

IDENTIFIKASI CEPAT PARAMETER DINAMIK JEMBATAN RANGKA BAJA BERBASIS *LOW-COST SENSOR*

Alan Putranto¹⁾, Nur Aida²⁾, Agung Iswandi³⁾, dan Khairul Muttaqin⁴⁾

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Sipil dan Pertambangan, Politeknik Negeri Ketapang
E-mail: alanputranto@politap.ac.id

Abstract

Bridges are vital transportation infrastructures subject to dynamic loads from traffic and environmental influences, which can degrade structural performance over time. Conventional structural health monitoring (SHM) systems are often limited by cost and complexity. This study investigates the use of embedded smartphone accelerometers and the ambient vibration test (AVT) method to identify dynamic parameters of steel truss bridges in Ketapang, West Kalimantan. The study employs a non-destructive, low-cost approach by using daily traffic as a natural excitation source. Several bridges were selected based on service lifetime, visible damage, and functional condition. Data collection was performed using the Resonance Android application, which records acceleration and processes it into frequency spectra. Dominant frequencies and damping ratios were extracted from the results. Field measurements on Pawan 1 and Pawan 2 bridges indicate that several dynamic parameters, including frequency, displacement, and damping ratio, exceed standard limits, suggesting possible structural degradation. These findings demonstrate that smartphone-based monitoring can provide preliminary diagnostic insights and support decisions for more advanced, cost-intensive evaluations.

Keywords: *structural health monitoring, ambient vibration test, smartphone accelerometer, damping ratio, bridge inspection*

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan komponen vital dalam infrastruktur transportasi yang mendukung mobilitas manusia dan distribusi barang. Dalam operasionalnya, jembatan terkena beban dinamis dari lalu lintas kendaraan serta pengaruh lingkungan seperti angin, getaran tanah, dan perubahan temperatur. Beban berulang ini dapat menurunkan kinerja struktur seiring waktu—melalui deformasi permanen, degradasi material, atau kerusakan lokal—yang tidak selalu mudah terdeteksi secara visual. Oleh karena itu, diperlukan metode monitoring struktur yang efektif, efisien, dan dapat mendeteksi perubahan kondisi struktur secara dini.

Parameter dinamik seperti frekuensi alami, rasio redaman, dan mode getar penting dalam menggambarkan karakteristik dinamis struktur. Nilai-nilai ini mencerminkan hubungan antara kekakuan, massa, dan kapasitas disipasi energi struktur, dan perubahan parameter ini dapat berfungsi sebagai indikator dini penurunan kekakuan atau kerusakan (Qu *et al*, 2024 and Cao *et al*, 2024). Meskipun pendekatan analisis modal konvensional dengan sensor profesional sangat akurat, implementasinya terbatas oleh biaya tinggi dan kebutuhan teknis yang kompleks.

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan sensor murah dan akselerometer bawaan smartphone untuk *Structural Health Monitoring* (SHM) jembatan menjadi fokus utama

penelitian karena menawarkan solusi efisien dan ekonomis dibanding sistem konvensional yang mahal (Battini & Cederholm, 2024). Bahkan beberapa peneliti sebelumnya telah mengembangkan teknologi robotik untuk melakukan inspeksi jembatan (Lin *et al.*, 2023 dan 2024, Putranto, 2025). Komarizadehasl *et al.* (2024) membandingkan akselerometer *Internet of Thing* (IoT) LARA dengan iPhone XR dan menunjukkan bahwa keduanya mampu mengidentifikasi frekuensi alami jembatan secara akurat. Matarazzo *et al.* (2022) membuktikan bahwa data crowdsourcing dari perjalanan kendaraan dapat mengidentifikasi modal jembatan secara tepat dan memperpanjang umur layanan infrastruktur. Talebi-Kalaleh dan Mei (2024) mengembangkan kerangka kerja compressed sensing untuk efisiensi data, dengan akurasi deteksi kerusakan tetap terjaga. Selain itu, aspek redaman struktur yang krusial untuk keselamatan dan umur layanan jembatan kini hanya dapat diidentifikasi melalui pengujian dinamis lapangan (Qu *et al.*, 2024). Ulasan oleh Ozer dan Kromanis (2024) menegaskan bahwa pendekatan berbasis smartphone meliputi identifikasi getaran, monitoring deformasi visual, hingga metode drive-by, menjadikannya solusi potensial untuk SHM jembatan yang berkelanjutan dan terjangkau.

Berdasarkan tren tersebut, penelitian ini bertujuan menguji penggunaan sensor akselerometer *smartphone Android* melalui metode *ambient vibration test* (AVT) dalam mengidentifikasi parameter dinamik jembatan rangka baja di Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat. Dengan memanfaatkan gangguan dinamis lalu lintas biasa sebagai eksitasi, pendekatan ini bisa menjadi solusi low-cost, non-destruktif, dan representatif bagi monitoring struktur di wilayah terpencil dengan keterbatasan teknologi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi kuantitatif eksperimental lapangan yang bertujuan untuk mengidentifikasi parameter dinamik jembatan rangka baja dengan memanfaatkan sensor akselerometer internal pada *smartphone Android*. Metode yang digunakan adalah *ambient vibration test* yaitu pengukuran respons dinamis struktur tanpa eksitasi buatan, dengan memanfaatkan lalu lintas harian sebagai sumber gangguan dinamis. Pendekatan ini bersifat non-destruktif, efisien secara biaya, dan representatif untuk pemantauan struktur dalam kondisi operasional normal.

Objek penelitian adalah beberapa unit jembatan rangka baja di Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat. Jembatan ini dipilih melalui metode purposive sampling berdasarkan beberapa kriteria teknis, yaitu: (1) umur layan lebih dari 10 tahun, (2) struktur utama berupa

rangka baja dengan sambungan baut, (3) terdapat indikasi kerusakan minor secara visual, (4) adanya penurunan kenyamanan pengguna yang teramati, dan (5) kondisi fungsional jembatan memungkinkan pengujian dilakukan dengan aman.

Pengukuran dilakukan menggunakan aplikasi *resonance* pada perangkat Android, yang merekam data percepatan secara real-time melalui sensor akselerometer internal. Dua sensor merekam selama 120 detik dan dipasang menggunakan perekat transparan (isolasi) pada tengah bentang jembatan untuk segmen ke-1 pada elemen trotoar (disingkat *Tr*) dan rangka jembatan web (diagonal) (disingkat *Dg*). Kedua sensor mulai diaktifkan untuk merekam sesaat sebelum beban kendaraan berat melintasi jembatan 120 detik perekaman data. Sensor-sensor tersebut ditempatkan ditengah bentang jembatan dengan pertimbangan teknis perpindahan maksimum terjadi ditengah bentang. Setelah selesai pada segmen ke-1, kemudian kedua sensor dipindahkan ke segmen ke-2 dan seterusnya dilakukan prosedur pengukuran yang sama. Data ini kemudian diolah langsung oleh aplikasi menjadi spektrum frekuensi menggunakan transformasi *Fourier*. Puncak utama dari spektrum diidentifikasi sebagai frekuensi dominan dan diasumsikan sebagai frekuensi alami struktur. Rasio redaman dihitung menggunakan metode *logarithmic decrement*, yaitu dengan menganalisis penurunan amplitudo osilasi dari puncak berturut-turut. Nilai perpindahan (displacement) diperoleh melalui proses integrasi dua kali terhadap data percepatan, yang dilakukan secara otomatis oleh aplikasi.

Estimasi redaman dilakukan berdasarkan respons bebas getaran. Nilai logarithmic decrement (δ) (Inman, 2013) dihitung menggunakan persamaan:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x(t)}{x(t+nT)} \right) \quad (1)$$

Dimana:

$x(t)$ = amplitudo getaran pada waktu t puncak pertama).

$x(t + nT)$ = amplitudo setelah n siklus (misalnya puncak ke-4 bila $n=3$).

T = periode satu siklus osilasi.

n = jumlah siklus yang digunakan (biasanya 1 hingga 3 untuk menghindari *noise*).

Setelah diperoleh δ pada persamaan (1), nilai damping ratio (ζ) (Inman, 2013) dihitung dengan persamaan berikut:

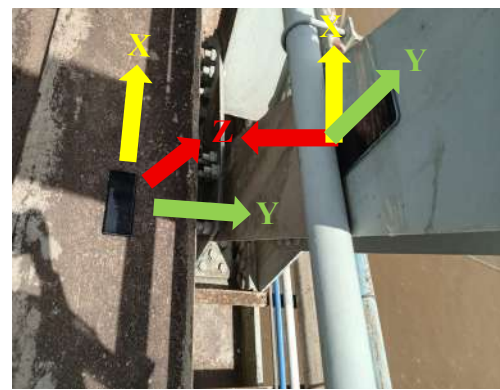
$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran dilakukan pada jembatan Pawan 1 dan jembatan Pawan 2. Pengukuran menggunakan 2 sensor yang diletakan di tengah bentang pada elemen trotoar (*Tr*) dan rangka jembatan web (*Dg*). Masing-masing perletakan sensor dan visualisasi jembatan dapat dilihat pada gambar 1 – gambar 2 dan hasil parameter dinamik masing-masing jembatan ditunjukkan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1
Data Parameter Dinamik Jembatan diukur Pada Tengah Bentang

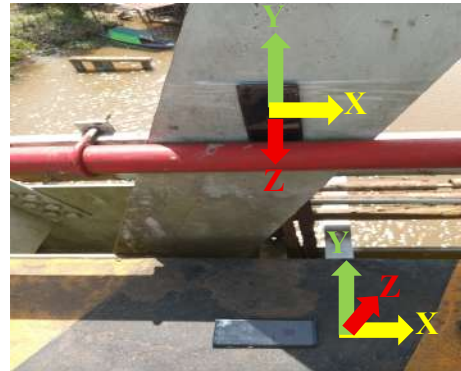
Data Teknis	Lokasi sensor	Frekuensi (Hz)			Perpindahan (mm)			Damping ratio (%)
		x	y	z	x	y	z	
Jembatan Pawan 1 • Umur layan 37 tahun • Panjang total 240 m • Lebar 7 m • Tinggi 5 m	Segmen 1 (Dg 1)	34,1	2,3	27,2	30,7	26,7	34,6	8,2
	Segmen 1 (Tr 1)	14,1	18	2,3	3,9	0,3	6	3,2
	Segmen 2 (Dg 2)	2,3	2,2	14,4	1,6	9,3	40,7	7,2
	Segmen 2 (Tr 2)	9,2	2,3	14,5	14,8	3,4	66	11,3
	Segmen 3 (Dg 3)	9	2,2	17,4	14	10	22,3	3,1
	Segmen 3 (Tr 3)	3,5	2,3	2,2	12,9	11,2	45,6	5,7
	Segmen 4 (Dg 4)	42,4	2,3	17,9	22,1	5,9	53,2	2,9
	Segmen 4 (Tr 4)	14,5	16,9	2,3	0,4	7	27,1	5,9
Jembatan Pawan 2 • Umur layan 32 tahun • Panjang total 240 m • Lebar 7 m • Tinggi 5 m	Segmen 1 (Dg 1)	4,3	3,3	47	12,9	103,5	3,1	7,2
	Segmen 1 (Tr 1)	25,3	17	3,3	7,9	0,6	25,6	5,7
	Segmen 2 (Dg 2)	27,5	3,1	17,3	1,2	29,3	40,3	7,1
	Segmen 2 (Tr 2)	21,7	15,9	16,4	5,3	11,3	66,5	7,9
	Segmen 3 (Dg 3)	31,3	2,2	25,5	9,7	1,2	24,4	4,4
	Segmen 3 (Tr 3)	12,1	13,1	2,2	0,7	2,3	46,2	8,5



(a) visualisasi jembatan pawan 1 (b) perletakan sensor pada jembatan pawan 1



(a)



(b)

Gambar 2. (a) visualisasi jembatan pawan 2 (b) perletakan sensor pada jembatan pawan 2

Berdasarkan standar pembebanan jembatan pada SNI 1725:2016, faktor beban dinamis akibat kendaraan dan getaran lentur jembatan memiliki nilai frekuensi dasar berkisar antara 2 – 5 Hz. Sedangkan untuk redaman merujuk pada Eurocode 8 EN 1998-1 tahun 2004 harus memiliki rasio redaman tidak melebihi 5%. Pada AASHTO LRFD bridge design specification, syarat defleksi untuk jembatan baja di area urban adalah $L/1000$. Untuk data pada jembatan pawan 1 dan pawan 2, hampir dari sebagian besar parameter dinamik baik frekuensi, damping ratio, maupun perpindahan telah melewati nilai ambang batas. Hal ini sejalan dengan masa umur layan jembatan dan potensi degradasi struktur yang telah terjadi. Informasi ini dapat dijadikan langkah awal dalam pemeriksaan kesehatan struktur jembatan, dan sebagai dasar untuk melakukan monitoring dengan alat sensor yang lebih akurat agar dapat memberikan kepastian langkah dan perbaikan struktur jembatan yang dapat dilakukan dimasa yang akan datang.

KESIMPULAN

Dari data yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwasanya jembatan pawan 1 dan pawan 2 telah mengalami degradasi structural berdasarkan hasil analisa sensor cepat berbasis aplikasi *smartphone android*. Sensor berbasis *smartphone android* dapat memberikan gambaran awal parameter dinamik yang cukup informatif. Data-data yang dihasilkan dapat menjadi dasar mengambil keputusan yang tepat untuk langkah monitoring parameter dinamik lanjutan dengan alat sensor yang lebih standar dan mahal untuk memastikan langkah perbaikan jembatan yang tepat dan efisien biaya.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was funded by the Internal Research Grant for Beginner Lecturers (Hibah Penelitian Dosen Pemula Internal) in 2025. The authors would like to express their sincere gratitude to the Directorate of Research and Community Service at Politeknik Negeri Ketapang for the financial and administrative support provided during the implementation of this study.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2020). *LRFD bridge design specifications* (9th ed.). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Battini, L., & Cederholm, I. (2024). *Innovating smartphones as intelligent sensors for bridge data collection: Utilizing iPhone's accelerometer for structural health monitoring* (Master's thesis). KTH Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering and Computer Science.
- Cao, H., Liu, Z., Xu, X., & Wu, Z. (2024). Vibration-based methods for local damage identification of breathing cracks in truss-like structures. *Journal of Sound and Vibration*, 592, 118646.
- EN 1998-1. (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Inman, D. J. (2013). *Engineering vibrations* (4th ed., International ed.). Harlow, England: Pearson Education. ISBN: 9780273785217.
- Komarizadehasl, S., Xia, Y., Komary, M., & Lozano, F. (2024). Eigenfrequency analysis of bridges using a smartphone and a novel low-cost accelerometer prototype. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 18(2), 202–215.
- Lin, T. H., Chang, C. T., & Putranto, A. (2024). Tiny machine learning empowers climbing inspection robots for real-time multiobject bolt-defect detection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108618.
- Lin, T. H., Putranto, A., Chen, P. H., Teng, Y. Z., & Chen, L. (2023). High-mobility inchworm climbing robot for steel bridge inspection. *Automation in Construction*, 152, 104905.
- Matarazzo, T. J., Kondor, D., Milardo, S., Eshkevari, S. S., Santi, P., Pakzad, S. N., ... & Ratti, C. (2022). Crowdsourcing bridge dynamic monitoring with smartphone vehicle trips. *Communications Engineering*, 1(1), 29.
- Ozer, E., & Kromanis, R. (2024). Smartphone prospects in bridge structural health monitoring, a literature review. *Sensors*, 24(11), 3287.

- Putranto, A., Lin, T. H., & Tsai, P. T. (2025). Digital twin-enabled robotics for smart tag deployment and sensing in confined space. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 95, 102993.
- Qu, C., Tu, G., Gao, F., Sun, L., Pan, S., & Chen, D. (2024). Review of bridge structure damping model and identification method. *Sustainability*, 16(21), 9410.
- SNI 1725:2016. (2016). *Pembebanan untuk jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Talebi-Kalaleh, M., & Mei, Q. (2024). Damage detection in bridge structures through compressed sensing of crowdsourced smartphone data. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024(1), 5436675.