



Terbit *online* pada laman web jurnal :  
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

# SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



## Integrasi Bridge Management System (BMS) dan Non-Destructive Testing (NDT) untuk Prediksi Umur Jembatan pada Ruas Jalan Jawa Timur

Kohar Yudoprasetyo<sup>a</sup>, Moh. Fadhlán Rosyidi<sup>a</sup>, Ifarrel Rachmanda Hariyanto<sup>a</sup>, Yosi Noviari Wibowo<sup>a</sup>, Moh. Safi'i Mansur<sup>a</sup>, Hendra Wahyudi<sup>a</sup>, Alfán Dimas Prasetya<sup>b</sup>,

<sup>a</sup> Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jalan Menur No. 127, Surabaya, 60282, Indonesia

<sup>b</sup> Mahasiswa Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jalan Menur No. 127, Surabaya, 60282, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

*Sejarah Artikel:*

Diterima Redaksi: 20 Mei 2026

Revisi Akhir: 09 Juni 2026

Diterbitkan *Online*: 27 Juni 2026

### KATA KUNCI

Bridge Management System (BMS)

Non-Destructive Testing (NDT)

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Hammer Test

Prediksi Umur Jembatan

### KORESPONDENSI

Telepon: -

E-mail: [kohar.yudo@its.ac.id](mailto:kohar.yudo@its.ac.id)

### ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penggunaan Bridge Management System (BMS) yang digabungkan dengan pengujian *Non-Destructive Testing* (NDT) berupa *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dan *Schmidt Hammer Test* untuk menilai kondisi jembatan pada ruas jalan Batas Kabupaten Lamongan – Batas Kota Gresik. Analisis dilakukan dengan tujuan untuk mengembangkan model prediksi umur jembatan yang lebih akurat dengan mengintegrasikan hasil survei visual dan data teknis dari uji NDT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kondisi jembatan (NK) memiliki hubungan yang signifikan dengan mutu beton yang diukur menggunakan metode NDT, di mana semakin tinggi nilai NK, semakin rendah kualitas beton dan kecepatan rambat gelombang ultrasonik. Berdasarkan model prediksi, jembatan dengan nilai kondisi lebih baik diprediksi memiliki umur sisa yang lebih panjang, sementara jembatan dengan nilai kondisi lebih buruk memerlukan tindakan pemeliharaan lebih mendesak. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem manajemen jembatan yang lebih efisien, meningkatkan keselamatan infrastruktur, serta memberikan rekomendasi pemeliharaan berbasis data untuk jembatan-jembatan yang terletak di koridor strategis Provinsi Jawa Timur.

## 1. PENDAHULUAN

Infrastruktur jembatan merupakan komponen kritis dalam sistem transportasi yang menjamin konektivitas regional sekaligus mendukung aktivitas ekonomi dan sosial. Di Indonesia, proporsi signifikan dari aset jembatan telah memasuki tahap usia layanan menengah hingga lanjut, yang memerlukan evaluasi kondisi komprehensif dan prediksi sisa umur layanan. *Bridge Management System* (BMS) telah digunakan secara ekstensif sebagai pendekatan penilaian berbasis visual untuk evaluasi kondisi jembatan; namun demikian, metode ini menunjukkan keterbatasan inheren terkait objektivitas dan

<https://doi.org/10.35583/js.v14i1.432>

akurasi [1]. Urgensi penelitian ini sangat tinggi mengingat jembatan merupakan infrastruktur vital yang mendukung efisiensi transportasi dan keselamatan publik. Peningkatan akurasi dalam prediksi sisa umur layanan memfasilitasi perencanaan pemeliharaan tepat waktu dan penggantian komponen, mengurangi pengeluaran yang tidak perlu, serta meningkatkan keselamatan pengguna jalan.

Studi-studi terdahulu telah mendemonstrasikan efektivitas BMS dalam mengevaluasi kondisi jembatan di berbagai wilayah termasuk Riau, Medan, dan Garut; meskipun demikian, penerapan komprehensif masih terbatas di Provinsi Jawa Timur, khususnya pada koridor jalan strategis seperti ruas Batas Kabupaten Lamongan – Batas

[Attribution-NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Some rights reserved

Kota Gresik. Studi komparatif antara BMS dan metode kuantitatif masih langka, meskipun potensi kombinasi kedua pendekatan dapat meningkatkan akurasi prediksi umur struktural secara signifikan. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, melalui Balai Geoteknik, Terowongan dan Struktur, telah mempublikasikan pedoman identifikasi kerusakan jembatan komprehensif berbasis sistem SRKFP (Struktur, Retak, Kuantitas, Fungsi, Pengaruh), yang menyediakan protokol lebih terperinci dan terstruktur [2]. Sistem ini menetapkan klasifikasi standar tingkat keparahan kerusakan mulai dari Level 1 (kondisi baik) hingga Level 5 (runtuh), sekaligus mengintegrasikan penilaian visual dengan kategorisasi risiko pengaruh antar elemen [3].

Perkembangan terkini dalam manajemen jembatan menunjukkan tren peningkatan ke arah integrasi *Bridge Management System* (BMS) dengan pendekatan berbasis *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML). Dalam konteks ini, model prediksi umur layanan dan deteriorasi jembatan berbasis ML telah dikembangkan untuk menangkap pola kerusakan struktural kompleks yang tidak dapat dijelaskan secara memadai melalui pendekatan deterministik tradisional [4]. Studi yang memanfaatkan data empiris dan *Artificial Neural Networks* (ANN) telah berhasil mengidentifikasi variabel dominan yang menyebabkan degradasi kinerja jembatan sambil menyediakan estimasi umur layanan dengan tingkat kesalahan yang berkurang. Model yang menonjol melibatkan pendekatan probabilistik *risk-based maintenance*, di mana data inspeksi historis dikombinasikan dengan algoritma klasifikasi untuk menentukan prioritas pemeliharaan jembatan secara lebih adaptif [5]. Metodologi ini telah berhasil diimplementasikan dalam sistem manajemen infrastruktur di negara-negara maju, mendemonstrasikan kapabilitas dalam mengurangi biaya siklus hidup sambil meningkatkan ketahanan jembatan terhadap kerusakan laten.

Penelitian yang dilakukan oleh Budiarmo [6] menyoroti efektivitas metode *Bridge Management System* (BMS) dan *Bridge Condition Rating* (BCR) dalam inventarisasi kondisi jembatan di Kota Malang. Temuan penelitian mengindikasikan bahwa 21% jembatan memiliki rating kondisi 3 (memerlukan rehabilitasi) sementara 79% jembatan dikategorikan di bawah rating kondisi 0–2, menandakan kebutuhan pemeliharaan rutin dan periodik. Investigasi ini menggarisbawahi pentingnya utilisasi BMS dalam mendeteksi kebutuhan pemeliharaan dini sambil menyediakan fondasi yang kokoh untuk pengambilan keputusan teknis dalam manajemen aset infrastruktur. Lebih lanjut, Budiarmo menekankan kebutuhan untuk sistem digitalisasi data yang ditingkatkan dan integrasi

dengan sistem BCR untuk meningkatkan objektivitas penilaian. Meskipun BMS terbukti efektif dalam mengidentifikasi kerusakan struktural secara visual, penelitian juga mengungkapkan keterbatasan sistem dalam mendeteksi kerusakan mikroskopis yang tidak terlihat mata, sehingga menciptakan peluang untuk pengembangan model prediksi berbasis probabilistik atau *machine learning* sebagai arah penelitian masa depan.

Bersamaan dengan meningkatnya permintaan untuk manajemen infrastruktur yang andal dan efisien, penelitian mengenai penilaian kondisi jembatan dan prediksi umur layanan struktural telah berkembang secara signifikan. Studi sebelumnya mendemonstrasikan bahwa metodologi BMS dapat mendeteksi kerusakan ringan hingga sedang dengan cepat; namun demikian, metode ini memiliki keterbatasan dalam akurasi prediksi umur layanan dan evaluasi integritas material internal [6], [7]. Penelitian oleh Zaeni dkk [8] memperkenalkan pendekatan analisis kapasitas residual struktural untuk jembatan menggunakan metodologi *rating factor*, berdasarkan beban hidup dan beban mati yang bekerja pada struktur atas. Penilaian ini bersifat numerik dan berbasis regulasi teknis seperti SNI 1725:2016 dan pedoman dari Direktorat Jenderal Bina Marga [3]. Hasil evaluasi *rating factor* menyediakan indikator kuantitatif mengenai keamanan jembatan dan kelayakan operasional; namun demikian, metode ini tidak mempertimbangkan aspek degradasi material mikroskopis seperti korosi internal atau delaminasi.

Pendekatan probabilistik modern berbasis *life-cycle cost optimization*, sebagaimana dikembangkan oleh Wu dkk [9], memanfaatkan model semi-Markov untuk mengakomodasi ketidakpastian dalam durasi kerusakan dan efektivitas pemeliharaan. Dalam konteks jembatan Indonesia, pendekatan ini belum diadopsi secara luas karena keterbatasan dalam data historis terstruktur dan sistem monitoring terintegrasi yang masih belum berkembang secara digital. Meskipun demikian, model semi-Markov menawarkan potensi substansial untuk merancang strategi pemeliharaan jangka panjang yang efisien biaya dan berdampak langsung pada ketahanan sistem transportasi. Pendekatan lanjutan dalam prediksi umur layanan jembatan telah dikembangkan melalui model berbasis probabilistik, seperti semi-Markov *processes*, yang memungkinkan estimasi *sojourn time* untuk setiap kondisi kerusakan sebagai distribusi acak yang lebih realistis sambil mendukung pemilihan strategi perbaikan optimal dari perspektif biaya dan efektivitas. Wu dkk [9] dan Mašović dkk [10], mendemonstrasikan bahwa pendekatan semi-Markov lebih adaptif terhadap variasi dalam kondisi lingkungan, volume lalu lintas, dan tipe material struktural dibandingkan model Markov konvensional.

Identifikasi kerusakan jembatan merupakan aspek fundamental dalam sistem manajemen komprehensif. Setiap sistem teknis dan struktur rekayasa, termasuk jembatan, menunjukkan kecenderungan inheren terhadap deteriorasi yang disebabkan oleh berbagai faktor sebagaimana diartikulasikan oleh Karimi [11], mencakup karakteristik struktural termasuk kualitas proses konstruksi dan material yang digunakan, pembebanan lalu lintas yang melintasi jembatan, kondisi iklim dan lingkungan di sekitar jembatan, serta praktik pemeliharaan yang diimplementasikan. Sistem penilaian kerusakan jembatan merepresentasikan aplikasi metodologis dari identifikasi kerusakan yang mencakup faktor penyebab, mekanisme kegagalan, dan mode kegagalan. Sistem ini telah diimplementasikan di Indonesia untuk periode yang panjang, terutama melalui publikasi Pedoman Inspeksi Jembatan BMS pada tahun 1993 [1]. Untuk memfasilitasi dan menstandarkan proses evaluasi kerusakan, penilaian telah dirinci ke dalam beberapa komponen berbeda termasuk Struktur (S) yang secara konseptual mengindikasikan tipe mode kegagalan yang terjadi, Kerusakan (R) merepresentasikan penilaian sejauh mana propagasi kegagalan, Kuantitas (K) mengevaluasi besaran degradasi yang dihasilkan dari kegagalan, serta Fungsi (F) dan Pengaruh (P) yang menilai dampak ultimum dari kegagalan terhadap fungsi elemen individual dan pengaruh selanjutnya pada elemen lain.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji evaluasi kondisi jembatan pada ruas Batas Kabupaten Lamongan – Batas Kota Gresik dengan mengintegrasikan penilaian visual menggunakan sistem BMS dan SRKFP dengan data kuantitatif hasil pengujian NDT (UPV dan Schmidt Hammer Test). Penelitian ini difokuskan pada pengembangan model evaluasi kondisi jembatan yang memadukan pendekatan visual dan pengujian non-destruktif untuk memperoleh penilaian kondisi yang lebih komprehensif serta mendukung prediksi umur layanan jembatan secara lebih akurat. Melalui pendekatan hibrid ini, diharapkan dapat dihasilkan rekomendasi strategi pemeliharaan dan rehabilitasi yang lebih tepat sasaran bagi jembatan-jembatan strategis di Provinsi Jawa Timur, sekaligus memberikan kontribusi terhadap pengembangan kebijakan manajemen jembatan yang berkelanjutan dan berbasis keselamatan.

## 2. METODE

### 2.1. Pengumpulan Data

Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data dari jembatan-jembatan yang terdapat pada ruas jalan Batas Kabupaten Lamongan - Batas Kota Gresik hingga ruas jalan Widang/Bedahan – Batas Kota Lamongan. Fokus

utama penelitian ini adalah pada jembatan simple beam dengan tipe Gelagar Beton Bertulang Permanen (GTP). Jembatan-jembatan yang dipilih memiliki struktur simple beam, yaitu struktur yang dihasilkan dari gelagar beton bertulang yang didesain untuk menahan beban secara sederhana tanpa adanya elemen penopang di tengah bentang, sehingga memberikan gambaran mengenai perilaku struktur jembatan dengan bentang relatif pendek hingga sedang. Data akan diambil dari jembatan-jembatan yang terdaftar, di antaranya adalah Ambeng-Ambeng II, Tebalokan II No. 5, Mandepo No. 10, dan lainnya, yang memiliki bentang bervariasi, seperti bisa dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar Nama Jembatan dalam Penelitian ini

Nama Jembatan	Panjang Bentang (m)	Tipe Bangunan Atas	Tahun Bangun
Ambeng-Ambeng II	14.90	GTP	1991
Tebalokan II No. 5	17.30	GTP	1992
Mandepo No.10	10.10	GTP	1980
Pandan No. 13	17.00	GPP	1993
Pancur	16.80	GTP	1992
Singosari	14.30	GTP	1990
Waru Kulon	14.50	GTP	1990
Moro Pelang	12.50	GTP	1970
Kebalandono	14.00	GTP	1990
Dati	14.40	GTP	1990
Tenawong	10.40	GTP	1990

### 2.2. Inspeksi Visual

Setiap sistem dan struktur rekayasa, termasuk jembatan, memiliki kecenderungan inheren untuk mengalami kerusakan yang disebabkan oleh berbagai faktor sebagaimana dikemukakan oleh Karimi [11], meliputi karakteristik struktur jembatan termasuk kualitas proses pembangunan dan material yang digunakan, beban lalu lintas yang melewati jembatan, kondisi cuaca dan lingkungan di sekitar jembatan, serta praktik penanganan dan pemeliharaan yang dilakukan. Untuk melakukan pengendalian sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius, perlu dilakukan identifikasi terhadap komponen kegagalan yang mencakup penyebab, berkurangnya pencegahan terhadap mekanisme kegagalan (*failure mechanism*), mekanisme kegagalan yang mulai terjadi, deteriorasi yang terukur, cacat berupa potensi kegagalan, mode kegagalan (*failure mode*), hingga kegagalan total [12]. Sistem penilaian kerusakan jembatan di Indonesia telah lama diterapkan melalui Panduan Pemeriksaan Jembatan BMS tahun 1993 [1], yang kemudian disempurnakan dengan sistem SRKFP untuk mempermudah dan menstandarkan proses evaluasi kerusakan. Penilaian SRKFP dirinci ke dalam beberapa komponen terpisah yang meliputi Struktur (S) yang menunjukkan jenis mode kegagalan yang terjadi, Kerusakan (R) yang merepresentasikan sejauh mana

kegagalan telah berkembang (propagasi), Kuantitas (K) yang mengevaluasi jumlah atau besaran degradasi akibat kegagalan, serta Fungsi (F) dan Pengaruh (P) yang menilai dampak akhir dari kegagalan terhadap fungsi elemen secara individual maupun pengaruh lanjutan terhadap elemen-elemen lainnya. Setiap komponen penilaian diberi skor biner (1 atau 0) yang merepresentasikan apakah kondisi tersebut memenuhi atau tidak memenuhi kriteria kerusakan, dengan pencatatan hanya dilakukan pada elemen yang mengalami kerusakan untuk menyederhanakan proses pemeriksaan. Penilaian kondisi dilakukan secara bertahap dalam 5 Level hierarki, mulai dari Level 1 (jembatan secara keseluruhan) hingga Level 5 (lokasi spesifik pada elemen yang memerlukan perhatian khusus), di mana elemen dengan nilai kondisi lebih dari sama dengan 2 dianggap mengalami kerusakan yang memerlukan tindakan khusus, sementara nilai kondisi kurang dari 2 menunjukkan kondisi baik yang hanya membutuhkan pemeliharaan rutin. Penilaian ini dilakukan berdasarkan ketentuan yang telah ditetapkan dalam Tabel 2.

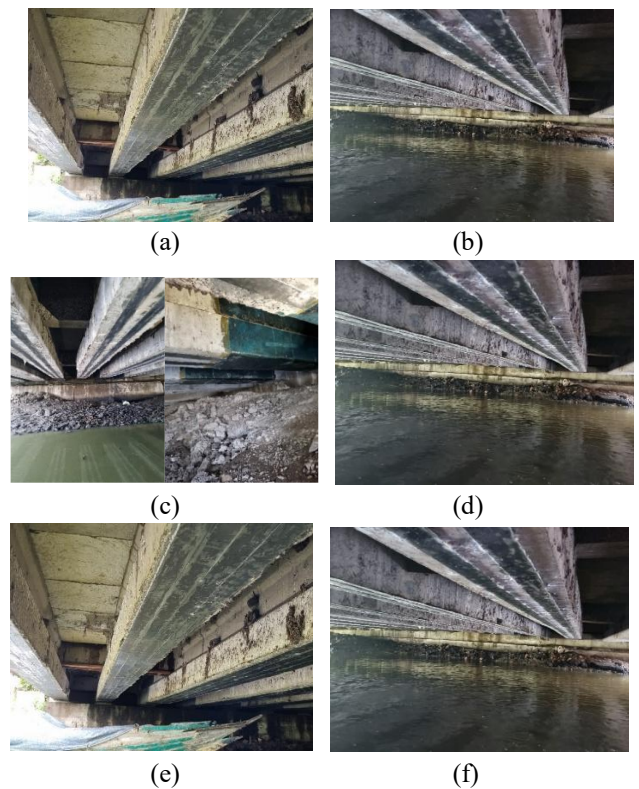
Tabel 2. Hasil Penilaian Kondisi Visual Jembatan

Sistem Penilaian	Kriteria	Nilai
Struktur (S)	Berbahaya	1
	Tidak Berbahaya	0
Kerusakan (R)	Parah	1
	Tidak Parah	0
Kuantitas (K)	Lebih dari $x$ %	1
	Kurang dari $x$ %	0
	$x = 30\%$ untuk elemen structural dan $50\%$ untuk elemen non structural	
Fungsi (F)	Elemen tidak berfungsi	1
	Elemen berfungsi	0
Pengaruh (P)	Mempengaruhi elemen lain	1
	Tidak mempengaruhi elemen lain	0
Nilai Kondisi (NK)	$NK = S + R + K + F + P$	0-5

Berdasarkan kriteria penilaian SRKFP yang telah ditetapkan, dilakukan inspeksi visual langsung di lapangan untuk mengidentifikasi dan mendokumentasikan berbagai jenis kerusakan yang ditemukan pada elemen struktural jembatan. Inspeksi dilakukan secara menyeluruh pada struktur atas dan struktur bawah jembatan, dengan fokus pada identifikasi mode kegagalan, tingkat keparahan, dan kuantitas kerusakan yang terjadi. Dokumentasi visual kerusakan seperti pada Gambar 1. diperlukan sebagai bukti objektif kondisi aktual struktur dan menjadi basis data untuk analisis lebih lanjut dalam penentuan nilai kondisi jembatan serta rekomendasi tindakan pemeliharaan yang diperlukan.

### 2.3. Non-Destructive Testing (NDT)

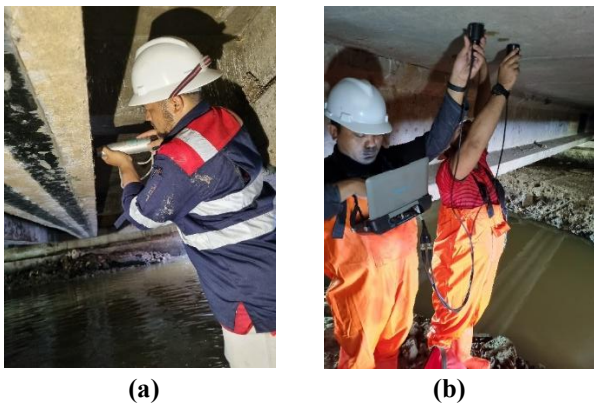
Metode pengujian *Non-Destructive Testing* (NDT) merupakan pendekatan kuantitatif yang dapat memberikan data objektif mengenai kerusakan mikrostruktur pada komponen jembatan tanpa merusak integritas elemen struktur [6]. Dalam penelitian ini, pengujian NDT dilakukan pada elemen struktural utama jembatan yang meliputi struktur atas (*superstructure*) dan struktur bawah (*substructure*). Pengujian pada struktur atas difokuskan pada balok girder dan pelat lantai jembatan, sedangkan pada struktur bawah dilakukan pada elemen pier, abutment, dan pile cap. Pemilihan lokasi pengujian didasarkan pada hasil inspeksi visual, dengan prioritas pada area yang menunjukkan indikasi kerusakan atau potensi degradasi. Pengujian NDT yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada dua metode utama yaitu *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dan *Schmidt Hammer Test*, yang merupakan teknik standar untuk evaluasi kualitas beton pada struktur jembatan eksisting. Pengujian kekuatan dan keseragaman mutu beton dengan uji *Hammer* dilakukan menyebar pada elemen beton struktur yang diuji [13], [14].



Gambar 1. Dokumentasi Inspeksi Visual Jembatan (a) Talabalkan II No. 5; (b) Mandepo No.10; (c) Pancur; (d) Waru Kulon; (e) Kebalandono; (f) Tenawong

*Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik melalui material beton dengan frekuensi 20-150 kHz untuk mendeteksi kerusakan internal seperti retak mikro, delaminasi, dan perubahan

densitas beton. Beton berkualitas baik menghasilkan kecepatan rambat tinggi (>3500 m/s), sementara beton yang mengalami deteriorasi menunjukkan kecepatan lebih rendah. *Schmidt Hammer Test* bekerja berdasarkan prinsip energi pantulan (rebound) untuk memperkirakan kuat tekan beton, di mana nilai rebound yang lebih tinggi mengindikasikan kuat tekan yang lebih besar. Pengujian dilakukan sesuai standar ASTM C805 dengan multiple readings pada setiap lokasi dan permukaan beton dibersihkan sebelum pengujian. Data kecepatan gelombang dari UPV dan rebound number dari Schmidt Hammer dianalisis untuk menentukan kualitas dan kuat tekan beton, kemudian dikorelasikan dengan hasil inspeksi visual BMS untuk menghasilkan penilaian kondisi jembatan yang lebih komprehensif dan objektif dalam mendukung prediksi umur sisa layanan. Pada Gambar 2. Menunjukkan pengujian Non-Destructive Testing (NDT) dilakukan.



Gambar 2. Pengujian Non-Destructive Testing (NDT) (a) Schmidt Hammer Test; (b) Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

**2.4. Prediksi Usia Jembatan**

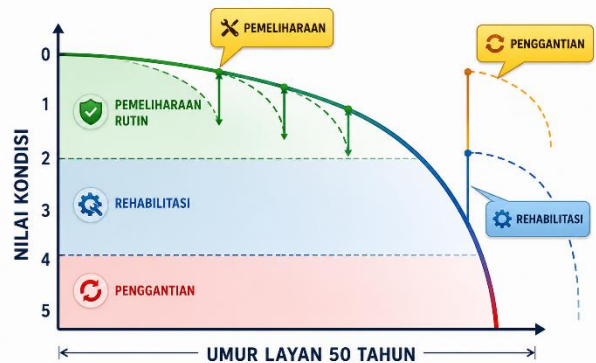
Prediksi usia jembatan dilakukan melalui pendekatan analisis nilai kondisi struktur berdasarkan umur layanan yang direncanakan, dengan mengacu pada Pedoman Penanganan dan Preservasi Jembatan [3] yang mengkuantifikasi hubungan antara umur jembatan dan nilai kondisi menggunakan model deterministik maupun probabilistik. Salah satu metode deterministik menggunakan persamaan eksponensial yang menghubungkan nilai kondisi (NK) dengan usia jembatan (Y) dan usia rencana (N), yaitu:

$$NK = 5 - \left( \frac{100 - Y}{a} \right)^{1/b} \dots\dots\dots(1)$$

dimana:  
 NK = Nilai Kondisi  
 Y = Usia Jembatan

N = Usia Rencana

Di mana a = 4,66 dan b = 1,9051, serta umur rencana jembatan (N) umumnya diasumsikan 50 tahun. Persamaan ini digunakan untuk menentukan level intervensi pemeliharaan seperti pemeliharaan rutin, rehabilitasi, atau penggantian berdasarkan grafik hubungan nilai kondisi terhadap usia layanan jembatan, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Nilai Kondisi Jembatan terhadap Usia Sisa Jembatan

Untuk analisis prediktif yang lebih mendalam, pendekatan probabilistik berbasis proses Markov telah banyak diterapkan, di mana nilai kondisi jembatan pada waktu tertentu dapat diprediksi menggunakan rumus:

$$NK_t = NK_{t-1} \cdot P = NK_0 P^t \dots\dots\dots(2)$$

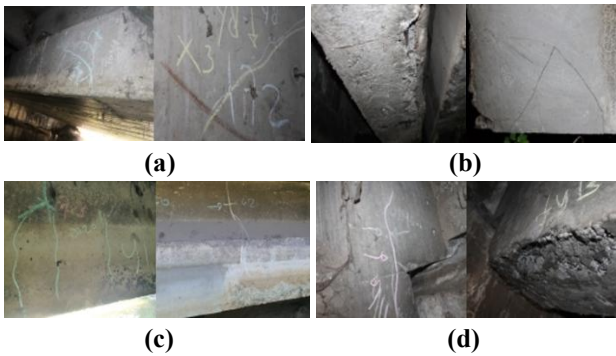
Di mana P adalah matriks probabilitas transisi (MPT) yang memuat informasi probabilitas perubahan kondisi dari tahun ke tahun, dan π(0) adalah vektor nilai kondisi awal. Namun, pendekatan Markov konvensional memiliki keterbatasan karena menggunakan proses diskrit dan asumsi waktu homogen. Untuk mengatasi hal tersebut, model semi-Markov dikembangkan dengan mempertimbangkan waktu tinggal (*sojourn time*) dalam setiap kondisi, yang memungkinkan prediksi degradasi infrastruktur jembatan secara lebih akurat dan realistis. Studi oleh Wu dkk [9], Mašović dkk [10], dan Fang & Sun [15] telah menunjukkan bahwa model semi-Markov memberikan tingkat akurasi prediksi yang lebih tinggi serta mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan jembatan yang lebih efisien, tepat waktu, dan adaptif terhadap variasi kondisi lingkungan, volume lalu lintas, serta jenis material struktur.

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1. Hasil Inspeksi Visual**

Penilaian kondisi jembatan dilakukan pada 11 jembatan strategis di Provinsi Jawa Timur menggunakan metode

*Bridge Management System* (BMS) yang mengacu pada Panduan Pemeriksaan Jembatan tahun 1993 dan sistem SRKFP (Struktur, Retak, Kuantitas, Fungsi, Pengaruh) [1]. Inspeksi visual dilakukan secara sistematis pada lima level komponen struktural utama jembatan, yaitu bangunan atas (BA), lantai (LNT), bangunan bawah (BB), dinding abutmen dan sayap (DAS), serta jalan pendekat (OP), dengan fokus penilaian pada elemen struktural utama jembatan (JBT). Nilai kondisi (NK) yang diperoleh dari inspeksi visual merepresentasikan tingkat kerusakan struktur berdasarkan parameter S (Struktur), R (Kerusakan), K (Kuantitas), F (Fungsi), dan P (Pengaruh), dengan skala penilaian 0 hingga 5, di mana nilai 0-1 menunjukkan kondisi baik atau cacat ringan yang belum berkembang, nilai 2 menunjukkan kerusakan ringan yang mulai menyebar dan membutuhkan pemantauan, sementara nilai  $\geq 3$  mengindikasikan kerusakan berat yang memerlukan rehabilitasi atau penggantian [1], [2]. Dokumentasi visual dari kegiatan inspeksi di lapangan disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Dokumentasi Hasil Inspeksi Visual Jembatan (a) Ambeng-Ambeng II; (b) Tebalokan II No. 5; (c) Moro Pelang; (d) Dati

Berdasarkan dokumentasi pada Gambar 4., ditemukan kerusakan signifikan pada elemen girder (balok utama) jembatan. Kerusakan pada girder ini terklasifikasi sebagai kerusakan berat karena telah menyebar luas dan berpotensi membahayakan integritas struktural jembatan, sehingga menghasilkan nilai kondisi 3 pada komponen bangunan atas (BA) [2]. Setiap jenis kerusakan dicatat menggunakan formulir inspeksi BMS yang telah distandarisasi dan dinilai secara hierarkis dari Level 5 hingga Level 1 dengan mempertimbangkan tingkat signifikansi pengaruh setiap elemen terhadap keseluruhan struktur jembatan [1]. Hasil lengkap penilaian kondisi visual dari 11 jembatan yang dievaluasi disajikan pada Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 3, hasil inspeksi visual menunjukkan variasi kondisi struktural yang signifikan di antara 11 jembatan yang dievaluasi. Lima jembatan yaitu Ambeng-Ambeng II, Tebalokan II No. 5, Singosari, Moro Pelang, dan Dati memperoleh nilai kondisi jembatan (NK) sebesar 3, yang menurut klasifikasi BMS termasuk dalam kategori

"rehabilitasi" dan mengindikasikan kerusakan berat yang telah menyebar luas serta membahayakan. Jembatan dengan nilai kondisi 3 berada dalam kondisi rusak berat dan memerlukan perhatian segera untuk mencegah degradasi lebih lanjut yang dapat mengancam keselamatan pengguna jalan [6].

Tabel 3. Hasil Penilaian Kondisi Visual Jembatan

Nama Jembatan	BA	LNT	BB	DAS	OP	NK
Ambeng-Ambeng II	3	3	2	2	1	3
Tebalokan II No. 5	3	2	2	2	1	3
Mandepo No.10	2	2	2	2	2	2
Pandanan No. 13	2	2	1	2	0	2
Pancur Singosari	2	2	2	2	2	2
Waru Kulon	3	3	2	1	2	3
Moro Pelang	2	2	2	1	2	2
Kebalandono	3	2	2	2	1	3
Dati	2	2	2	0	1	2
Tenawong	3	2	2	2	2	3
	2	2	1	2	2	2

Analisis distribusi kerusakan pada komponen struktural menunjukkan bahwa elemen bangunan atas (BA) memiliki tingkat kerusakan tertinggi dengan 7 dari 11 jembatan (63,6%) memperoleh nilai kondisi 3, diikuti oleh elemen lantai (LNT) dengan 5 jembatan (45,5%) bernilai kondisi 3. bangunan atas jembatan cenderung mengalami deteriorasi lebih cepat akibat paparan langsung terhadap beban lalu lintas berulang, kondisi cuaca ekstrem, dan faktor lingkungan seperti kelembaban dan suhu [5]. Jembatan tertua adalah Moro Pelang yang dibangun tahun 1970 (55 tahun) dengan nilai kondisi 3, mengonfirmasi korelasi positif antara usia jembatan dengan tingkat deteriorasi struktural.

### 3.2. Hasil Pengujian Non-Destructive Testing (NDT)

Pengujian non-destruktif (NDT) dilakukan menggunakan dua metode utama, yaitu *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dan *Schmidt Hammer Test*, untuk mengevaluasi kualitas dan kekuatan beton secara kuantitatif tanpa merusak elemen struktural [9]. Metode UPV mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik melalui material beton, yang memberikan indikasi terhadap kepadatan, homogenitas, dan keberadaan cacat internal seperti retak, rongga, atau delaminasi. Menurut British Standart [16] dan Lencis dkk [17], kecepatan gelombang ultrasonik dalam beton dapat digunakan sebagai indikator kualitas material, dengan klasifikasi: kecepatan  $>4500$  m/s untuk kualitas sangat baik (*excellent*), 3500-4500 m/s untuk kualitas baik (*good*), 3000-3500 m/s untuk kualitas sedang (*medium*), 2000-

3000 m/s untuk kualitas buruk (*poor*), dan <2000 m/s untuk kualitas sangat buruk (*very poor*). Sementara itu, *Schmidt Hammer Test* mengukur nilai *rebound hardness* yang berkorelasi dengan kuat tekan beton permukaan. Hasil lengkap pengujian NDT pada 11 jembatan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian NDT (UPV dan *Schmidt Hammer*)

Nama Jembatan	Nilai Kondisi	Average UPV (m/s)	Average Hammer Test (MPa)
Ambeng-Ambeng II	3	3265	19
Tebalokan II No. 5	3	3111	24
Mandepo No.10	2	3868	28
Pandanan No. 13	2	3745,25	19,5
Pancur	2	3883	23
Singosari	3	2892,25	22,5
Waru Kulon	2	3423,5	21,25
Moro Pelang	3	3200	29
Kebalandono	2	3485	23,25
Dati	3	3326	22,5
Tenawong	2	3705,25	23,25

Berdasarkan Tabel 4., hasil pengujian UPV menunjukkan variasi kecepatan gelombang ultrasonik berkisar antara 2892,25 m/s hingga 3883 m/s, dengan nilai rata-rata 3370,75 m/s. Lima jembatan yaitu Mandepo No. 10 (3868 m/s), Pancur (3883 m/s), Pandanan No. 13 (3745,25 m/s), Tenawong (3705,25 m/s), dan Kebalandono (3485 m/s) memiliki kualitas beton yang baik dengan nilai UPV >3500 m/s. Empat jembatan berada dalam kategori kualitas sedang dengan nilai UPV 3000-3500 m/s, sedangkan dua jembatan yaitu Singosari (2892,25 m/s) dan Moro Pelang (3200 m/s) menunjukkan kualitas beton yang relatif rendah, mengindikasikan deteriorasi internal yang signifikan.

Pengujian *Schmidt Hammer* memberikan hasil nilai *rebound* dimana nilai tersebut menginterpretasikan kuat tekan beton secara *non-destructive test* yang berkisar antara 19 MPa hingga 29 MPa, dengan nilai rata-rata 23,02 MPa. Jembatan Moro Pelang dan Mandepo No. 10 menunjukkan nilai tertinggi (29 MPa dan 28 MPa), sedangkan Ambeng-Ambeng II dan Pandanan No. 13 menunjukkan nilai terendah (19 MPa dan 19,5 MPa), mengindikasikan deteriorasi kekuatan permukaan beton akibat faktor lingkungan.

Analisis korelasi antara hasil UPV dan *Schmidt Hammer* menunjukkan pola yang tidak sepenuhnya linier, mengindikasikan bahwa kedua metode mengukur parameter kualitas beton yang berbeda namun saling melengkapi. Pendekatan probabilistik berbasis *life-cycle cost optimization* memanfaatkan model semi-Markov untuk mengakomodasi ketidakpastian dalam durasi

kerusakan dan efektivitas perawatan, yang memberikan potensi besar dalam merancang strategi pemeliharaan jangka panjang yang efisien biaya [9]. Integrasi data visual BMS dengan data kuantitatif NDT menjadi dasar untuk pengembangan model prediksi umur jembatan yang lebih akurat dan objektif.

### 3.3. Hasil Prediksi Umur Jembatan

Prediksi sisa umur jembatan pada penelitian ini dihitung berdasarkan nilai kondisi (NK) yang diperoleh dari hasil survei tahun 2025. Persamaan eksponensial pada bagian metode digunakan untuk memperoleh usia layanan ekuivalen (Y) untuk setiap nilai kondisi dengan asumsi umur rencana jembatan (N) sebesar 50 tahun, konstanta a = 4,66, dan b = 1,9051. Pendekatan ini merupakan pendekatan condition-based, yaitu estimasi sisa umur diturunkan dari kondisi aktual jembatan pada saat inspeksi, bukan hanya dari umur kronologis sejak tahun pembangunan. Secara konseptual, pendekatan ini sejalan dengan Jabbar dkk. [18] yang menekankan bahwa penilaian umur layanan jembatan eksisting perlu mempertimbangkan kondisi aktual struktur, serta Srikanth dan Arockiasamy [19] yang menunjukkan bahwa model deteriorasi dan remaining useful life membutuhkan data kondisi sebagai variabel utama dalam prediksi kinerja jembatan. Prediksi ini menggunakan persamaan eksponensial yang menghubungkan nilai kondisi (NK) dengan usia jembatan (Y) dan usia rencana (N):

$$5 - 3 = \left( \frac{100 - \frac{Y}{50\%}}{4,66} \right)^{0,5249} \dots\dots\dots(3)$$

$$Y = 41,273 \dots\dots\dots(4)$$

Berdasarkan hasil perhitungan, jembatan dengan NK = 2 memiliki usia layanan ekuivalen sekitar 31,11 tahun. Dengan umur rencana 50 tahun, sisa umur jembatan pada kondisi tersebut adalah 18,89 tahun atau dibulatkan menjadi 19 tahun. Oleh karena itu, tahun estimasi penanganan untuk jembatan dengan NK = 2 adalah 2025 + 19 = 2044. Sementara itu, jembatan dengan NK = 3 memiliki usia layanan ekuivalen sekitar 41,27 tahun, sehingga sisa umur yang diperoleh adalah 8,73 tahun atau dibulatkan menjadi 9 tahun. Dengan demikian, tahun estimasi penanganan untuk jembatan dengan NK = 3 adalah 2025 + 9 = 2034. Pola ini konsisten dengan studi Panji dan Sumargo [5], Safana dan Sumargo [7], serta Budiarmo dkk. [6], yang menggunakan nilai kondisi BMS sebagai dasar untuk menentukan prioritas pemeliharaan, rehabilitasi, dan prediksi sisa umur layanan jembatan.

Perlu ditegaskan bahwa tahun estimasi pada Tabel 5 dihitung berdasarkan kondisi jembatan pada tahun survei 2025, bukan langsung berdasarkan tahun pembangunan. Oleh karena itu, jembatan dengan nilai kondisi yang sama

akan menghasilkan sisa umur dan tahun estimasi penanganan yang sama. Tahun bangun tetap digunakan untuk menghitung usia aktual jembatan pada saat survei dan usia jembatan pada tahun estimasi. Penegasan ini penting karena dalam sistem manajemen jembatan, sebagaimana dijelaskan oleh Federal Highway Administration [20], data kondisi digunakan sebagai alat bantu perencanaan jaringan, penentuan prioritas, dan alokasi sumber daya, bukan sebagai satu-satunya dasar untuk menyatakan keamanan struktur secara absolut.

Tabel 5 menyajikan estimasi sisa umur dan tahun penanganan jembatan berdasarkan hasil survei 2025. Kolom usia saat survei menunjukkan usia aktual jembatan pada tahun 2025, kolom sisa umur menunjukkan hasil perhitungan berdasarkan NK, kolom tahun estimasi penanganan menunjukkan tahun prioritas penanganan, sedangkan kolom usia jembatan pada tahun estimasi menunjukkan usia jembatan ketika tahun penanganan tersebut tercapai. Dengan pendekatan ini, jembatan dengan NK = 3 diprioritaskan untuk penanganan pada tahun 2034, sedangkan jembatan dengan NK = 2 diprioritaskan pada tahun 2044.

Tabel 5. Estimasi Sisa Umur dan Tahun Penanganan Jembatan Berdasarkan Survei 2025

Nama Jembatan	Tahun Bangun	Nilai Kondisi Jembatan	Usia Saat Survei 2025	Sisa Umur Berdasarkan NK	Tahun Estimasi Penanganan	Usia jembatan pada tahun estimasi (Tahun)
Ambeng-Ambeng II	1991	3	34	9	2034	43
Tebalokan II No. 5	1992	3	33	9	2034	42
Mandepo No.10	1980	2	45	19	2044	64
Pandanan No. 13	1993	2	32	19	2044	51
Pancur	1992	2	33	19	2044	52
Singosari	1990	3	35	9	2034	44
Waru Kulon	1990	2	35	19	2044	54
Moro Pelang	1970	3	55	9*	2034*	64
Kebalandono	1990	2	35	19	2044	54
Dati	1990	3	35	9	2034	44
Tenawong	1990	2	35	19	2044	54

\*) Jembatan Moro Pelang telah berusia 55 tahun pada saat survei 2025 dan telah melampaui umur rencana 50 tahun. Oleh karena itu, estimasi tahun 2034 tidak dimaknai sebagai jaminan keamanan layanan hingga tahun tersebut, melainkan sebagai hasil screening berbasis nilai kondisi. Jembatan ini perlu menjadi prioritas untuk inspeksi detail, evaluasi kapasitas, rehabilitasi, atau penggantian.

Berdasarkan Tabel 5, rata-rata usia jembatan pada tahun estimasi adalah sekitar 51,45 tahun. Kelompok jembatan dengan NK = 3, yaitu Ambeng-Ambeng II, Tebalokan II No. 5, Singosari, Moro Pelang, dan Dati, memiliki sisa

umur lebih pendek, yaitu sekitar 9 tahun dari tahun survei 2025. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jembatan dengan NK = 3 perlu ditempatkan sebagai prioritas penanganan lebih awal dibandingkan jembatan dengan NK = 2. Sebaliknya, jembatan dengan NK = 2 masih memiliki estimasi sisa umur sekitar 19 tahun, sehingga penanganan dapat diarahkan pada pemantauan berkala, pemeliharaan periodik, dan pengendalian agar kerusakan tidak berkembang menjadi kategori yang lebih berat. Temuan ini sejalan dengan prinsip bridge management yang menempatkan nilai kondisi sebagai indikator awal untuk penyusunan prioritas preservasi, sebagaimana juga diterapkan dalam studi BMS oleh Budiarmo dkk. [6] dan Safana dan Sumargo [7].

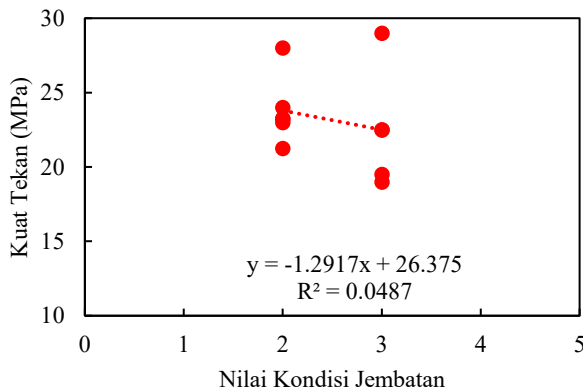
Jembatan Moro Pelang perlu ditempatkan sebagai kasus khusus dalam interpretasi hasil prediksi umur layanan karena jembatan ini dibangun pada tahun 1970 dan telah berusia 55 tahun pada saat survei tahun 2025. Dengan nilai kondisi NK = 3, Jembatan Moro Pelang termasuk dalam kelompok jembatan yang memerlukan prioritas penanganan lebih awal. Hasil pengujian NDT menunjukkan bahwa jembatan ini memiliki nilai UPV sebesar 3200 m/s, yang mengindikasikan kualitas beton pada kategori sedang dan menunjukkan adanya potensi penurunan homogenitas material. Di sisi lain, nilai Hammer Test sebesar 29 MPa relatif tinggi dibandingkan beberapa jembatan lain dengan nilai kondisi yang sama, sehingga hasil uji kuat tekan permukaan tersebut perlu ditafsirkan secara hati-hati dan tidak dapat digunakan sebagai indikator tunggal dalam menyimpulkan kondisi struktur. Kondisi ini menunjukkan bahwa evaluasi terhadap Moro Pelang perlu dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan inspeksi visual BMS, hasil UPV, Hammer Test, umur aktual jembatan, serta evaluasi struktural lanjutan.

Selain pendekatan berbasis nilai kondisi dan NDT, jembatan yang telah melampaui umur rencana seperti Moro Pelang juga memerlukan evaluasi kinerja struktural, terutama terkait kapasitas dan batas layan. Yudoprastetyo dkk. [21] menunjukkan bahwa Teorema Castigliano dapat digunakan sebagai pendekatan metode energi untuk mengevaluasi defleksi pada jembatan beton prategang, sehingga relevan sebagai rujukan tambahan dalam menekankan pentingnya evaluasi respons struktural. Meskipun pendekatan tersebut berbeda dengan metode BMS dan NDT yang digunakan dalam penelitian ini, kajian tersebut memperkuat bahwa keputusan penanganan jembatan berusia lanjut tidak cukup hanya didasarkan pada estimasi sisa umur, tetapi perlu dilengkapi dengan pemeriksaan teknis yang lebih mendalam, seperti inspeksi detail, evaluasi kapasitas, analisis defleksi, load rating, serta kajian rehabilitasi atau penggantian.

Temuan ini juga konsisten dengan pendekatan semi-Markov yang digunakan dalam manajemen jembatan modern, di mana kondisi struktur diperlakukan sebagai keadaan yang dapat berubah dari waktu ke waktu dan digunakan untuk mendukung keputusan pemeliharaan yang adaptif [9], [10], [15]. Meskipun penelitian ini belum membangun matriks probabilitas transisi, hasil estimasi berbasis NK dapat diposisikan sebagai dasar awal untuk pengembangan model prediksi yang lebih lanjut apabila data inspeksi historis tersedia.

**3.4. Nilai Kondisi Jembatan Terhadap Uji NDT**

Analisis hubungan antara nilai kondisi jembatan (NK) dan parameter Non-Destructive Testing (NDT) dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana hasil inspeksi visual BMS sejalan dengan indikator kuantitatif kualitas beton. Parameter NDT yang digunakan adalah kuat tekan beton hasil Schmidt Hammer Test dan kecepatan rambat gelombang ultrasonik hasil Ultrasonic Pulse Velocity (UPV). Pendekatan gabungan ini relevan dengan kajian Omar dan Nehdi [19] yang menyatakan bahwa penilaian kondisi jembatan beton bertulang akan lebih komprehensif apabila inspeksi visual dikombinasikan dengan metode NDT, karena kerusakan internal atau penurunan mutu material tidak selalu dapat diidentifikasi hanya melalui pengamatan visual. Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) pada grafik digunakan untuk menunjukkan proporsi variasi parameter NDT yang dapat dijelaskan oleh perubahan NK melalui model regresi linear, sedangkan tanda kemiringan garis regresi menunjukkan arah hubungan antara NK dan parameter NDT.



Gambar 5. Hubungan Nilai Kondisi Jembatan dengan Kuat Tekan Beton

Berdasarkan Gambar 5, hubungan antara nilai kondisi jembatan dan kuat tekan beton hasil Schmidt Hammer Test menghasilkan persamaan regresi linear  $y = -1,2917x + 26,375$  dengan nilai  $R^2 = 0,0487$ . Karena kemiringan garis regresi bernilai negatif, koefisien korelasi linear ( $R$ ) bernilai sekitar  $-0,221$ . Nilai  $R^2$  yang sangat rendah menunjukkan bahwa perubahan NK hanya mampu menjelaskan sekitar 4,87% variasi kuat tekan beton hasil Hammer Test. Dengan demikian, hubungan linear antara

NK dan kuat tekan beton permukaan pada data penelitian ini tergolong sangat lemah. Hasil ini menunjukkan bahwa Hammer Test lebih tepat digunakan sebagai data pendukung, bukan sebagai indikator tunggal untuk menjelaskan peningkatan nilai kondisi jembatan.

$$y = -1,2917x + 26,375 \dots\dots\dots(5)$$

$$R^2 = 0,0487 \approx R = -0,221 \dots\dots\dots(6)$$

Rendahnya nilai  $R^2$  pada hubungan NK terhadap Hammer Test menunjukkan bahwa hasil Schmidt Hammer perlu ditafsirkan secara hati-hati dan tidak dapat digunakan sebagai indikator tunggal untuk menilai degradasi struktur jembatan. Hal ini sejalan dengan karakteristik Schmidt Hammer Test yang terutama merepresentasikan kekerasan permukaan beton, sehingga hasilnya dapat dipengaruhi oleh kondisi permukaan, karbonasi beton tua, kelembaban, kekasaran permukaan, dan variasi lokal pada titik pengujian. Dalam penelitian evaluasi kondisi struktur beton, Yudoprasetyo dkk. [13], [14] juga menempatkan hasil Hammer sebagai bagian dari evaluasi kondisi yang perlu dikombinasikan dengan informasi lain. Kasus Jembatan Moro Pelang memperkuat interpretasi tersebut karena jembatan ini memiliki NK = 3 dan usia aktual 55 tahun, namun nilai Hammer Test relatif tinggi dibandingkan beberapa jembatan lain. Oleh karena itu, hasil Hammer Test perlu dibaca bersama hasil inspeksi visual, data UPV, umur jembatan, dan evaluasi teknis lanjutan.

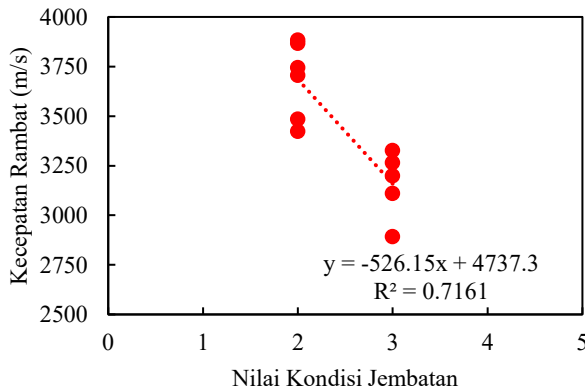
Berbeda dengan Hammer Test, hubungan antara NK dan UPV pada Gambar 6 menunjukkan pola negatif yang lebih kuat. Persamaan regresi linear yang diperoleh adalah  $y = -526,15x + 4737,3$  dengan nilai  $R^2 = 0,7161$ . Karena kemiringan regresi bernilai negatif, nilai koefisien korelasi linear ( $R$ ) adalah sekitar  $-0,846$ . Nilai  $R^2$  tersebut menunjukkan bahwa sekitar 71,61% variasi kecepatan rambat beton dapat dijelaskan oleh perubahan nilai kondisi jembatan melalui model linear. Secara praktis, setiap kenaikan satu tingkat NK berasosiasi dengan penurunan kecepatan rambat gelombang ultrasonik sekitar 526,15 m/s. Hubungan negatif ini sejalan dengan konsep pengujian UPV pada British Standard [15], di mana penurunan kecepatan rambat gelombang dikaitkan dengan penurunan kualitas, homogenitas, atau kepadatan beton.

$$y = -526,35x + 4737,7 \dots\dots\dots(7)$$

$$R^2 = 0,7161 \approx R = -0,846 \dots\dots\dots(8)$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa UPV memiliki konsistensi yang lebih baik dibandingkan Hammer Test dalam merepresentasikan penurunan kualitas beton terhadap peningkatan nilai kondisi jembatan. Hal ini dapat dipahami karena UPV tidak hanya mencerminkan kondisi permukaan, tetapi juga berkaitan dengan kepadatan, homogenitas, dan potensi cacat internal pada beton. Temuan ini mendukung rekomendasi Omar dan Nehdi [22] bahwa kombinasi inspeksi visual dan NDT dapat meningkatkan kualitas diagnosis kondisi jembatan,

terutama ketika masing-masing metode memiliki sensitivitas terhadap jenis kerusakan yang berbeda. Dengan demikian, nilai UPV lebih sesuai digunakan sebagai indikator kuantitatif pendukung dalam penilaian kondisi jembatan, sedangkan Hammer Test tetap bermanfaat sebagai informasi tambahan mengenai kekerasan permukaan beton.



Gambar 6. Hubungan Nilai Kondisi Jembatan dengan Kecepatan Rambat Beton

Secara keseluruhan, hasil regresi menunjukkan bahwa integrasi BMS dan NDT memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap kondisi jembatan, sebagaimana juga ditekankan dalam penelitian terkait manajemen jembatan dan condition assessment [6], [7], [22]. Namun, interpretasi hubungan NK terhadap parameter NDT perlu dilakukan secara proporsional. Hubungan NK terhadap Hammer Test tidak dapat dinyatakan kuat karena nilai  $R^2$  hanya 0,0487 dan  $R = -0,221$ , sedangkan hubungan NK terhadap UPV menunjukkan korelasi negatif yang kuat dengan  $R^2 = 0,7161$  dan  $R = -0,846$ . Oleh karena itu, prediksi kondisi dan prioritas penanganan jembatan sebaiknya tidak hanya didasarkan pada satu parameter, tetapi menggunakan kombinasi hasil inspeksi visual, UPV, Hammer Test, usia jembatan, serta evaluasi teknis lanjutan apabila diperlukan. Dengan jumlah data yang masih terbatas dan nilai NK yang hanya berada pada kategori 2 dan 3, hasil regresi pada penelitian ini sebaiknya diposisikan sebagai model awal untuk mendukung screening dan prioritasasi, bukan sebagai model prediksi universal untuk seluruh populasi jembatan.

Dengan demikian, keterkaitan hasil penelitian ini dengan penelitian terdahulu terletak pada dua aspek utama. Pertama, hasil subbab 3.3 memperkuat peran BMS sebagai alat prioritasasi pemeliharaan berbasis kondisi sebagaimana digunakan dalam studi BMS terdahulu [5]–[7]. Kedua, hasil subbab 3.4 menunjukkan bahwa integrasi inspeksi visual dengan NDT, terutama UPV, dapat memberikan dasar teknis yang lebih objektif dalam menafsirkan kondisi material beton, sejalan dengan kajian condition assessment jembatan beton bertulang oleh Omar dan Nehdi [22].

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, integrasi metode Bridge Management System (BMS) dengan Non-Destructive Testing (NDT) memberikan penilaian kondisi jembatan yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan inspeksi visual saja. Hasil regresi menunjukkan bahwa hubungan NK terhadap Hammer Test tergolong sangat lemah, dengan  $R^2 = 0,0487$  dan  $R = -0,221$ , sedangkan hubungan NK terhadap UPV menunjukkan korelasi negatif yang kuat, dengan  $R^2 = 0,7161$  dan  $R = -0,846$ . Temuan ini menunjukkan bahwa UPV lebih konsisten dalam merepresentasikan penurunan kualitas beton terhadap peningkatan nilai kondisi jembatan, sementara Hammer Test tetap berfungsi sebagai data pendukung yang perlu ditafsirkan bersama hasil inspeksi visual dan umur jembatan.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa prediksi umur jembatan dengan tipe GTP memiliki rata-rata umur lebih dari 51 tahun, sementara jembatan dengan nilai kondisi 3 menunjukkan sisa umur yang lebih pendek, dengan estimasi sekitar 9 tahun. Data yang diperoleh sangat berguna untuk merencanakan tindakan pemeliharaan yang tepat waktu, serta mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan infrastruktur jembatan di wilayah Batas Kabupaten Lamongan – Batas Kota Gresik.

Dengan demikian, pendekatan yang menggabungkan BMS dan NDT ini dapat menjadi solusi yang lebih efisien dalam manajemen jembatan, membantu meminimalkan biaya perawatan yang tidak perlu dan meningkatkan keselamatan infrastruktur jembatan di masa mendatang.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih atas hibah penelitian Nomor 2801/PKS/ITS/2025 yang diberikan oleh Direktorat Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRPM) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Kami juga mengucapkan terima kasih kepada tim surveyor jembatan di Gresik dan Lamongan atas bantuan mereka dalam pengumpulan data di lokasi dan uji lapangan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal Binamarga., *Bridge Management System (BMS): IBMS Planning dan Programming Manual*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum, 1993.
- [2] O. Soeherman, R. Mastra, D. Hermana, and R. Irawan, *Identifikasi Kerusakan Struktur*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2024.
- [3] Direktorat Jenderal Binamarga, *Pedoman*

- Pemeriksaan Jembatan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Direktorat Jenderal Bina Marga, 2022.
- [4] A. Pratiwi, N. Chairunnisa, I. Prasetya, I. Radam, and R. Nurwidayati, "Bridge Management System dan Bridge Condition Rating pada Evaluasi Kondisi Jembatan Girder Baja Komposit di Kabupaten Tapin," *Bul. Profesi Ins.*, vol. 6, pp. 26–31, Jan. 2023.
- [5] P. Marshando and S. Sumargo, "Penilaian Kondisi, Solusi Penanganan, dan Prediksi Umur Sisa Jembatan Way Kendawai I Bandar Lampung Menggunakan Bridge Management System (BMS)," *J. Tek. Sipil*, vol. 16, pp. 39–49, Feb. 2021.
- [6] R. N. D. S. Budiarmo, N. C. E. Yulianti, and H. Susanto, "Studi Inventarisasi Jembatan Menggunakan Metode Bridge Management System dan Bridge Condition Rating," *Compos. J. Civ. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 87–93, 2023.
- [7] N. G. Safana and S. Sumargo, "Penilaian Kondisi Visual dan Prediksi Sisa Umur Jembatan Way Gedau Lampung dengan Metode Bridge Management System," *J. Tek. Sipil*, vol. 28, no. 1 SE-, pp. 23–30, Jul. 2021.
- [8] M. R. Zaeni, S. F. Ambari, I. Sudarsono, and F. Mulyawati, "Analisis Nilai Kapasitas Jembatan Eksisting Menggunakan Metode Rating Factor (Jembatan Pelawi – Baturaja)," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 3, p. 154, 2023.
- [9] D. Wu, C. Yuan, W. Kumfer, and H. Liu, "A Life-Cycle Optimization Model Using Semi-Markov Process for Highway Bridge Maintenance," *Appl. Math. Model.*, vol. 43, Oct. 2016.
- [10] S. Mašović, S. Stošić, and R. Hajdin, "Application of semi-Markov decision process in bridge management," *LABSE Conf. Geneva 2015 Struct. Eng. Provid. Solut. to Glob. Challenges - Rep.*, pp. 1017–1024, 2015.
- [11] S. Karimi and O. Mirza, "Damage identification in bridge structures: review of available methods and case studies," *Aust. J. Struct. Eng.*, vol. ahead-of-p, no. ahead-of-print, pp. 89–119, May 2023.
- [12] D. Daley, "Failure Modes and Failure Mechanisms Course No: B03-007 Credit: 3 PDH Failure Modes and Failure Mechanisms," no. 877, 2013.
- [13] K. Yudoprasetyo, Y. Tajunnisa, R. B. A. Affandhie, and S. Suwandi, "Evaluasi Kondisi Struktur Terkini dan Rekomendasi Perkuatan pada Gedung Perkantoran di Surabaya," *Sewagati*, vol. 8, no. 6, pp. 2336–2346, Nov. 2024.
- [14] Moh Fadhlan Rosyidi, A. Susanto, K. Yudoprasetyo, and M. A. Alrasyidi, "Evaluasi dan Perkuatan Beton Bertulang Struktur Silo Kerucut," *Bangunan Teor. Prakt. Penelitian, dan Pengajaran Tek. Bangunan*, vol. 30, no. 2, pp. 169–180, Oct. 2025.
- [15] Y. Fang and L. Sun, "Developing A Semi-Markov Process Model for Bridge Deterioration Prediction in Shanghai," *Sustainability*, vol. 11, no. 19. 2019.
- [16] British Standart, "Testing concrete - Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete," *BSI Stand. Publ.*, 1986.
- [17] U. Lencis, A. Udris, P. Kara De Maeijer, and A. Korjakins, "Methodology for Determining the Correct Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete," *Buildings*, vol. 14, no. 3, p. 720, May 2024.
- [18] Z. A. Jabbar and H. Y. Aziz, "A Review Study on Structural Evaluation of Bridges, Methods, and Applications," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1507, no. 1, p. 12053, May 2025.
- [19] I. Srikanth and M. Arockiasamy, "Deterioration models for prediction of remaining useful life of timber and concrete bridges: A review," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 7, no. 2, pp. 152–173, 2020.
- [20] Federal Highway Administration, "Bridge Management Systems: Meeting the Challenges of Managing Bridge Assets." 2005.
- [21] K. Yudoprasetyo, I. R. Hariyanto, M. F. Rosyidi, and P. Al Manwaroh, "Aplikasi Teorema Castigliano untuk Analisis Defleksi pada Desain Jembatan Beton Prategang : Pendekatan Metode Energi untuk Evaluasi Kinerja Struktural," vol. 4, no. 4, pp. 10558–10572, 2026.
- [22] T. Omar and M. L. Nehdi, "Condition assessment of reinforced concrete bridges: Current practice and research challenges," *Infrastructures*, vol. 3, no. 3, pp. 1–23, 2018.