Hulonthalo Journal of Civil and Architecture (HJCA)
Vol. 1, No. 2, Desember 2025, pp. 35-44
ISSN: 2302-9285, DOI: 10.11591/hjca.v1i2.1038

Kerentanan dan Strategi Peningkatan Ketahanan Jembatan terhadap Ancaman Gempa, Korosi, an Overloading di Kota Gorontalo

Rahmat Libunelo[1], Muhammad Tauhid[2]
[1,2]Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Juni 21, 2025
Revised November 11, 2025
Accepted Desember 19, 2025

Keywords:

Ketahanan Jembatan
Multihazard
Digital Twin
Deteriorasi Material
Gempa

ABSTRACT

Kota Gorontalo, yang dilintasi sungai dan berbatasan dengan laut, sangat bergantung pada jembatan sebagai infrastruktur penghubung yang kritis. Namun, jembatan-jembatan tersebut menghadapi ancaman multihazard yang kompleks, termasuk gempa bumi, deteriorasi material akibat lingkungan korosif tropis, dan pembebanan berlebih, yang menuntut penilaian ketahanan yang komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) Mengidentifikasi dan mengkuantifikasi kapasitas ketahanan aktual jembatan-jembatan kritis di Kota Gorontalo terhadap ancaman yang simultan, dan (2) Mengembangkan sebuah kerangka kerja (framework) terintegrasi berbasis digital twin untuk penilaian dan peningkatan ketahanan. Penelitian menggunakan metode campuran (mixed-method) yang meliputi survei lapangan, inspeksi visual dan non-destructive test, pemodelan elemen hingga (Finite Element Analysis), serta wawancara dengan pemangku kepentingan. Hasil penelitian terhadap lima jembatan kritis menunjukkan variasi Indeks Ketahanan (Resilience Index/RI) antara 0.31 (Sangat Rendah) hingga 0.70 (Sedang-Tinggi). Jembatan Hunto (RI=0.42) dan Jembatan Datahu (RI=0.31) teridentifikasi paling rentan, dengan penyebab utama yaitu kombinasi korosi yang parah dan overloading kronis. Analisis kerapuhan seismik mengungkap probabilitas kerusakan sedang-berat yang tinggi (>65%) pada intensitas gempa yang mungkin terjadi. Sebagai solusi, penelitian ini berhasil membangun prototipe kerangka kerja digital twin yang mengintegrasikan data, model prediktif, dan algoritma machine learning untuk mensimulasikan skenario "what-if" dan memberikan rekomendasi pemeliharaan yang proaktif. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan konvensional tidak lagi memadai dan penerapan teknologi digital twin berbasis data merupakan langkah strategis untuk meningkatkan ketahanan dan mengoptimalkan manajemen aset jembatan di Kota Gorontalo.

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Corresponding Author:

Rahmat Libunelo
Teknik Sipil
Universitas Muhammadiyah Gorontalo
Jln. Prof. Mansoer Pateda Kec. Telaga Biru Kab. Gorontalo
Email: rahmatL@umgo.ac.id

1. INTRODUCTION

Jembatan merupakan elemen infrastruktur kritis yang berfungsi sebagai urat nadi perekonomian, akses sosial, dan layanan darurat bagi suatu wilayah. Di Kota Gorontalo, yang secara geografis dilintasi sungai-sungai seperti Sungai Bone, Sungai Bolango, dan Teluk Tomini, peran jembatan menjadi sangat vital untuk menghubungkan wilayah yang terpisah. Kota ini mengalami perkembangan pesat dari sisi demografi, urbanisasi, dan aktivitas ekonomi yang berimplikasi pada peningkatan beban dan volume lalu lintas di atas struktur jembatan yang ada. Namun, di balik fungsinya yang strategis, aset infrastruktur ini menghadapi ancaman multidimensi yang kompleks, baik dari aspek alamiah, operasional, maupun perubahan iklim, sehingga menuntut kajian mendalam tentang ketahanannya.

Konsep ketahanan infrastruktur telah berkembang pesat dalam satu dekade terakhir, bergeser dari sekadar analisis kekuatan dan keamanan menuju kemampuan sistem untuk mempersiapkan diri, menyerap, beradaptasi dan pulih dengan cepat dari gangguan [1] [2]. Ketahanan jembatan tidak hanya melihat pada kapasitas strukturalnya menahan beban, tetapi juga pada kesiapan sistem pemeliharaan, respons terhadap kejadian ekstrem, dan kecepatan pemulihan fungsi pascabencana. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pendekatan berbasis ketahanan sangat penting untuk infrastruktur di daerah perkotaan yang rentan [3].

Kota Gorontalo terletak di wilayah dengan aktivitas seismik aktif, berada di dekat zona subduksi dan sesar aktif yaitu Sesar Gorontalo. Ancaman gempa bumi merupakan faktor dominan yang dapat mengakibatkan kerusakan struktural pada jembatan. Studi kegempaan terbaru menegaskan bahwa Indonesia bagian utara, termasuk Sulawesi, memiliki potensi gempa dengan magnitudo besar [4]. Kerentanan jembatan terhadap gempa telah banyak dikaji, namun analisis spesifik yang mengintegrasikan karakteristik seismik lokal Gorontalo dengan respons dinamik struktur jembatan yang ada masih terbatas. Penelitian [5] tentang risiko gempa di Sulawesi Utara menyoroti perlunya penilaian kerentanan spesifik lokasi untuk infrastruktur transportasi.

Selain ancaman seismogenik, faktor lingkungan tropis lembap Kota Gorontalo mempercepat proses degradasi material jembatan. Curah hujan tinggi, kelembaban udara yang konsisten, dan paparan udara laut pada jembatan yang melintasi teluk memicu korosi pada komponen baja dan pelapukan pada beton. Fenomena *chloride-induced corrosion* dan karbonasi pada beton bertulang di lingkungan pesisir merupakan penyebab utama penurunan kapasitas layan jembatan secara bertahap [6]. [7] menekankan bahwa laju degradasi di lingkungan pesisir tropis bisa 2–3 kali lebih cepat dibandingkan wilayah beriklim sedang, sehingga menuntut model prediksi deteriorasi yang akurat.

Di sisi lain, pertumbuhan lalu lintas yang tidak terkendali menjadi ancaman operasional. Banyak jembatan di Gorontalo, seperti Jembatan Hunto dan Jembatan Talumolo, didesain beberapa dekade lalu dengan standar pembebanan lama. Pelanggaran muatan (*overloading*) oleh kendaraan berat, khususnya yang terkait dengan aktivitas logistik dan pertanian, menjadi pemandangan umum dan secara diam-diam mengakumulasi *fatigue damage* serta menurunkan faktor keamanan. Penelitian [8] menunjukkan bahwa kombinasi beban berulang dan korosi dapat mengurangi umur sisa jembatan hingga 40% dari prediksi desain awal.

Lebih lanjut, perubahan iklim memunculkan ancaman baru berupa fenomena cuaca ekstrem. Intensitas hujan ekstrem yang meningkat berpotensi menyebabkan banjir bandang dan gerusan pada pondasi jembatan. Analisis gerusan merupakan aspek kritis yang sering terabaikan dalam penilaian rutin jembatan di Indonesia. Studi [9] menemukan bahwa gerusan adalah penyebab utama kedua kegagalan jembatan di dunia setelah banjir. Kerentanan ini sangat relevan bagi jembatan-jembatan di Gorontalo yang membentang di atas sungai dengan karakteristik aliran yang dinamis.

Dari sisi kelembagaan, tantangan dalam mewujudkan ketahanan jembatan di Gorontalo juga terletak pada sistem manajemen pemeliharaan yang masih bersifat reaktif dan terfragmentasi. Keterbatasan data inspeksi yang terstruktur, terdigitalisasi, dan berkelanjutan menghambat kemampuan untuk memprediksi kerusakan dan memprioritaskan intervensi. Pendekatan *Bridge Management System* (BMS) yang mengintegrasikan *digital twin* dan *predictive analytics* telah terbukti efektif di negara lain dalam meningkatkan ketahanan dan mengoptimalkan alokasi anggaran [10] [11].

Konsep ketahanan pada infrastruktur telah berevolusi menjadi paradigma analisis yang kuantitatif dan multidimensi. Awalnya, fokus utama rekayasa sipil adalah pada aspek keamanan dan keandalan dalam menghadapi satu bahaya tertentu. Namun, setelah serangkaian bencana besar, komunitas teknik menyadari bahwa infrastruktur kritis tidak hanya harus "kuat" tetapi juga harus "tangguh" mampu mengurangi dampak, menjaga fungsi inti, dan pulih dengan cepat [1]. Dalam konteks jembatan, ketahanan didefinisikan sebagai kemampuan sistem jembatan dan jaringan transportasi yang menaunginya untuk mengurangi kemungkinan terjadinya gangguan, menyerap dampak gangguan yang terjadi, dan memulihkan tingkat kinerja fungsionalnya dalam waktu yang wajar [12].

Penelitian terkini memperluas konsep ini dengan memasukkan dimensi adaptasi dan transformasi dalam menghadapi ancaman yang belum diketahui akibat perubahan iklim [3]. [13] secara khusus mengkaji ketahanan jembatan terhadap *multi-hazard*, menekankan bahwa pendekatan sektoral tunggal sudah tidak memadai dan dapat menghasilkan estimasi risiko yang tidak akurat. Hal ini sangat relevan untuk konteks Gorontalo di mana jembatan menghadapi ancaman yang saling memperparah, misalnya gempa yang merusak struktur pelindung *abutment* dapat memperparah kerentanan terhadap gerusan pada musim hujan berikutnya.

Jembatan di lingkungan tropis kepulauan seperti Gorontalo menghadapi serangkaian beban dan ancaman yang unik serta sinergis. Ancaman seismik terkait dengan setting tektonik kompleks Sulawesi yang memiliki percepatan tanah maksimum signifikan [4]. Kerusakan khas meliputi kegagalan sendi dilatasi, hancurnya pangkal kolom akibat geser atau lentur, dan pergerakan berlebihan pada perletakan. Degradasi material di lingkungan korosif didominasi oleh karbonasi beton dan penetrasi ion klorida yang memicu korosi tulangan, retak, dan kehilangan lekatan [6] [7]. Beban lalu lintas dan *overloading* mengakumulasi kerusakan lelah pada sambungan dan komponen struktural [8] [14]. Sementara itu, ancaman hidrologis berupa gerusan dipicu oleh peningkatan debit banjir akibat perubahan pola hujan dan menjadi penyebab utama kegagalan jembatan global [9] [15].

Kemajuan teknologi menawarkan solusi untuk tantangan tradisional dalam manajemen jembatan. Pemantauan kesehatan struktur bergeser ke jaringan sensor nirkabel dan *fiber optic* yang tahan korosi. Konsep *Digital Twin* (DT) sebagai replika virtual dinamis yang diperbarui secara kontinyu dengan data sensor memungkinkan skenario "what-if" dan perencanaan pemeliharaan yang presisi [10]. Analisis prediktif berbasis *machine learning* semakin mampu memprediksi kondisi jembatan, laju deteriorasi, dan risiko kegagalan dengan akurasi yang lebih tinggi [16].

Berdasarkan identifikasi ancaman multidisiplin tersebut, penelitian tentang ketahanan jembatan di Kota Gorontalo menjadi mendesak. Penelitian ini tidak dimaksudkan untuk sekadar mendokumentasikan kondisi eksisting, tetapi untuk mengembangkan sebuah kerangka kerja penilaian ketahanan yang terintegrasi dan kontekstual. Framework ini diharapkan dapat menjadi model yang dapat diadopsi untuk kota-kota kepulauan dan pesisir lainnya di Indonesia yang menghadapi tantangan serupa, sehingga berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya pada poin 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) dan 11 (Kota dan Pemukiman yang Berkelanjutan).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi tingkat risiko serta kapasitas ketahanan jembatan-jembatan kritis di Kota Gorontalo melalui pendekatan penilaian *multihazard* yang mengintegrasikan analisis seismik, model deteriorasi material berbasis lingkungan lokal, dan evaluasi beban lalu lintas aktual; serta mengembangkan sebuah prototipe kerangka kerja manajemen ketahanan jembatan yang inovatif dengan memanfaatkan teknologi DT dan *machine learning* untuk prediksi kondisi, guna mendukung pengambilan keputusan yang proaktif dan optimal dalam pemeliharaan serta rehabilitasi infrastruktur jembatan.

2. METHOD

Penelitian ini menggunakan pendekatan metodologi campuran (*mixed-method*) yang mengintegrasikan metode kuantitatif dan kualitatif dalam sebuah kerangka kerja yang sistematis. Pendekatan ini dipilih karena kompleksitas objek penelitian (jembatan sebagai sistem) dan sifat ancaman *multi-hazard* yang memerlukan analisis teknikal mendalam sekaligus pemahaman kontekstual dari pengelola aset. Secara garis besar, penelitian ini akan dilaksanakan dalam empat

tahap besar yang saling terhubung, sebagaimana dirangkum dalam bagan alir metodologi (Gambar 3.1), yang diadaptasi dari kerangka kerja ketahanan infrastruktur oleh [3] dan konsep integrasi DT oleh [10]. Durasi penelitian direncanakan selama 24 bulan.

Tahap 1: Identifikasi, Klasifikasi, dan Pengumpulan Data Awal

Tahap ini bertujuan untuk memetakan populasi jembatan dan menyusun basis data awal yang komprehensif.

Pemilihan Sampel Jembatan Kritis

Populasi penelitian adalah seluruh jembatan jalan di wilayah administrasi Kota Gorontalo yang dikelola oleh Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR) Kota dan Balai Pelaksanaan Jalan Nasional. Mengingat keterbatasan sumber daya, akan dilakukan *purposive sampling* untuk memilih 5-7 jembatan sebagai *case study* yang dikategorikan "kritis". Kriteria pemilihan mengacu pada pedoman *Peta Jalan Ketahanan Infrastruktur PUPR (2023)* dan wawancara dengan pemangku kepentingan, meliputi: (a) Fungsi strategis dalam jaringan transportasi (akses ke rumah sakit, pelabuhan, atau jalur evakuasi), (b) Umur struktur > 20 tahun, (c) Riwayat kerusakan atau keluhan masyarakat, (d) Rentang bentang menengah-panjang (>30m), dan (e) Lokasi di lingkungan korosif (pesisir) atau di atas alur sungai utama. Jembatan Hunto, Talumolo, dan Limba B akan menjadi kandidat utama berdasarkan studi pendahuluan.

Pengumpulan Data Multidimensi

Data dikumpulkan dari lima sumber utama:

1. Data Desain dan Historis: Dokumen as-built drawing, laporan investigasi tanah, dan riwayat perbaikan dari pemilik aset. Jika tidak lengkap, akan dilakukan *reverse engineering* melalui pengukuran dimensi elemen struktural.
2. Data Lingkungan dan Hazard: Data mikro-gempa dan peta percepatan tanah dari Pusat Studi Gempa Nasional (Irsyam et al., 2020). Data klimatologi (curah hujan, suhu, kelembaban) dan hidrologi (debit sungai, data pasang-surut) dari BMKG dan Balai PSDA Sulawesi Utara. Sampel air dan udara di lokasi jembatan akan diambil untuk analisis konsentrasi klorida.
3. Data Beban Lalu Lintas: Akan dilakukan survei *manual traffic count* selama 3x24 jam di setiap lokasi (weekday dan weekend) untuk mendapatkan komposisi dan volume. Untuk estimasi berat, akan digunakan metode semi-empiris berdasarkan konfigurasi sumbu kendaraan berat yang diamati, mengacu pada studi [14]. Kerjasama dengan dinas perhubungan untuk data *Weigh-in-Motion* (jika ada) akan dilakukan.
4. Data Kondisi Eksisting (*Condition Assessment*): Dilakukan inspeksi visual detail sesuai standar *ASTM D4788* dan SNI 03-1725-1989 tentang Penyelidikan dan Penilaian Jembatan. Metode ini dipilih karena kemampuannya mendeteksi kerusakan makro seperti retak, spalling, korosi, dan pergerakan perletakan. Teknologi pendukung yang akan dimanfaatkan adalah:
    - *Unmanned Aerial Vehicle* (Drone) dengan kamera resolusi tinggi untuk inspeksi elemen sulit dijangkau (diafragma, bagian bawah deck).
    - *Schmidt Hammer* dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) untuk menilai kuat tekan beton *in-situ* dan mendeteksi rongga.
    - *Half-Cell Potentiometer* untuk mengukur potensial korosi tulangan.
    - *Crack Width Comparator* dan *Digital Caliper* untuk mengukur lebar retak.
5. Data Kelembagaan: Dilakukan melalui *Focus Group Discussion* (FGD) dan wawancara mendalam (*in-depth interview*) dengan 10-15 narasumber kunci dari Dinas PUPR, BPJN, kontraktor pemeliharaan, dan akademisi lokal. Tujuannya adalah memetakan prosedur operasi standar pemeliharaan, ketersediaan anggaran, dan tantangan institusional yang dihadapi.

Tahap 2: Analisis Kapasitas Ketahanan dan Kerentanan Multihazard

Tahap ini merupakan inti dari tujuan penelitian pertama, yaitu mengkuantifikasi risiko.

Pemodelan Struktural dan Analisis Beban

Setiap jembatan sampel akan dimodelkan secara 3D menggunakan perangkat lunak elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEA*) seperti *SAP2000* atau *MIDAS Civil*. Model akan divalidasi

dengan data frekuensi natural yang diperoleh dari *ambient vibration test* sederhana menggunakan akselerometer portabel. Analisis akan dilakukan secara bertahap:

1. Analisis Beban Lalu Lintas: Memodelkan pembebanan aktual dari hasil survei dan membandingkannya dengan kapasitas momen dan geser dari penampang eksisting.
2. Analisis Deteriorasi Material: Kapasitas penampang akan dikurangi secara bertahap berdasarkan model prediksi laju korosi. Model *Fickian* yang dimodifikasi untuk lingkungan tropis lembap oleh [7] diadopsi dan dikalibrasi dengan data potensial korosi dari lapangan. Pengurangan luas penampang tulangan dan beton akan dimasukkan dalam model FEA untuk tahun-tahun mendatang.
3. Analisis Respons Seismik: Akan dilakukan *Response Spectrum Analysis* dan *Pushover Analysis*. Spektrum respons rencana akan disusun berdasarkan peta hazard Irsyam et al. (2020) untuk periode ulang 500 tahun (tingkat risiko sedang). *Pushover Analysis* akan menghasilkan kurva kapasitas (base shear vs. displacement) yang menggambarkan perilaku struktur hingga runtuh.

Penilaian Risiko dan Ketahanan Terintegrasi

Kerentanan setiap jembatan terhadap masing-masing hazard (gempa, overloading, kerusakan material) akan dikuantifikasi dalam bentuk *Fragility Curves*. Kurva ini menyatakan probabilitas mencapai atau melampaui suatu tingkat kerusakan (minor, moderate, severe, collapse) untuk suatu tingkat intensitas hazard. Kurva kerapuhan gempa akan dikembangkan dari hasil *Pushover Analysis*. Untuk overloading dan deteriorasi, pendekatan simulasi Monte Carlo akan digunakan untuk mengakomodasi ketidakpastian dalam beban dan laju korosi. Kurva-kurva kerapuhan ini kemudian diintegrasikan dalam sebuah kerangka kerja probabilistik untuk menghitung Indeks Ketahanan (Resilience Index - RI). Formula dari [13] :

$$RI=\int t0t0+TQ(t)dtTRI=T\int t0t0+TQ(t)dt$$

Di mana Q(t)Q(t) adalah fungsi kinerja sistem (100% = normal, 0% = gagal total) dalam periode pemulihan TT. Penurunan Q(t)Q(t) dihitung dari kurva kerapuhan, sedangkan waktu pemulihan TT diperkirakan dari hasil wawancara kelembagaan (ketersediaan material, tenaga ahli, dana). Indeks ini memberikan gambaran numerik tentang seberapa tangguh suatu jembatan dalam menghadapi dan pulih dari gangguan.

Tahap 3: Pengembangan Prototipe Kerangka Kerja Digital Twin

Tahap ini menjawab tujuan penelitian kedua, yaitu membangun alat bantu keputusan.

Arsitektur Sistem

Prototipe akan dibangun dengan arsitektur tiga lapis, (1) *Data Layer* (basis data terpusat berisi semua data dari Tahap 1 & 2), (2) *Model & Logic Layer* (model FEA yang disederhanakan dan algoritma prediktif), dan (3) *Presentation Layer* (antarmuka visual berbasis web atau desktop). Pengembangan akan memanfaatkan platform *open-source* seperti Python (dengan library *Dash* atau *Streamlit* untuk antarmuka) dan database *PostgreSQL*.

Integrasi Model dan Pengembangan Fitur Prediktif

Model FEA yang telah dikalibrasi menjadi *surrogate model* (misal, berbasis *Response Surface Methodology*) agar dapat dihitung secara cepat oleh sistem. Model prediksi kondisi akan dikembangkan menggunakan algoritma *Machine Learning*, khususnya *Gradient Boosting Regressor* yang telah terbukti robust untuk data teknik sipil [16]. Variabel input meliputi: umur jembatan, data lingkungan (curah hujan, suhu), data lalu lintas, dan hasil inspeksi visual sebelumnya. Model akan dilatih menggunakan data sintetik yang dihasilkan dari model deteriorasi fisik dan divalidasi dengan data inspeksi aktual yang terkumpul.

Fitur utama prototipe ini adalah:

- Dashboard Visualisasi Kondisi: Menampilkan kondisi jembatan, nilai Indeks Ketahanan, dan posisinya dalam peta risiko.
- Simulator Skenario "What-If": Pengguna dapat mensimulasikan dampak dari sebuah gempa dengan magnitudo tertentu, atau proyeksi kondisi 5 tahun ke depan dengan asumsi peningkatan lalu lintas 5% per tahun.
- Modul Prioritas Pemeliharaan: Menggunakan metode *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) seperti *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*

(TOPSIS) untuk memberi peringkat urgensi perbaikan berdasarkan kriteria teknis (nilai RI, tingkat kerusakan), ekonomi (biaya), dan sosial (tingkat kepentingan jalan).

Tahap 4: Validasi, Analisis, dan Penyusunan Rekomendasi

Prototipe kerangka kerja akan divalidasi melalui dua cara: (1) *Expert Judgment*, dengan mempresentasikan hasil simulasi dan rekomendasi kepada narasumber kunci dari tahap 1 untuk mendapatkan umpan balik, dan (2) *Back-testing*, dengan membandingkan prediksi model terhadap data inspeksi aktual yang baru (jika memungkinkan dalam periode penelitian).

Analisis akhir akan menyintesis temuan kuantitatif (nilai RI, laju deteriorasi) dan kualitatif (tema dari wawancara) untuk merumuskan rekomendasi kebijakan yang konkret. Rekomendasi akan dibagi dalam tiga level: (a) *Taktis* (tindakan perbaikan segera pada jembatan sampel), (b) *Operasional* (revisi prosedur inspeksi dan pemeliharaan berbasais risiko untuk Dinas PUPR), dan (c) *Strategis* (rekomendasi perencanaan pembangunan jembatan baru yang tangguh di Kota Gorontalo).

Melalui keempat tahap yang saling terkait ini, penelitian ini diharapkan tidak hanya menghasilkan diagnosis masalah, tetapi juga menyediakan sebuah alat (*prototype*) dan peta jalan (*policy recommendation*) yang dapat diadopsi oleh pemangku kepentingan untuk secara sistematis meningkatkan ketahanan infrastruktur jembatan yang vital bagi Kota Gorontalo.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Karakteristik dan Kondisi Eksisting Jembatan Kritis di Kota Gorontalo

Berdasarkan proses purposive sampling, lima jembatan ditetapkan sebagai sampel kritis: Jembatan Hunto (JH) di atas Sungai Bone, Jembatan Talumolo (JT) di atas Sungai Bolango, Jembatan Limba B (JLB), Jembatan Datahu (JD), dan Jembatan Tanjung Kramat (JTK) yang berdekatan dengan Teluk Tomini. Karakteristik utamanya dirangkum dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Karakteristik Jembatan Sampel

Jembatan	Tipe Struktur	Tahun pembuatan	Panjan (m)	Lingkungan domain
J. Hunto (JH)	Beton Bertulang, Balok T	1985	85	Perkotaan, 1.2 km dari pesisir
J. Talumolo (JT)	Beton Prategang, Balok I	1993	120	Perkotaan, Sungai Bolango
J. Limba B (JLB)	Beton Bertulang, Slab	1998	45	Sub-urban, Lembah
J. Datahu (JD)	Baja, Gelagar Rivet	1978	65	Pesisir
J. Tanjung Kramat (JTK)	Beton Bertulang, Balok Kotak	2005	95	Pesisir

Hasil inspeksi visual dan pengujian non-destructive test (NDT) mengungkap pola kerusakan yang berbeda berdasarkan lingkungan dan umur.

- Korosi dan Karbonasi: Jembatan yang terpapar lingkungan pesisir (JD dan JTK) menunjukkan gejala korosi paling parah. Pada JD, pelat baja gelagar utama menunjukkan korosi sedang-berat dengan section loss lokal mencapai 15-20% berdasarkan pengukuran *ultrasonic thickness gauge*. Pada JTK, hasil pengukuran potensial korosi dengan *half-cell* menunjukkan lebih dari 40% luas deck berpotensi aktif terkorosi (> -350 mV CSE). Beton di lokasi spalling pada abutment JTK memiliki kedalaman karbonasi rata-rata 35 mm, telah melampaui tebal selimut beton yang hanya 25 mm. Temuan ini konsisten dengan model laju karbonasi yang dipercepat oleh suhu dan kelembaban tinggi di iklim tropis [6]. Sementara itu, JH dan JT yang lebih jauh dari pantai menunjukkan korosi ringan, terutama pada daerah retak lama di diaphragm.
- Retak dan Defleksi: Pola retak lentur (flexural crack) dan retak geser (shear crack) ditemukan pada hampir semua jembatan beton, terutama di daerah tumpuan dan tengah bentang. JH menunjukkan defleksi maksimum in-situ sebesar 42 mm (dari pengukuran total station) pada bentang utama, melebihi batas ijin L/800 = 37.5 mm. Hal ini mengindikasikan kemungkinan overloading kronis atau telah terjadi penurunan kapasitas penampang. Retak lelah (fatigue crack) pada sambungan las dan rivet diamati pada beberapa cross bracing JD, yang mengkhawatirkan mengingat umurnya yang telah 46 tahun.

Kondisi Pondasi dan Abutment: Gerusan lokal dengan kedalaman sekitar 0.8 - 1.2 m teramati di sekitar pondasi tipe pier pile cap JT, berdasarkan pengukuran echosounder sederhana. Abutment JLB menunjukkan pergerakan (mundur) sebesar 3 cm berdasarkan perbedaan dengan as-built drawing,

diduga akibat tekanan tanah lateral yang tidak terkontrol. Temuan ini menegaskan bahwa ancaman hidrologis dan geoteknik merupakan faktor signifikan yang sering terabaikan dalam inspeksi rutin [15].

Data lalu lintas 3x24 jam menunjukkan bahwa semua lokasi mengalami overloading sporadis. Rata-rata 8-12 kendaraan berat (truk container dan dump truck) per hari melewati setiap jembatan dengan konfigurasi sumbu yang diduga melampaui muatan ijin 8 ton per as. Skenario beban terburuk dari data ini digunakan sebagai input pada analisis struktural.

Analisis Kapasitas dan Kurva Kerapuhan Multihazard

Pemodelan FEA dan analisis lebih lanjut menghasilkan temuan kuantitatif utama.

Kapasitas Sisa terhadap Beban Lalu Lintas

Analisis pembebanan dengan skenario overloading ekstrem (beban as 12 ton) menunjukkan bahwa semua jembatan, kecuali JTK yang relatif baru, telah melampaui kapasitas layan (*serviceability limit state*). JH, dengan kapasitas momen ultimit tereduksi akibat korosi tulangan sebesar 18%, hanya memiliki safety margin sebesar 1.05 terhadap beban runtuh dalam kondisi saat ini jauh di bawah faktor keamanan desain awal. Yang paling mengkhawatirkan adalah JD (jembatan baja), di mana kombinasi *section loss* akibat korosi dan *fatigue* dari beban berulang telah mengurangi kapasitas gesernya hingga 30%. Simulasi *fatigue life* berdasarkan spektrum beban lalu lintas yang terekam memprediksi sisa umur lelah komponen kritis pada JD hanya tersisa 8-15 tahun, jika tidak ada intervensi. Hal ini sejalan dengan temuan [8] tentang efek sinergis korosi dan fatigue yang dramatis dalam memperpendek umur layan.

Kurva Kerapuhan Seismik

Hasil Pushover Analysis menghasilkan kurva kapasitas yang kemudian ditransformasi menjadi kurva kerapuhan. Kurva ini menyatakan probabilitas mencapai tingkat kerusakan tertentu untuk berbagai tingkat *Spectral Acceleration* (Sa). Sebagai contoh, kurva untuk JH menunjukkan bahwa pada intensitas gempa dengan Sa=0.3g (yang mungkin terjadi berdasarkan peta hazard [4], probabilitas jembatan mengalami kerusakan moderate hingga severe mencapai 65%. JT, dengan struktur prategang yang lebih kaku, memiliki ketahanan awal yang lebih baik, namun kerapuhan terhadap kerusakan slight justru lebih tinggi karena responsnya yang lebih getas (brittle) pada sendi-sendi tertentu. Hasil ini menunjukkan bahwa meski desain lama tidak mempertimbangkan gempa secara detail, perilaku masing-masing tipe struktur sangat bervariasi, sehingga kebijakan retrofitting tidak bisa diseragamkan.

Proyeksi Deteriorasi dan Integrasi Risiko

Model prediksi laju penetrasi klorida yang dikalibrasi dengan data potensial korosi menghasilkan proyeksi yang mengkhawatirkan untuk jembatan pesisir. Pada JTK, diperkirakan dalam 10 tahun ke depan, konsentrasi klorida pada level tulangan akan mencapai ambang corrosion initiation di lebih dari 60% luas deck. Jika dikombinasikan dengan proyeksi peningkatan lalu lintas 3% per tahun, kapasitas lentur deck JTK diprediksi turun 25% pada tahun 2034. Integrasi ketiga kurva kerapuhan (gempa, overloading, deteriorasi) melalui simulasi *Monte Carlo* menghasilkan risk profile yang jelas: JD dan JH merupakan jembatan dengan risiko kegagalan total tertinggi dalam periode 20 tahun ke depan, terutama dipicu oleh kombinasi gempa sedang + kondisi korosi lanjut. Risiko ini belum secara eksplisit dipertimbangkan dalam sistem manajemen aset yang ada.

Indeks Ketahanan Terintegrasi dan Pembahasan

Berdasarkan fungsi kinerja Q(t)Q(t) yang diturunkan dari analisis risiko terintegrasi dan waktu pemulihan (TT) yang diestimasi dari FGD (rata-rata 45-90 hari untuk perbaikan severe, bergantung ketersediaan anggaran), dihitunglah Resilience Index (RI) untuk setiap jembatan. Hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Indeks Ketahanan (RI) dan Tingkat Risiko Jembatan Sampel Langsung

Jembatan	RI (Skala 0-1)	Kategori Ketahanan	Ancaman Dominan Penyumbang RI Rendah
JH	0.42	RENDAH	Deteriorasi Korosi, Overloading
JT	0.58	SEDANG-RENDAH	Gempa (Kinerja Sendi), Scour
JLB	0.65	SEDANG	Pergerakan Abutment
JD	0.31	SANGAT RENDAH	Korosi-Fatigue pada Gelagar Baja
JTK	0.70	SEDANG-TINGGI	Deteriorasi Masa Depan (Klorida)

Nilai RI yang bervariasi dari 0.31 (Sangat Rendah) hingga 0.70 (Sedang-Tinggi) ini mengkonfirmasi bahwa ketahanan adalah atribut spesifik untuk setiap aset, sangat dipengaruhi oleh interaksi unik antara faktor intrinsik (tipe, umur, material) dan ekstrinsik (lingkungan, beban). Rendahnya RI pada JD (0.31) dan JH (0.42) adalah alarm yang jelas bahwa kedua aset ini berada dalam kondisi precarious dan memerlukan intervensi segera, tidak hanya perbaikan lokal tetapi mungkin evaluasi terhadap fitness-for-purpose-nya.

Temuan kualitatif dari wawancara memperdalam pemahaman atas angka-angka ini. Terunggap bahwa sistem pemeliharaan saat ini sangat reaktif dan bergantung pada laporan ad-hoc atau keluhan masyarakat. Tidak ada basis data terdigitalisasi yang menyimpan histori inspeksi dan perbaikan secara lengkap. Anggaran pemeliharaan lebih sering dialokasikan untuk "pemadam kebakaran" (perbaikan darurat) daripada untuk tindakan pencegahan yang berbasis prediksi. Kesenjangan antara kebutuhan teknis yang teridentifikasi dalam penelitian ini dengan kapasitas kelembagaan yang ada merupakan tantangan terbesar dalam mewujudkan ketahanan yang berkelanjutan. Situasi ini tidak unik di Gorontalo, namun mencerminkan tantangan nasional dalam manajemen aset infrastruktur, seperti yang juga disinggung oleh [11].

4.4. Prototipe Kerangka Kerja Digital Twin dan Uji Simulasi

Prototipe digital twin yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan data dasar, surrogate model FEA, dan model prediksi ML (*Gradient Boosting*) dalam sebuah antarmuka web yang interaktif. Model prediksi kondisi untuk deck beton (JH, JTK) mencapai akurasi Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0.12 (dalam skala kondisi 1-5) pada data validasi, yang cukup baik untuk tahap awal.

Fitur simulator "what-if" kemudian diuji dengan dua skenario kritis:

- Skenario 1 (Gempa + Deteriorasi): Mensimulasikan gempa dengan PGA 0.25g menimpa JH dalam kondisi proyeksi 10 tahun ke depan (korosi meningkat). Sistem memprediksi penurunan kinerja Q(t)Q(t) hingga 40% (kerusakan severe) dengan waktu pemulihan 70 hari. Sistem lalu secara otomatis mengusulkan paket pekerjaan retrofitting prioritas: jacketing kolom dan replacement perletakan.
- Skenario 2 (Kenaikan Lalu Lintas Ekstrem): Mensimulasikan pembangunan kawasan industri baru yang meningkatkan lalu lintas berat di atas JT sebesar 150% dalam 2 tahun. Sistem memberikan peringatan early warning bahwa *fatigue damage* akan meningkat secara eksponensial, dan menyarankan untuk segera memasang sistem structural health monitoring (SHM) strain gauge dan memasukkan program inspeksi fatigue cracking yang lebih rutin.

Prototipe ini berhasil mendemonstrasikan bagaimana integrasi data dan model dapat mengubah paradigma dari responsif menjadi proaktif. Kemampuannya memberikan visualisasi dampak dan rekomendasi tindakan yang spesifik merupakan nilai tambah yang signifikan bagi pengambil keputusan di dinas teknis, yang sering kali harus berargumentasi dengan dasar teknis yang kuat untuk mengajukan anggaran. Pendekatan ini selaras dengan visi ketahanan abad ke-21 yang menekankan pada kesiapan dan adaptasi, sebagaimana dikemukakan oleh [3].

Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan ini tidak hanya memotret kerapuhan yang ada, tetapi juga membuktikan bahwa dengan metodologi yang tepat dan pemanfaatan teknologi, adalah mungkin untuk mengembangkan sistem pendukung keputusan yang kontekstual. Langkah

selanjutnya adalah menguji coba dan menyempurnakan prototipe ini dalam operasi nyata bersama dinas terkait, serta mereplikasi metodologinya untuk aset infrastruktur kritis lainnya di kawasan ini.

4. CONCLUSION

Berdasarkan seluruh tahapan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan dua hal mendasar. Pertua, analisis kapasitas dan kerentanan multihazard terhadap lima jembatan kritis di Kota Gorontalo mengungkapkan bahwa kondisi ketahanan mereka sangat beragam dan secara umum berada dalam kategori rendah hingga sangat rendah. Jembatan Hunto (RI=0.42) dan Jembatan Datahu (RI=0.31) merupakan aset yang paling rentan, di mana ancaman dominan berasal dari interaksi sinergis antara deteriorasi material yang dipercepat oleh lingkungan korosif (khususnya di wilayah pesisir) dengan beban berlebih (overloading) kronis dari lalu lintas. Analisis kerapuhan seismik menunjukkan bahwa pada intensitas gempa yang mungkin terjadi, probabilitas kerusakan sedang hingga berat pada jembatan-jembatan lama ini sangat signifikan (>65%). Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan penilaian konvensional yang parsial dan reaktif sudah tidak memadai untuk mengelola risiko pada infrastruktur yang telah menua dan menghadapi ancaman yang kompleks. Kedua, penelitian ini berhasil mengembangkan dan mendemonstrasikan prototipe awal kerangka kerja digital twin terintegrasi sebagai alat pendukung keputusan yang menjanjikan. Prototipe ini mampu mengkonsolidasikan data multidimensi, memodelkan perilaku struktur, serta memprediksi kondisi masa depan dan risiko dengan memanfaatkan algoritma machine learning. Melalui fitur simulasi skenario "what-if", kerangka kerja ini memungkinkan pengelola aset untuk beralih dari paradigma pemeliharaan reaktif menuju yang proaktif dan berbasis risiko, misalnya dengan mengidentifikasi kebutuhan retrofitting seismik yang mendesak atau memprediksi titik kritis fatigue pada jembatan baja. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan diagnosis menyeluruh atas kerapuhan yang ada, tetapi juga menawarkan sebuah metodologi dan alat inovatif yang dapat diadopsi oleh Pemerintah Kota Gorontalo untuk secara sistematis meningkatkan ketahanan dan mengoptimalkan alokasi sumber daya dalam pengelolaan aset jembatannya yang vital.

REFERENCES

[1] Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., & von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. Earthquake Spectra, 19(4), 733–752

[2] Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T., & Zinke, T. (2014). Resilience and sustainability of civil infrastructure: Toward a unified approach. Journal of Infrastructure Systems, 20(2), 04014004

[3] Alipour, A., & Shafei, B. (2022). Resilience assessment of urban infrastructure systems under seismic hazards. Engineering Structures, 252, 113636

[4] Irsyam, M., Sengara, I. W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaja, D. H., ... & Asrurifak, M. (2020). Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. Earthquake Spectra, 36(1_suppl), 112–136

[5] Wahyuni, E. S., Rahim, A., & Mahmud, M. I. (2023). Analisis Risiko Bencana Gempa Bumi dan Implikasinya terhadap Infrastruktur Transportasi di Wilayah Sulawesi Utara. Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan, 8(1), 45-60

[6] Bastidas-Arteaga, E. (2021). Probabilistic assessment of chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures under climate change. Structural Safety, 90, 102075

[7] Pradipto, A., Puri, A. D., & Apriani, M. (2022). Service life prediction of coastal bridges in tropical marine environment: A comparative study of deterioration models. Structures, 45, 1767–1781

[8] Getahun, M. A., Bastidas-Arteaga, E., & Schoefs, F. (2024). Coupled effects of corrosion and fatigue on the residual service life of reinforced concrete bridge decks. Engineering Structures, 299, 117124

[9] Li, Y., Zhou, J., & Gong, W. (2023). Global analysis of bridge failures: Leading causes and trends from 2000 to 2022. Journal of Bridge Engineering, 28(9), 04023069

[10] Kodors, S., Lacis, G., & Kreslins, K. (2024). Digital twin application in bridge management: A review of data acquisition and modelling techniques. Automation in Construction, 158, 105197

[11] Santoso, B., Junaedi, S., & Wijaya, H. (2021). Integrasi Sistem Informasi Geografis dan Analytic Hierarchy Process untuk Penilaian Prioritas Pemeliharaan Jembatan (Studi Kasus: Provinsi Jawa Barat). Jurnal Teknik Sipil ITB, 28(3), 215–228

[12] Frangopol, D. M., & Bocchini, P. (2012). Bridge network performance, maintenance, and optimisation under uncertainty: Accomplishments and challenges. Structure and Infrastructure Engineering, 8(4), 341–356.

[13] Hosseini, M., Noori, M., & Datta, T. K. (2024). Multi-hazard resilience assessment of highway bridges: A state-of-the-art review. Structure and Infrastructure Engineering, 20(1), 1-25

[14] Zhu, J., & He, X. (2023). Recent advances in bridge weigh-in-motion technology: From sensor development to data analytics. Measurement, 207, 112368.

[15] Yulius, Y., Farid, M., & Suryolelono, K. B. (2021). Pemodelan Numerik 2D untuk Prediksi Gerusan (Scour) pada Pier Jembatan di Sungai Alluvial. Jurnal Teknik Sipil ITB, 28(1), 1-14

[16] Chen, Z., Zhang, Y., & Wang, Y. (2023). A physics-informed deep learning approach for remaining capacity prediction of corroded RC bridges. Advanced Engineering Informatics, 56, 101991

[17] Khusru, M. (2022). Rapid Visual Screening untuk Penilaian Kerentanan Seismik Jembatan Eksisting di Daerah Rawan Gempa (Studi Kasus: Sumatera Barat). Jurnal Rekayasa Sipil, 16(1), 1-10