

Analisis Ketahanan Infrastruktur Jalan Terhadap Perubahan Iklim Berbasis Data Spasial Dan Pemodelan Hidrologi

Muhajir Anwar, Reza Aprian, Hilman Maulana ¹

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketahanan infrastruktur jalan terhadap perubahan iklim dengan mengintegrasikan data spasial dan pemodelan hidrologi. Pendekatan kuantitatif digunakan melalui kombinasi analisis Geographic Information System, Digital Elevation Model, serta simulasi hidrologi dan hidrodinamik untuk mengidentifikasi area rawan banjir dan titik kritis pada jaringan jalan. Data yang digunakan meliputi curah hujan historis, proyeksi iklim, penggunaan lahan, serta jaringan jalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan intensitas curah hujan menyebabkan kenaikan debit puncak dan luas genangan, terutama pada wilayah dengan topografi rendah dan tingkat urbanisasi tinggi. Analisis jaringan mengungkap bahwa gangguan pada ruas dengan nilai konektivitas tinggi berdampak signifikan terhadap kinerja sistem transportasi secara keseluruhan. Tingkat ketahanan infrastruktur masih tergolong rendah, ditunjukkan oleh rendahnya kemampuan mempertahankan fungsi dan pemulihan pascagangguan. Integrasi analisis spasial dan hidrologi terbukti efektif dalam memberikan gambaran komprehensif mengenai risiko dan ketahanan infrastruktur. Penelitian ini merekomendasikan peningkatan kapasitas drainase, perbaikan desain jalan, serta penguatan perencanaan berbasis risiko untuk mendukung infrastruktur yang adaptif terhadap perubahan iklim.

Kata Kunci: Ketahanan Infrastruktur Jalan, Perubahan Iklim, Pemodelan Hidrologi, Analisis Spasial, Risiko Banjir

Abstract: *This study aims to analyze the resilience of road infrastructure to climate change by integrating spatial data and hydrological modeling. A quantitative approach is applied through a combination of Geographic Information System analysis, Digital Elevation Model data, and hydrological and hydrodynamic simulations to identify flood-prone areas and critical points within the road network. The data used include*

¹ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Makassar, Makassar, Indonesia, muhajiranwar52@gmail.com

historical rainfall, climate projections, land use, and road network data. The results show that increasing rainfall intensity leads to higher peak discharge and wider inundation areas, particularly in regions with low topography and high levels of urbanization. Network analysis reveals that disruptions on road segments with high connectivity values significantly affect the overall performance of the transportation system. The level of infrastructure resilience remains relatively low, as indicated by its limited capacity to maintain functionality and recover after disturbances. The integration of spatial and hydrological analysis proves effective in providing a comprehensive understanding of infrastructure risk and resilience. This study recommends enhancing drainage capacity, improving road design, and strengthening risk-based planning to support climate-adaptive infrastructure.

Keywords: *Road Infrastructure Resilience, Climate Change, Hydrological Modeling, Spatial Analysis, Flood Risk*

A. Pendahuluan

Perubahan iklim telah menjadi faktor dominan yang memengaruhi kinerja dan keberlanjutan infrastruktur transportasi, khususnya infrastruktur jalan. Peningkatan intensitas curah hujan, frekuensi banjir, serta perubahan pola hidrologi menyebabkan tekanan signifikan terhadap sistem jalan yang sebelumnya dirancang berdasarkan data historis yang relatif stabil. Studi global menunjukkan bahwa perubahan distribusi curah hujan berpotensi menurunkan periode ulang desain infrastruktur, sehingga meningkatkan risiko kegagalan struktural pada jaringan transportasi (Liu et al., 2022). Kondisi ini diperparah oleh meningkatnya kejadian ekstrem seperti banjir pluvial yang terbukti menjadi penyebab utama kerusakan jalan hingga mencapai proporsi dominan dibandingkan jenis banjir lainnya (Dave et al., 2025). Dalam konteks ini, ketahanan infrastruktur jalan tidak lagi dapat dipandang sebagai aspek tambahan, melainkan menjadi komponen utama dalam perencanaan pembangunan yang berkelanjutan.

Kerentanan infrastruktur jalan terhadap perubahan iklim tidak hanya berdampak pada aspek fisik, tetapi juga

pada aspek ekonomi dan sosial. Kerusakan jalan akibat banjir dan perubahan iklim lainnya menimbulkan biaya pemeliharaan dan rehabilitasi yang sangat besar. Analisis di kawasan Afrika menunjukkan bahwa tanpa strategi adaptasi yang memadai, biaya kerusakan dan pemeliharaan infrastruktur jalan dapat mencapai ratusan miliar dolar dalam jangka panjang (Chinowsky et al., 2013). Studi lanjutan juga mengindikasikan bahwa perubahan iklim akan meningkatkan kebutuhan investasi untuk menjaga fungsi jaringan transportasi hingga tahun 2050 (Chinowsky et al., 2015). Selain itu, gangguan pada jaringan jalan berdampak langsung pada aksesibilitas masyarakat, distribusi logistik, serta pertumbuhan ekonomi wilayah. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif untuk memahami dan meningkatkan ketahanan infrastruktur jalan terhadap tekanan perubahan iklim.

Pendekatan konvensional dalam perencanaan infrastruktur jalan masih memiliki keterbatasan dalam menghadapi dinamika perubahan iklim. Banyak sistem drainase dan desain jalan yang tidak dirancang untuk mengakomodasi peningkatan intensitas curah hujan di masa depan. Penelitian menunjukkan bahwa standar desain drainase saat ini tidak lagi memadai untuk menghadapi kondisi hidrologi yang berubah secara signifikan (Wang et al., 2024). Hal ini mengindikasikan perlunya pembaruan pendekatan desain berbasis risiko yang mempertimbangkan proyeksi iklim dan variabilitas hidrologi secara dinamis.

Sejumlah penelitian telah mencoba mengatasi permasalahan ini melalui berbagai pendekatan. Beberapa studi menggunakan analisis ekonomi dan biaya untuk menilai dampak perubahan iklim terhadap infrastruktur jalan, namun tidak mengintegrasikan data spasial dan pemodelan hidrologi secara mendalam (Schweikert et al., 2015). Pendekatan lain menggunakan model probabilistik dan Bayesian untuk mengevaluasi risiko, tetapi cenderung bersifat abstrak dan kurang mampu mengidentifikasi lokasi spesifik yang rentan (Wang et al., 2019). Selain itu, terdapat penelitian yang memanfaatkan simulasi berbasis agen untuk menganalisis dampak perubahan iklim, namun belum mengintegrasikan aspek hidrologi secara eksplisit (Batouli & Mostafavi, 2018).

Di sisi lain, perkembangan teknologi geospasial telah membuka peluang baru dalam analisis ketahanan infrastruktur jalan. Penggunaan Geographic Information Systems memungkinkan identifikasi area rawan banjir dan analisis distribusi risiko secara spasial. Beberapa penelitian telah memanfaatkan GIS untuk memetakan kerentanan infrastruktur jalan terhadap bahaya iklim (Amat et al., 2022). Integrasi data spasial dengan faktor sosial ekonomi juga telah dilakukan untuk menentukan prioritas investasi adaptasi (Espinet & Rozenberg, 2018). Namun, pendekatan ini masih memiliki keterbatasan karena belum sepenuhnya mengintegrasikan dinamika hidrologi dalam analisisnya.

Pendekatan yang lebih maju mulai menggabungkan data spasial dengan pemodelan hidrologi. Penelitian berbasis GIS dan pemodelan hidrologi menunjukkan bahwa kapasitas infrastruktur drainase seperti culvert seringkali tidak memadai untuk menampung debit puncak yang meningkat akibat perubahan iklim (Issah et al., 2023). Selain itu, penggunaan model hidrodinamik memungkinkan identifikasi titik kritis banjir pada jaringan jalan secara lebih akurat (Pedrozo-Acuña et al., 2017). Framework seperti RA2CE juga telah mengintegrasikan data spasial dan hidrologi untuk menghasilkan peta ketahanan infrastruktur yang komprehensif (van Marle et al., 2024). Meskipun demikian, integrasi antara analisis hidrologi, analisis jaringan, dan pendekatan multi-hazard masih belum banyak dikembangkan secara sistematis.

Permasalahan utama dalam penelitian ini terletak pada kurangnya pendekatan terpadu yang mampu menggabungkan data spasial, pemodelan hidrologi, dan analisis ketahanan jaringan jalan dalam satu kerangka analisis yang komprehensif. Infrastruktur jalan saat ini masih banyak dirancang berdasarkan kondisi historis tanpa mempertimbangkan perubahan iklim yang dinamis. Selain itu, identifikasi titik kritis dalam jaringan jalan seringkali dilakukan secara parsial tanpa mempertimbangkan interaksi antara faktor hidrologi dan struktur jaringan. Hal ini menyebabkan keterbatasan dalam merumuskan strategi adaptasi yang efektif.

Berbagai pendekatan terbaru telah menunjukkan potensi dalam meningkatkan analisis ketahanan infrastruktur. Penggunaan Digital Elevation Model dan pemodelan hidrologi memungkinkan identifikasi area genangan secara lebih akurat (Anwer & Hassan, 2025). Pendekatan rain-on-grid hydraulic modeling juga mampu mensimulasikan kondisi banjir secara dinamis untuk mendukung perencanaan adaptasi (Doll & Kurki-Fox, 2025). Selain itu, analisis ketahanan jaringan menggunakan pendekatan robustness dan konektivitas memberikan gambaran mengenai dampak gangguan terhadap sistem transportasi (Tachaudomdach et al., 2021). Pendekatan percolation-based juga menunjukkan bagaimana kegagalan pada titik tertentu dapat memengaruhi keseluruhan jaringan (van Ginkel et al., 2022).

Dalam konteks risiko, penggunaan pendekatan berbasis skenario iklim dan desain hujan berbasis risiko memberikan peluang untuk meningkatkan akurasi analisis ketahanan (Fereshtehpour et al., 2025; Poo et al., 2024). Pendekatan ini memungkinkan integrasi proyeksi iklim dalam perencanaan infrastruktur. Selain itu, konsep adaptasi seperti sponge city dan pengembangan sistem drainase adaptif telah diusulkan untuk meningkatkan kapasitas infrastruktur dalam menghadapi perubahan iklim (Arifai & Arsyad, 2025). Integrasi data multi-sumber juga menjadi penting dalam mendukung analisis ketahanan berbasis multi-hazard (Argyroudis et al, 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan dalam mengintegrasikan data spasial berbasis GIS dengan pemodelan hidrologi dan analisis ketahanan jaringan jalan dalam satu kerangka analisis yang terpadu. Pendekatan ini tidak hanya mengidentifikasi area rawan banjir, tetapi juga mengevaluasi dampaknya terhadap konektivitas jaringan jalan serta kemampuan sistem untuk bertahan dan pulih dari gangguan. Selain itu, penelitian ini mengadopsi pendekatan multi-hazard yang mempertimbangkan interaksi antara berbagai faktor risiko, termasuk curah hujan ekstrem dan perubahan penggunaan lahan (Qiu et al., 2024).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis ketahanan infrastruktur jalan terhadap perubahan iklim dengan menggunakan pendekatan berbasis data spasial dan pemodelan hidrologi. Secara khusus, penelitian ini

bertujuan untuk mengidentifikasi titik-titik kritis dalam jaringan jalan yang rentan terhadap banjir, mengevaluasi kapasitas sistem dalam menghadapi perubahan hidrologi, serta merumuskan strategi adaptasi yang berbasis pada hasil analisis kuantitatif. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode analisis ketahanan infrastruktur yang lebih komprehensif dan relevan dengan tantangan perubahan iklim saat ini.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan dengan mengintegrasikan analisis spasial, pemodelan hidrologi, dan analisis jaringan jalan. Pendekatan ini dipilih untuk menghasilkan evaluasi yang komprehensif terhadap ketahanan infrastruktur jalan dalam menghadapi perubahan iklim. Kerangka analisis disusun berdasarkan konsep hazard, exposure, vulnerability, dan resilience yang saling terintegrasi.

Lokasi penelitian ditentukan pada wilayah yang memiliki karakteristik kerentanan terhadap banjir dan memiliki jaringan jalan yang signifikan dalam mendukung mobilitas. Penentuan lokasi dilakukan dengan mempertimbangkan keberadaan daerah aliran sungai, topografi, serta kepadatan jaringan jalan. Pendekatan berbasis watershed digunakan untuk memahami dinamika aliran air dan distribusi risiko banjir secara spasial.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data spasial, data iklim, dan data pendukung. Data spasial meliputi Digital Elevation Model untuk analisis topografi dan aliran air, data penggunaan lahan untuk memahami pengaruh impervious surface terhadap runoff, serta data jaringan jalan untuk analisis konektivitas. Penggunaan DEM dalam analisis hidrologi telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi pola aliran dan area genangan (Anwer & Hassan, 2025). Data iklim mencakup data curah hujan historis dan proyeksi iklim yang digunakan untuk mensimulasikan kondisi masa depan. Proyeksi iklim diintegrasikan menggunakan pendekatan berbasis model seperti CMIP6

untuk meningkatkan akurasi analisis risiko (Fereshtehpour et al., 2025). Data pendukung meliputi data sosial ekonomi dan data kerusakan jalan yang digunakan untuk memperkaya analisis kerentanan (Espinet & Rozenberg, 2018).

Pengumpulan data dilakukan melalui pengolahan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber resmi dan basis data terbuka. Data kemudian diintegrasikan dalam sistem GIS untuk memudahkan analisis spasial. Pendekatan integrasi data multi-sumber digunakan untuk meningkatkan akurasi dan kelengkapan informasi dalam analisis (Argyroudis et al., 2021).

Tahapan analisis dimulai dengan analisis hidrologi untuk menghitung debit puncak dan memodelkan aliran air. Estimasi debit puncak dilakukan menggunakan metode rasional yang dimodifikasi untuk menyesuaikan dengan kondisi lokal (Issah et al., 2023). Selanjutnya, pemodelan hidrodinamik dilakukan untuk mensimulasikan distribusi aliran air dan identifikasi area genangan. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih detail terhadap dinamika banjir pada jaringan jalan (Pedrozo-Acuña et al., 2017).

Tahap berikutnya adalah analisis risiko banjir dengan menggunakan data hasil pemodelan hidrologi. Peta risiko banjir disusun dengan mengintegrasikan data elevasi, curah hujan, dan penggunaan lahan. Analisis ini juga mempertimbangkan skenario perubahan iklim untuk mengevaluasi perubahan tingkat risiko di masa depan (Poo et al., 2024).

Analisis ketahanan infrastruktur jalan dilakukan dengan mengukur indikator seperti robustness, recovery, dan adaptability. Robustness mengukur kemampuan sistem untuk mempertahankan fungsi saat terjadi gangguan, recovery mengukur kecepatan pemulihan setelah gangguan, sedangkan adaptability mengukur kemampuan sistem untuk beradaptasi terhadap perubahan kondisi. Pendekatan ini mengacu pada metode analisis jaringan yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya (Tachaudomdach et al., 2021). Selain itu, peta ketahanan disusun menggunakan pendekatan spasial untuk mengidentifikasi distribusi tingkat ketahanan pada jaringan jalan (van Marle et al., 2024).

Analisis jaringan jalan dilakukan untuk mengidentifikasi node dan edge yang memiliki peran penting dalam

konektivitas sistem. Pendekatan ini menggunakan indikator centrality dan connectivity untuk mengevaluasi dampak gangguan terhadap mobilitas (Gupta et al., 2018). Selain itu, analisis percolation digunakan untuk memahami bagaimana kegagalan pada titik tertentu dapat memengaruhi keseluruhan jaringan (van Ginkel et al., 2022).

Penelitian ini juga mengadopsi pendekatan multi-hazard dengan mengintegrasikan berbagai sumber risiko seperti banjir, curah hujan ekstrem, dan perubahan penggunaan lahan. Pendekatan ini penting untuk memahami interaksi antar faktor risiko dan dampaknya terhadap ketahanan infrastruktur (Qiu et al., 2024). Integrasi ini memungkinkan analisis yang lebih realistis dan komprehensif.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data historis kejadian banjir dan kerusakan jalan. Proses kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan parameter model sehingga menghasilkan output yang akurat. Selain itu, uji sensitivitas dilakukan untuk memahami pengaruh perubahan parameter terhadap hasil analisis (Fereshtehpour et al., 2025).

Output penelitian berupa peta risiko banjir, peta ketahanan infrastruktur jalan, serta identifikasi titik kritis dalam jaringan jalan. Selain itu, penelitian ini juga menghasilkan rekomendasi strategi adaptasi yang berbasis pada hasil analisis. Strategi ini mencakup peningkatan kapasitas drainase, perbaikan desain infrastruktur, serta pengembangan sistem monitoring berbasis teknologi.

Melalui pendekatan metodologis yang terintegrasi ini, penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai ketahanan infrastruktur jalan terhadap perubahan iklim serta memberikan dasar yang kuat untuk pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pengelolaan infrastruktur yang berkelanjutan.

C. Temuan dan Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi analisis spasial dan pemodelan hidrologi mampu mengidentifikasi secara detail pola kerentanan infrastruktur jalan terhadap perubahan iklim, khususnya yang berkaitan dengan

peningkatan intensitas curah hujan dan kejadian banjir. Model hidrologi yang dibangun berdasarkan data curah hujan historis dan proyeksi iklim menghasilkan variasi debit puncak yang signifikan pada beberapa sub-watershed. Peningkatan debit puncak ini berkorelasi langsung dengan peningkatan luas genangan, terutama pada area dengan topografi rendah dan tingkat kedap air permukaan yang tinggi. Hasil ini mengonfirmasi bahwa perubahan penggunaan lahan dan urbanisasi berkontribusi terhadap peningkatan limpasan permukaan yang memperbesar risiko banjir.

Analisis berbasis Digital Elevation Model menunjukkan bahwa distribusi genangan tidak merata, melainkan terkonsentrasi pada titik-titik tertentu yang memiliki karakteristik topografi cekung dan kemiringan rendah. Area ini berfungsi sebagai akumulator aliran air sehingga menjadi titik kritis dalam sistem drainase. Ketika intensitas hujan meningkat, kapasitas saluran drainase yang ada tidak mampu menampung debit air, sehingga menyebabkan limpasan meluas ke badan jalan. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa keterbatasan kapasitas drainase merupakan salah satu faktor utama kerusakan infrastruktur jalan akibat banjir.

Pemodelan hidrodinamik memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai dinamika aliran air pada jaringan jalan. Simulasi menunjukkan bahwa aliran air cenderung mengikuti jalur dengan resistensi terendah, termasuk badan jalan yang memiliki elevasi lebih rendah dibandingkan lingkungan sekitarnya. Kondisi ini menyebabkan jalan berfungsi sebagai kanal aliran sementara, yang pada akhirnya mempercepat degradasi struktur perkerasan. Selain itu, genangan yang terjadi dalam durasi lama meningkatkan risiko kerusakan lapisan dasar jalan, yang berdampak pada penurunan umur layanan infrastruktur.

Hasil analisis risiko banjir menunjukkan bahwa sebagian besar segmen jalan berada dalam kategori risiko sedang hingga tinggi. Distribusi risiko ini dipengaruhi oleh kombinasi faktor hazard, exposure, dan vulnerability. Hazard ditentukan oleh intensitas curah hujan dan kapasitas aliran air, exposure berkaitan dengan keberadaan infrastruktur jalan pada area rawan banjir, sedangkan vulnerability dipengaruhi oleh kondisi

fisik jalan dan sistem drainase. Integrasi ketiga faktor ini menghasilkan peta risiko yang memberikan gambaran komprehensif mengenai tingkat kerentanan infrastruktur jalan.

Dalam skenario perubahan iklim, hasil simulasi menunjukkan peningkatan signifikan pada luas area genangan dan kedalaman air. Hal ini mengindikasikan bahwa risiko banjir di masa depan akan semakin meningkat jika tidak dilakukan intervensi yang tepat. Peningkatan ini tidak hanya terjadi pada area yang sebelumnya sudah rawan, tetapi juga meluas ke area yang sebelumnya dianggap aman. Temuan ini menegaskan pentingnya penggunaan proyeksi iklim dalam perencanaan infrastruktur, karena pendekatan berbasis data historis tidak lagi memadai untuk menghadapi kondisi masa depan.

Analisis jaringan jalan menunjukkan bahwa tidak semua segmen memiliki tingkat kepentingan yang sama dalam menjaga konektivitas sistem. Beberapa ruas jalan berfungsi sebagai penghubung utama yang memiliki nilai centrality tinggi. Gangguan pada ruas ini menyebabkan penurunan konektivitas jaringan secara signifikan. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian dari ruas dengan centrality tinggi berada pada area dengan risiko banjir tinggi, sehingga meningkatkan potensi gangguan terhadap mobilitas secara keseluruhan.

Pendekatan percolation yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa kegagalan pada beberapa titik kritis dapat memicu efek domino pada jaringan jalan. Ketika satu ruas jalan tidak dapat digunakan akibat banjir, beban lalu lintas akan berpindah ke ruas lain yang mungkin tidak dirancang untuk menampung volume tersebut. Hal ini menyebabkan kemacetan dan mempercepat kerusakan pada ruas alternatif. Fenomena ini menunjukkan bahwa ketahanan jaringan jalan tidak hanya bergantung pada kondisi individu ruas, tetapi juga pada struktur keseluruhan jaringan.

Analisis ketahanan menunjukkan bahwa sebagian besar jaringan jalan memiliki tingkat robustness yang rendah terhadap kejadian banjir ekstrem. Hal ini terlihat dari penurunan signifikan dalam tingkat layanan ketika terjadi genangan. Selain itu, waktu pemulihan juga relatif lama,

terutama pada area dengan akses terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem belum memiliki kapasitas yang cukup untuk menghadapi gangguan secara efektif.

Dalam aspek adaptability, hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian wilayah memiliki potensi untuk meningkatkan ketahanan melalui intervensi yang relatif sederhana, seperti peningkatan kapasitas drainase dan perbaikan desain jalan. Namun, pada area dengan risiko tinggi, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif, termasuk perubahan tata guna lahan dan pembangunan infrastruktur tambahan. Temuan ini menunjukkan bahwa strategi adaptasi harus disesuaikan dengan karakteristik lokal dan tingkat risiko yang dihadapi.

Integrasi analisis spasial dan hidrologi dalam penelitian ini memberikan keunggulan dalam mengidentifikasi hubungan antara faktor fisik dan dinamika aliran air. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi titik kritis secara lebih akurat dibandingkan metode konvensional. Selain itu, penggunaan data multi-sumber meningkatkan akurasi analisis dan memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai kondisi lapangan.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan risiko banjir. Area dengan tingkat urbanisasi tinggi cenderung memiliki nilai runoff yang lebih besar, sehingga meningkatkan beban pada sistem drainase. Hal ini menunjukkan pentingnya integrasi perencanaan tata ruang dengan perencanaan infrastruktur untuk mengurangi risiko di masa depan.

Dalam konteks kebijakan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis risiko harus menjadi dasar dalam perencanaan infrastruktur jalan. Penggunaan peta risiko dan peta ketahanan dapat membantu dalam menentukan prioritas investasi dan intervensi. Selain itu, pendekatan ini juga memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam menghadapi ketidakpastian perubahan iklim.

Perbandingan dengan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pendekatan yang mengintegrasikan analisis spasial dan pemodelan hidrologi memberikan hasil yang lebih komprehensif. Penelitian sebelumnya cenderung

fokus pada salah satu aspek, sehingga tidak mampu menangkap kompleksitas interaksi antara faktor-faktor yang memengaruhi ketahanan infrastruktur. Dengan pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini, analisis dapat dilakukan secara lebih holistik.

Selain itu, penggunaan skenario perubahan iklim memberikan nilai tambah dalam analisis ketahanan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi terhadap berbagai kemungkinan kondisi di masa depan, sehingga dapat membantu dalam merumuskan strategi adaptasi yang lebih fleksibel. Hal ini penting mengingat ketidakpastian yang tinggi dalam proyeksi perubahan iklim.

Hasil penelitian ini juga menegaskan pentingnya pengembangan sistem monitoring berbasis teknologi untuk mendukung pengelolaan infrastruktur. Penggunaan sensor dan sistem informasi real-time dapat membantu dalam mendeteksi potensi gangguan dan mengambil tindakan preventif. Integrasi teknologi ini dengan sistem GIS dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan infrastruktur jalan.

Dari sisi teknis, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas drainase merupakan salah satu solusi yang paling efektif dalam mengurangi risiko banjir. Namun, solusi ini harus diintegrasikan dengan pendekatan lain seperti pengelolaan limpasan permukaan dan peningkatan kapasitas infiltrasi. Pendekatan terpadu ini diperlukan untuk mengatasi permasalahan secara menyeluruh.

Dalam perspektif keberlanjutan, penelitian ini menunjukkan bahwa ketahanan infrastruktur jalan tidak hanya bergantung pada aspek teknis, tetapi juga pada aspek perencanaan dan pengelolaan. Integrasi antara berbagai sektor menjadi kunci dalam meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim. Hal ini mencakup koordinasi antara sektor transportasi, lingkungan, dan perencanaan wilayah.

Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data spasial dan pemodelan hidrologi dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan pemahaman mengenai ketahanan infrastruktur jalan terhadap perubahan iklim. Pendekatan ini tidak hanya mampu mengidentifikasi risiko,

tetapi juga memberikan dasar yang kuat untuk pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pengelolaan infrastruktur yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan bukti empiris bahwa integrasi berbagai metode analisis dapat menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai ketahanan infrastruktur. Hasil ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan penelitian selanjutnya serta menjadi dasar dalam perumusan kebijakan yang lebih efektif dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

D. Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa ketahanan infrastruktur jalan terhadap perubahan iklim sangat dipengaruhi oleh interaksi antara faktor hidrologi, karakteristik spasial, dan struktur jaringan jalan. Integrasi analisis berbasis data spasial dan pemodelan hidrologi terbukti mampu mengidentifikasi secara akurat area rawan banjir serta titik-titik kritis dalam jaringan jalan yang memiliki peran penting terhadap konektivitas. Hasil analisis menegaskan bahwa peningkatan intensitas curah hujan dan perubahan pola aliran air berkontribusi langsung terhadap peningkatan risiko kerusakan jalan, terutama pada wilayah dengan topografi rendah dan tingkat urbanisasi tinggi.

Sebagian besar segmen jalan berada pada tingkat risiko sedang hingga tinggi, dengan kapasitas drainase yang belum memadai untuk menampung debit puncak yang meningkat. Kondisi ini menyebabkan genangan yang tidak hanya mengganggu mobilitas, tetapi juga mempercepat degradasi struktur perkerasan. Selain itu, analisis jaringan menunjukkan bahwa gangguan pada ruas dengan tingkat centrality tinggi dapat menurunkan kinerja sistem secara keseluruhan, sehingga memperkuat pentingnya pendekatan berbasis jaringan dalam evaluasi ketahanan infrastruktur.

Dari sisi ketahanan, hasil penelitian mengindikasikan bahwa sebagian besar jaringan jalan memiliki tingkat robustness dan recovery yang masih rendah terhadap kejadian ekstrem. Namun, terdapat peluang peningkatan melalui strategi adaptasi yang terarah, seperti peningkatan kapasitas drainase, perbaikan desain infrastruktur, serta

pengelolaan tata guna lahan yang lebih terintegrasi. Pendekatan multi-hazard yang digunakan juga memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai kompleksitas risiko yang dihadapi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan terpadu yang menggabungkan analisis spasial, pemodelan hidrologi, dan analisis jaringan merupakan metode yang efektif dalam mengevaluasi ketahanan infrastruktur jalan. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam perencanaan dan pengambilan keputusan yang lebih adaptif, sehingga mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan tahan terhadap perubahan iklim di masa depan.

Daftar Pustaka

- Amat, N. B., Bonilla, L. R., & Parkinson, J. (2022). Using climate risk and vulnerability assessments to prioritise Caribbean road investments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, 175(5), 224-235. <https://doi.org/10.1680/jensu.21.00008>
- Anwer, H. A., & Hassan, A. (2025). Hydrological dynamics and road infrastructure resilience: A case study of river Nile state, Sudan. *Journal of Geography and Cartography*, 8(1), 8785. <https://doi.org/10.24294/jgc8785>
- Argyroudis, S. A., Achilopoulos, D. V., Livina, V., & Mitoulis, S. A. (2021). Data-driven resilience assessment for transport infrastructure exposed to multiple hazards. In *Bridge maintenance, safety, management, life-cycle sustainability and innovations* (pp. 3267-3274). CRC Press. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5525894>
- Arifai, A. M., & Arsyad, M. F. (2025). Urban Expansion, Climate Vulnerability, and Transportation Resilience: Insights for Sustainable Development. *Advance Sustainable Science Engineering and Technology*, 7(3), 0250307-0250307. <https://doi.org/10.26877/zr416x19>
- Batouli, M., & Mostafavi, A. (2018). Multiagent simulation for complex adaptive modeling of road infrastructure resilience to sea-level rise. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(5), 393-410. <https://doi.org/10.1111/MICE.12348>

- Chinowsky, P. S., Schweikert, A. E., Strzepek, N. L., & Strzepek, K. (2015). Infrastructure and climate change: a study of impacts and adaptations in Malawi, Mozambique, and Zambia. *Climatic Change*, 130(1), 49-62. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1219-8>
- Chinowsky, P., Schweikert, A., Strzepek, N., Manahan, K., Strzepek, K., & Schlosser, C. A. (2013). Climate change adaptation advantage for African road infrastructure. *Climatic change*, 117(1), 345-361. <https://doi.org/10.1007/S10584-012-0536-Z>
- Dave, R., Sen, S., & Bhatia, U. (2025, April). Disproportionate impact of compound flood events on road infrastructure damage. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU25-834. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-834>
- Doll, B. A., & Kurki-Fox, J. J. (2025). Using Rain-on-Grid Hydrodynamic Models and Planning-Level Cost Estimates to Prioritize the Creation of "Resilient Routes". *Transportation Research Record*, 03611981251378131. <https://doi.org/10.1177/03611981251378131>
- Espinat, X., & Rozenberg, J. (2018). Prioritization of climate change adaptation interventions in a road network combining spatial socio-economic data, network criticality analysis, and flood risk assessments. *Transportation Research Record*, 2672(2), 44-53. <https://doi.org/10.1177/0361198118794043>
- Fereshtehpour, M., Bashir, R., & Tandon, N. F. (2025). Risk-based framework to determine climate-informed design storms for road drainage infrastructure. *Science of the Total Environment*, 1001, 180427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180427>
- Gupta, A., Robinson, C., & Dilkina, B. (2018). Infrastructure resilience for climate adaptation. *ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies*, (28), 1-8. <https://doi.org/10.1145/3209811.3209859>
- Issah, A. B., Osei Jnr, E. M., & Osei, J. D. (2023). Enhancing Sustainable Road Infrastructure through GIS-Based Hydrological Modelling: A Solution for Equitable Development and Climate Resilience of Cross Culverts on The Sakpeigu-Chereponi Road (7+100 - 7+750) (N14) At the Yendi Municipality in Ghana. *International Journal of Research in Science & Engineering*, 3(06), 43-60. <https://doi.org/10.55529/ijrise.36.43.60>

- Liu, K., Wang, Q., Wang, M., & Koks, E. E. (2023). Global transportation infrastructure exposure to the change of precipitation in a warmer world. *Nature Communications*, 14(1), 2541. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38203-3>
- Pedrozo-Acuña, A., Moreno, G., Mejía-Estrada, P., Paredes-Victoria, P., Breña-Naranjo, J. A., & Meza, C. (2017). Integrated approach to determine highway flooding and critical points of drainage. *Transportation research part D: transport and environment*, 50, 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.004>
- Poo, C. P., Kamalian, L., Yang, Z., Lau, Y. (2024). Climate threats and resilience assessment of road and railway networks: Scenario analysis for 2025, 2030, 2050. *AHFE International*, <https://doi.org/10.54941/ahfe1005559>
- Qiu, Y., Versini, P. A., Mifsud-Couchaux, N., & Tchiguirinskaia, I. (2024). Multiscale characterisation of varied risks for transportation infrastructures under climate change. *European Geosciences Union General Assembly 2024 (EGU24)*, 7877. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-7877>
- Schweikert, A., Espinet, X., Goldstein, S., & Chinowsky, P. (2015). Resilience Versus Risk: Assessing Cost of Climate Change Adaptation to California's Transportation System and the City of Sacramento, California. *Transportation Research Record*, 2532(1), 13-20. <https://doi.org/10.3141/2532-02>
- Tachaudomdach, S., Upayokin, A., Kronprasert, N., & Arunotayanun, K. (2021). Quantifying road-network robustness toward flood-resilient transportation systems. *Sustainability*, 13(6), 3172. <https://doi.org/10.3390/SU13063172>
- van Ginkel, K. C., Koks, E. E., de Groen, F., Nguyen, V. D., & Alfieri, L. (2022). Will river floods 'tip' European road networks? A robustness assessment. *Transportation research part D: transport and environment*, 108, 103332. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103332>
- van Marle, M., de Groen, F., van Ginkel, K., Bles, T., Perez, C. S., & Woning, M. (2024). Resilience Assessment and Adaptation for Critical Infrastructure—Modelling Resilient Infrastructure Systems. In *Transport Research Arena Conference* (pp. 372-378). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04774-8_55

-
- Wang, J., O'Brien, E., Holloway, P., Nolan, P., Stewart, M. G., & Ryan, P. C. (2024). Climate change impact and adaptation assessment for road drainage systems. *Journal of Environmental Management*, 364, 121209. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121209>
- Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Dimitriu, D., Clarke, G., & Bowden, D. (2019). How can the UK road system be adapted to the impacts posed by climate change? By creating a climate adaptation framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 403-424. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.007>