

# MODEL PENILAIAN KERENTANAN JARINGAN JALAN TERHADAP GUNCANGAN GEMPA DAN GANGGUAN AKSESIBILITAS PADA WILAYAH KEPULAUAN

Jeliawati<sup>1</sup>, Reni<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Seruyan, Indonesia

<sup>2</sup> Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Seruyan, Indonesia

<sup>1</sup> Email [jiliawati09@gmail.com](mailto:jiliawati09@gmail.com) ; <sup>2</sup> Email [reni\\_aaa@gmail.com](mailto:reni_aaa@gmail.com)

## Abstract

This study aims to design a road network vulnerability assessment model and measure the extent of spatial accessibility degradation due to earthquake shaking in island regions. Seismically prone island regions feature linear topographical characteristics and limited alternative routes, making linear infrastructure damage a major trigger for severe regional isolation. Employing a spatial quantitative approach through the integration of Geographic Information Systems (GIS), HAZUS-FEMA physical vulnerability matrices, and graph theory analysis, this study simulates multiple earthquake scenarios. The simulation results demonstrate an exponential non-linear relationship between increasing earthquake magnitudes, the number of damaged road segments, and the reduction in network topological efficiency. Damage to critical road links triggers surges in emergency travel times and total isolation in specific sub-islands. This assessment model successfully maps the most vital infrastructure segments requiring structural retrofitting priorities, serving as a strategic guide for policymakers in enhancing transportation system resilience in disaster-prone areas.

**Keywords:** Road Network Vulnerability, Earthquake Shaking, Accessibility Analysis, Geographic Information Systems, Island Regions.

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang model penilaian kerentanan jaringan jalan dan mengukur tingkat penurunan aksesibilitas spasial akibat guncangan gempa di wilayah kepulauan. Wilayah kepulauan yang rawan gempa memiliki karakteristik topografi linier dan keterbatasan rute alternatif, sehingga kerusakan infrastruktur linier berpotensi memicu isolasi wilayah yang parah. Menggunakan pendekatan kuantitatif spasial melalui integrasi Sistem Informasi Geografis (GIS), matriks kerentanan fisik HAZUS-FEMA, dan analisis teori graf, penelitian ini mensimulasikan beberapa skenario gempa rencana. Hasil simulasi menunjukkan adanya hubungan non-linier eksponensial antara peningkatan magnitudo gempa, jumlah kerusakan segmen jalan, dan penurunan efisiensi topologi jaringan. Kerusakan pada ruas jalan kritis memicu lonjakan waktu tempuh darurat serta isolasi total pada sub-pulau tertentu. Model penilaian ini berhasil memetakan segmen infrastruktur paling vital yang memerlukan prioritas perkuatan struktural, sehingga dapat menjadi panduan strategis bagi pengambil kebijakan dalam meningkatkan ketahanan sistem transportasi di kawasan rawan bencana.

**Kata Kunci:** Kerentanan Jaringan Jalan, Guncangan Gempa, Analisis Aksesibilitas, Sistem Informasi Geografis, Wilayah Kepulauan.

## PENDAHULUAN

Jaringan jalan raya memegang peranan yang sangat fundamental sebagai tulang punggung sistem transportasi darat dan penggerak utama roda perekonomian wilayah. Di kawasan kepulauan, di mana pusat-pusat aktivitas penduduk, pelabuhan, fasilitas kesehatan, dan logistik pangan terdistribusi secara terpisah di antara pulau-pulau kecil, keandalan fungsional jaringan jalan menjadi penentu utama kelangsungan hidup dan mobilitas regional. Menurut Rodrigue, Comtois, and Slack (2017), infrastruktur transportasi di wilayah

kepulauan bersifat kritis karena keterbatasan rute alternatif, sehingga setiap gangguan fisik pada satu ruas jalan dapat melumpuhkan seluruh sistem jaringan distribusi wilayah tersebut secara total.

Namun, posisi geografis wilayah kepulauan di Indonesia yang terletak di zona pertemuan lempeng tektonik utama menempatkannya pada tingkat kerawanan bencana alam yang sangat tinggi, khususnya gempabumi tektonik berulang. Ancaman guncangan gempa bumi tidak hanya berpotensi merusak elemen struktur fisik jalan seperti jembatan, tembok penahan tanah, dan perkerasan, tetapi juga memicu bencana sekunder berupa longsor lereng (slope failures) dan likuefaksi tanah dasar. Sebagaimana dikemukakan oleh Kramer (1996), kerentanan geoteknik dan struktural pada koridor transportasi di daerah rawan gempa menuntut adanya evaluasi risiko yang komprehensif guna mengantisipasi kelumpuhan mendadak pasca-bencana.

Ketika terjadi gempa bumi kuat di wilayah kepulauan, kerusakan fisik pada jaringan jalan langsung berimplikasi pada terputusnya aksesibilitas spasial menuju fasilitas-fasilitas vital darurat. Terhambatnya proses evakuasi korban, tertundanya distribusi bantuan kemanusiaan, serta isolasi wilayah terdampak sering kali menjadi masalah krusial pada jam-jam pertama setelah bencana terjadi. Menurut Caterbow (2011), dimensi aksesibilitas pasca-bencana merupakan indikator esensial yang menentukan tingkat ketahanan (resilience) suatu wilayah terhadap guncangan eksternal.

Selama ini, evaluasi keamanan infrastruktur transportasi pasca-gempa cenderung bersifat reaktif dan terfokus pada perbaikan fisik bangunan struktural tunggal semata, seperti jembatan atau gedung pelayanan, tanpa memodelkan dampak sistemik terhadap keseluruhan jaringan jalan (network-level vulnerability). Pendekatan parsial ini gagal menangkap dinamika topologis jaringan ketika ruas-ruas jalan tertentu mengalami putus total atau penurunan kapasitas arus lalu lintas. Sebagaimana ditekankan oleh Berdica (2002), kerentanan sistem transportasi harus didefinisikan sebagai kerentanan kinerja jaringan (network vulnerability) yang mengintegrasikan aspek ketahanan fisik infrastruktur dengan tingkat penurunan aksesibilitas spasial bagi pengguna jalan.

Dalam konteks pengembangan ilmu transportasi modern, pemodelan kerentanan jaringan jalan (road network vulnerability assessment) telah berkembang pesat melalui penerapan sistem informasi geografis (Geographic Information Systems - GIS) dan analisis teoretis graf (graph theory). Pendekatan ini memungkinkan para peneliti untuk memetakan jalur-jalur kritis (critical links) yang apabila mengalami kerusakan akibat gempa, akan memberikan dampak paling masif terhadap peningkatan waktu tempuh dan keterisolasian wilayah. Menurut Taylor, Sekhar, and D'Este (2006), identifikasi ruas jalan kritis berbasis analisis topologi jaringan sangat krusial untuk memprioritaskan alokasi anggaran mitigasi dan perkuatan struktur sebelum bencana terjadi.

Berbagai indeks kerentanan jaringan telah diusulkan dalam literatur internasional, namun sebagian besar model tersebut dirancang untuk wilayah daratan kontinental dengan topografi dan jaringan alternatif yang padat. Karakteristik wilayah kepulauan yang memiliki konektivitas linier terbatas, topografi berbukit di sepanjang pesisir, serta tingginya kerentanan geologis menuntut pengembangan model penilaian kerentanan yang disesuaikan dengan konteks lokal kepulauan. Sebagaimana dicatat oleh Mattsson and Jenelius (2015), evaluasi kerentanan pada jaringan transportasi wilayah kepulauan harus memperhitungkan faktor hambatan geografis antarpulau dan ketergantungan fungsional pada simpul-simpul pelabuhan penyeberangan.

Pemodelan kerentanan jaringan jalan terhadap guncangan gempa memerlukan pendekatan multi-kriteria dan multi-tahap, yang memadukan tingkat bahaya seismik (seismic hazard), kerentanan fisik elemen infrastruktur (physical vulnerability), serta analisis penurunan aksesibilitas spasial (accessibility degradation). Melalui integrasi pemodelan spasial berbasis GIS dan algoritma matriks jarak terpendek (shortest path algorithms), peneliti dapat mensimulasikan berbagai skenario penutupan ruas jalan akibat gempa dan mengukur tingkat penurunan aksesibilitas menuju fasilitas evakuasi darurat. Menurut Church and Murray (2009), analisis aksesibilitas spasial merupakan instrumen terukur yang mampu menterjemahkan kerusakan fisik infrastruktur menjadi dampak sosial-ekonomi bagi masyarakat.

Meskipun urgensi mitigasi bencana di wilayah kepulauan sangat tinggi, kajian yang secara khusus membangun model penilaian kerentanan jaringan jalan akibat guncangan gempa dan dampaknya terhadap aksesibilitas di pulau-pulau kecil Indonesia masih sangat terbatas. Sebagian besar studi mitigasi infrastruktur jalan di daerah masih bersifat administratif dan belum memanfaatkan pemodelan spasial prediktif tingkat lanjut. Adachi and Ellingwood (2008) menyatakan bahwa kuantifikasi kerugian fungsional jaringan transportasi pasca-gempa adalah fondasi utama dalam merumuskan strategi manajemen risiko bencana yang efektif dan berkelanjutan.

Melalui penelitian ini, dibangun sebuah model penilaian kerentanan jaringan jalan yang komprehensif untuk mengevaluasi dampak guncangan gempa terhadap penurunan tingkat aksesibilitas di wilayah kepulauan. Pendekatan pemodelan ini menggabungkan data percepatan puncak tanah (Peak Ground Acceleration - PGA), peta sebaran kerentanan longsor lereng, analisis topologi jaringan jalan berbasis teori graf, serta perhitungan indeks aksesibilitas spasial (accessibility indices). Sebagaimana ditekankan oleh Taylor (2017), pemodelan

kerentanan jaringan akan membantu para pembuat kebijakan dalam merancang tata ruang wilayah yang lebih tangguh dan adaptif terhadap ancaman bencana geologis.

Kontribusi dari penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya khazanah literatur rekayasa transportasi dan mitigasi bencana, tetapi juga menawarkan instrumen keputusan praktis bagi pemerintah daerah dan instansi terkait dalam menentukan prioritas investasi perkuatan infrastruktur jalan. Dengan tersusunnya model penilaian yang akurat, risiko kelumpuhan mobilitas wilayah kepulauan akibat guncangan gempa dapat diminimalkan secara sistematis.

Berdasarkan latar belakang pemikiran dan landasan konseptual dari para ahli tersebut, perumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana merancang model spasial dan analitis untuk mengevaluasi tingkat kerentanan fisik jaringan jalan serta mengukur besar penurunan aksesibilitas spasial akibat guncangan gempa di wilayah kepulauan.

### METODELOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dirancang sebagai kerangka kerja analitis dan komputasional yang sistematis untuk mengevaluasi tingkat kerentanan fisik jaringan jalan serta mengukur besar penurunan aksesibilitas spasial akibat guncangan gempa di wilayah kepulauan. Menurut Creswell and Creswell (2018), penelitian kuantitatif berbasis spasial dan pemodelan sistem jaringan memerlukan integrasi data empiris lapangan dengan algoritma komputasi yang terstandar agar hasil analisis mampu merepresentasikan kondisi risiko bencana secara akurat dan objektif.

Pendekatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif spasial melalui kombinasi Sistem Informasi Geografis (Geographic Information Systems - GIS) dan Analisis Teori Graf (Graph Theory). Pendekatan ini dipilih karena kemampuannya dalam memetakan interaksi topologis antarruas jalan, memperhitungkan sebaran bahaya seismik secara spasial, serta mensimulasikan dampak penutupan jalur terhadap penurunan mobilitas regional. Sebagaimana dikemukakan oleh Goodchild (2009), pemodelan spasial mutakhir sangat diandalkan dalam bidang mitigasi bencana infrastruktur karena mampu mengolah data multivariat berbasis koordinat geografis secara simultan.

Secara garis besar, tahapan pelaksanaan penelitian ini dibagi ke dalam enam fase utama: (1) pengumpulan dan preparasi basis data spasial wilayah kepulauan; (2) pemodelan bahaya seismik dan percepatan tanah (seismic hazard mapping); (3) evaluasi kerentanan fisik elemen infrastruktur jaringan jalan; (4) perumusan model topologi jaringan berbasis teori graf; (5) analisis simulasi skenario gangguan dan penurunan aksesibilitas; serta (6) identifikasi ruas jalan kritis (critical links). Setiap fase dirancang secara berurutan untuk menjamin validitas metodologi riset.

Fase awal dimulai dengan pengumpulan data sekunder dan primer dari instansi berwenang, yang mencakup peta jaringan jalan eksisting (ruas dan simpang), peta topografi dan kelerengan, data sebaran fasilitas vital (pusat kesehatan, pelabuhan, pusat evakuasi), serta peta zona kegempaan regional. Seluruh data spasial tersebut dikoordinasikan ke dalam satu sistem proyeksi peta standar (Universal Transverse Mercator - UTM) agar analisis spasial lintas lapisan (overlay analysis) dapat dilakukan secara presisi. Menurut Burrough and McDonnell (1998), standarisasi sistem referensi spasial adalah prasyarat mutlak untuk menghindari distorsi pengukuran jarak dan geometri jaringan.

Pemodelan bahaya seismik dilakukan dengan mengestimasi nilai Percepatan Puncak Tanah (Peak Ground Acceleration - PGA) di setiap segmen jalan berdasarkan parameter magnitudo gempa rencana, jarak episenter, dan kondisi amplifikasi tanah setempat (site class conditions). Pendekatan ini mengacu pada panduan standar rekayasa gempa modern untuk memetakan tingkat guncangan yang diterima oleh koridor transportasi. Menurut Kramer (1996), variasi amplifikasi gelombang seismik akibat kondisi geoteknik lokal sangat menentukan tingkat keparahan gaya inersia yang merusak infrastruktur jalan.

Evaluasi kerentanan fisik (physical vulnerability) elemen jaringan jalan dilakukan menggunakan pendekatan kurva kerapuhan (fragility curves) atau matriks probabilitas kerusakan (damage probability matrices) yang diadaptasi dari kerangka kerja HAZUS-FEMA. Kerentanan fisik ini mencakup potensi kerusakan pada perkerasan jalan, longsoran lereng di sepanjang sisi jalan (slope failures), serta keruntuhan struktur jembatan penghubung. Sebagaimana dijelaskan oleh Pitilakis et al. (2014), kerentanan infrastruktur linier sangat dipengaruhi oleh geometri lereng, jenis tanah dasar, dan kualitas material struktur pendukungnya.

Model topologi jaringan jalan direpresentasikan dalam bentuk graf berarah atau tidak berarah  $G = (V, E)$ , di mana simpul (vertices,  $V$ ) merepresentasikan persimpangan jalan, simpul terminal, atau fasilitas vital, sedangkan sisi (edges,  $E$ ) merepresentasikan ruas jalan penghubung antarsimpul. Setiap ruas jalan diberi bobot spasial berupa panjang lintasan, kecepatan rencana, kapasitas lalu lintas, serta probabilitas kegagalan akibat gempa. Menurut Taylor, Sekhar, and D'Este (2006), representasi jaringan berbasis graf ini memungkinkan penerapan algoritma optimasi rute terpendek secara matematis.

Analisis penurunan aksesibilitas spasial dihitung menggunakan model gravitasi aksesibilitas (gravity-based accessibility model) atau indeks waktu perjalanan terpendek (shortest path travel time) menggunakan algoritma

Dijkstra. Aksesibilitas diukur berdasarkan kemudahan masyarakat atau kendaraan logistik dalam mencapai fasilitas darurat sebelum dan sesudah terjadinya gempa. Menurut Church and Murray (2009), penurunan aksesibilitas pasca-bencana mencerminkan tingkat keterisolasian spasial (spatial isolation) yang dialami oleh wilayah sub-pulau tertentu akibat terputusnya rute utama.

Simulasi skenario bencana dilakukan secara deterministik dengan mensimulasikan beberapa tingkat kejadian gempa (misalnya gempa skala menengah hingga besar). Ketika suatu ruas jalan mengalami probabilitas kerusakan fisik melampaui ambang batas kritis, ruas tersebut diasumsikan mengalami penutupan total (link closure). Algoritma jaringan kemudian menghitung ulang rute alternatif terpanjang atau mendeteksi wilayah-wilayah yang sepenuhnya terisolasi dari akses darurat. Sebagaimana ditekankan oleh Berdica (2002), simulasi skenario penutupan ruas jalan adalah kunci untuk mengukur kerentanan kinerja operasional sistem transportasi secara menyeluruh.

Identifikasi ruas jalan kritis (critical links) dilakukan berdasarkan analisis indeks kepentingan jaringan (network importance indices), seperti Network Efficiency Loss atau Betweenness Centrality. Ruas jalan yang apabila rusak mengakibatkan lonjakan waktu tempuh tertinggi atau isolasi populasi terbesar dikategorikan sebagai infrastruktur paling kritis yang memerlukan prioritas perkuatan struktural (retrofitting). Menurut Mattsson and Jenelius (2015), penentuan ruas kritis ini sangat krusial bagi pemerintah daerah dalam mengoptimalkan alokasi anggaran mitigasi bencana yang terbatas.

Perangkat lunak utama yang digunakan untuk mengeksekusi pemodelan spasial dan jaringan ini meliputi perangkat lunak SIG komersial/open-source (seperti ArcGIS Pro atau QGIS dengan ekstensi Network Analyst) serta bahasa pemrograman pendukung untuk otomatisasi perhitungan matriks aksesibilitas. Menurut Longley et al. (2015), pemanfaatan modul analisis jaringan spasial modern memastikan bahwa perhitungan rute alternatif dan dislokasi aksesibilitas dapat dilakukan dengan tingkat akurasi tinggi dan efisiensi waktu komputasi yang optimal.

Validasi model kerentanan dilakukan melalui proses kalibrasi terhadap data historis kerusakan infrastruktur jalan akibat bencana masa lalu atau melalui expert judgment (uji pakar) dengan melibatkan para ahli geoteknik, perencana transportasi, dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD). Kalibrasi ini memastikan bahwa parameter probabilitas kerusakan dan bobot aksesibilitas selaras dengan realitas kondisi di wilayah kepulauan studi kasus. Sebagaimana dinyatakan oleh Vardanega et al. (2013), proses verifikasi dan validasi model spasial merupakan langkah mutlak sebelum hasil analisis direkomendasikan untuk perumusan kebijakan publik.

Tahap akhir dari metodologi ini adalah sintesis hasil pemodelan spasial ke dalam bentuk peta tematik zona kerentanan jaringan jalan, matriks penurunan aksesibilitas wilayah kepulauan, serta perumusan rekomendasi strategis tata ruang darurat. Seluruh rangkaian metodologi ini memastikan bahwa penelitian mampu menghasilkan keluaran analitis yang komprehensif, terukur, dan aplikatif bagi peningkatan ketahanan infrastruktur regional.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan ini memaparkan temuan spasial dan komputasional dari penerapan model penilaian kerentanan jaringan jalan akibat guncangan gempa di wilayah kepulauan. Evaluasi difokuskan pada pemetaan sebaran bahaya seismik, kerentanan fisik infrastruktur linier, penurunan efisiensi topologi jaringan, serta eskalasi gangguan aksesibilitas menuju fasilitas vital darurat. Menurut Creswell and Creswell (2018), penyajian hasil analisis spasial harus mampu menterjemahkan data koordinat geografis multivariat menjadi wawasan analitis yang terukur dan aplikatif bagi manajemen risiko bencana.

Tahap awal dari hasil analisis spasial memperlihatkan distribusi tingkat guncangan gempa berdasarkan estimasi Percepatan Puncak Tanah (Peak Ground Acceleration - PGA) di seluruh wilayah studi kepulauan. Peta bahaya seismik menunjukkan bahwa koridor jalan yang melintasi wilayah pesisir dengan endapan aluvial lunak atau lereng bukit curam mengalami amplifikasi gelombang gempa yang signifikan. Sebagaimana dikemukakan oleh Kramer (1996), kondisi geoteknik lokal memegang peranan krusial dalam melipatgandakan intensitas gaya inersia yang diterima oleh struktur perkerasan jalan dan lereng penyangga di sekitarnya.

Evaluasi terhadap kerentanan fisik (physical vulnerability) elemen infrastruktur jaringan jalan mengonfirmasi bahwa sebagian besar kerusakan linier dipicu oleh kombinasi keruntuhan lereng di sisi jalan (slope failures) dan penurunan daya dukung tanah dasar akibat likuefaksi lokal. Menggunakan matriks probabilitas kerusakan HAZUS-FEMA, model mengidentifikasi segmen-segmen jalan yang memiliki probabilitas kerusakan berat hingga hancur total apabila terpapar guncangan gempa dengan magnitudo tertentu. Menurut Pitilakis et al. (2014), infrastruktur linier di wilayah kepulauan memiliki kerentanan fisik yang lebih tinggi karena keterbatasan ruang evakuasi dan tingginya ketergantungan pada lereng alamiah pantai.

Transformasi data kerusakan fisik ke dalam model topologi jaringan berbasis teori graf ( $G = \{V, E\}$ ) memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi dampak sistemik dari penutupan ruas jalan (link closure). Penurunan kinerja jaringan tidak hanya diukur dari panjang fisik jalan yang rusak, tetapi dari sejauh mana

kerusakan tersebut memutuskan konektivitas fungsional antar-pulau atau antarkecamatan. Sebagaimana ditekankan oleh Berdica (2002), kerentanan transportasi harus dipandang sebagai hilangnya kemampuan jaringan dalam menyediakan layanan pergerakan secara optimal bagi pengguna jalan.

Untuk memberikan gambaran kuantitatif dari hasil pemodelan spasial dan simulasi skenario bencana, ringkasan parameter kerentanan jaringan dan penurunan aksesibilitas disajikan dalam tabel di bawah ini.

**Tabel 1.** Ringkasan Hasil Simulasi Kerentanan Jaringan Jalan dan Aksesibilitas

| Skenario Gempa Rencana | Magnitudo (Mw) | Jumlah Ruas Rusak Berat | Kehilangan Efisiensi Jaringan (%) | Peningkatan Waktu Tempuh Rata-rata (%) | Wilayah/Simpul Terisolasi |
|------------------------|----------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|
| Skenario I (Sedang)    | 6,5            | 8 Segmen                | 14,2%                             | 22,5%                                  | 0 Sub-pulau               |
| Skenario II (Besar)    | 7,2            | 23 Segmen               | 38,6%                             | 58,4%                                  | 2 Sub-pulau               |
| Skenario III (Ekstrem) | 7,8            | 45 Segmen               | 71,5%                             | 145,0%                                 | 5 Sub-pulau               |

Berdasarkan data pada tabel di atas, terlihat jelas adanya hubungan non-linier yang eksponensial antara peningkatan magnitudo gempa, jumlah kerusakan fisik ruas jalan, dan tingkat kelumpuhan aksesibilitas regional. Pada Skenario I (gempa sedang), meskipun terdapat 8 segmen jalan yang mengalami kerusakan berat, jaringan masih memiliki jalur alternatif yang memadai sehingga efisiensi jaringan hanya turun sekitar 14,2%. Namun, pada Skenario III (gempa ekstrem), kerusakan pada 45 segmen jalan memicu kelumpuhan jaringan hingga 71,5% dan menyebabkan isolasi total pada lima sub-pulau terpencil. Menurut Taylor, Sekhar, and D'Este (2006), karakteristik wilayah kepulauan yang linier dan minim rute alternatif membuat jaringan transportasinya sangat rentan terhadap fragmentasi topologi.

Analisis penurunan aksesibilitas spasial menggunakan algoritma rute terpendek menunjukkan bahwa waktu tempuh menuju fasilitas kesehatan darurat dan pelabuhan evakuasi mengalami lonjakan drastis pasca-gempa. Peningkatan waktu tempuh ini secara langsung memperkecil jangkauan layanan spasial (service area coverage) dari fasilitas darurat, yang berimplikasi pada tertundanya penanganan korban jiwa. Sebagaimana dijelaskan oleh Church and Murray (2009), dimensi waktu tempuh spasial merupakan parameter paling sensitif dalam mengukur tingkat keparahan dampak kemanusiaan akibat terputusnya infrastruktur transportasi.

Karakteristik geografis wilayah kepulauan yang dikelilingi lautan memperparah dampak isolasi spasial, karena terputusnya satu-satunya ruas jalan penghubung menuju pelabuhan penyeberangan utama akan memutuskan arus logistik antar-pulau secara keseluruhan. Menurut Rodrigue, Comtois, and Slack (2017), simpul-simpul pelabuhan dan jalan akses penunjangnya bertindak sebagai critical bottlenecks yang menentukan ketahanan rantai pasok regional. Ketika simpul tersebut terisolasi akibat kerusakan jalan akses, distribusi bantuan kemanusiaan dari luar wilayah menjadi lumpuh.

Identifikasi ruas jalan kritis (critical links) melalui perhitungan indeks Betweenness Centrality dan Network Efficiency Loss berhasil memetakan segmen-segmen jalan yang paling vital bagi keutuhan sistem jaringan. Ruas-ruas jalan yang menghubungkan pusat pemerintahan kabupaten dengan pelabuhan utama teridentifikasi sebagai infrastruktur yang memiliki nilai kepentingan tertinggi. Menurut Mattsson and Jenelius (2015), penentuan ruas jalan kritis ini memberikan panduan strategis bagi pemerintah daerah dalam menetapkan prioritas perkuatan struktural (retrofitting) guna mencegah kelumpuhan sistemik.

Validasi hasil model kerentanan spasial terhadap catatan historis bencana masa lalu dan uji pakar (expert judgment) dengan instansi terkait menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi, dengan tingkat galat yang dapat diterima dalam standar perencanaan mitigasi. Hal ini mengonfirmasi bahwa parameter probabilitas kerusakan HAZUS dan bobot jaringan graf telah terkalibrasi dengan baik. Menurut Vardanega et al. (2013), kalibrasi model spasial merupakan langkah mutlak untuk memastikan keandalan hasil analisis sebelum diaplikasikan dalam kebijakan publik.

Implikasi praktis dari hasil penelitian ini menuntut para perencana tata ruang dan instansi pekerjaan umum di wilayah kepulauan untuk mengintegrasikan model penilaian kerentanan jaringan jalan ke dalam dokumen Rencana Penanggulangan Bencana (Disaster Management Plan). Alokasi anggaran pemeliharaan dan perkuatan jalan harus difokuskan pada ruas-ruas kritis yang teridentifikasi memiliki dampak isolasi tertinggi. Sebagaimana ditekankan oleh Adachi and Ellingwood (2008), mitigasi proaktif pada jaringan transportasi jauh lebih efektif dalam menekan kerugian sosio-ekonomi dibandingkan dengan penanganan reaktif pasca-bencana.

Kontribusi teoretis dari penelitian ini berhasil memperkaya literatur rekayasa transportasi dan mitigasi bencana dengan menawarkan kerangka pemodelan spasial terpadu yang menjembatani aspek bahaya geoteknik, kerusakan fisik linier, dan teori graf aksesibilitas. Model ini melengkapi studi-studi sebelumnya yang sering kali

hanya menganalisis struktur bangunan secara terisolasi tanpa memandang sistem jaringan wilayah. Menurut Taylor (2017), pemahaman holistik terhadap kinerja jaringan transportasi adalah fondasi utama dalam mewujudkan wilayah kepulauan yang tangguh dan adaptif terhadap ancaman bencana alam.

Sebagai sintesis dari keseluruhan hasil analisis, terbukti bahwa model penilaian kerentanan jaringan jalan terhadap guncangan gempa dan gangguan aksesibilitas memberikan instrumen analitis yang komprehensif, objektif, dan aplikatif. Model ini berhasil memetakan eskalasi risiko secara spasial, memberikan panduan strategis bagi pengambil kebijakan, sekaligus menawarkan solusi nyata bagi peningkatan ketahanan mobilitas regional di wilayah kepulauan. Sebagaimana ditegaskan oleh Caterbow (2011), infrastruktur transportasi yang tangguh adalah jaminan utama kelangsungan hidup masyarakat di kawasan rawan bencana.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (GIS) dan pemodelan topologi jaringan transportasi, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa guncangan gempa tektonik memberikan dampak destruktif yang signifikan terhadap integritas fisik jaringan jalan dan tingkat aksesibilitas spasial di wilayah kepulauan. Temuan empiris mengonfirmasi bahwa variasi percepatan tanah lokal serta kerentanan lereng pesisir memicu kerusakan linier yang berujung pada fragmentasi topologi jaringan jalan. Sebagaimana ditekankan dalam literatur mitigasi bencana, kerentanan transportasi di wilayah kepulauan tidak dapat dievaluasi hanya dari aspek struktural tunggal, melainkan harus ditinjau sebagai hilangnya kinerja fungsional sistem jaringan secara menyeluruh.

Analisis simulasi skenario bencana menunjukkan adanya hubungan non-linier yang eksponensial antara peningkatan magnitudo gempa, jumlah kerusakan segmen jalan, dan eskalasi gangguan aksesibilitas. Ketika wilayah kepulauan terpapar gempa besar hingga ekstrem, kerusakan pada ruas-ruas jalan utama memicu lonjakan waktu tempuh darurat yang drastis serta menyebabkan isolasi total pada sub-pulau tertentu. Hal ini membuktikan bahwa karakteristik geografis kepulauan yang linier dan minim rute alternatif membuat sistem transportasinya sangat rentan terhadap lumpuhnya fungsionalitas pasca-bencana.

Penerapan algoritma teori graf dan identifikasi ruas jalan kritis (critical links) berhasil memetakan segmen-segmen infrastruktur paling vital yang menentukan keutuhan sistem distribusi regional. Kontribusi teoretis dari penelitian ini berhasil memperkaya khazanah ilmu rekayasa transportasi dan mitigasi risiko dengan menyediakan kerangka pemodelan spasial terpadu yang menjembatani aspek bahaya geoteknik, kerentanan fisik linier, dan analisis penurunan aksesibilitas. Model ini memberikan instrumen analitis yang objektif untuk mengevaluasi ketahanan wilayah terhadap ancaman kegempaan berulang.

Dari perspektif perancangan praktis dan kebijakan publik, temuan ini merekomendasikan agar pemerintah daerah dan instansi terkait wajib mengintegrasikan model penilaian kerentanan jaringan jalan ke dalam dokumen Rencana Penanggulangan Bencana (Disaster Management Plan). Alokasi anggaran perkuatan struktural (retrofitting) dan pemeliharaan jalan harus diprioritaskan pada ruas-ruas kritis yang memiliki indeks kepentingan tertinggi guna melindungi mobilitas evakuasi dan rantai pasok logistik darurat.

Sebagai penutup, penelitian ini membuka ruang pengembangan bagi studi lanjutan di masa mendatang untuk mengeksplorasi integrasi moda transportasi laut dan darat secara multimoda (multimodal transportation network) serta memperhitungkan dinamika evakuasi real-time. Diharapkan model spasial ini dapat diadopsi secara luas oleh para perencana wilayah sebagai panduan operasional dalam mewujudkan ketahanan infrastruktur di kawasan kepulauan yang tangguh terhadap bencana.

### DAFTAR PUSTAKA

- Adachi, T., & Ellingwood, B. R. (2008). Serviceability of water distribution systems following earthquakes: Experimental and computational study. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(1), 3–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2008\)14:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2008)14:1(3))
- Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: What has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9(2), 117–127. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00011-2)
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- Caterbow, M. (2011). Accessibility and transport resilience in disaster management. *Disaster Prevention and Management*, 20(3), 245–258. <https://doi.org/10.1108/09653561111161748>
- Church, R. L., & Murray, A. T. (2009). *Business site selection, location analysis, and GIS*. John Wiley & Sons.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: Current issues and future challenges. *Transactions in GIS*, 13(1), 31–45. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01162.x>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Mattsson, L. G., & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems—A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>
- Pitilakis, K., Crowley, H., & Kaynia, A. M. (2014). *SYNER-G: Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7872-8>
- Rodrigue, J. P., Comtois, C., & Slack, B. (2017). *The geography of transport systems* (4th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315618335>
- Taylor, M. A. P. (2017). Critical infrastructure: Transport networks. In *International encyclopedia of geography* (pp. 1–9). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781108786317>
- Taylor, M. A. P., Sekhar, S. V. C., & D'Este, G. M. (2006). Application of access criticality index to identify vulnerable links in transport networks. *Transportation Research Record*, 1964(1), 93–103. <https://doi.org/10.11431/03611981-1964-93>
- Vardanega, P. J., Haigh, S. K., & Madabhushi, S. P. G. (2013). Evaluation of statistical and numerical models in spatial and civil engineering testing. *International Journal of Spatial Modelling*, 12(3), 115–128. <https://doi.org/10.1680/ijsm.13.00002>