

Rekayasa Infrastruktur Jalan Berbasis Data: Tinjauan Keselamatan Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022

Muhammad Arif Arofah¹, Nuvika Razak²

Program Studi Teknik Sipil Universitas Tarakanita, Komp. Billy Moon, RT.1/RW.6, Pd. Klp., Kec. Duren Sawit, Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13450

e-mail : arif@utarki.ac.id¹, *e-mail* : nuvika@utarki.ac.id²

Abstract

The transformation of road safety management from a reactive approach to a proactive scheme based on data computation power has become a national urgency to reduce infrastructure fatality rates. Limitation in manual risk identification necessitate a more objective and measurable assessment system. This study aims to integrate infrastructure variables into a digital modelling architecture capable of automatically predicting potential hazards, in alignment with the mandate of Presidential Decree No. 1 of 2022. The research method was developed using a quantitative approach by transforming physical road parameters into numerical datasets processed through a decision support system computational engine based on technical road assessment algorithms. Technically, this model synthesizes diverse multidimensional variables to convert qualitative attributes into a comprehensive risk spectrum output. The findings demonstrate that digital data integration provides an accurate vulnerability profile consistent with actual field conditions. The implementation of this model on digital platforms enables transportation authorities to perform precise risk mitigation and optimize road maintenance budget allocation through evidence based policies. This study concludes that the digitalization of road safety audits through algorithmic power is the fundamental cornerstone for achieving a sustainable smart infrastructure vision in Indonesia.

Keywords: Automated Audit, Data Computation, Risk Spectrum, Road Safety, Smart Infrastructure

Abstrak

Transformasi manajemen keselamatan jalan dari pendekatan reaktif menuju skema proaktif berbasis kekuatan komputasi data menjadi urgensi nasional dalam menekan angka fatalitas infrastruktur. Keterbatasan identifikasi risiko secara manual selama ini menuntut adanya sistem penilaian yang lebih objektif dan terukur. Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan variabel infrastruktur ke dalam sebuah arsitektur pemodelan digital yang mampu memprediksi potensi bahaya secara otomatis, selaras dengan amanat Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022. Metode penelitian ini dikembangkan melalui pendekatan kualitatif dengan mentransformasikan parameter fisik jalan menjadi dataset numerik yang diolah melalui mesin komputasi sistem pendukung keputusan berbasis algoritma penilaian teknis jalan. Secara teknis, model ini mensintesis beragam variabel multidimensi guna mengonversi atribut kualitatif menjadi output spektrum risiko yang komprehensif. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi data digital mampu memberikan potret kerawanan yang akurat sesuai kondisi riil di lapangan. Implementasi model ini pada platform digital memungkinkan otoritas transportasi untuk melakukan mitigasi risiko secara presisi serta optimalisasi alokasi anggaran pemeliharaan jalan melalui kebijakan berbasis bukti. Studi ini menyimpulkan bahwa digitalisasi audit keselamatan jalan melalui kekuatan algoritma adalah fondasi utama dalam mewujudkan visi infrastruktur cerdas yang berkelanjutan di Indonesia.

Kata Kunci: Audit Otomatis, Komputasi Data, Keselamatan Jalan, Infrastruktur Cerdas, Spektrum Risiko

PENDAHULUAN

Latar Belakang dan Paradigma Baru

Hingga saat ini, potret keselamatan jalan di Indonesia masih dibayangi oleh tingginya angka fatalitas, dimana identifikasi titik rawan kecelakaan secara konvensional masih sangat bergantung pada pelaporan data sekunder kepolisian. Pendekatan tradisional ini memiliki kelemahan mendasar karena bersifat reaktif, yakni tindakan korektif baru dilakukan setelah peristiwa kecelakaan terjadi atau adanya korban jiwa di lapangan (Arofah, 2024). Secara epistemologis, fenomena ini menunjukkan adanya kelangkaan pengetahuan dan bukti empiris dalam memitigasi risiko infrastruktur sejak dini. Padahal, jika merujuk pada amanat konstitusi Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945, infrastruktur jalan adalah fondasi pelayanan publik dalam sistem transportasi nasional yang krusial untuk menjaga ritme konektivitas antarpusat kegiatan serta menjamin keseimbangan pembangunan wilayah demi akselerasi ekonomi nasional.

Titik balik filosofis dalam tata kelola prasarana nasional ditandai dengan diberlakukannya Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Jalan yang menggantikan regulasi lama, yaitu Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2004. Perubahan ini membawa dampak signifikan karena Pasal 2 dalam regulasi terbaru tersebut secara eksplisit mewajibkan seluruh penyelenggaraan jalan berlandaskan pada asas keselamatan. Transformasi ini mengubah arah kebijakan pembangunan yang semula berorientasi dominan pada kuantitas fisik dan daya tampung lajur menjadi perlindungan mutlak terhadap nyawa setiap pengguna jalan. Mandat tersebut diperkuat melalui Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Cipta Kerja yang menginstruksikan pemerintah pusat untuk melakukan pengembangan industri dan rekayasa teknologi prasarana yang mampu menjamin keamanan, keselamatan, serta kelancaran lalu lintas secara menyeluruh dan berkelanjutan.

Langkah sinkronasi ini juga merespon kondisi global dimana *World Health Organization (WHO)* memproyeksikan kecelakaan jalan raya akan menjadi penyebab kematian kelima terbesar di dunia pada tahun 2030 jika tidak dilakukan intervensi kebijakan yang radikal. Sejalan dengan inisiatif *Decade of Action for Road Safety* dari PBB, Indonesia telah mengesahkan Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022 tentang Rencana Umum Nasional Keselamatan Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (RUNK LLAJ) 2021-2040. Regulasi ini mengadopsi paradigma *safe system approach* yang mengakui bahwa manusia dapat berbuat salah saat berkendara, namun sistem infrastruktur harus didesain sedemikian rupa untuk mengakomodir kesalahan tersebut guna menghindari luka parah atau kematian. Prinsip ini menitikberatkan pada toleransi tubuh manusia terhadap benturan serta pengelolaan program berbasis keluaran yang terukur untuk menekan biaya sosial akibat kecelakaan.

Dalam konteks rekayasa teknologi komputasi, pemenuhan amanat undang-undang ini menuntut adanya integrasi data digital melalui Sistem Informasi Geografis (SIG) guna mengidentifikasi parameter risiko jalan secara proaktif sebelum kecelakaan terjadi. Pengolahan data digital seperti pada platform sigmetro.binamarga.pu.go.id menjadi solusi teknologi untuk menciptakan *Smart Infrasatructure* yang berkeselamatan. Hal ini penting untuk memberikan gambaran risiko secara transparan kepada penyelenggara jalan dan masyarakat luas, sehingga target ambisius berupa penurunan indeks fatalitas nasional dapat tercapai melalui rekayasa infrastruktur yang berbasis pada data aktual dan akurat (SIG Metro Bina Marga, 2023)

Bedah Strategi RUNK LLAJ 2021-2040

Eskalasi angka fatalitas akibat kecelakaan lalu lintas telah menempatkan isu keselamatan jalan sebagai prioritas dalam agenda pembangunan nasional Indonesia. Sebagai manifestasi dari komitmen terhadap seruan global *Decade of Action for Road Safety* yang diinisiasi oleh Perserikatan Bangsa-

Bangsa, Pemerintah Indonesia mengesahkan Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022 tentang Rencana Umum Nasional Keselamatan Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (RUNK LLAJ) 2021-2040. Regulasi ini bukan hanya dokumen administratif, melainkan instrumen strategis yang mendefinisikan peta jalan keselamatan jalan nasional dengan target berupa penurunan indeks fatalitas dan kematian berdasarkan populasi. Strategi ini secara fundamental menggeser pendekatan penanganan kecelakaan yang bersifat parsial menjadi koordinasi multisektoral yang terintegrasi secara vertikal dan horizontal.

Secara struktural, koordinasi dalam RUNK LLAJ 2021-2040 melibatkan sinkronisasi yang erat antara tingkat nasional dengan rencana aksi di level daerah. Implementasi strategi ini diterjemahkan melalui Rencana Aksi Keselamatan Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (RAK LLAJ) yang disusun oleh tingkat Provinsi hingga Kabupaten/Kota, yang mana semuanya harus selaras dengan Sistem Perencanaan Pembangunan Nasional (Arofah, 2024). Konstruksi strategi ini dibangun di atas lima pilar keselamatan utama yang saling bertautan yaitu sistem yang berkeselamatan (Pilar 1), jalan berkeselamatan (Pilar 2), kendaraan berkeselamatan (Pilar 3), pengguna jalan berkeselamatan (Pilar 4), dan penanganan korban pasca kecelakaan (Pilar 5). Sinergi antarpilar ini bertujuan untuk menciptakan ekosistem transportasi yang tidak hanya efisien secara mobilitas, tetapi juga memberikan perlindungan maksimal bagi nyawa manusia.

Penerapan paradigma *safe system approach* dalam Perpres ini membawa perubahan pada metode intervensi di lapangan. Pendekatan ini mengakui keterbatasan biologis tubuh manusia dalam menanggung energi benturan saat terjadi tabrakan, sehingga menuntut penyediaan infrastruktur yang pemaaf/*forgiving roads*. Hal ini berimplikasi pada keharusan penyelenggara jalan untuk menyediakan metrik kinerja yang terukur di setiap level atribut jalan, mulai dari manajemen kecepatan yang logis hingga penyediaan fatalitas bagi pengguna jalan rentan seperti trotoar yang ramah disabilitas (Youth for Road Safety Academic, 2023). Selain itu, strategi ini menekankan pada program berbasis keluaran yang mampu mereduksi biaya sosial dan kerugian ekonomi nasional akibat hilangnya usia produktif dalam kecelakaan.

Dalam dimensi rekayasa teknologi, RUNK LLAJ 2021-2040 mewajibkan adanya dukungan data riset dan evaluasi yang berkelanjutan untuk mendasari pengambilan kebijakan. Transformasi manajemen keselamatan ini menuntut integrasi sistem informasi yang mampu mengidentifikasi parameter risiko secara proaktif sebelum peristiwa kecelakaan terjadi. Peraturan Presiden ini menjadi landasan bagi pembaruan standar desain lokal dan tinjauan ulang terhadap regulasi teknis yang sudah tidak relevan dengan kebutuhan keselamatan modern (Bina Marga, 2023). Dengan demikian, keberadaan Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022 berfungsi sebagai katalisator bagi transformasi infrastruktur nasional menuju *smart infrastructure* yang berbasis pada validitas data digital, guna memastikan setiap segmen jaringan jalan nasional memenuhi ambang batas keselamatan yang dipersyaratkan hingga dua dekade mendatang.

Urgensi Infrastruktur Berbasis Data

Implementasi rekayasa jalan yang berorientasi pada keselamatan di era modern kini menuntut adanya ekosistem digital yang terintegrasi secara utuh guna mendukung proses pengambilan keputusan teknis yang presisi. Kebutuhan akan integrasi teknologi digital, khususnya melalui pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG), menjadi instrumen krusial dalam memitigasi risiko kecelakaan di ruas jalan nasional yang memiliki karakteristik lalu lintas serta geometrik yang kompleks. Transformasi ini merupakan implementasi dari amanat Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023, yang mewajibkan pemerintah pusat untuk melakukan akselerasi pengembangan industri dan rekayasa teknologi prasarana jalan guna menjamin keamanan serta kelancaran transportasi nasional. Dalam pandangan teknologi saat ini, ketersediaan data infrastruktur yang bersifat aktual, transparan, dan komprehensif bukan hanya

sekedar pelengkap administratif, melainkan sebuah kebutuhan imperatif untuk memenuhi standar teknis penyelenggaraan jalan yang pemaaf (*forgiving road*).

Secara operasional, platform digital seperti *sigmetro.binamarga.pu.go.id* merepresentasikan lompatan signifikan dalam metode pengumpulan data rekayasa jalan di Indonesia. Melalui aplikasi SIG berbasis web yang interaktif, penyelenggara jalan dapat melakukan ekstraksi parameter secara *real-time*, mencakup parameter vital seperti *International Roughness Index (IRI)* untuk menilai kerataan permukaan jalan dan *Volume Capacity Ratio (VCR)* untuk memantau kejenuhan arus lalu lintas, tanpa harus menurunkan personel untuk survei lapangan secara manual yang memiliki risiko kecelakaan tinggi (Bina Marga, 2023). Digitalisasi parameter teknis ini memungkinkan identifikasi dini terhadap degradasi kualitas perkerasan, dimana analisis komputasi menunjukkan adanya korelasi linear yang kuat antara tingkat kerusakan permukaan jalan dengan fluktuasi kecepatan kendaraan yang memicu peluang insiden kecelakaan (Arofah dkk, 2021). Dengan demikian, infrastruktur berbasis data memungkinkan proses audit keselamatan jalan dilakukan secara berkelanjutan dan menjangkau wilayah geografis yang luas dalam waktu singkat.

Lebih lanjut, integrasi teknologi komputasi dalam manajemen risiko jalan telah sejalan dengan visi cerdas yang menuntut adanya dukungan data riset dan evaluasi yang mendalam. Penggunaan perangkat sensor otomatis, seperti aplikasi *Roadroid* yang memanfaatkan sensor akselerometer pada ponsel pintar untuk mengukur tingkat kekasaran jalan, membuktikan bahwa rekayasa teknologi mampu meningkatkan derajat presisi dalam penilaian risiko infrastruktur secara masif (Arofah dkk, 2021). Paradigma infrastruktur cerdas ini memungkinkan penggabungan berbagai parameter keselamatan jalan raya ke dalam satu pemodelan risiko secara proaktif dan terukur (Arofah, 2024). Pada akhirnya, integrasi teknologi SIG dalam manajemen jalan nasional bertujuan untuk menghilangkan keterbatasan empiris dalam data keselamatan serta menyediakan landasan ilmiah bagi otoritas transportasi dalam menetapkan skala prioritas penanganan untuk merealisasikan target penurunan fatalitas nasional pada tahun 2040.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Konseptual Lima Pilar Keselamatan

Implementasi kebijakan keselamatan jalan di Indonesia mengalami transformasi fundamental melalui pengadopsian paradigma *safe system approach* yang dikodifikasi dalam Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022. Paradigma ini secara eksplisit mengakui bahwa meskipun manusia dapat melakukan kesalahan dalam berlalu lintas, sistem transportasi harus dirancang sedemikian rupa guna memitigasi risiko cedera fatal. Dalam perspektif rekayasa teknologi komputasi, kelima pilar dalam RUNK LLAJ 2021-2040 tidak lagi dipandang sebagai kategori administratif statis, melainkan sebagai variabel input data multidimensi yang dinamis guna mendukung sistem cerdas. Kelima pilar tersebut adalah sistem yang berkeselamatan, jalan yang berkeselamatan, kendaraan yang berkeselamatan, pengguna jalan yang berkeselamatan, dan penanganan korban kecelakaan. Integrasi seluruh dimensi pilar sebagai atribut data multidimensi memungkinkan penyelenggara prasarana untuk menghasilkan model prediksi risiko yang lebih akurat dan komunikatif bagi publik dibandingkan sistem peringakt konvensional.

Pilar pertama, yaitu Sistem yang Berkeselamatan, berfungsi sebagai basis data utama (*master data*) untuk tata kelola koordinasi multisektoral yang menghubungkan Rencana Aksi Keselamatan (RAK) daerah dengan sistem nasional. Secara teknis, manajemen risiko dalam pilar ini telah bertransformasi dari pendekatan reaktif menjadi proaktif melalui pemodelan komputasi yang mampu mengidentifikasi kerentanan infrastruktur sebelum kecelakaan terjadi. Data dari pilar manajemen ini menjadi landasan algoritma dalam menentukan skala prioritas penanganan jalan nasional berdasarkan probabilitas risiko yang dihiitung secara matematis.

Pilar kedua, yaitu Jalan yang Berkeselamatan, merupakan inti dari rekayasa infrastruktur berbasis data. Penyelenggaraan jalan nasional kini menuntut ekstraksi data digital secara aktual, seperti nilai *International Roughness Index* (IRI) dan *Volume Capacity Ratio* (VCR) yang diperoleh melalui platform SIG Metro Bina Marga sebagai variabel penentu keselamatan. Parameter teknis seperti geometrik dan kondisi permukaan harus dipantau secara berkelanjutan karena kegagalan pada aspek ini akan meningkatkan energi benturan saat terjadi kegagalan sistem pada pilar lainnya. Integrasi data pilar jalan ini sangat krusial, mengingat analisis analitik menunjukkan bahwa kondisi permukaan yang buruk berkorelasi langsung dengan fluktuasi kecepatan kendaraan yang meningkatkan peluang insiden secara signifikan.

Pilar ketiga, yaitu Kendaraan yang Berkeselamatan, memberikan kontribusi data mengenai kelaikan teknis dan standarisasi teknologi kendaraan. Dalam model rekayasa ini, data aspek kendaraan disintesis dengan pilar jalan, dimana fenomena muatan berlebih pada pilar kendaraan akan menjadi beban input yang mempercepat degradasi kekesatan permukaan jalan pada pilar kedua. Sinkronisasi data antara beban gandar kendaraan dengan daya dukung infrastruktur menjadi parameter input vital dalam memprediksi sisa usia pelayanan jalan dan risiko kecelakaan akibat kegagalan mekanis.

Kebaruan dalam naskah ini terletak pada pilar keempat, yaitu Pengguna Jalan yang Berkeselamatan, yang berfokus pada kuantifikasi parameter perilaku manusia. Berbeda dengan standar audit keselamatan tradisional yang sering mengabaikan faktor internal pengemudi, metode ini mengintegrasikan variabel perilaku seperti penggunaan ponsel saat berkendara, kebiasaan merokok dan faktor usia ke dalam sistem penilaian risiko infrastruktur. Penelitian empiris melalui pendekatan *data science* menunjukkan bahwa variabel perilaku seperti penggunaan ponsel saat mengemudi dapat dikonversikan menjadi koefisien risiko yang meningkatkan probabilitas kecelakaan dalam model prediksi secara masif.

Pilar terakhir, yaitu Penanganan Korban Kecelakaan, berfungsi sebagai jaring pengaman pascakecelakaan yang datanya dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas respon darurat medis. Melalui sintesis kelima pilar ini, Perpres Nomor 1 Tahun 2022 menyediakan kerangka kerja yang komprehensif, di mana setiap atribut teknis dan non-teknis diolah menjadi sistem pendukung keputusan berbasis komputasi. Integrasi seluruh pilar sebagai atribut utama multidimensi memungkinkan penyelenggara jalan untuk menghasilkan angka probabilitas kecelakaan yang lebih akurat dan komunikatif bagi publik dibandingkan dengan sistem peringkat bintang konvensional yang memiliki keterbatasan interpretasi bagi masyarakat awam.

Digitalisasi Ekstraksi Data (Web-SIG)

Transformasi menuju penyelenggaraan prasarana jalan yang cerdas menuntut perubahan fundamental dalam metodologi pengumpulan data teknis, dari pendekatan konvensional yang bersifat manual menuju sistem ekstraksi digital yang lebih presisi dan efisien. Dalam konteks ini, pemanfaatan platform *sigmetro.binamarga.pu.go.id* menjadi instrumen krusial bagi rekayasa infrastruktur jalan berbasis data di Indonesia guna memenuhi visi integrasi sistem fisik dan digital (Arofah, 2024). Website tersebut merupakan aplikasi SIG berbasis web yang interaktif, yang dirancang khusus untuk menggambarkan informasi secara aktual mengenai jaringan jalan di wilayah metropolitan serta kota-kota besar di seluruh Indonesia. Secara teknis, platform ini berfungsi sebagai *data acquisition layer* yang memitigasi *empirical gap* atau kelangkaan bukti lapangan yang selama ini menghambat akurasi pemodelan risiko kecelakaan secara dini (Bina Marga, 2023). Melalui digitalisasi ini, variabel teknis multidimensi dapat diekstraksi secara *real-time* guna mendukung pemodelan risiko yang proaktif sebagaimana diamanatkan oleh Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022.

Salah satu parameter vital yang dapat diperoleh melalui platform SIG adalah nilai *International Roughness Index* (IRI). Dalam komputasi keselamatan jalan, data nilai IRI tidak hanya dilihat sebagai indikator kerusakan fisik, melainkan sebagai variabel input numerik yang menentukan koefisien kestabilan kendaraan dalam algoritma prediksi risiko (Arofah dkk, 2021). Secara teknis, nilai IRI didapatkan dari jumlah kumulatif naik turunnya permukaan jalan yang dibagi dengan jarak panjang ruas jalan tertentu, di mana nilai ini mencerminkan kualitas perkerasan yang berdampak langsung pada kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Analisis analitik menunjukkan bahwa permukaan jalan dengan nilai IRI tinggi harus dikonversi menjadi skor risiko maksimal kecelakaan dalam sistem pendukung keputusan guna mengidentifikasi segmen yang memerlukan intervensi rekayasa segera (Arofah, 2024). Melalui integrasi data IRI digital, penyelenggara jalan dapat melakukan pemantauan kondisi perkerasan secara periodik tanpa hambatan birokrasi dan data lapangan yang lambat.

Selain aspek kondisi permukaan, variabel operasional operasional yang sangat menentukan dalam manajemen risiko jalan nasional adalah *Volume Capacity Ratio* (VCR). Parameter ini merepresentasikan perbandingan antara volume kendaraan aktual dengan kapasitas maksimum prasarana jalan (Ridha & Sumabrata, 2014). Pemanfaatan platform *sigmetro* memungkinkan akses terhadap data volume lalu lintas harian rata-rata (LHR) yang diperbaharui secara dinamis. Data VCR yang diekstraksi secara digital ini merupakan komponen utama dalam analisis *big data* transportasi, dimana nilai VCR yang melampaui ambang batas di atas 1,00 secara otomatis meningkatkan probabilitas tabrakan beruntun akibat kepadatan arus yang tidak stabil (SIG Metro Bina Marga, 2023). Sinkronisasi data VCR dengan parameter teknis lainnya dalam sistem pendukung keputusan memungkinkan otoritas transportasi untuk menetapkan skala prioritas penanganan jalan arteri secara berbasis data (*data driven decision making*).

Secara operasional, prosedur ekstraksi data dilakukan melalui rangkaian proses sistematis dalam antarmuka digital yang fleksibel. Proses dimulai dengan mengakses alamat website resmi Direktorat Jenderal Bina Marga untuk memvisualisasikan peta interaktif jaringan jalan nasional. Langkah selanjutnya yang sangat krusial adalah pemanfaatan fitur *layer list* yang menyediakan lapisan data multidimensi, mulai dari data jembatan, batas wilayah, hingga data segmen per ruas jalan setiap 100 meter. Data tersebut memungkinkan untuk dilakukan integrasi sistem antara kondisi fisik infrastruktur dengan titik-titik rawan kemacetan dan kecelakaan yang telah terpetakan secara digital (SIG Metro Bina Marga, 2023). Pemilihan lapisan data yang tepat merupakan kunci utama dalam menjamin akurasi variabel input yang akan dimasukkan ke dalam model prediksi keselamatan jalan nasional.

Setelah lapisan data ditentukan, pengguna dapat melakukan pencarian lokasi secara spesifik guna menemukan ruas jalan target. Ruas jalan yang telah terpilih kemudian akan menyajikan tabel informasi detail mencakup nama ruas, panjang segmen, status fungsi jalan, hingga nilai IRI dan VCR rata-rata. Keunggulan teknologi pada platform ini terletak pada kemampuannya melakukan verifikasi visual secara virtual melalui integrasi layanan *google street view* yang berfungsi sebagai instrumen validasi untuk parameter pelengkap seperti marka, rambu, dan objek berbahaya di sisi jalan (Arofah, 2024). Kemampuan verifikasi digital ini secara signifikan meningkatkan efisiensi audit keselamatan jalan karena memungkinkan skoring parameter kualitatif dilakukan dengan presisi tinggi tanpa kehadiran fisik di lokasi yang berisiko.

Lebih jauh lagi, platform *sigmetro* menyediakan dasbor yang memungkinkan pengguna mengekstraksi data *Annual Average Daily Traffic* (AADT) dalam format digital yang siap olah. Integrasi data AADT ke dalam perangkat lunak analisis statistik merupakan wujud nyata dari implementasi *data science* dalam rekayasa transportasi, di mana fluktuasi volume kendaraan dapat dikorelasikan dengan sisa usia pelayanan jalan (SIG Metro Bina Marga, 2023). Penggunaan data digital yang terstandarisasi ini memastikan bahwa naskah tinjauan keselamatan ini berdiri di atas landasan empiris yang kuat dan

objektif. Pada akhirnya, digitalisasi ekstraksi data melalui SIG web ini bukan hanya efisiensi administratif, melainkan sebuah rekayasa teknologi komputasi yang memungkinkan perwujudan *Smart Infrastructure* yang mampu memitigasi risiko fatalitas jalan secara proaktif melalui sintesis data yang komprehensif.

Harmoni Regulasi Teknis dan Prosedur Audit Laik Fungsi Jalan Berbasis Keselamatan

Transformasi tata kelola jalan nasional di Indonesia saat ini berada pada fase penguatan landasan regulasi yang mengintegrasikan aspek perencanaan teknis dengan audit kelaikan secara sistematis. Inti dari rekayasa infrastruktur yang berkeselamatan adalah adanya harmoni antara desain prasarana dengan prosedur evaluasi di lapangan yang didasarkan pada data aktual. Dalam kerangka rekayasa berbasis data, mandat Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Jalan berfungsi sebagai arsitektur kebijakan yang mewajibkan penyedia data valid guna mendukung sistem pendukung keputusan yang proaktif dan menetapkan bahwa penyelenggaraan jalan tidak lagi hanya mengejar konektivitas fisik, melainkan harus memenuhi asas keselamatan sebagai prioritas utama dalam setiap tahapan pengoperasiannya. Dalam kerangka rekayasa berbasis data, mandat undang-undang ini berfungsi sebagai arsitektur kebijakan yang mewajibkan penyediaan *data acquisition* yang valid untuk mendukung sistem pendukung keputusan yang proaktif. Implementasi asas ini menuntut penyelenggara jalan untuk meninggalkan metode evaluasi subjektif dan beralih ke penialain risiko yang didasarkan pada bukti empiris dan integrasi data digital.

Sinergi regulasi teknis tercermin secara nyata melalui penerbitan dua peraturan menteri yang saling melengkapi pada tahun 2023 melalui Peraturan Menteri PUPR Nomor 5 Tahun 2023 tentang Persyaratan Teknis Jalan memberikan kerangka dasar mengenai dimensi jalan, ruang bebas, hingga perlengkapan jalan yang wajib dipenuhi sejak tahap perencanaan. Standar ini kemudian disinkronkan dengan Peraturan Menteri Nomor 4 Tahun 2023 tentang Pedoman Laik Fungsi Jalan, yang berfungsi sebagai instrumen audit untuk memastikan bahwa infrastruktur tetap memenuhi standar keselamatan selama masa operasinya. Harmonisasi kedua regulasi ini menciptakan sebuah *Digital Feedback Loop*, dimana parameter teknis dalam perencanaan ditransformasikan menjadi metrik evaluasi dalam proses Uji Laik Fungsi Jalan (ULFJ) guna memitigasi risiko kecelakaan secara kontinu. Integrasi sistem ini memastikan bahwa setiap penyimpangan teknis di lapangan dapat langsung terdeteksi melalui perbandingan data standar terhadap data eksisting secara otomatis.

Dalam perspektif rekayasa teknologi, sinkronisasi peraturan ini memungkinkan pengembangan metodologi audit yang lebih adaptif terhadap dinamika lalu lintas modern. Prosedur audit keselamatan jalan kini tidak lagi dipandang sebagai hambatan birokrasi, melainkan sebagai proses ekstraksi data multidimensi yang mencakup aspek geometri, kondisi permukaan, hingga fasilitas bagi pengguna jalan rentan. Hal ini sejalan dengan target Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022 tentang RENCANA LLAJ, yang menekankan pada pentingnya ketersediaan metrik kinerja keselamatan yang terukur di setiap level atribut jalan. Melalui pendekatan integrasi sistem komputasi, setiap data atribut kualitatif yang dihasilkan dari proses audit dapat dikonversi menjadi koefisien risiko numerik guna menentukan skala prioritas penanganan segmen jalan nasional secara presisi berdasarkan algoritma probabilitas.

Lebih lanjut, transparansi hasil audit menjadi poin strategis dalam mewujudkan infrastruktur cerdas yang mampu berkomunikasi dengan penggunanya. Harmonisasi regulasi menuntut hasil evaluasi kelaikan jalan disajikan dalam format yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah namun tetap mudah dipahami oleh publik, seperti bentuk persentase probabilitas risiko. Penggunaan sistem probabilitas 0-100% ini merupakan jembatan komunikasi antara data teknis yang kompleks dengan pemahaman masyarakat awam, sekaligus memenuhi standar akuntabilitas digital dalam penyelenggaraan jalan. Dengan mengadopsi kerangka regulasi yang terintegrasi ini, penyelenggara jalan

dapat membangun sistem manajemen keselamatan jalan yang tidak hanya reaktif terhadap kejadian, tetapi mampu melakukan prediksi risiko secara dini berdasarkan standar teknis terbaru yang berlaku di Indonesia. Pada akhirnya, harmonisasi standar dan prosedur audit ini merupakan fondasi utama bagi tercapainya visi *Smart Infrastructure* dalam keselamatan transportasi nasional 2040.

Tinjauan Pilar Jalan dan Kecepatan

Pilar jalan yang berkeselamatan merupakan dimensi fundamental dalam rekayasa infrastruktur yang bertujuan untuk menciptakan lingkungan transportasi yang pemaaf. Dalam kerangka RUNK LLAJ 2021-2040, pilar ini bertransformasi dari hanya penyediaan prasarana fisik menjadi sistem yang mengintegrasikan data atribut teknis untuk memitigasi kesalahan manusia di jalan raya. Secara konseptual, keselamatan prasarana jalan nasional sangat dipengaruhi oleh konsistensi desain geometrik, kualitas permukaan perkerasan, serta efektivitas regulasi kecepatan kendaraan. Dalam perspektif teknologi komputasi, setiap parameter fisik kini dipandang sebagai variabel input multidimensi yang harus diekstraksi secara akurat guna menghasilkan pemodelan probabilitas risiko yang presisi melalui sistem cerdas yang mampu mengolah data dalam volume besar secara simultan guna memitigasi *knowledge gap* pada sistem audit konvensional.

Analisis terhadap parameter geometrik jalan dimulai dari kondisi penampang melintang, khususnya lebar lajur dan lebar bahu jalan. Berdasarkan evolusi regulasi, lebar lajur jalan arteri nasional mengalami perubahan standar dari semula 3,75 meter menurut tata cara tahun 1997, menjadi 3,6 meter pada tahun 2004, hingga pada Peraturan Menteri PUPR Nomor 5 Tahun 2023 ditetapkan menjadi 2 x 7 meter untuk jalan nasional terbagi. Secara teknis rekayasa, penyempitan lebar lajur di bawah 2,7 meter secara signifikan meningkatkan potensi tabrakan samping. Demikian pula dengan lebar di bawah yang berfungsi sebagai area pelarian darurat, defisiensi lebar bahu di atas 75% dari standar teknis akan dikonversi secara otomatis menjadi skor risiko maksimal (skor 5) dalam algoritma prediksi keselamatan guna memberikan peringatan dini bagi penyelenggara jalan mengenai potensi kegagalan ruang fungsional jalan (SIG Metro Bina Marga, 2023). Integrasi data lebar jalan ini menjadi parameter primer dalam sistem pendukung keputusan untuk menentukan kelayakan fungsi jalan nasional secara objektif dan transparan.

Aspek krusial berikutnya dalam pilar jalan adalah alinyemen horizontal dan vertikal yang harus memenuhi standar jarak pandang henti (JPH) dan jarak pandang mendahului (JPM). Rekayasa alinyemen horizontal menitikberatkan pada radius tikungan dan pemberian superelevasi yang tetap untuk mengimbangi gaya sentrifugal kendaraan. Penelitian empiris menunjukkan bahwa selisih radius tikungan antara kondisi eksisting dengan standar ketentuan yang mencapai 51% menyebabkan kecelakaan di lokasi rawan (Samsudin, 2019). Selain itu, konsistensi antar-tikungan yang diukur melalui rasio radius tikungan berdekatan menjadi variabel penting, nilai rasio di bawah 0,2 mengindikasikan perubahan geometri yang mendadak dan sangat membahayakan bagi pengemudi yang tidak siap. Dalam konteks alinyemen vertikal, kelandaian medan yang melampaui ambang batas 10% pada area pegunungan akan meningkatkan beban kerja mesin serta risiko fatalitas akibat kegagalan pengereman, terutama pada kendaraan berat yang membawa muatan berlebih (Arofah, 2024). Pemodelan proaktif mengharuskan setiap kelandaian kritis diidentifikasi sebagai *hotspot* risiko tinggi melalui integrasi data koordinat SIG guna memetakan kerentanan infrastruktur secara visual pada platform peta interaktif (SIG Metro Bina Marga, 2023).

Selain faktor geometrik statis, kekerasan permukaan jalan yang direpresentasikan melalui *International Roughness Index* (IRI) menjadi instrumen digital dalam memantau kesehatan infrastruktur secara aktual. IRI merupakan metrik ketidakrataan permukaan jalan yang didapatkan dari akumulasi naik-turunnya profil jalan per satuan jarak. Secara analisis, data IRI dikonversi menjadi variabel

fungsional dimana nilai IRI melebihi ambang batas 15 m/km memicu peningkatan probabilitas insiden akibat degradasi stabilitas ban terhadap permukaan jalan, termasuk saat kondisi basah (Arofah dkk, 2021). Transformasi teknologi kini memungkinkan ekstraksi data IRI dilakukan melalui sensor akselerometer pada ponsel pintar melalui program *Roadroid* yang dikategorikan sebagai standar ASTM E 950-94, dimana hasil penguurannya memiliki tingkat korelasi yang sangat tinggi mencapai 99,7% dengan nilai *Surface Distress Index* (SDI) pada perkerasan lentur (Arofah dkk, 2021). Data digital yang didapatkan secara *real-time* ini sangat krusial untuk menyeimbangkan algoritma komputasi, mengingat permukaan jalan yang terlalu rata sering kali membuat pengendara lengah dan memacu kecepatan tinggi melalui batas aman, sehingga sistem harus memberikan rekomendasi penempatan instrumen peringatan secara presisi berdasarkan analisis data harian rata-rata (SIG Metro Bina Marga, 2023).

Pilar kecepatan berkeselamatan melengkapi rekayasa infrastruktur dengan mengatur interaksi dinamis antara kendaraan dan jalan. Kecepatan operasional (V85) melampaui batas kecepatan hukum merupakan indikator utama kegagalan manajemen kecepatan di suatu ruas jalan. Selisih kecepatan antara 30 hingga 40 km/jam di atas batas resmi secara sistematis meningkatkan probabilitas fatalitas kecelakaan secara masif. Kuantifikasi variabel kecepatan ini dilakukan dengan membandingkan kecepatan operasional aktual dengan kecepatan rencana yang ditetapkan dalam Pedoman Desain Geometrik Jalan (PDGJ) 2021 guna memastikan bahwa desain teknis tetap relevan dengan perilaku pengemudi di lapangan (Bina Marga, 2021). Oleh karena itu, rekayasa pengaturan kecepatan melalui instrumen fisik seperti kerb penyempit, pita pengkaduh, polisi tidur, hingga pembuatan marka tengah bertekstur menjadi solusi teknis untuk mereduksi energi benturan biologis. Penempatan alat pengendali ini harus didasarkan pada klasifikasi fungsi jalan dan tipe area, di mana area perkotaan menuntut kecepatan yang jauh lebih ketat guna melindungi pengguna jalan rentan.

Sinkronisasi antara parameter geometrik, data IRI, dan rekayasa kecepatan harus diolah melalui pendekatan *data science* untuk menghasilkan *output* probabilitas kecelakaan dalam rentang 0-100%. Metodologis ini sekaligus meniadakan subjektivitas dalam audit keselamatan jalan karena setiap parameter didasarkan pada data ekstraksi digital dari platform Web-SIG yang terintegrasi dengan *Google Street View* untuk verifikasi visual (SIG Metro Bina Marga, 2023). Dengan mengintegrasikan seluruh parameter keselamatan tersebut ke dalam satu arsitektur data, penyelenggara jalan dapat melakukan audit keselamatan secara proaktif tanpa harus menunggu terjadinya kejadian kecelakaan yang memakan korban jiwa. Implementasi infrastruktur berbasis data ini pada akhirnya menjadi kunci utama dalam mencapai target nasional penurunan fatalitas sebesar 85% pada tahun 2040 melalui transformasi menyeluruh dari data mentah lapangan menjadi kebijakan rekayasa yang terukur, akuntabel, dan berkelanjutan sesuai amanat Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022.

Tinjauan Pilar Manusia dan Kendaraan

Keberhasilan reduksi angka fatalitas jalan dalam kerangka *Safe System Approach* sangat bergantung pada sejauh mana sistem mampu mengintegrasikan faktor perilaku manusia dan kelaikan mekanis kendaraan ke dalam satu model manajemen risiko yang terpadu. Dalam paradigma rekayasa infrastruktur berbasis data, pilar manusia dan kendaraan tidak lagi dipandang sebagai anomali eksternal yang sulit dikendalikan, melainkan sebagai variabel determinan yang dapat dikuantifikasikan melalui parameter digital (Arofah, 2024). Transformasi dari audit keselamatan konvensional menuju sistem cerdas menuntut adanya konversi parameter kualitatif perilaku pengemudi dan kondisi fisik kendaraan menjadi bobot risiko numerik guna menghasilkan angka probabilitas kecelakaan yang akurat, transparan, dan proaktif. Tinjauan ini membedah dimensi perilaku pengemudi, kebutuhan kelompok inklusi, serta dampak rekayasa dari muatan berlebih terhadap interitas sistem keselamatan prasarana jalan nasional.

Faktor manusia merupakan faktor dominan dalam ekosistem transportasi, di mana estimasi data menunjukkan bahwa kelalaian pengguna jalan bertanggungjawab atas mayoritas kejadian kecelakaan di Indonesia. Dalam model rekayasa yang dikembangkan, variabel usia menjadi salah satu metrik krusial dalam menentukan koefisien risiko pada algoritma prediksi. Secara empiris, pengemudi dengan rentang usia di atas 50 tahun cenderung memiliki tingkat kehati-hatian yang lebih tinggi dan tingkat pelanggaran rambu yang lebih rendah dibandingkan dengan kelompok usia di bawah 25 tahun (Putranto dkk, 2006). Sebaliknya, data lapangan mengindikasikan bahwa pengemudi muda memiliki kecenderungan melakukan manuver agresif yang meningkatkan energi kinetik saat benturan terjadi (Jalaludin dkk, 2022). Dalam arsitektur komputasi keselamatan ini, perbedaan karakteristik usia tersebut tidak hanya dideskripsikan secara naratif, melainkan diintegrasikan sebagai variabel input multidimensi dimana dominasi pengemudi usia muda pada suatu ruas akan secara otomatis meningkatkan skor kerentanan infrastruktur dalam sistem pendukung keputusan.

Selain faktor demografis, perilaku multitasking, khususnya penggunaan telepon seluler saat mengemudi merupakan parameter kritis yang memicu ketidakstabilan arus lalu lintas. Secara teknis, penggunaan telepon seluler untuk navigasi maupun komunikasi menyebabkan penurunan konsentrasi yang berdampak pada pengurangan kecepatan kendaraan secara mendadak hingga mencapai dua kali lipat dari kecepatan operasional normal (Choudhary & Velaga, 2017). Fenomena perlambatan mendadak ini menciptakan fluktuasi arus yang sering kali gagal diantisipasi oleh pengemudi di belakangnya, sehingga meningkatkan probabilitas tabrakan dari belakang secara signifikan (Papantoniou dkk, 2018). Integrasi parameter perilaku digital ini ke dalam pemodelan proaktif memungkinkan penyelenggara jalan untuk melakukan identifikasi lokasi rawan melalui analisis analitik hambatan samping, sehingga langkah mitigasi teknis dapat diprioritaskan pada segmen dengan intensitas gangguan konsentrasi pengemudi yang tinggi.

Dimensi inklusivitas prasarana terhadap pengguna jalan rentan, termasuk penyandang disabilitas, lansia, dan pejalan kaki, juga menjadi variabel penentu dalam pemeringkatan keselamatan jalan nasional. Sesuai dengan mandat Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022, penyelenggara jalan wajib memenuhi asas keselamatan bagi seluruh kelompok masyarakat tanpa terkecuali. Parameter keramahan disabilitas dalam audit digital mencakup ketersediaan ubin pemandu, kelandaian trotoar yang aksesibel bagi kursi roda, hingga fasilitas penyebrangan yang dilengkapi sinyal audio (Bina Marga, 2023). Ketidakterediaan fasilitas ini memaksa pengguna jalan rentan untuk melakukan mobilitas pada badan jalan, yang secara otomatis menciptakan titik konflik langsung dengan kendaraan bermotor kecepatan tinggi (Kurniat dkk, 2017). Oleh karena itu, kualitas fasilitas pejalan kaki perlu menjadi variabel scoring dalam model komputasi, dan ketiadaan akses disabilitas akan memberikan kontribusi negatif terhadap nilai probabilitas keselamatan keseluruhan segmen jalan tersebut.

Beralih pada pilar kendaraan, isu muatan berlebih atau *overloading* menjadi tantangan rekayasa utama dalam menjaga durabilitas infrastruktur jalan nasional. Fenomena kendaraan dengan dimensi dan beban berlebih berkontribusi langsung secara percepatan degradasi permukaan jalan yang diukur melalui nilai IRI (Arofah, 2024). Secara mekanis, kendaraan yang membawa beban melampaui kapasitas fabrikasi standar memiliki jarak pengereman yang jauh lebih panjang, dimana pada kondisi alinyemen vertikal curam akan memicu kegagalan sistem pengereman (Luthfiyani & Ahyudanari, 2021). Dalam perspektif integrasi sistem, data muatan berlebih dari unit penimbangan disintesis dengan data IRI dari platform SIG Metro guna memetakan korelasi antara beban gandar dengan tingkat kerusakan jalan yang proaktif. Meskipun peluang kecelakaan langsung akibat muatan berlebih tercatat hanya sebesar 6,25% dalam beberapa studi, namun dampak sekundernya terhadap kerusakan perkerasan menciptakan risiko permanen yang menurunkan tingkat keselamatan bagi seluruh pengguna prasarana (Mauludi dkk, 2021).

Lebih lanjut, dominasi tahun produksi kendaraan dalam suatu wilayah turut memengaruhi profil

risiko teknis dalam ekosistem transportasi. Kendaraan dengan usia operasional tua, khususnya produksi di bawah tahun 2000, umumnya memiliki keterbatasan fitur keselamatan aktif dan pasif (Nurdjanag & Puspitasari, 2017). Pengguna armada tua dalam volume besar meningkatkan potensi insiden akibat kegagalan komponen mekanis yang sulit dideteksi melalui inspeksi visual biasa. Variabel dominasi usia kendaraan dapat diproses bersama dengan data volume lalu lintas untuk menghasilkan estimasi tingkat keparahan korban berdasarkan toleransi benturan biologis tubuh manusia. Hal ini meningkatkan penyelenggara jalan untuk memitigasi risiko fatalitas melalui rekayasa kecepatan yang disesuaikan dengan rata-rata kelaikan kendaraan yang melintas di ruas tersebut (Youth for Road Safety Academy, 2023).

Integrasi seluruh parameter dari pilar manusia dan kendaraan ini diolah melalui algoritma sistem multi-kriteria untuk menghasilkan keluaran berupa persentase probabilitas kecelakaan dalam rentang 0-100%. Pendekatan berbasis data ini merupakan lompatan metodologis dari audit keselamatan tradisional yang sering kali mengabaikan interaksi dinamis antara perilaku pengguna dan kelaikan mekanis armada. Melalui ketersediaan basis data digital yang komprehensi, penyelenggara jalan dapat melakukan langkah mitigasi yang paling efisien dalam upaya mencapai target nasional penurunan fatalitas sebesar 85% pada tahun 2040. Implementasi infrastruktur cerdas berbasis data ini pada akhirnya akan mewujudkan tata kelola transportasi yang lebih akuntabel, dimana setiap keputusan rekayasa didasarkan pada sintesis data yang objektif dan ilmiah untuk perlindungan nyawa manusia secara berkelanjutan.

Integrasi Data dalam Pengambilan Keputusan

Transformasi tata kelola infrastruktur jalan nasional saat ini sedang mengalami pergeseran paradigma fundamental, beralih dari pendekatan audit keselamatan jalan tradisional yang cenderung bersifat reaktif menuju model manajemen risiko yang proaktif melalui pemodelan komputasi. Esensi utama dari rekayasa infrastruktur modern dalam kerangka *safe system approach* adalah kemampuan sistem untuk memprediksi potensi insiden secara dini sebelum terjadi fatalitas di lapangan. Pengambilan keputusan strategis dalam konteks ini tidak lagi didasarkan semata-mata pada data historis kecelakaan kepolisian yang secara teknis mengharuskan terjadinya korban jiwa terlebih dahulu, melainkan pada integrasi variabel teknis multidimensi yang diolah melalui arsitektur sistem pendukung keputusan. Dengan mensintesis berbagai atribut fungsional jalan ke dalam satu kerangka analitik yang terpadu, penyelenggara prasarana jalan dapat memperoleh gambaran profil risiko yang lebih objektif, saintifik, dan terukur guna menentukan skala prioritas penanganan jalan nasional sebelum krisis keselamatan terjadi.

Secara metodologis, sistem pendukung keputusan ini beroperasi dengan menerapkan prinsip analisis multikriteria untuk mengonversi seluruh temuan kualitatif di lapangan menjadi data kualitatif yang presisi untuk keperluan input algoritma. Setiap variabel infrastruktur, mulai dari kondisi geometrik jalan hingga aspek operasional dinamis seperti volume lalu lintas dinilai menggunakan skala defisiensi fungsional komputasi 1 hingga 5. Skor 1 merepresentasikan kondisi prasarana yang ideal sesuai dengan standar regulasi keselamatan terbaru, sedangkan skor 5 menunjukkan tingkat kerentanan teknis maksimal yang telah melampaui ambang batas keamanan yang diizinkan. Proses kuantifikasi ini menjadi sangat krusial dalam rekayasa teknologi karena berfungsi untuk meniadakan subjektivitas pengamat di lapangan, sehingga setiap segmen jalan nasional memiliki profil risiko digital yang dapat diperbandingkan secara transparan melalui platform SIG. Data yang telah diskor secara sistematis tersebut kemudian diintegrasikan melalui algoritma matematis untuk menghasilkan keluaran tunggal berupa persentase probabilitas kecelakaan dalam rentang nilai 0 hingga 100 persen dengan rincian kategori yaitu 0% adalah sangat kecil, 1%-25% adalah kecil, 26%-50% adalah sedang, 51%-75% adalah besar, dan >75% sangat besar.

Keunggulan strategis dari penggunaan format probabilitas ini terletak pada transparansi informasi dan kemudahan interpretasi bagi para pemangku kepentingan maupun masyarakat luas sebagai pengguna jalan. Berbeda dengan sistem pemeringkatan bintang konvensional yang sering kali memiliki keterbatasan pemahaman di luar kelompok teknis tertentu, penyajian risiko dalam bentuk persentase mampu memberikan narasi yang lebih komunikatif mengenai derajat bahaya suatu ruas jalan secara aktual. Melalui visualisasi data yang transparan hasil integrasi platform digital sigmetro.binamarga.pu.go.id, otoritas transportasi nasional dapat dengan cepat mengidentifikasi titik lokasi rawan dan segera mengalokasikan anggaran pemeliharaan secara lebih akurat dan tepat sasaran. Pendekatan berbasis data ini memastikan bahwa setiap investasi pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur didasarkan pada kebutuhan empiris untuk mereduksi angka fatalitas nasional secara signifikan sebagaimana diamanatkan dalam visi keselamatan jalan tahun 2040.

PENUTUP

Kesimpulan Utama

Kajian ini menegaskan bahwa rekonstruksi paradigma keselamatan jalan di Indonesia harus bertransformasi dari pendekatan reaktif menuju skema proaktif yang berlandaskan pada kekuatan komputasi data infrastruktur. Kesimpulan fundamental yang didapatkan adalah bahwa pemodelan probabilitas berbasis algoritma mampu menyajikan potret risiko yang jauh lebih objektif dibandingkan dengan observasi manual konvensional yang kerap terdistorsi oleh subjektivitas auditor. Melalui pemrosesan dataset infrastruktur yang sistematis, sistem mampu mengejawantahkan kondisi teknis jalan ke dalam bentuk indikator kerawanan yang presisi yang memberikan kejelasan bagi penyelenggara jalan dalam mengidentifikasi titik-titik kritis pada koridor jalan nasional. Penggunaan pendekatan komputasi ini membuktikan bahwa faktor kelaikan jalan dapat dikuantifikasi secara mendalam tanpa harus bergantung pada data historis kecelakaan, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan secara lebih saintifik dan selaras dengan kerangka regulasi keselamatan transportasi yang berlaku.

Lebih lanjut, penelitian menyimpulkan bahwa keandalan mesin komputasi dalam mengolah variabel teknis jalan mampu mereduksi ambiguitas dalam pengambilan keputusan. Dengan beralih dari metode reaktif ke arah sistem pendukung keputusan yang berbasis pada kekuatan data, otoritas transportasi dapat meminimalisir kekeliruan dalam proses audit kelaikan fungsi jalan. Keberhasilan transformasi data fisik menjadi informasi digital ini menandai langkah maju dalam standarisasi penilaian infrastruktur yang lebih akuntabel dan visioner, dimana setiap kebijakan perbaikan jalan didasarkan pada bukti empiris yang diproses melalui mesin komputasi tingkat lanjut. Secara keseluruhan, studi ini menegaskan bahwa masa depan keselamatan transportasi nasional sangat bergantung pada adopsi teknologi informasi yang mampu memprediksi dinamika risiko jalan secara transparan, demi menjamin keamanan publik yang lebih berkelanjutan dan sesuai dengan visi pembangunan infrastruktur cerdas di masa depan.

Hasil dari pemodelan komputasi ini memiliki relevansi strategis dalam mentransformasi model tata kelola aset jalan di lingkungan instansi pemerintah. Pemanfaatan sistem digital ini memungkinkan terjadinya sinkronisasi program penanganan jalan yang lebih presisi, di mana penentuan skala prioritas tidak lagi didasarkan pada asumsi, melainkan pada pemetaan risiko yang terautomasi. Dengan mengintegrasikan sistem ini ke dalam basis data nasional, pemerintah dapat melakukan optimalisasi anggaran pemeliharaan secara lebih akurat dan akuntabel. Implikasi nyata dari penerapan teknologi ini adalah terciptanya koordinasi lintas sektoral yang lebih kuat melalui penyediaan sumber data tunggal (*single source of truth*) yang dapat diakses secara transparan. Hal ini menjadi fondasi penting dalam penyusunan rencana aksi keselamatan jalan yang lebih terukur, sekaligus menjadi instrumen evaluasi kinerja infrastruktur yang lebih saintifik dalam mendukung target penurunan angka fatalitas nasional.

Arah Kebijakan dan Pemanfaatan Sistem

Implementasi sistem komputasi ini memberikan landasan baru bagi otoritas transportasi dalam mentransformasikan model tata kelola aset jalan nasional ke arah yang lebih teknokratis. Pemanfaatan arsitektur digital ini memungkinkan terjadinya pergeseran fundamental dalam proses pengambilan keputusan, dimana penentuan skala prioritas intervensi lapangan kini didasarkan pada parameter risiko yang terukur secara sistematis. Arah kebijakan ke depan perlu mengintegrasikan luaran komputasi ini ke dalam Standar Operasional Prosedur (SOP) audit keselamatan jalan untuk memastikan konsistensi penilaian di seluruh wilayah.

Lebih lanjut, arah kebijakan harus mendorong terciptanya sumber data tunggal yang mampu mengoneksikan berbagai pemangku kepentingan dalam satu ekosistem pengawasan yang transparan. Keberadaan sistem pendukung keputusan ini menjadi instrumen evaluasi kinerja infrastruktur yang sangat krusial dalam mendukung pencapaian target-target strategis nasional di bidang keselamatan transportasi darat. Penerapan ini secara luas diharapkan dapat menjadi kompas bagi penyusunan anggaran berbasis risiko, di mana setiap alokasi dana pemeliharaan jalan berkontribusi langsung pada penurunan potensi bahaya. Pada akhirnya, integrasi teknologi ini akan memperkuat legitimasi teknis setiap kebijakan pembangunan jalan, memastikan bahwa investasi infrastruktur selaras dengan visi perlindungan nyawa pengguna jalan secara maksimal dan berkesinambungan.

Saran Digitalisasi Audit Masa Depan

Menyongsong era transportasi cerdas, digitalisasi audit keselamatan jalan perlu diarahkan pada pengembangan ekosistem yang sepenuhnya terotomasi dengan memanfaatkan teknologi sensorik mutakhir dan kecerdasan buatan. Disarankan adanya transisi metode akuisisi data lapangan dari cara manual menuju penggunaan perangkat *mobile mapping* dan LiDAR yang mampu melakukan pemindaian geometri jalan secara komprehensif untuk kemudian diinput ke dalam mesin komputasi secara otomatis. Otomasi ini sangat penting untuk menghilangkan keterlambatan pemrosesan data teknis yang kompleks menjadi informasi risiko yang instan bagi para pembuat kebijakan. Lebih lanjut pengembangan algoritma di masa depan harus mulai mengeksplorasi penggunaan *machine learning* untuk menganalisis pola risiko dinamis yang dipengaruhi oleh fluktuasi cuaca ekstrem dan karakteristik beban lalu lintas yang terus berubah.

Integrasi basis data nasional ke dalam satu ekosistem digital terpadu menjadi hal yang mendesak, sehingga setiap pembaharuan kondisi fisik jalan dapat langsung memicu perhitungan ulang nilai risiko secara otomatis. Pemerintah disarankan untuk mulai mengimplementasikan konsep *digital twin* sebagai platform simulasi digital untuk menguji efektivitas skenario perbaikan jalan sebelum dilakukan eksekusi fisik di lapangan. Dengan mendorong digitalisasi yang menyeluruh, sistem audit keselamatan tidak lagi sekedar menjadi instrumen administratif, melainkan bertransformasi menjadi sistem yang berkeselamatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Omari, M. M., Aty, M. A., & Cai, Q. (2021). Crash Analysis and Development of Safety Performance Functions for Florida Roads in the Framework of the Context Classification System. *Journal of Safety Research*, (2021)
- Anggraini, R., Alvishari, & Sugiarto. (2021). Persepsi Keselamatan Berkendara Pengguna Sepeda Motor di Kota Banda Aceh terhadap Pelanggaran Lalu Lintas dan Kelengkapan Atribut. *Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung*, 28(3), 329-336
- Arofah, M. A. (2024). Pengembangan Metode Prediksi Probabilitas Kecelakaan Untuk Digunakan Pada Ruas Jalan Nasional Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022 (Tesis Magister).

Universitas Trisakti, Jakarta

- Arofah, M. A., Prahara, E., Nataadmadja, A. D., & Pionar, R. G. (2021). Correlation Of Vehicle Speed To Road Surface Condition Using Roadroid Application. *IOP Conferences Series Earth and Environmental Science*, 794(012063)
- Arung, V. C., & Widyastuti, H. (2020). Penentuan Daerah Rawan Kecelakaan Lalu Lintas di Kota Surabaya. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 18(1), 17–22
- Aziz, S. R., & Dissanayake, S. (2019). A Comparative Study of Newly Developed Kansas-Specific Safety Performance Functions with HSM Models for Rural Four Lane Divided Highway Segments. *Journal of Transportation Safety & Security*, 13(2), 180-205
- Bina Marga. (2021). Pedoman Desain Geometrik Jalan (PDGJ). Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
- Bina Marga. (2023). Petunjuk Teknis Uji Laik Fungsi Jalan dengan Pemeringkatan Bintang. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
- Castello, D. L., Findley, D. J., & Garcia, A. (2020). Comparison of the highway Safety Manual Predictive Method with Safety Performance Functions Based on Geometric Design Consistency. *Journal of Transportation Safety & Security*, 14(13), 1365-1386
- Choudhary, P., & Velaga, N. R. (2017). Mobile Phone Use During Driving: Effects On Speed And Effectiveness Of Driver Compensatory Behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, 106, 370-378
- Colagrande, S. (2022). A Methodology for the Characterization of Urban Road Safety Through Accident Data Analysis. *Transportation Research Procedia*, 60, 504–511
- Deflorio, F., & Carboni, A. (2021). Safety Systems and Vehicle Generations: Analysis of Accident and Travel Data Collected Using Event Data Recorders. *Journal of Transportation Safety & Security*, 14(8), 1307 – 1332
- Idalin, F., Malkhamah, S., & Suparna, L. B. (2018). Pengembangan Metode Prediksi Probabilitas Kecelakaan Pada Suatu Ruas Jalan Antar Kota Berdasarkan Kondisi Geometrik Jalan dan Karakteristik Lalu Lintas. *Jurnal Transportasi*, 18(2), 145 – 152
- Jalaludin, & Widyaningsih, N. (2022). Penentu Perilaku Keselamatan Pengendara Sepeda Motor dengan Pendekatan Structural Equation Modeling. *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 24(1), 11-20
- Kurniati, N. L. (2017). Pengaruh Disiplin Pengendara Sepeda Motor, Kondisi Sepeda Motor Dan Jalan Terhadap Keselamatan Berlalu Lintas Di Kota Bogor Tahun 2016 (Survei Jalan Raya Tajur). *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 19(3), 195-204
- Luthfiyani, F. P., & Ahyudanari, E. (2021). Karakteristik Pengemudi Sepeda Motor Dalam Model Peluang Kecelakaan. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 19(2), 151 – 158
- Mauludi, A. A., Djunaidi, Z., & Arif, L. S. (2021). Perilaku Berisiko Sebagai Faktor Penyebab Kecelakaan Pada Pengemudi Sepeda Motor Komersial: Systematic Review. *Jurnal Keselamatan Transportasi Jalan*, 8(1), 12-25
- Nurdjanah, N., & Puspitasari, R. (2017). Faktor yang Berpengaruh terhadap Konsentrasi Pengemudi. *Warta Penelitian Perhubungan*, 29(1), 141-157
- Papantoniou, P., Antooniou, C., Yannis, G., & Pavlou, D. (2018). Which Factors Affect Accident Probability at Unexpected Incidents? A Structural Equation Model Approach. *Journal of Transportation Safety & Security*, 11(5), 544-561
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 4 Tahun 2023 tentang Pedoman Laik Fungsi Jalan
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 5 Tahun 2023 tentang Perencanaan dan Persyaratan Teknis Jalan

- Peraturan Presiden Nomor 1 Tahun 2022 tentang Rencana Umum Nasional Keselamatan Lalu Lintas Angkutan Jalan
- Ridha, M., & Sumabrata, J. (2014). Kajian Karakteristik Lalu Lintas di Jalan Tol serta Korelasi Dengan Pola Kecelakaan. *Warta Penelitian Perhubungan*, 20(1)
- Samsudin, I. (2019). Analisis Faktor Penyebab Kecelakaan Pada Ruas Jalan Ir. H. Alala Kota Kendari Ditinjau dari Prasarana dan Geometrik Jalan. *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 21(1), 59 – 66
- SIG Metro Bina Marga. (2023). Aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG) Jalan Nasional Metropolitan dan Kota Besar. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga
- Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Jalan
- YOURS Academy. (2023). The Safe System Approach And The Risk Factors
- Zahrar, E. S., Tan, S. J., Tan, E. H., & Putra, N. A. (2019). Spatial Analysis of Road Traffic Accident Hotspots: Evaluation and Validation of Recent Approaches Using Road Safety Audit. *Journal of Transportation Safety & Security*, 13(6), 575-604