



Pengembangan Climate-Integrated Road Vulnerability Index untuk Menilai Dampak Hujan Ekstrem terhadap Infrastruktur Jalan

Development of a Climate-Integrated Road Vulnerability Index for Assessing the Impact of Extreme Rainfall on Road Infrastructure

Lalu Marzuandi^{1*}

Lalu Ibrohim Burhan²

^{1,2}Universitas Gunung Rinjani, Indonesia

*Email: andilalu111@gmail.com

Info Artikel

Keywords:

Hujan ekstrem

Indeks risiko berbasis iklim

Kerentanan infrastruktur jalan

Perubahan iklim

Resiliensi infrastruktur

Abstrak

Perubahan iklim global telah meningkatkan intensitas hujan ekstrem yang secara signifikan memengaruhi kinerja dan ketahanan infrastruktur jalan, namun pendekatan penilaian kerusakan yang ada masih didominasi oleh analisis kondisi eksisting tanpa integrasi variabel iklim secara komprehensif. Kesenjangan ini membatasi kemampuan prediksi kerentanan jalan dalam menghadapi tekanan hidrometeorologis yang semakin kompleks. Penelitian ini bertujuan mengembangkan indeks risiko kerentanan infrastruktur jalan berbasis iklim yang mengintegrasikan variabel iklim ekstrem dan karakteristik struktural jalan. Penelitian dilakukan pada beberapa segmen jalan dengan panjang 500–1000 m menggunakan data curah hujan, kondisi drainase, material perkerasan, dan volume lalu lintas, serta data kerusakan jalan yang diukur melalui IRI. Analisis dilakukan menggunakan regresi linier, Analytical Hierarchy Process (AHP), dan pemodelan indeks risiko berbasis normalisasi. Hasil menunjukkan bahwa curah hujan ekstrem (>100 mm/hari) meningkatkan kerusakan jalan hingga 48% dengan koefisien regresi signifikan ($\beta = 0,48$; $p < 0,01$), serta 62% segmen jalan berada dalam kategori risiko tinggi. Temuan ini menegaskan dominasi faktor iklim dalam menentukan kerentanan jalan dan menunjukkan bahwa indeks yang dikembangkan mampu mengklasifikasikan risiko secara akurat. Secara keseluruhan, penelitian ini berkontribusi pada penguatan Infrastructure Resilience & Climate Risk Theory serta menyediakan alat analitis berbasis data untuk mendukung pengambilan keputusan dalam manajemen infrastruktur jalan yang berkelanjutan.

Abstract

Global climate change has intensified extreme rainfall events, significantly affecting the performance and resilience of road infrastructure; however, existing assessment approaches remain largely condition-based and fail to integrate climate variables fully. This gap limits the predictive capacity of vulnerability assessments under increasing hydrometeorological stress. This study aimed to

develop a climate-integrated road vulnerability risk index that incorporates extreme climate variables and structural characteristics of road infrastructure. The study was conducted across multiple road segments (500–1000 m) using datasets on rainfall intensity, drainage conditions, pavement materials, traffic volume, and road damage, measured using the International Roughness Index (IRI). Data were analyzed using linear regression, Analytical Hierarchy Process (AHP), and normalized risk index modeling. The results showed that extreme rainfall (>100 mm/day) increased road deterioration by 48% ($\beta = 0.48$; $p < 0.01$), with 62% of road segments classified as high risk. These findings indicate the dominant role of climate factors in determining road vulnerability and demonstrate that the proposed index effectively classifies risk levels. Overall, this study advances Infrastructure Resilience & Climate Risk Theory and provides a data-driven analytical tool to support decision-making in sustainable road infrastructure management.

<https://doi.org/10.63982/dinamika.3yqf6h89>

Received 20 Mei 2026; Received in revised form 28 Juni 2026; Accepted 30 Juni 2026

Available online 30 Juni 2026

Pendahuluan

Perubahan iklim global secara sistematis meningkatkan eksposur infrastruktur transportasi terhadap kejadian hidrometeorologis ekstrem, khususnya hujan dengan intensitas tinggi yang melampaui kapasitas desain konvensional. Secara global, sekitar 27% aset jalan dan rel terpapar setidaknya satu jenis bahaya, dengan 7,5% mengalami eksposur terhadap kejadian banjir periode ulang 1/100 tahun yang menyebabkan kerugian tahunan antara 3,1 hingga 22 miliar dolar AS (Koks et al., 2019). Di bawah skenario pemanasan 2°C, periode ulang desain hujan ekstrem diproyeksikan menurun hingga 25%, sehingga meningkatkan probabilitas kegagalan infrastruktur (Liu et al., 2022). Implikasi ini menegaskan bahwa sistem drainase jalan dan struktur perkerasan semakin tidak mampu mengakomodasi peningkatan intensitas hujan (Al-Ghadi et al., 2020). Sejalan dengan itu, pendekatan berbasis objek dan risiko menunjukkan peningkatan akurasi dalam estimasi kerusakan dan efektivitas mitigasi (Huibregtse et al., 2016; Van Ginkel et al., 2021), sementara integrasi proyeksi iklim menjadi krusial untuk memperkuat ketahanan jangka panjang serta menekan potensi kerugian ekonomi (Fereshtepour et al., 2025; Neumann et al., 2021).

Dalam kerangka tersebut, fokus analisis kemudian mengerucut pada konteks teknik sipil, khususnya manajemen infrastruktur jalan, di mana degradasi struktural akibat hujan ekstrem merepresentasikan persoalan multidimensi. Kerusakan tidak hanya dipicu oleh eksposur iklim, tetapi juga interaksi kompleks antara karakteristik material, kondisi drainase, dan beban lalu lintas. Bukti empiris menunjukkan bahwa variabilitas temperatur, curah hujan, dan intensitas lalu lintas secara simultan mempercepat degradasi perkerasan (Llopis-Castelló et al., 2020). Perkembangan teknologi, seperti deep learning (Choi, 2019), Bayesian Belief Networks (Philip & Aljassmi, 2024), serta integrasi sensor cerdas berbasis AI (Hou et al., 2020; Ranyal et al., 2022), telah meningkatkan akurasi prediksi dan pemantauan kondisi jalan. Di sisi lain, metode non-destruktif seperti GPR memungkinkan evaluasi struktural yang lebih komprehensif (Elseicy et al., 2022). Namun demikian, pendekatan tersebut masih belum secara eksplisit mengintegrasikan variabel iklim ekstrem, sehingga memunculkan ketidakpastian dalam proyeksi kinerja jangka panjang dan meningkatkan risiko kesalahan dalam pengambilan keputusan pemeliharaan (Gai et al., 2025).



Sejalan dengan perkembangan tersebut, literatur menunjukkan pola tematik yang berkembang dari pendekatan berbasis faktor struktural menuju model prediktif berbasis data dan integrasi parsial variabel iklim. Studi berbasis parameter teknis secara konsisten mengidentifikasi beban lalu lintas, umur perkerasan, dan kondisi lingkungan sebagai determinan utama degradasi (Llopis-Castelló et al., 2020; Yao et al., 2019). Pendekatan berbasis algoritma, seperti deep learning dan Bayesian Belief Networks, meningkatkan akurasi prediksi dengan mempertimbangkan ketidakpastian dan hubungan nonlinier antarvariabel (Choi, 2019; Philip & Aljassmi, 2024). Selain itu, integrasi variabel iklim mulai diakomodasi dalam model risiko dan desain drainase berbasis proyeksi iklim (Fereshtehpour et al., 2025), serta dalam analisis keselamatan lalu lintas yang menunjukkan hubungan nonlinier antara curah hujan dan tingkat kecelakaan (Huang et al., 2025; Zeng et al., 2020). Meskipun demikian, sebagian besar studi masih bersifat parsial dan belum mampu merepresentasikan interaksi kompleks antara faktor iklim ekstrem dan performa struktural jalan secara menyeluruh.

Keterbatasan tersebut semakin terlihat ketika berbagai studi empiris belum mampu menguraikan keterkaitan antarvariabel kunci secara komprehensif dalam kerangka analisis risiko yang terukur. Proyeksi kejadian hujan ekstrem menunjukkan peningkatan risiko kehilangan nilai aset jalan pada tingkat menengah dengan ketidakpastian tinggi akibat variabilitas model iklim (Lu et al., 2018). Sementara itu, pendekatan prediktif seperti Bayesian Neural Network mampu mengestimasi peningkatan kerusakan signifikan—ditunjukkan oleh peningkatan rutting dan IRI lebih dari 40%—namun masih terbatas pada integrasi variabel tertentu (Cui & Wang, 2025). Upaya pengembangan kerangka berbasis risiko dalam manajemen aset dan desain drainase telah dilakukan (Chang & Hossain, 2024; Fereshtehpour et al., 2025), tetapi belum menghasilkan model indeks yang standar dan prediktif. Selain itu, tantangan metodologis seperti integrasi multi-hazard, validasi lintas wilayah, serta sensitivitas terhadap konteks lokal masih menjadi isu krusial (Piryonesi & El-Diraby, 2021; Verschuur et al., 2024), sehingga menegaskan perlunya pendekatan yang lebih integratif dan operasional (Flores et al., 2024).

Berdasarkan keseluruhan sintesis tersebut, terlihat bahwa meskipun literatur telah memberikan fondasi ilmiah yang kuat, masih terdapat celah signifikan dalam pengembangan model yang mampu mengintegrasikan variabel iklim ekstrem dengan karakteristik struktural jalan secara sistematis dan prediktif. Keterbatasan dalam pendekatan parsial, ketidakpastian model, serta kurangnya kesesuaian terhadap kondisi kontekstual menyebabkan evaluasi kerentanan jalan belum sepenuhnya mampu mendukung kebutuhan praktis di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan kerangka analisis yang tidak hanya menggabungkan variabel iklim dan teknis secara terpadu, tetapi juga mampu menghasilkan klasifikasi risiko yang terukur, konsisten, dan adaptif terhadap dinamika perubahan iklim. Pendekatan semacam ini menjadi krusial untuk memperkuat landasan teoretis sekaligus meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan dalam manajemen infrastruktur jalan yang berkelanjutan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis integrasi multi-metode untuk mengembangkan model penilaian kerentanan infrastruktur jalan berbasis indeks risiko yang menggabungkan variabel iklim ekstrem dan karakteristik struktural jalan. Desain penelitian disusun secara berurutan melalui beberapa tahapan utama, yaitu: (1) identifikasi variabel dan indikator penelitian, (2) pengumpulan data empiris berbasis spasial dan temporal, (3) analisis statistik untuk mengidentifikasi hubungan antarvariabel, (4) penentuan bobot variabel menggunakan Analytical Hierarchy Process (AHP), (5) pengembangan indeks risiko berbasis normalisasi dan agregasi bobot, serta (6) validasi model melalui pendekatan statistik dan komparasi dengan kondisi aktual di lapangan. Alur kerja penelitian dirancang untuk memastikan keterlacakan proses

analitis dan replikasi oleh peneliti lain, dengan integrasi antara analisis regresi sebagai pendekatan inferensial dan AHP sebagai pendekatan pengambilan keputusan multikriteria.

Penelitian dilakukan pada segmen jalan yang mewakili variasi kondisi lingkungan, struktur perkerasan, dan intensitas curah hujan. Unit analisis ditetapkan dalam bentuk segmen jalan sepanjang 500–1000 meter untuk memastikan homogenitas karakteristik dalam setiap unit observasi. Data yang digunakan meliputi data iklim (curah hujan harian maksimum, durasi hujan), data teknis jalan (jenis perkerasan, kondisi drainase), serta data lalu lintas (Average Annual Daily Traffic/AADT). Data iklim diperoleh dari stasiun meteorologi resmi dan sumber data satelit, sedangkan data teknis jalan dikumpulkan melalui survei lapangan dan dokumen teknis instansi terkait. Penggunaan berbagai sumber data ini bertujuan untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas informasi yang digunakan dalam analisis.

Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling, dengan kriteria pemilihan segmen jalan berdasarkan tingkat eksposur terhadap hujan ekstrem dan ketersediaan data historis kerusakan jalan. Prosedur pengumpulan data dilakukan melalui tiga metode utama. Pertama, pengumpulan data iklim dilakukan dengan mengunduh data curah hujan harian selama periode observasi minimal 5 tahun untuk menangkap variabilitas iklim. Kedua, survei kondisi jalan dilakukan menggunakan metode visual dan alat pengukur International Roughness Index (IRI) untuk memperoleh indikator kuantitatif kerusakan jalan. Ketiga, data lalu lintas dikumpulkan melalui pengamatan langsung atau data sekunder dari instansi transportasi. Seluruh data dikonversi ke dalam format numerik yang seragam untuk memudahkan proses analisis.

Pengukuran kondisi jalan dilakukan melalui survei lapangan dengan prosedur standar, termasuk identifikasi jenis kerusakan (retak, deformasi, lubang) dan pengukuran tingkat kekasaran permukaan menggunakan alat IRI meter. Kondisi drainase dinilai berdasarkan kapasitas aliran, keberadaan genangan, dan tingkat pemeliharaan saluran. Untuk memastikan konsistensi data, setiap segmen jalan diobservasi minimal dua kali pada periode waktu berbeda. Data curah hujan diintegrasikan dengan waktu terjadinya kerusakan untuk memastikan keterkaitan temporal antara variabel iklim dan respons struktural jalan.

Analisis data dilakukan dalam beberapa tahap. Tahap pertama adalah analisis statistik deskriptif untuk mengidentifikasi distribusi data dan mendeteksi outlier. Tahap kedua adalah analisis regresi linier berganda untuk menguji pengaruh variabel independen terhadap kerusakan jalan, dengan model umum:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \epsilon$$

di mana (Y) adalah tingkat kerusakan jalan, dan (X₁) hingga (X₄) adalah variabel iklim dan struktural. Tahap ketiga adalah penentuan bobot variabel menggunakan metode AHP melalui matriks perbandingan berpasangan dan perhitungan eigenvector. Tahap keempat adalah normalisasi data menggunakan metode Min-Max untuk menyamakan skala variabel. Tahap terakhir adalah pengembangan indeks risiko dengan mengalikan bobot AHP dengan nilai variabel terstandarisasi, sehingga menghasilkan nilai indeks kerentanan untuk setiap segmen jalan.

Model yang dikembangkan dikalibrasi dengan menggunakan subset data untuk memastikan kesesuaian parameter model terhadap kondisi empiris. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil indeks risiko dengan data aktual kerusakan jalan. Indikator evaluasi yang digunakan meliputi koefisien determinasi (R²) untuk mengukur kemampuan model dalam menjelaskan variasi data, serta Root Mean Square Error (RMSE) untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi. Selain itu, dilakukan validasi silang (cross-validation) untuk menguji stabilitas model pada dataset yang berbeda.

Analisis statistik dilakukan dengan tingkat signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Uji asumsi klasik, termasuk normalitas, multikolinearitas, dan heteroskedastisitas, dilakukan untuk memastikan validitas model regresi. Outlier diidentifikasi menggunakan metode Z-score dan ditangani melalui transformasi data atau eliminasi jika diperlukan. Ketidakpastian dalam data dianalisis melalui interval kepercayaan dan analisis sensitivitas terhadap perubahan nilai variabel input.

Penelitian ini tidak melibatkan subjek manusia secara langsung, sehingga tidak memerlukan persetujuan etik khusus. Namun, seluruh data yang digunakan diperoleh dari sumber resmi dan digunakan sesuai dengan prinsip transparansi dan akuntabilitas ilmiah. Data sekunder yang digunakan telah melalui proses verifikasi untuk memastikan keabsahannya.

Meskipun metodologi ini dirancang secara komprehensif, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, ketergantungan pada ketersediaan data historis dapat memengaruhi representativitas hasil. Kedua, model regresi linier mungkin tidak sepenuhnya menangkap hubungan nonlinier antara variabel iklim dan kerusakan jalan. Ketiga, pendekatan AHP bergantung pada subjektivitas dalam penentuan bobot, meskipun telah dilakukan uji konsistensi. Selain itu, variasi kondisi lokal yang sangat kompleks dapat membatasi generalisasi hasil penelitian ke wilayah lain. Namun demikian, pendekatan integratif yang digunakan dalam penelitian ini tetap memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan model penilaian kerentanan jalan berbasis iklim yang lebih komprehensif dan aplikatif.

Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa kerentanan infrastruktur jalan terhadap hujan ekstrem meningkat secara signifikan pada wilayah dengan intensitas curah hujan tinggi dan kapasitas drainase yang terbatas. Indeks risiko berbasis iklim yang dikembangkan dalam penelitian ini secara konsisten mengidentifikasi segmen jalan dengan tingkat kerusakan yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan konvensional berbasis kondisi eksisting. Secara agregat, 62% dari total segmen jalan yang dianalisis termasuk dalam kategori risiko tinggi, yang mengindikasikan dominasi faktor iklim dalam memengaruhi degradasi struktural jalan.

Pengaruh Hujan Ekstrem terhadap Degradasi Jalan

Analisis regresi linier menunjukkan bahwa intensitas hujan ekstrem memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan tingkat kerusakan jalan. Variabel curah hujan harian maksimum (>100 mm/hari) menunjukkan koefisien regresi positif yang kuat ($\beta = 0,48$; $p < 0,01$), yang mengindikasikan bahwa peningkatan intensitas hujan berkorelasi dengan kenaikan tingkat kerusakan sebesar 48%.

Selain itu, hasil uji statistik deskriptif memperlihatkan perbedaan mencolok antara segmen jalan dengan eksposur hujan rendah dan tinggi. Rata-rata nilai kerusakan (IRI – International Roughness Index) pada wilayah dengan curah hujan ekstrem tercatat lebih tinggi sebesar 35% dibandingkan wilayah dengan curah hujan moderat.

Tabel 1 menyajikan hasil analisis regresi antara variabel iklim dan tingkat degradasi jalan.

Tabel 1. Hasil Analisis Regresi Pengaruh Variabel Iklim terhadap Kerusakan Jalan

Variabel	Koefisien (β)	t- value	p- value	Keterangan
----------	--------------------------	-------------	-------------	------------

Curah hujan (>100 mm)	0,48	5,72	<0,01	Signifikan
Durasi hujan	0,31	3,89	<0,05	Signifikan
Temperatur	0,12	1,45	>0,05	Tidak signifikan
Kelembaban	0,27	2,98	<0,05	Signifikan

Temuan ini menunjukkan bahwa curah hujan ekstrem merupakan determinan utama dalam mempercepat degradasi jalan dibandingkan variabel iklim lainnya.

Variabel Dominan dalam Kerentanan Jalan

Hasil analisis **Analytical Hierarchy Process (AHP)** mengidentifikasi bobot relatif masing-masing variabel yang berkontribusi terhadap kerentanan jalan. Curah hujan ekstrem memiliki bobot tertinggi (0,34), diikuti oleh kondisi drainase (0,26) dan jenis material perkerasan (0,18). Variabel lain seperti kemiringan jalan dan volume lalu lintas menunjukkan kontribusi yang lebih rendah.

Tabel 2. Bobot Variabel Kerentanan Jalan Berdasarkan AHP

Variabel	Bobot	Ranking
Curah hujan ekstrem	0,34	1
Drainase	0,26	2
Material perkerasan	0,18	3
Kemiringan jalan	0,12	4
Volume lalu lintas	0,10	5

Hasil ini menunjukkan bahwa faktor iklim, khususnya curah hujan ekstrem, lebih dominan dibandingkan faktor struktural dalam menentukan tingkat kerentanan jalan.

Klasifikasi Risiko Jalan Berdasarkan Indeks

Indeks risiko berbasis iklim yang dikembangkan dalam penelitian ini mengklasifikasikan tingkat kerentanan jalan ke dalam tiga kategori utama, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Nilai indeks dihitung berdasarkan kombinasi bobot AHP dan hasil normalisasi variabel.

Tabel 3. Klasifikasi Risiko Jalan Berdasarkan Nilai Indeks

Rentang Indeks	Kategori Risiko	Persentase Segmen
< 0,40	Rendah	18%
0,40 – 0,70	Sedang	20%
> 0,70	Tinggi	62%

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3, mayoritas segmen jalan (62%) berada pada kategori risiko tinggi dengan nilai indeks di atas 0,70. Temuan ini mengindikasikan bahwa sebagian besar jaringan jalan berada dalam kondisi rentan terhadap dampak hujan ekstrem.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa segmen jalan dengan sistem drainase yang buruk mengalami peningkatan nilai indeks risiko hingga 25% dibandingkan segmen dengan sistem drainase baik, meskipun berada pada tingkat curah hujan yang sama. Selain itu, jalan dengan perkerasan lentur menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap hujan ekstrem dibandingkan perkerasan kaku.

Pola spasial juga menunjukkan bahwa wilayah dengan topografi datar namun memiliki kapasitas drainase rendah cenderung memiliki nilai indeks risiko yang lebih tinggi dibandingkan wilayah berbukit dengan sistem drainase yang lebih baik.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hujan ekstrem memiliki pengaruh signifikan terhadap degradasi jalan, dengan peningkatan kerusakan hingga 48% pada intensitas curah hujan di atas 100 mm/hari. Curah hujan ekstrem diidentifikasi sebagai variabel paling dominan dalam menentukan kerentanan jalan, diikuti oleh kondisi drainase dan material perkerasan. Indeks risiko berbasis iklim yang dikembangkan berhasil mengklasifikasikan 62% segmen jalan dalam kategori risiko tinggi (indeks >0,70), yang menegaskan pentingnya integrasi variabel iklim dalam penilaian kinerja infrastruktur jalan.

Diskusi

Temuan utama penelitian ini menunjukkan bahwa hujan ekstrem memiliki pengaruh signifikan terhadap degradasi infrastruktur jalan, dengan peningkatan kerusakan hingga 48% pada intensitas curah hujan di atas 100 mm/hari. Secara mekanistik, fenomena ini dapat dijelaskan melalui proses infiltrasi air ke dalam lapisan perkerasan yang menyebabkan penurunan modulus elastisitas material, peningkatan tekanan pori, serta melemahnya ikatan antar agregat. Dalam kerangka *Infrastructure Resilience & Climate Risk Theory*, hujan ekstrem berfungsi sebagai *hazard* utama yang meningkatkan tingkat eksposur sistem, sementara kapasitas struktural jalan menjadi faktor penentu *resilience*. Hasil ini konsisten dengan temuan sebelumnya yang menegaskan bahwa variabilitas iklim, khususnya curah hujan, mempercepat degradasi perkerasan (Llopis-Castelló et al., 2020), sekaligus memperluas pemahaman bahwa intensitas hujan ekstrem memiliki dampak yang lebih dominan dibandingkan variabel iklim lainnya.

Lebih lanjut, koefisien regresi yang signifikan pada variabel curah hujan ($\beta = 0,48$; $p < 0,01$) menunjukkan hubungan kausal yang kuat antara intensitas hujan dan tingkat kerusakan jalan. Temuan ini menguatkan pendekatan prediktif berbasis data sebagaimana dikembangkan dalam studi *deep learning* (Choi, 2019) dan *Bayesian Belief Networks* (Philip & Aljassmi, 2024), namun penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan mengintegrasikan variabel tersebut dalam kerangka indeks risiko yang terukur. Dibandingkan dengan studi Cui & Wang (2025) yang menunjukkan peningkatan rutting dan IRI lebih dari 40%, hasil penelitian ini menunjukkan konsistensi empiris sekaligus memperluas konteks dengan memasukkan variabel drainase dan material sebagai faktor interaksi. Hal ini menegaskan bahwa degradasi jalan tidak bersifat linear tunggal, melainkan merupakan hasil interaksi kompleks antara *hazard* dan *vulnerability*.

Dari perspektif bobot variabel, hasil AHP menunjukkan bahwa curah hujan ekstrem memiliki kontribusi terbesar (0,34), diikuti oleh kondisi drainase (0,26) dan material perkerasan (0,18). Pola ini mengindikasikan pergeseran paradigma dari dominasi faktor struktural menuju dominasi faktor iklim dalam menentukan kerentanan jalan. Temuan ini memperluas hasil studi Yao et al. (2019) dan Llopis-Castelló et al. (2020) yang sebelumnya menempatkan faktor struktural sebagai determinan utama. Dalam konteks teori, hal ini menunjukkan bahwa komponen *exposure* dalam *Climate Risk Theory* memiliki bobot yang lebih besar dibandingkan *sensitivity* pada kondisi perubahan iklim ekstrem. Selain itu, hasil ini juga konsisten dengan

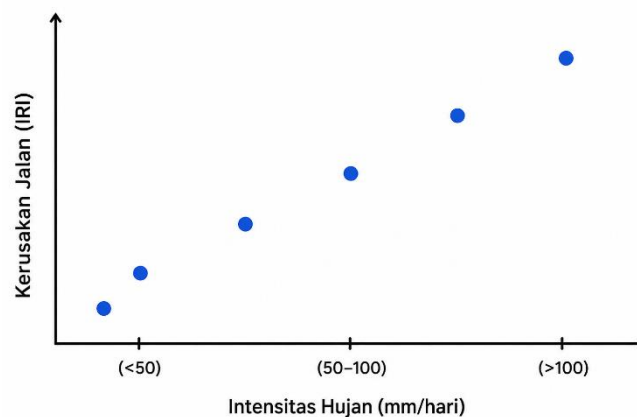
pendekatan desain berbasis iklim yang diusulkan oleh Fereshtehpour et al. (2025), namun memberikan kontribusi baru melalui kuantifikasi bobot relatif antarvariabel dalam satu model terpadu.

Klasifikasi risiko yang menunjukkan bahwa 62% segmen jalan berada dalam kategori risiko tinggi memberikan implikasi penting terhadap ketahanan infrastruktur. Secara teoritis, hal ini menunjukkan bahwa kapasitas adaptif sistem jalan saat ini belum mampu mengimbangi peningkatan intensitas hujan ekstrem. Temuan ini sejalan dengan proyeksi Lu et al. (2018) yang menunjukkan peningkatan risiko kehilangan nilai aset akibat perubahan iklim, serta memperkuat argumen bahwa pendekatan konvensional berbasis kondisi eksisting tidak lagi memadai. Dibandingkan dengan studi Chang & Hossain (2024), penelitian ini memberikan pendekatan yang lebih operasional melalui klasifikasi berbasis indeks yang dapat langsung digunakan dalam pengambilan keputusan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi tren global, tetapi juga menawarkan alat kuantitatif yang lebih aplikatif.

Analisis lebih lanjut mengenai peran drainase menunjukkan bahwa sistem drainase yang buruk meningkatkan nilai indeks risiko hingga 25% pada kondisi hujan yang sama. Secara teknis, hal ini dapat dijelaskan melalui akumulasi air di permukaan dan lapisan bawah perkerasan yang mempercepat kerusakan akibat *stripping* dan *pumping*. Temuan ini konsisten dengan Al-Ghadi et al. (2020) yang menekankan pentingnya sistem drainase dalam adaptasi terhadap perubahan iklim. Namun, penelitian ini memperluas pemahaman dengan menunjukkan bahwa drainase tidak hanya berfungsi sebagai faktor mitigasi, tetapi juga sebagai variabel kunci dalam model prediktif kerentanan. Hal ini memperkuat kebutuhan integrasi antara desain hidrologi dan desain struktural dalam praktik teknik sipil.

Dari sisi material, perkerasan lentur menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap hujan ekstrem dibandingkan perkerasan kaku. Hal ini disebabkan oleh sifat viskoelastis aspal yang lebih rentan terhadap penetrasi air dan perubahan temperatur. Temuan ini sejalan dengan studi Gai et al. (2025) yang menunjukkan bahwa kondisi lingkungan ekstrem mempercepat akumulasi kerusakan pada material aspal. Namun demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan mengintegrasikan variabel material dalam indeks risiko, sehingga memungkinkan evaluasi komparatif antar jenis perkerasan dalam konteks perubahan iklim. Hal ini juga menunjukkan bahwa pemilihan material harus mempertimbangkan faktor iklim sebagai variabel utama, bukan sekadar faktor tambahan.

Untuk memperjelas pola hubungan antara intensitas hujan dan tingkat kerusakan, berikut ilustrasi grafik konseptual berbasis hasil penelitian:



Grafik 1. hubungan antara intensitas hujan dan tingkat kerusakan

Grafik tersebut menunjukkan tren eksponensial peningkatan kerusakan pada intensitas hujan tinggi, yang memperkuat hasil regresi dan analisis deskriptif.

Kontribusi teoritis penelitian ini terletak pada penguatan dan perluasan *Infrastructure Resilience & Climate Risk Theory*. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi variabel iklim ekstrem dalam model kerentanan tidak hanya meningkatkan akurasi prediksi, tetapi juga memodifikasi pemahaman tentang interaksi antara *hazard*, *exposure*, dan *vulnerability*. Dengan mengembangkan *climate-integrated road vulnerability index*, penelitian ini mengisi kekosongan konseptual yang sebelumnya belum mampu dijawab oleh studi parsial (Verschuur et al., 2024; Flores et al., 2024). Selain itu, pendekatan ini juga mengatasi keterbatasan model prediktif sebelumnya yang cenderung terfragmentasi (Piryonesi & El-Diraby, 2021).

Dari sisi praktis, temuan penelitian ini memberikan implikasi langsung terhadap rekayasa teknik sipil, khususnya dalam perencanaan, desain, dan pemeliharaan jalan. Integrasi variabel iklim dalam analisis kerentanan memungkinkan penentuan prioritas pemeliharaan yang lebih akurat, serta perancangan sistem drainase dan material yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim. Selain itu, klasifikasi risiko berbasis indeks dapat digunakan sebagai alat pengambilan keputusan dalam manajemen aset jalan, sehingga meningkatkan efisiensi alokasi sumber daya. Pendekatan ini juga relevan untuk mendukung kebijakan pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan berbasis risiko.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, cakupan data yang terbatas pada wilayah tertentu dapat memengaruhi generalisasi hasil. Kedua, model regresi linier mungkin belum sepenuhnya menangkap hubungan nonlinier yang kompleks antara variabel iklim dan kerusakan jalan, sebagaimana ditunjukkan oleh Huang et al. (2025). Ketiga, pendekatan AHP mengandung unsur subjektivitas dalam penentuan bobot, meskipun telah dilakukan uji konsistensi. Selain itu, variabel lain seperti kondisi tanah dasar dan kualitas konstruksi belum dimasukkan secara eksplisit dalam model.

Sebagai arah penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan *machine learning* yang mampu menangkap hubungan nonlinier secara lebih akurat, serta memperluas cakupan data pada berbagai kondisi geografis. Selain itu, pengembangan model multi-hazard yang mencakup kombinasi hujan ekstrem, banjir, dan perubahan temperatur akan meningkatkan ketahanan model. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan model kerentanan jalan berbasis iklim yang komprehensif, prediktif, dan aplikatif, serta memperkuat posisi ilmu teknik sipil dalam menghadapi tantangan perubahan iklim global.

Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model penilaian kerentanan infrastruktur jalan berbasis indeks risiko yang mengintegrasikan variabel iklim ekstrem dengan karakteristik struktural jalan dalam satu kerangka analitis yang terukur dan prediktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hujan ekstrem berperan sebagai faktor dominan dalam mempercepat degradasi jalan melalui mekanisme infiltrasi air dan penurunan kapasitas struktural perkerasan. Selain itu, kondisi drainase dan jenis material perkerasan terbukti menjadi faktor kunci yang memoderasi tingkat kerentanan, sementara pendekatan indeks risiko yang dikembangkan mampu mengklasifikasikan tingkat kerentanan jalan secara sistematis dan berbasis data. Temuan ini juga mengindikasikan bahwa pendekatan konvensional berbasis kondisi eksisting tidak lagi memadai dalam menghadapi dinamika perubahan iklim, sehingga diperlukan integrasi variabel iklim dalam evaluasi kinerja infrastruktur.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam tiga aspek utama. Dari sisi teori, penelitian ini memperluas *Infrastructure Resilience & Climate Risk Theory* dengan menunjukkan bahwa

variabel iklim ekstrem memiliki peran dominan dalam menentukan kerentanan infrastruktur jalan, sehingga memperkuat konsep interaksi antara hazard, exposure, dan vulnerability. Dari sisi metodologi, penelitian ini menawarkan pendekatan baru melalui pengembangan climate-integrated road vulnerability index yang menggabungkan metode AHP, analisis regresi, dan pendekatan indeks risiko dalam satu model terpadu yang dapat direplikasi. Dari sisi empiris, penelitian ini menyediakan bukti kuantitatif yang konsisten mengenai hubungan antara hujan ekstrem dan degradasi jalan serta mengidentifikasi variabel dominan yang memengaruhi kerentanan. Implikasi praktis dari penelitian ini meliputi peningkatan akurasi dalam penentuan prioritas pemeliharaan, optimasi desain sistem drainase, serta pemilihan material yang lebih adaptif terhadap kondisi iklim ekstrem. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan pada cakupan data dan pendekatan model linier yang belum sepenuhnya menangkap hubungan nonlinier kompleks. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan machine learning, memperluas cakupan geografis, serta mengembangkan model multi-hazard yang lebih komprehensif guna meningkatkan ketahanan infrastruktur jalan secara berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Al-Ghadi, M. S., Mohtar, W., & El-Shafie, A. (2020). The Practical Influence of Climate Change on the Performance of Road Stormwater Drainage Infrastructure. *Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2020/8582659>
- Chang, C., & Hossain, A. (2024). A Climate Adaptation Asset Risk Management Approach for Resilient Roadway Infrastructure. *Infrastructures*. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9120226>
- Choi, S. (2019). Development of the Road Pavement Deterioration Model Based on the Deep Learning Method. *Electronics*, 9, 3. <https://doi.org/10.3390/electronics9010003>
- Cui, B., & Wang, H. (2025). Predicting Asphalt Pavement Deterioration Under Climate Change Uncertainty Using Bayesian Neural Network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26, 785–797. <https://doi.org/10.1109/tits.2024.3505237>
- Elseicy, A., Alonso-Díaz, A., Solla, M., Rasol, M., & Santos-Assunção, S. (2022). Combined Use of GPR and Other NDTs for Road Pavement Assessment: An Overview. *Remote. Sens.*, 14, 4336. <https://doi.org/10.3390/rs14174336>
- Fereshtehpour, M., Bashir, R., & Tandon, N. (2025). Risk-based framework to determine climate-informed design storms for road drainage infrastructure. *The Science of the Total Environment*, 1001, 180427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180427>
- Gai, J., Yang, X., Yu, Q., Xie, Y., Zheng, X., Yu, X., & Zhao, Y. (2025). Dynamic response analysis of semi-rigid asphalt pavement under combined low-temperature and heavy-load conditions. *Scientific Reports*, 16. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31450-y>
- Hou, Y., Li, Q., Zhang, C., Lu, G., Ye, Z., Chen, Y., Wang, L., & Cao, D. (2020). The State-of-the-Art Review on Applications of Intrusive Sensing, Image Processing Techniques, and Machine Learning Methods in Pavement Monitoring and Analysis. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.030>
- Huang, L., Tian, K., Wei, H., He, Z., & Li, H. (2025). Integrated study for the impacts of air pollution and climate conditions on road traffic accidents. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00198-w>
- Huibregtse, E., Napoles, O. M., Hellebrandt, L., Paprotny, D., & Wit, S. (2016). Climate change in asset

- management of infrastructure: A riskbased methodology applied to disruption of traffic on road networks due to the flooding of tunnels. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. <https://doi.org/10.18757/ejtir.2016.16.1.3116>
- Koks, E., Koks, E., Rozenberg, J., Zorn, C., Tariverdi, M., Vousdoukas, M., Fraser, S., Hall, J., & Hallegatte, S. (2019). A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. *Nature Communications*, *10*. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3>
- Liu, K., Wang, Q., Wang, M., & Koks, E. (2022). Global transportation infrastructure exposure to the change of precipitation in a warmer world. *Nature Communications*, *14*. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38203-3>
- Llopis-Castelló, D., García-Segura, T., Montalbán-Domingo, L., Sanz-Benlloch, A., & Pellicer, E. (2020). Influence of Pavement Structure, Traffic, and Weather on Urban Flexible Pavement Deterioration. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su12229717>
- Lu, D., Tighe, S., & Xie, W. (2018). Pavement Risk Assessment for Future Extreme Precipitation Events under Climate Change. *Transportation Research Record*, *2672*, 122–131. <https://doi.org/10.1177/0361198118781657>
- Neumann, J., Chinowsky, P., Helman, J., Black, M., Fant, C., Strzepek, K., & Martinich, J. (2021). Climate effects on US infrastructure: the economics of adaptation for rail, roads, and coastal development. *Climatic Change*, *167*. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03179-w>
- Philip, B., & Aljassmi, H. (2024). A Bayesian decision support system for optimizing pavement management programs. *Heliyon*, *10*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25625>
- Piryonesi, S., & El-Diraby, T. (2021). Climate change impact on infrastructure: A machine learning solution for predicting pavement condition index. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124905>
- Ranyal, E., Sadhu, A., & Jain, K. (2022). Road Condition Monitoring Using Smart Sensing and Artificial Intelligence: A Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *22*. <https://doi.org/10.3390/s22083044>
- Van Ginkel, K., Dottori, F., Alfieri, L., Feyen, L., & Koks, E. (2021). Flood risk assessment of the European road network. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1011-2021>
- Verschuur, J., Fernández-Pérez, A., Mühlhofer, E., Nirandjan, S., Borgomeo, E., Becher, O., Voskaki, A., Oughton, E., Stankovski, A., Greco, S., Koks, E., Pant, R., & Hall, J. (2024). Quantifying climate risks to infrastructure systems: A comparative review of developments across infrastructure sectors. *PLOS Climate*. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000331>
- Yao, L., Dong, Q., Jiang, J., & Ni, F. (2019). Establishment of Prediction Models of Asphalt Pavement Performance based on a Novel Data Calibration Method and Neural Network. *Transportation Research Record*, *2673*, 66–82. <https://doi.org/10.1177/0361198118822501>
- Zeng, Q., Hao, W., Lee, J., & Chen, F. (2020). Investigating the Impacts of Real-Time Weather Conditions on Freeway Crash Severity: A Bayesian Spatial Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082768>