

Penilaian Kelaikan Jembatan Berdasarkan Parameter Dinamis Experimental pada Jembatan PC-I Girder 40 m

Heri Khoeri^{1,*}, Wisnu Isvara², Fani Natasa³, Dini Sofiana³

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jakarta¹, PT. Hesa Laras Cemerlang, Jakarta², Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Depok³

* Korespondensi: E-mail: heri.khoeri@umj.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	15 November 2023	<i>Bridge and tunnel roads are essential transportation infrastructure that concerns the livelihoods of many people and has a very important social function, therefore safety measures must be implemented for road users. Before a bridge is put into operation, testing must be carried out to ensure the safety of the bridge. Dynamic loading tests (vibration tests) aim to obtain dynamic parameters such as natural frequency, damping ratio, stiffness, and mode shapes, as one of the indicators to assess the fitness for function of the bridge. The results of vibration tests, both on the west side (JSB) and the east side (JST), show good performance with natural frequencies of JSB 4.093 Hz and JST 4.956 Hz, higher than the theoretical 4.002 Hz. This indicates that the actual stiffness is higher than the theoretical. The actual damping ratio of JSB is 2.138%, and that of JST is 2.883%, these values fall into the category of intact concrete. Based on the dynamic parameter assessment, the bridge is declared fit for function.</i>
Diperbaiki	24 Februari 2024	
Disetujui	29 Februari 2024	

Keywords: suitability, bridge; assessment; FFT; dynamic parameter

Abstrak

Jembatan dan terowongan jalan merupakan salah satu prasarana transportasi yang menyangkut hajat hidup orang banyak dan mempunyai fungsi sosial yang sangat penting sehingga harus dilakukan penyelenggaraan keamanan bagi pengguna jalan. Sebelum sebuah jembatan difungsikan harus dilakukan pengujian, untuk memastikan tingkat keselamatan dan keamanan jembatan. Pengujian pembebanan dinamik (uji getar) bertujuan untuk mendapatkan parameter dinamik seperti frekuensi alami, rasio redaman, kekakuan dan pola getar, sebagai salah satu indikator untuk menilai kelaikan fungsi jembatan. Hasil uji getar, baik sisi barat (JSB) maupun sisi timur (JST) menunjukkan performa yang baik dengan frekuensi alami JSB 4,093 Hz dan JST 4,956Hz lebih tinggi dari pendekatan teoritik yaitu 4,002 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan aktual lebih tinggi dibandingkan teoritisnya. Rasio redaman aktual JSB 2,138% dan JST 2,883%, nilai tersebut masuk katagori beton utuh. Berdasarkan penilaian parameter dinamik, jembatan dinyatakan laik fungsi.

Kata kunci: kelaikan, jembatan, asesmen, FFT, parameter dinamik

1. Pendahuluan

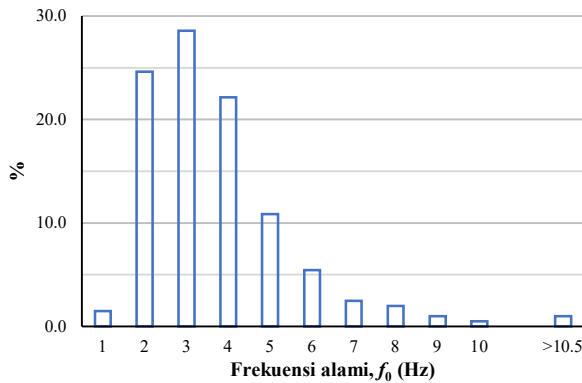
Uji getar untuk penilaian kondisi bangunan atas jembatan, merupakan salah satu pengujian yang bertujuan mengidentifikasi daya pikul aktual suatu jembatan lama atau baru, dengan mana terungkap tingkat kondisi keutuhan dan tingkat kerusakan jembatan. Pengujian getaran melengkapi pemeriksaan visual dalam menyediakan parameter dinamis tambahan berupa frekuensi getar. Frekuensi adalah ukuran untuk kekakuan dan keutuhan struktur. Setiap perubahan periodik dalam parameter dinamis memberikan korelasi kondisi struktural dengan tingkat laju kerusakan. Kriteria penilaian kondisi dengan cara uji getar sudah diterapkan untuk berbagai tipe struktur bangunan gedung [1] dan jembatan [2].

Penilaian kondisi bangunan atas jembatan dengan menggunakan frekuensi alami aktual dimaksudkan untuk penyederhanaan dalam melakukan analisis. Analisis yang

dimaksud tersebut adalah perhitungan ulang frekuensi alami berdasarkan dimensi struktur jembatan yang ditinjau [3].

Parameter penilaian dinamis diantaranya, frekuensi alami pertama yang terukur, f_{aktual} dari getaran bebas, kekakuan lentur, EI_{aktual} dan redaman kritis, ζ_{aktual} [2]. Dalam dekade terakhir, banyak pengembangan metode penilaian kerusakan struktural menggunakan perubahan respons statis atau dinamis [4], [5].

Saat ini telah diketahui mayoritas jembatan jalan raya memiliki frekuensi alami sekitar (2–5) Hz (**Gambar 1**), sesuai dengan frekuensi resonansi kendaraan komersial. Kesesuaian frekuensi ini mengarahkan pada pentingnya amplifikasi respons dinamik struktur. Kesesuaian yang baik juga telah dijumpai antara frekuensi getaran yang dihitung dan hasil yang diperoleh melalui uji dinamik [3].

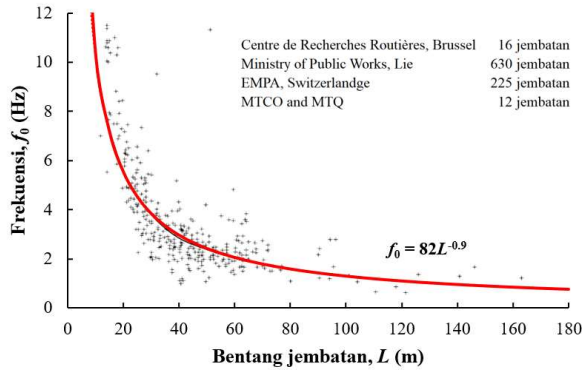


Gambar 1. Distribusi Frekuensi Alami (Hz) untuk 202 Unit Jembatan [6]

Hubungan antara bentang jembatan dan frekuensi dapat ditentukan melalui persamaan hasil regresi pengujian beban dinamik dari sekitar 898 jembatan jalan (**Gambar 2**), dihitung dengan persamaan (1).

$$f_0 = 82 \cdot L^{-0.9} \quad (1)$$

dengan: f_0 = frekuensi alami (Hz); L = bentang jembatan (m). Persamaan (1) sering digunakan untuk memastikan frekuensi jembatan yang akan diuji tidak berbeda terlalu jauh dengan nilai persamaan (1), sebelum dilakukan perhitungan dinamik [3].

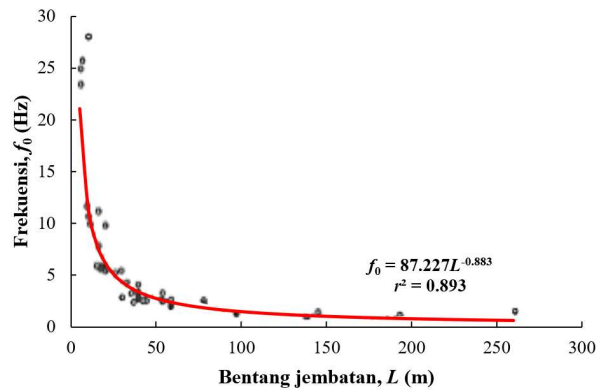


Gambar 2. Hubungan Frekuensi dan Bentang Jembatan [7]

Sementara Direktorat Jendral Bina Marga melalui pendekatan serupa, yang dilakukan oleh Paultre et al. (1992), dengan pendekatan regresi yang diaplikasikan pada data hasil frekuensi uji beban dinamik jembatan, yang hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 3**, dengan persamaan (2) [8]:

$$f_0 = 87.227 \cdot L^{-0.883} \quad (2)$$

Hasil regresi menunjukkan korelasi yang baik, dengan koefisien determinasi, $R^2 = 0.893$.



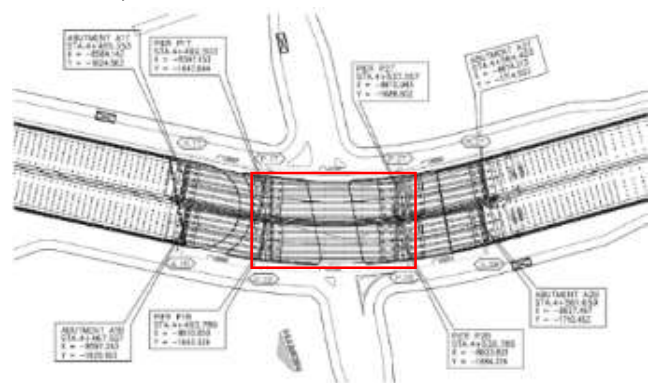
Gambar 3. Hubungan Frekuensi dan Bentang Jembatan [8]

Parameter kekakuan lentur (EI) langsung terkait dengan frekuensi alami aktual. Penurunan kekakuan lentur aktual, EI_{aktual} terhadap kekakuan lentur teoritis, $EI_{teoritis}$ menunjukkan penurunan kapasitas daya pikul. Penurunan frekuensi aktual terhadap frekuensi teoritis sebesar 10-20% menunjukkan kondisi cukup buruk. Rentang ini ekuivalen dengan penurunan kekakuan lentur, EI aktual terhadap kekakuan teoritis sebesar 20-40% [2].

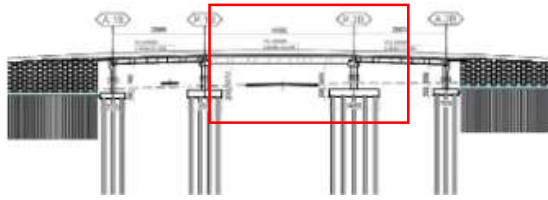
Peningkatan redaman kritis aktual, ζ_{aktual} terhadap redaman kritis teoritis, $\zeta_{teoritis}$ dari beton utuh menunjukkan tingkat kerusakan retakan. Rasio redaman yang tinggi sering disebabkan oleh penyerapan energi lewat retakan dalam beton. Beton utuh mempunyai rasio redaman kritis 2-5%. Beton retak mempunyai rasio redaman kritis 7-10% [2].

2. Metode

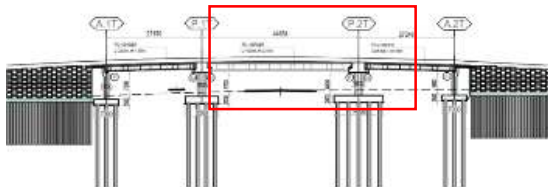
Span jembatan yang dibahas dalam tulisan ini adalah jembatan dengan 6 buah PC-I Girder (**Gambar 13**) dengan bentang 40.6 m, seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 4**, **Gambar 5**, dan **Gambar 6**.



Gambar 4. Denah Jembatan



Gambar 5. Potongan memanjang sisi barat (JSB)

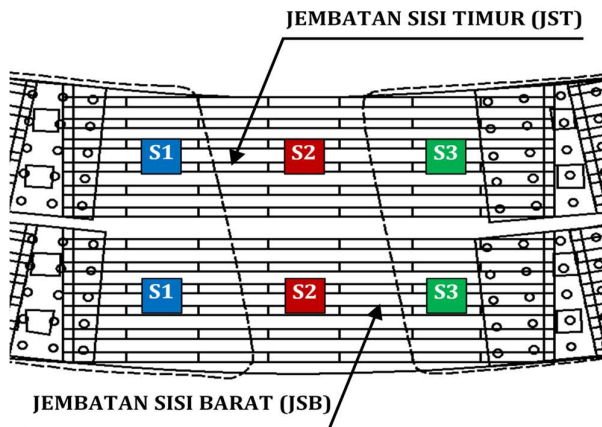


Gambar 6. Potongan memanjang sisi timur (JST)

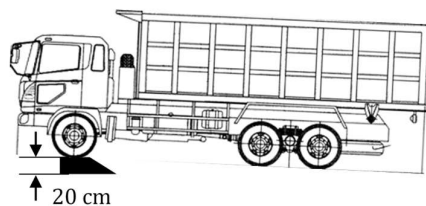
Tahapan Penelitian yang akan dilakukan adalah 1) uji getar; 2) Pemrosesan data percepatan dan 3) Analisis kelaikan berdasar parameter dinamik.

2.1. Pengukuran getaran pada Jembatan

Pengukuran respons dilakukan dengan menempatkan akselerometer pada 1/4, 1/2 dan 3/4 bentang di median (Gambar 7). Beban kejut menggunakan jatuhnya roda truck (berat total 17 ton dimensi seperti pada Tabel 1) dengan jumper 20 cm.



Gambar 7. Span yang ditinjau dan penempatan sensor



Gambar 8. Beban kejut dengan roda depan truk yang dihentakkan dari ketinggian 20 cm

Tabel 1. Dimensi truk yang digunakan

Deskripsi	Dimensi
Jarak Sumbu Roda	5,460 m
Panjang Keseluruhan	8,475 m
Lebar Keseluruhan	2,455 m
Tinggi keseluruhan	2,675 m
Jarak roda depan kiri-kanan	1,925 m
Jarak roda belakang kiri-kanan	1,845 m

2.2. Pemrosesan data

Data uji beban dinamik yang diperoleh adalah data percepatan (*accelerogram*). Data percepatan dalam domain waktu diolah menjadi domain frekuensi dengan *Fast Fourier Transformation (FFT)*. *FFT* membagi data percepatan dalam frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks. *Fourier Transform* dapat didefinisikan seperti pada persamaan (3):

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi ft} dt \tag{3}$$

Dengan $S(f)$ adalah sinyal dalam domain frekuensi, $a(t)$ sinyal percepatan dalam domain waktu [m/det²], $e^{-j2\pi ft}$ fungsi kernel, f frekuensi [Hz], dan t waktu [detik].

Filtering digunakan untuk menghilangkan komponen frekuensi tinggi (*low-pass filter*) atau komponen frekuensi rendah (*high-pass filter*). *Filtering* telah banyak digunakan baik yang dikombinasi dengan koreksi *baseline* atau hanya *filtering* saja dan memberikan peningkatan dalam akurasi perkiraan lendutan [9]. Dengan *FIR Equiripple Highpass Filter*, yang dioptimasi pada panjang filter yang dilakukan pada dua tahap integrasi *simpson 3/8* menghasilkan nilai lendutan dinamik $97.62\% \pm 1.43\%$ data LVDT [10].

Data percepatan diolah untuk mendapatkan Fungsi Respons Frekuensi (FRF). Untuk memfilter data dari noise frekuensi rendah (< 1Hz), digunakan Highpass filter. Pemrosesan data percepatan menggunakan FFT. Pemrosesan data dengan bantuan SIGVIEW 5.3.2.0 STANDARD.

2.3. Analisis Parameter Dinamis

Algoritma memperkirakan sifat dinamis sistem (yaitu frekuensi alami, *mode shape*, dan rasio redaman) dari representasi state space. Teknik *Stochastic subspace identification, SSI* telah terbukti menjadi alat yang dapat diandalkan untuk identifikasi modal, diantaranya digunakan untuk pemantauan kondisi online sistem suspensi kendaraan kereta api (Bogie Y25) [11], jembatan jalan raya dan kereta api [12], jembatan pedestrian [13], aplikasi industri [14], dalam pemantauan infrastruktur sipil [15], dalam identifikasi dinamis bangunan bersejarah [16], dan lainnya.

Detail *SSI* untuk mendapatkan realisasi sistem diringkas sebagai berikut: i) membangun matriks blok *Hankel* dengan data respons getaran sistem; ii) membagi matriks menjadi dua komponen, *past* dan *future*; iii) menghitung proyeksi ortogonal ruang baris komponen *past* dari matriks ke ruang baris komponen *future*; iv) terapkan dekomposisi nilai tunggal ke proyeksi dan hitung matriks observabilitas dengan matriks yang terdekomposisi. Matriks observabilitas merupakan fungsi dari matriks *state* dan matriks *output* yang merupakan representasi *state space* dari sistem. v) Nilai eigen dari matriks *state* berisi informasi tentang frekuensi natural dan rasio redaman sistem, dan vektor eigen yang dioperasikan pada matriks *output* menghasilkan *mode shape*. Van Overschee dan De Moor [17] menyajikan landasan teori matematis untuk algoritma identifikasi *subspace*.

Proses stabilisasi dilakukan dengan *SSI* yang terdiri dari dua Langkah, yaitu pengelompokan dan eliminasi. Proses pengelompokan rata-rata frekuensi serupa dengan variasi maksimum frekuensi sebesar 5% dan nilai *MAC* antar mode yang teridentifikasi lebih tinggi dari 0,95. Proses eliminasi, menghapus mode dengan kriteria: (i) frekuensi bernilai negatif, nol, atau sama atau lebih besar dari setengah frekuensi sampling; (ii) moda dengan rasio redaman negatif diasumsikan mempunyai redaman nol;

Dari parameter dinamis frekuensi alami aktual, f_{aktual} , kekakuan dinamis, EI_{aktual} dan rasio redaman kritis, ζ dilakukan penilaian kondisi jembatan. Respon jembatan berkaitan erat dengan kondisi kerusakan struktural. Nilai kerusakan struktural relative dihitung dengan Persamaan (4) [2]:

$$D_{realtif} = \frac{(f_{teoritis} - f_{aktual})}{f_{teoritis}} \times 100\% \quad (4)$$

Dengan $D_{realtif}$ adalah nilai kerusakan struktur relatif, f_{aktual} frekuensi alami aktual [Hz], dan $f_{teoritis}$ frekuensi alami teoritis [Hz].

Untuk simple beam, frekuensi alami teoritisnya dapat dinyatakan dengan persamaan (5) [18]:

$$f_{teoritis} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{48EI}{mL^3}} \quad (5)$$

Dengan L adalah panjang jembatan [m], EI kekakuan lentur dinamis [$\text{kN}\cdot\text{m}^2$], m merupakan massa jembatan [$\text{kN}\cdot\text{det}^2/\text{m}$], sementara $E_{dinamis}$ maka dapat diselesaikan dengan persamaan (6).

$$E_{dinamis\ beton} = \frac{E_{statis\ beton} + 19 \times 10^6}{1.25} \quad [\text{kN}/\text{m}^2] \quad (6)$$

$$E_{dinamis\ baja} = E_{statis\ baja} \quad [\text{kN}/\text{m}^2]$$

Analisis moda pertama dikakukan dengan persamaan (5), sedangkan analisis moda yang lebih tinggi dilakukan dengan bantuan program struktur analisis. Nilai penurunan kapasitas dihitung dengan persamaan (7):

$$D_{kap} = \frac{(EI_{teoritis} - EI_{aktual})}{EI_{teoritis}} \times 100\% \quad (7)$$

Dengan D_{kap} adalah nilai penurunan kapasitas, $EI_{teoritis}$ merupakan kekakuan lentur teoritis [$\text{kN}\cdot\text{m}^2$] dan EI_{aktual} adalah kekakuan lentur aktual [$\text{kN}\cdot\text{m}^2$].

Rasio redaman diestimasi menggunakan metode domain waktu dekremen logaritmik [19] seperti pada persamaan (8):

$$\delta = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (8)$$

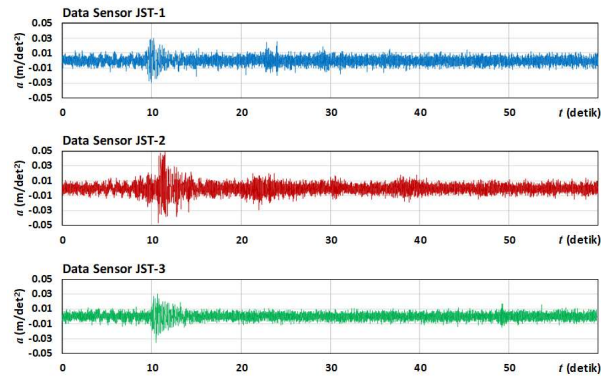
Dengan x_n dan x_{n+1} adalah dua puncak berturut-turut respons getaran bebas, ζ adalah rasio redaman. Untuk ζ kecil dan untuk meningkatkan ketepatan m siklus maka ζ , dapat dinyatakan seperti persamaan (9):

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{1}{2\pi m} \ln \frac{x_n}{x_{n+m}} \quad (9)$$

3. Hasil dan Pembahasan

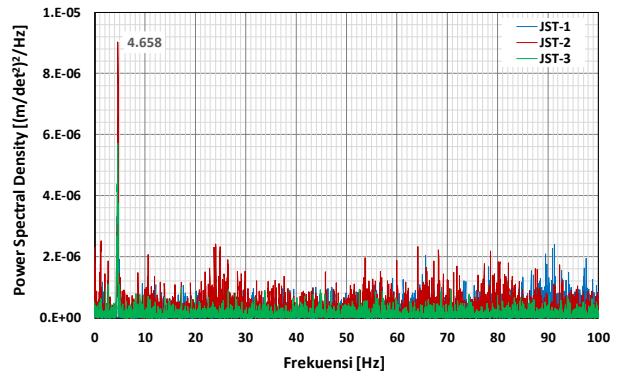
3.1. Jembatan Sisi Timur (JST)

Data percepatan tiap sensor disajikan dalam **Gambar 9**.



Gambar 9. Data accelerometer JST

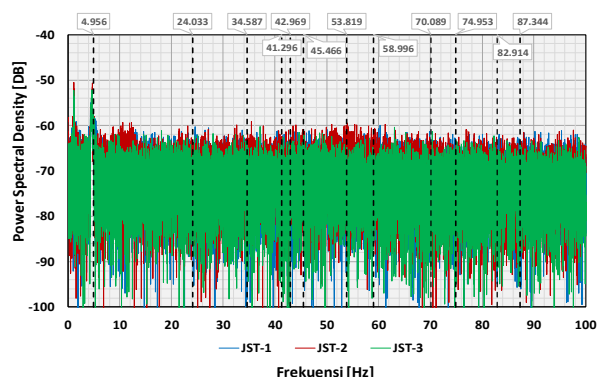
Sinyal percepatan dalam domain waktu ditransformasi ke domain frekuensi dengan *FFT*. Power spectral density dalam $(\text{m}/\text{det}^2)^2/\text{Hz}$ seperti pada **Gambar 10** dan frekuensi alami mode-1 seperti pada **Tabel 2**.



Gambar 10. Power Spectral Density

Tabel 2. Frekuensi alami mode-1 dari FFT data percepatam sensor JST

Sensor ID	Frekuensi Hz	Power Spectral Density $10^{-6}(\text{m/det}^2)^2/\text{Hz}$
JST-1	4.642	5.444
JST-2	4.658	9.024
JST-3	4.609	5.710



Gambar 11. Diagram stabilisasi estimasi model state space (estimated state space models) JST

Dari diagram pada **Gambar 11** terestimasi frekuensi dan redaman beberapa mode getar seperti pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Mode Getaran JST Global

Mode Shape	Frequency [Hz]	Std. Frequency [Hz]	Damping [%]	Std. Damping [%]
1	4.956	0.131	2.883	2.281
2	24.033	2.079	8.786	8.404
3	34.587	1.109	2.154	2.534
4	41.296	2.392	2.905	4.446
5	42.969	3.275	2.852	5.202
6	45.466	2.536	2.716	4.503
7	53.819	0.665	1.656	1.139
8	58.996	2.658	3.085	3.091
9	70.089	1.886	2.945	4.769
10	74.953	2.543	2.201	3.623
11	82.914	5.83	4.104	6.634
12	87.344	2.676	1.075	2.551

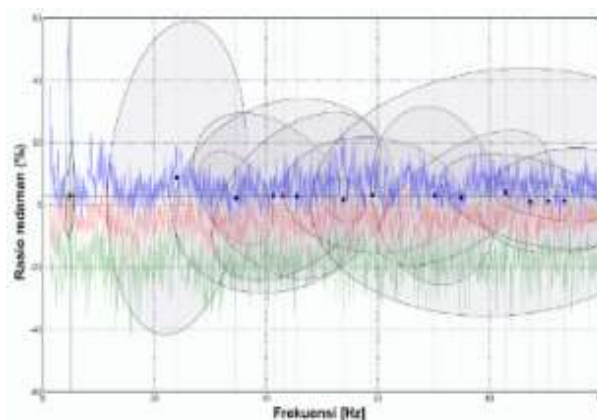
Diagram Frekuensi *versus* Redaman dan interval konfidensi seperti pada **Gambar 12**.

Frekuensi teoritis JST yang dijadikan acuan menggunakan frekuensi girdernya [persamaan (5)], diperoleh $f_{teoritis} = 4.002$ Hz, artinya frekuensi aktual lebih besar dari teoritisnya. Dari persamaan (4): $D_{realtif} = \frac{(4.002-4.956)}{4.002} \times 100\% > 1$, menunjukkan tidak ada kerusakan struktural.

Dengan hubungan penurunan frekuensi aktual terhadap frekuensi teoritis sebesar 10-20% ekuivalen dengan

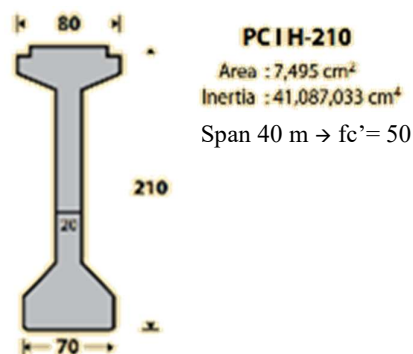
penurunan kekakuan lentur, EI aktual terhadap kekakuan teoritis 20-40%, dengan f_{aktual} diketahui, maka $EI_{aktual} = \frac{(2\pi f_{teoritis})^2 m L^3}{48} = 105316669 \text{ kN.m}^2$, selanjutnya dari persamaan (7), $D_{kap} = \frac{(41787215-10)}{41787215} \times 100\% < 0$, hal ini menunjukkan kapasitas aktual struktur jembatan lebih dari kapasitas teoritisnya.

Sementara dari persamaan (9) dan **Tabel 3** diketahui nilai redaman kritis adalah 2.883%. Nilai tersebut masih dalam range 2-5% artinya tidak ada indikasi keretakan struktural pada beton.



Gambar 12. Frekuensi vs. Redaman dan interval konfidensi JST

Dari analisis dapat diidentifikasi frekuensi *mode-1* struktur JST, $f_{aktual} = 4.956$ Hz.

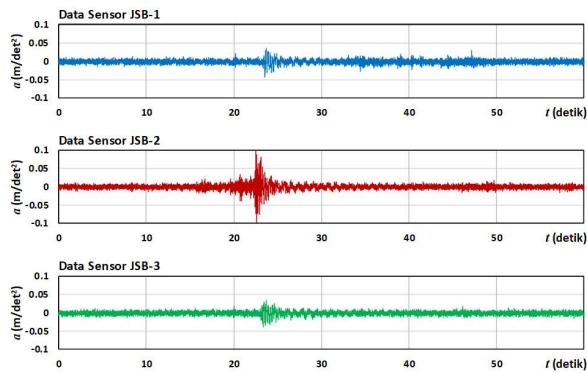


Gambar 13. Dimensi dan property PC-I girder [20]

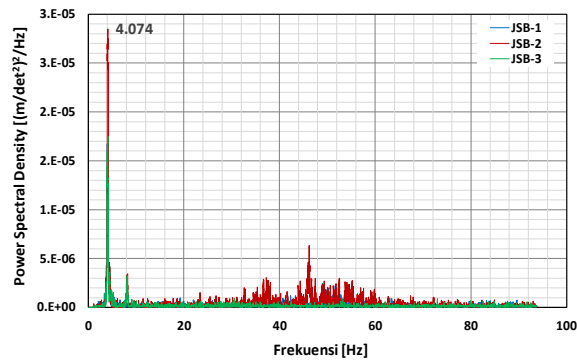
3.2. Jembatan Sisi Barat (JSB)

Data percepatan pada tiap sensor seperti ditunjukkan pada **Gambar 14**. Data percepatan ditransformasi ke domain frekuensi dengan FFT. Power spectral density (m/det^2)/Hz seperti **Gambar 14** dan frekuensi mode-1 seperti **Tabel 4**.

Dari **Gambar 11** terestimasi frekuensi dan redaman beberapa mode seperti pada **Tabel 5**.



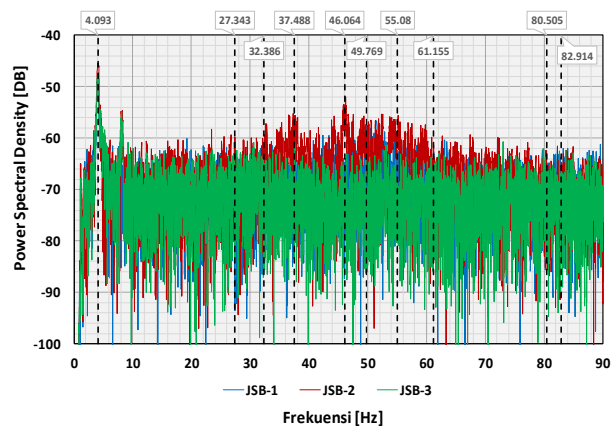
Gambar 14. Data *accelerometer* JSB



Gambar 15. Power Spectral Density JSB

Tabel 4. Frekuensi mode-1 dari FFT data percepatam JSB

Sensor ID	Frekuensi Hz	Power Spectral Density $10^{-6}(\text{m/det}^2)/\text{Hz}$
JSB-1	4.012	16.721
JSB-2	4.074	28.537
JSB-3	4.090	17.488



Gambar 16. Diagram stabilisasi estimasi model state space (estimated state space models) JSB

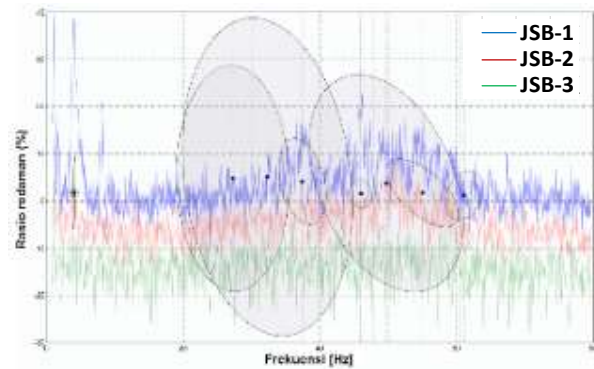
frekuensi alami aktual, $f_{aktual} = 4.093$ Hz. Sementara Frekuensi teoritis JSB sama dengan JST yaitu $f_{teoritis} =$

4.002 Hz. Dengan nilai tersebut berarti frekuensi aktual lebih besar dan nilainya mendekati frekuensi teoritis, mengindikasikan tidak ada kerusakan dan deviasi penurunan kekakuan, sehingga dapat disimpulkan kapasitas aktualnya lebih besar dengan nilai mendekati kapasitas teoritisnya.

Dari persamaan (9) dan Tabel 5 diketahui nilai redaman kritisnya 2.138%. Nilai tersebut masih dalam *range* 2-5% artinya tidak ada indikasi keretakan struktural pada beton.

Tabel 5. Mode Getaran JSB Global

Mode Shape	Frequency [Hz]	Std. Frequency [Hz]	Damping [%]	Std. Damping [%]
1	4.093	0.036	2.138	1.263
2	27.343	1.381	4.767	3.998
3	32.386	2.082	5.107	5.624
4	37.488	0.581	4.143	1.53
5	46.064	0.271	1.56	0.508
6	49.769	1.884	3.766	3.843
7	55.08	0.881	1.736	1.208
8	61.155	0.457	1.215	0.869
9	80.505	1.231	1.636	1.486
10	95.343	3.578	1.887	3.68
11	82.914	5.83	4.104	6.634
12	87.344	2.676	1.075	2.551
13	90.511	1.724	1.263	1.076
14	93.34	2.542	1.287	2.815



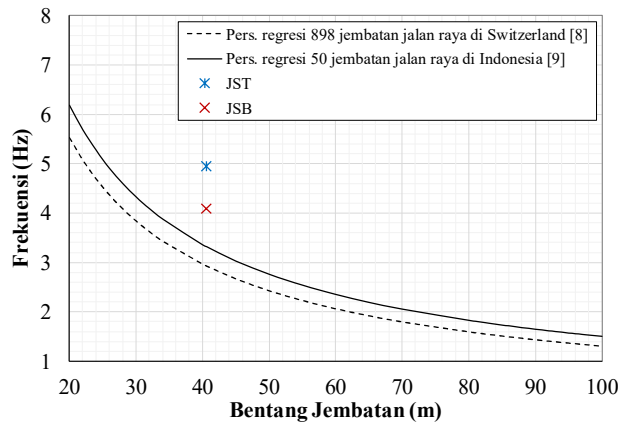
Gambar 17. Frekuensi vs. Redaman dan interval konfidensi JSB

3.3. Frekuensi JST dan JSB Dilihat dari Data Empirik Frekuensi Jembatan

Frekuensi alami JST lebih tinggi dibandingkan JSB hal ini karena massa JST yang berada di sisi dalam radius jembatan memiliki massa lebih kecil dibanding JSB yang berada di sisi luar. Selain itu geometrik kemiringan jalan berpengaruh terhadap frekuensi alami pada kedua jembatan tersebut.

Dengan mensubstitusikan panjang bentang jembatan JST dan JSB yang dalam hal ini adalah 40,6 m ke dalam

persamaan (2), diketahui frekuensi alami estimasi adalah 3,31 Hz. Frekuensi alami mode-1 dari JST dan JSB secara berturut-turut 149,55% dan 123,51% di atas frekuensi alami estimasi. Plot nilai Frekuensi alami mode-1 dari JST dan JSB terhadap persamaan regresi hubungan frekuensi dan bentang jembatan dari 50 jembatan yang ada di Indonesia [8] dan 898 jembatan yang ada di Switzerland [7] seperti ditunjukkan pada **Gambar 18**.



Gambar 18. Frekuensi JSB dan JST dibanding data frekuensi jembatan di Indonesia dan di Switzerland

4. Simpulan

Frekuensi alami jembatan sisi barat (JSB) 4,093 Hz dan jembatan sisi timur (JST) 4,956 Hz, nilai tersebut di atas frekuensi teoritiknya yaitu 4,002 Hz, mengindikasikan bahwa jembatan dalam kondisi baik sesuai perencanaan, tidak terindikasi adanya kerusakan dan penurunan kapasitas dari desain rencananya. Rasio redaman JSB 2,138% dan JST 2,883%, nilai tersebut mengindikasikan beton dalam kondisi utuh, dengan acuan secara empirik rasio redaman kritis untuk beton utuh adalah 2-5% sementara beton retak rasio redaman kritisnya 7-10%. Sementara dari grafik persamaan regresi hubungan panjang jembatan dan frekuensi alami jembatan di Indonesia, frekuensi JSB dan JST berada dalam range persamaan tersebut. Dengan demikian JST dan JSB laik untuk dioperasikan.

5. Saran

Untuk penelitian lebih lanjut dapat dilakukan analisis *mode shape* dan membandingkannya dengan uji statik untuk memperbaiki model analitik yang dapat dijadikan *benchmark* pada masa operasional dan pemeliharaan jembatan. Dan pengujian dalam kondisi operasional, (*Operational Modal Analysis, OMA*) untuk mengetahui perilaku dinamik pada saat operasional.

Daftar Pustaka

- [1] H. Khoeri and S. W. Alisjahbana, "Pemeriksaan Getaran Struktur dan Rekomendasi Perkuatan untuk Peningkatan Kapasitas Beban dan Pengurangan Getaran," *Konstruksia*, vol. 15, no. 1, p. 79, Dec. 2023, doi: 10.24853/jk.15.1.79-96.
- [2] Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, *Penilaian Kondisi Jembatan untuk Bangunan atas dengan Cara Uji Getar. Pt T-05-2002-B. Pedoman Konstruksi dan Bangunan*. 2002.
- [3] A. H. Purboyo and I. Zarkasi, "Akuisisi Data Vibrasi Uji Dinamik Jembatan," *Jurnal HPJI*, vol. 7, no. 2, pp. 79–96, Jul. 2021, doi: 10.26593/jhpji.v7i2.5053.-79-96.
- [4] D. Feng and M. Q. Feng, "Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review," *Eng Struct*, vol. 156, pp. 105–117, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.018.
- [5] X. Peng, Q. Yang, F. Qin, and B. Sun, "Structural Damage Detection Based on Static and Dynamic Flexibility: A Review and Comparative Study," *Coatings*, vol. 14, no. 1, p. 31, Dec. 2023, doi: 10.3390/coatings14010031.
- [6] O. Avci, O. Abdeljaber, S. Kiranyaz, M. Hussein, M. Gabbouj, and D. J. Inman, "A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications," *Mech Syst Signal Process*, vol. 147, p. 107077, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.-2020.107077.
- [7] H. Khoeri, S. W. Alisjahbana, and P. Nugroho, "Uji Beban Dinamik dan Analisis Modal Operasional Jembatan Baja Komposit Underpass Bekambit," *Dinamika Rekayasa*, vol. 20, no. 1, pp. 65–75, Jan. 2024, doi: 10.20884/1.dinarek.2024.20.1.20.
- [8] R. Cantieni, "Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland," Dübendorf, Switzerland, 1983.
- [9] P. Paultre, O. Chaallal, and J. Proulx, "Bridge dynamics and dynamic amplification factors — a review of analytical and experimental findings," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 260–278, Apr. 1992, doi: 10.1139/192-032.
- [10] Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, "Laporan Uji Dinamik Jembatan," Jakarta, 2014.

- [11] J. W. Park, S. H. Sim, and H. J. Jung, "Displacement estimation using multimetric data fusion," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1675–1682, 2013, doi: 10.1109/TMECH.-2013.2275187.
- [12] H. Khoeri, S. W. Alisjahbana, J. Widjajakusuma, and N. Najid, "Estimasi Lendutan Pelat Untuk Menghitung Kapasitas Beban Dengan Akurasi Tinggi Menggunakan Uji Getar," *Konstruksia*, vol. 14, no. 2, pp. 175–188, Jul. 2023, doi: 10.24853/jk.14.2.175-188.
- [13] F. Liu, J. Wang, M. Li, F. Gu, and A. D. Ball, "Operational Modal Analysis of Y25 Bogie via Stochastic Subspace Identification for the Condition Monitoring of Primary Suspension Systems," in *ICDAS: International Conference on Damage Assessment of Structures*, M. Abdel Wahab, Ed., Porto, Portugal: Springer, Jul. 2020, pp. 166–181. doi: 10.1007/978-981-13-8331-1_12.
- [14] Y. Xu, J. M. W. Brownjohn, and D. Hester, "Enhanced sparse component analysis for operational modal identification of real-life bridge structures," *Mech Syst Signal Process*, vol. 116, pp. 585–605, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.07.026.
- [15] A. Ali, T. Sandhu, and M. Usman, "Ambient Vibration Testing of a Pedestrian Bridge Using Low-Cost Accelerometers for SHM Applications," *Smart Cities*, vol. 2, no. 1, pp. 20–30, Jan. 2019, doi: 10.3390/smartcities2010002.
- [16] M. Salehi, S. M. Esfarjani, and M. Ghorbani, "Modal Parameter Extraction of a Huge Four Stage Centrifugal Compressor Using Operational Modal Analysis Method," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 15, no. 3, pp. 1–11, May 2018, doi: 10.1590/1679-78254117.
- [17] S. Gres, P. Andersen, C. Hoen, and L. Damkilde, "Orthogonal Projection-Based Harmonic Signal Removal for Operational Modal Analysis," 2019, pp. 9–21. doi: 10.1007/978-3-319-74476-6_2.
- [18] E. Ercan, "Assessing the impact of retrofitting on structural safety in historical buildings via ambient vibration tests," *Constr Build Mater*, vol. 164, pp. 337–349, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.-2017.12.154.
- [19] P. Van Overschee and B. De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems*. Boston, MA: Springer US, 1996. doi: 10.1007/978-1-4613-0465-4.
- [20] M. Paz, *Structural Dynamics*. Boston, MA: Springer US, 1990. doi: 10.1007/978-1-4615-7918-2.
- [21] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. in Civil Engineering and Engineering Mechanics Series. Prentice Hall, 2012.
- [22] Wika Beton, "The Precast Concrete Manufacture," Apr. 2019 Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: <https://wika-beton.co.id/uploads/1-BRO-SURSET.pdf>