

JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

Teknik Sipil dan Perencanaan

UJI BEBAN STATIS DAN DINAMIS JEMBATAN BAJA KOMPOSIT BATANG TORU-4

Heri Khoeri^{1*}, Panji Nugroho²

^{1*)} Fakultas Teknik Universitas Tama Jagakarsa
Email Penulis Korespondensi: [hkhoei@hesa.co.id](mailto:hkhoeri@hesa.co.id)
Nomor HP Penulis Korespondensi: 08158255374
²⁾ PT.Hesa Laras Cemerlang. <https://hesa.co.id>
Email: kontak@hesa.co.id

ABSTRACT

Bridges are vital infrastructure that require feasibility evaluation before being used to ensure user safety. Feasibility assessment can be done through dynamic and static tests. The dynamic parameters used are natural frequency and damping ratio, while static parameters include deflection and strain during loading. This study conducted forced vibration tests and static load tests on the Batang Toru-4 Bridge. The vibration test results showed a natural frequency of 3,248 Hz, lower than the minimum limit of 3,357 Hz according to Bina Marga empirical data, but still above the British Standard, and a damping ratio of 7.636%, indicating an indication of excessive energy dissipation which is generally due to defects in the structure. However, the static test showed a maximum deflection at 100% UDL of 11.9 mm, still far below the permissible limit of 50 mm. The residual deflection ratio was also only 0.044, still below the permissible limit of 0.2. Therefore, with these results, the bridge was declared functionally fit, but it was recommended to conduct further checks to ensure that excessive damping was not caused by structural damage. The calculated relative capacity is approached by a more conservative dynamic load test compared to a static load test, so that the dynamic load test is an alternative test with a relatively faster time, easier and more conservative results compared to the static load test.

Keyword: *Dinamis, Jembatan, Kelaikan, Statis.*

1. PENDAHULUAN

Sebelum Jembatan-4 Batang Toru dengan bentang 40 m dibuka untuk lalu lintas, terlebih dahulu dilakukan pengujian guna memastikan tingkat keamanan dan keselamatannya terhadap beban layan saat operasional [1]. Pengujian pembebanan merupakan salah satu metode evaluasi penting pada jembatan eksisting maupun jembatan baru [2]. Melalui uji beban, dapat diperoleh gambaran nyata mengenai respons struktur terhadap beban aktual. Hasil pengujian ini memungkinkan verifikasi kelayakan struktural serta validasi perhitungan desain, sekaligus menjadi tolok ukur awal untuk pemantauan selama masa layanan jembatan.

Pengujian beban dinamis melalui uji getaran dilakukan untuk mengevaluasi kondisi bangunan atas jembatan berdasarkan parameter dinamis yang diperoleh. Parameter yang dianalisis meliputi frekuensi fundamental hasil pengukuran getaran bebas (ζ_{actual}), kekakuan lentur (EI_{actual}), serta rasio redaman kritis (ζ_{actual}). Perubahan periodik pada parameter dinamis dapat menunjukkan hubungan antara kondisi struktur dan tingkat degradasinya. Metode penilaian kondisi berbasis pengujian getaran ini dapat diterapkan pada berbagai jenis jembatan [1]. Uji beban statis berperan sebagai metode deteksi yang umum digunakan untuk mengevaluasi kinerja jembatan, memberikan gambaran nyata mengenai kondisi operasionalnya, serta mengungkap potensi permasalahan sehingga dapat dirumuskan langkah penanganan yang tepat guna meningkatkan dan mengoptimalkan mutu jembatan [3], [4].

Analisis modal eksperimental (*Experimental Modal Analysis, EMA*) merupakan metode untuk mengidentifikasi parameter modal dengan memberikan eksitasi getaran buatan pada struktur. Estimasi karakteristik dinamis sistem dilakukan menggunakan algoritma *Stochastic Subspace Identification (SSI)*, yang telah banyak diterapkan sebagai alat identifikasi modal, termasuk dalam pemantauan kondisi sistem suspensi kereta api secara *online* dan penentuan frekuensi natural dari sistem suspensi [5], *precast girder* jembatan jalan raya [6], jembatan baja komposit, [7], kereta api [8], jembatan pejalan kaki [9], aplikasi industri [10], monitoring infrastruktur [11], pemeriksaan gedung [12], identifikasi bangunan bersejarah [13], dan lainnya.

Temuan empiris dari berbagai studi telah menetapkan adanya hubungan frekuensi dengan bentang jembatan, yang berfungsi sebagai pedoman awal baik dalam tahapan desain maupun saat melakukan pengujian dinamis, seperti pada persamaan (1) sampai dengan (5), dan dalam bentuk grafik diberikan pada Gambar 1.

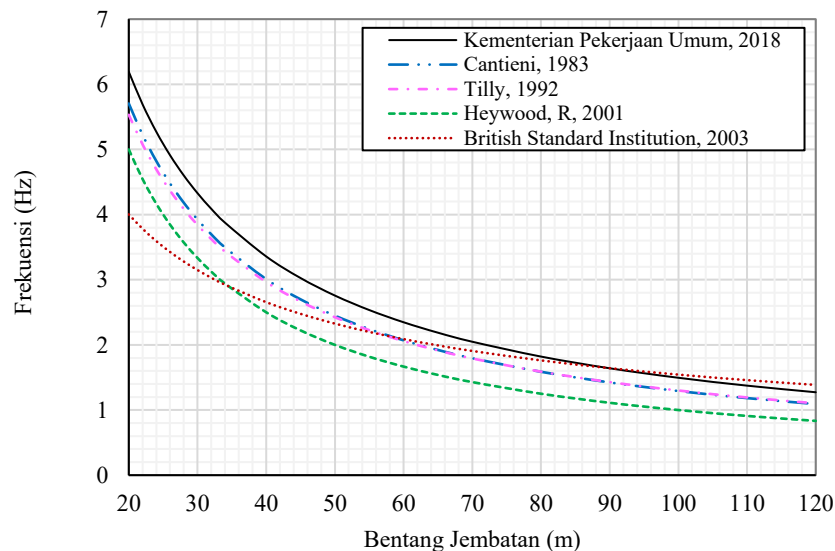
$$f_0 = 87.227L^{-0.883} \quad [14] \quad (1)$$

$$f_0 = 90.6L^{-0.923} \quad [15] \quad (2)$$

$$f_0 = 82L^{-0.9} \quad [16] \quad (3)$$

$$f_0 = 100/L \quad \text{dengan range bentang pendek ke panjang } 80/L \text{ sampai } 120/L \quad [17] \quad (4)$$

$$f_0 = 23.58L^{-0.592} \quad \text{untuk } 20\text{m} < L < 100 \text{ m}; f_0 = 23.58L^{-0.592} \quad \text{untuk } L > 100 \text{ m} \quad [18] \quad (5)$$



Gambar 1. Hubungan frekuensi natural dan bentang jembatan dari beberapa penelitian sebelumnya

2. METODE

2.1. Metode Uji Beban Dinamis (Uji Getar)

Tahap-tahap pelaksanaan pengujian dinamis jembatan: (1) pemberian dampak untuk membangkitkan getaran dan pengumpulan informasi respons getaran jembatan; (2) Pemrosesan rekaman data percepatan getar; (3) Analisis Modal; (4) Analisis terhadap parameter dinamis.

Getaran pada jembatan diukur menggunakan sensor akselerometer tiga sumbu di $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$ bentang jembatan, juga pada tumpuan kiri dan kanan, yang direkam dalam interval waktu 75 sampai 125 detik, mencakup kondisi prabebeban dan pascabebeban. Getaran paksa dibuat dengan menjatuhkan roda depan truk dari elevasi 17 cm (Gambar 2).



Gambar 2. Beban yang dijadikan pemicu timbulnya getaran pada jembatan

Perangkat akselerometer mengukur percepatan sebagai fungsi waktu dengan interval sampling tertentu; dalam studi ini digunakan interval 0,01 detik atau 100 Hz. Data *time-domain* tersebut kemudian diubah menjadi data *frequency-domain*. Transformasi sinyal percepatan, $a(t)$ dari format data berbasis waktu, t ke format data berbasis frekuensi, f ditransformasikan menggunakan metode *Discrete Fourier Transformation (DFT)* sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (6) berikut [19]:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (6)$$

Dengan $a(t)$ sebagai sinyal percepatan (m/det^2), $S(f)$ dinyatakan sebagai kerapatan spektral yakni percepatan dalam format data berbasis frekuensi dengan satuan $m^2 \cdot det^{-4} \cdot Hz^{-1}$, $e^{-j2\pi ft}$ sebagai *kernel function*, f sebagai frekuensi (Hz), dan t sebagai waktu (detik). Di samping penerapan Persamaan (6), operasi transformasi Fourier diskrit, *DFT* juga dapat dilakukan dengan algoritma cepat yang dikenal sebagai *Fast Fourier Transform (FFT)*. *FFT* dioperasikan melalui proses rekursif, yakni mempartisi vektor sinyal menjadi dua, melakukan transformasi pada tiap bagian, dan akhirnya mengintegrasikan kembali hasil transformasinya.

Pemrosesan data dilakukan menggunakan perangkat lunak *Modal Analysis*. Penilaian kondisi superstruktur jembatan mengacu pada parameter dinamis hasil uji beban dinamis guna menaksir keutuhan dan kemampuan strukturalnya. Parameter utama yang digunakan mencakup frekuensi natural pertama, f_{actual} dari respons getaran bebas, kekakuan lentur EI_{actual} , dan rasio redaman kritis aktual, ζ_{actual} . Hubungan yang kuat terdapat antara respons dinamis jembatan dan tingkat kerusakan struktur. Parameter kerusakan struktural relatif diuraikan sebagai berikut [20]:

$$D_{relatif} = \frac{(f_{theoretical} - f_{actual})}{f_{theoretical}} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan:

$D_{relatif}$ = parameter kerusakan struktural relatif
 f_{actual} = frekuensi natural aktual (Hz)
 $f_{theoretical}$ = frekuensi natural teoritik (Hz)

Kekakuan lentur (EI) secara langsung memengaruhi nilai frekuensi natural. Penurunan kekakuan aktual, EI_{actual} relatif terhadap teoritis, $EI_{theoretical}$ menandakan degradasi kapasitas struktural. Deviasi frekuensi aktual sebesar 10–20% dari nilai teoritis lazimnya berkorelasi dengan penurunan kekakuan lentur sebesar 20–40%. Estimasi penurunan kapasitas diperoleh melalui [20]:

$$D_{kap} = \frac{(EI_{theoretical} - EI_{actual})}{EI_{theoretical}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan:

D_{kap} = tingkat berkurangnya kapasitas
 $EI_{theoretical}$ = kekakuan lentur teoritik ($kN \cdot m^2$)
 EI_{actual} = kekakuan lentur aktual ($kN \cdot m^2$)

Estimasi rasio redaman dilakukan melalui teknik *logarithmic decrement* [21]:

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

Dengan x_n dan x_{n+1} sebagai dua nilai puncak berurutan dari respons vibrasi bebas, sedangkan ζ adalah rasio redaman. Pada kondisi redaman rendah ($\zeta < 0.2$) dan $\sqrt{1 - \zeta^2} \approx 1$, rasio redaman ζ dapat diperoleh dari persamaan (10):

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} \quad (10)$$

Peningkatan rasio redaman kritis aktual, ζ_{actual} terhadap nilai teoritisnya, $\zeta_{theoretical}$ pada beton bisa terjadi karena adanya disipasi energi mealalui retakan yang terjadi pada beton. Secara empiris pada

beton yang masih utuh, nilai redaman kritis berada pada kisaran 2–5%. Sementara pada beton yang mengalami retak, redamannya meningkat menjadi 7–10% [20], [12].

2.2. Metode Uji Beban Statis

Secara garis besar, proses uji beban statis dan analisis terdiri atas: (1) menentukan magnitude, konfigurasi, dan tahapan pembebanan; (2) melaksanakan pengujian sesuai ketentuan teknis; serta (3) mengevaluasi parameter hasil pengujian. Beban uji menggunakan truk, dan konfigurasi detailnya diberikan sebagai berikut [22]:

- Beban terbagi rata (*uniform distributed load, UDL*):

$$UDL = 0,9 \times \left(0,5 + \frac{L}{15} \right) \text{ ton/m}^2 \quad (11)$$

dengan, L = bentang jembatan (m)

- Beban terbagi rata per satuan panjang, UDL/m' dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} b \leq 5,5 \text{ m} &\rightarrow UDL/m' = 5,5UDL \\ b > 5,5 \text{ m} &\rightarrow UDL/m' = 5,5UDL + 50\%UDL(b - 5,5) \end{aligned} \quad (12)$$

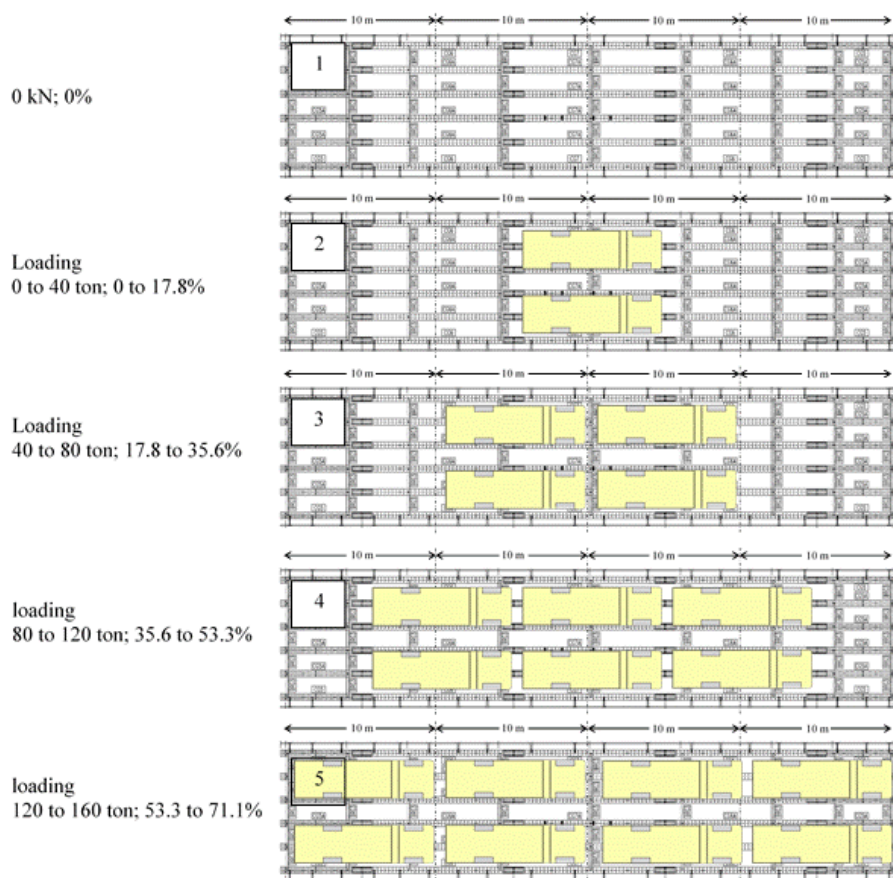
dengan, b = lebar lalu lintas (m).

- Beban terbagi rata total, UDL_{Total} :

$$UDL_{Total} = UDL/m' \times L \quad (13)$$

- Mengikuti konsep linearitas dan struktur diasumsikan masih elastis, maka jumlah beban UDL yang akan dilaksanakan boleh diambil sebesar 50% UDL
- Jumlah truk yang dibutuhkan untuk uji beban statis ditentukan dengan membagi beban UDL_{Total} terhadap berat per truk uji.

Dari persamaan (11), (12), (13) dengan memasukkan dimensi jembatan, maka 100%UDL adalah 2206 kN. Menggunakan truk bermuatan dengan total berat 20 ton, maka tahapan pembebanan yang diaplikasikan seperti pada **Gambar 3**.

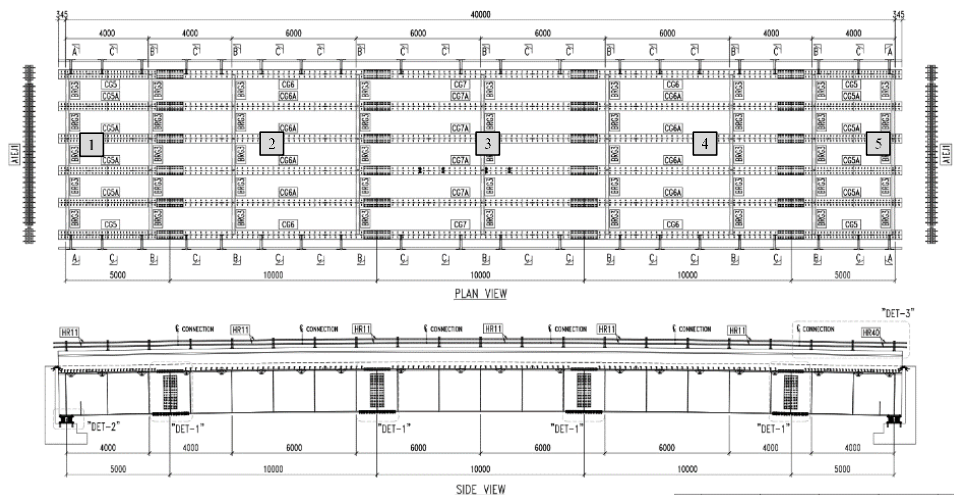


Gambar 3. Tahapan pembebanan

Selanjutnya tahap *unloading* dilakukan secara bertahap dengan step yang sama sampai dengan 0%. Penomoran lokasi sensor seperti diberikan pada **Gambar 4** dan penempatan sensor seperti diberikan pada **Tabel 1**. Secara umum lokasi yang dipilih adalah pada $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$ bentang dan pada posisi gelagar sementara accelerometer diletakkan tepat pada median jembatan.

Tabel 1. Tipe dan lokasi sensor

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Total Station (Reflector Sheet)	V	V	V							V	V	V		V	V	V
Dial gauge										V	V	V				
LVDT										V	V	V				
Strain gauge				V							V					
Tiltmeter													V			
Accelerometer				V	V	V	V	V								

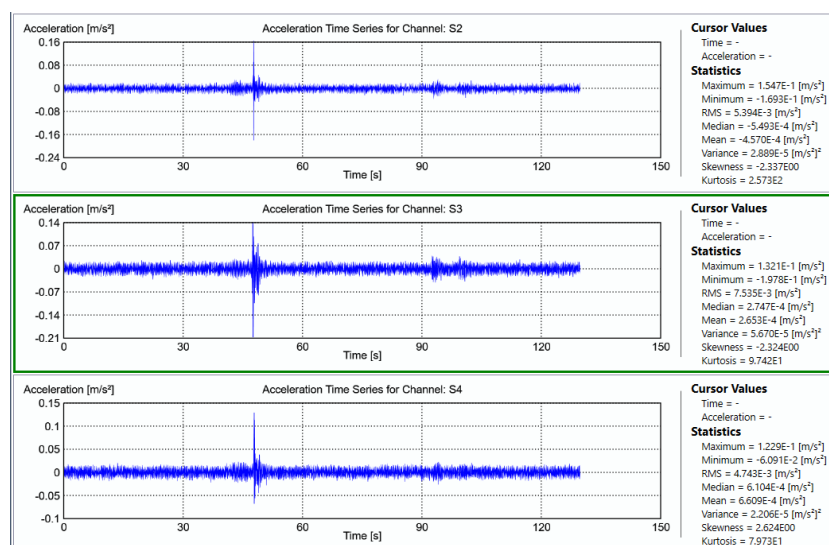


Gambar 4. Penomoran lokasi sensor

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

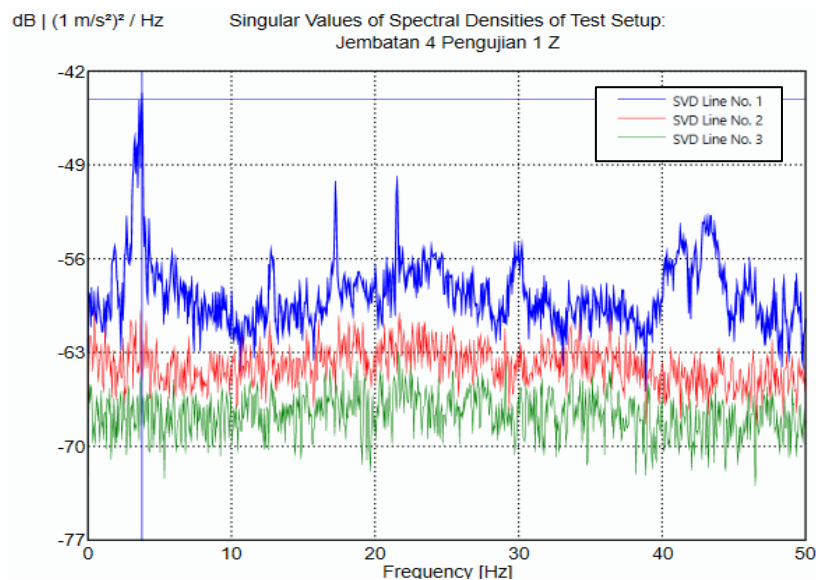
3.1. Hasil Uji Beban Dinamis (Uji Getar)

Rekaman data *accelerometer* seperti diberikan pada **Gambar 5**.



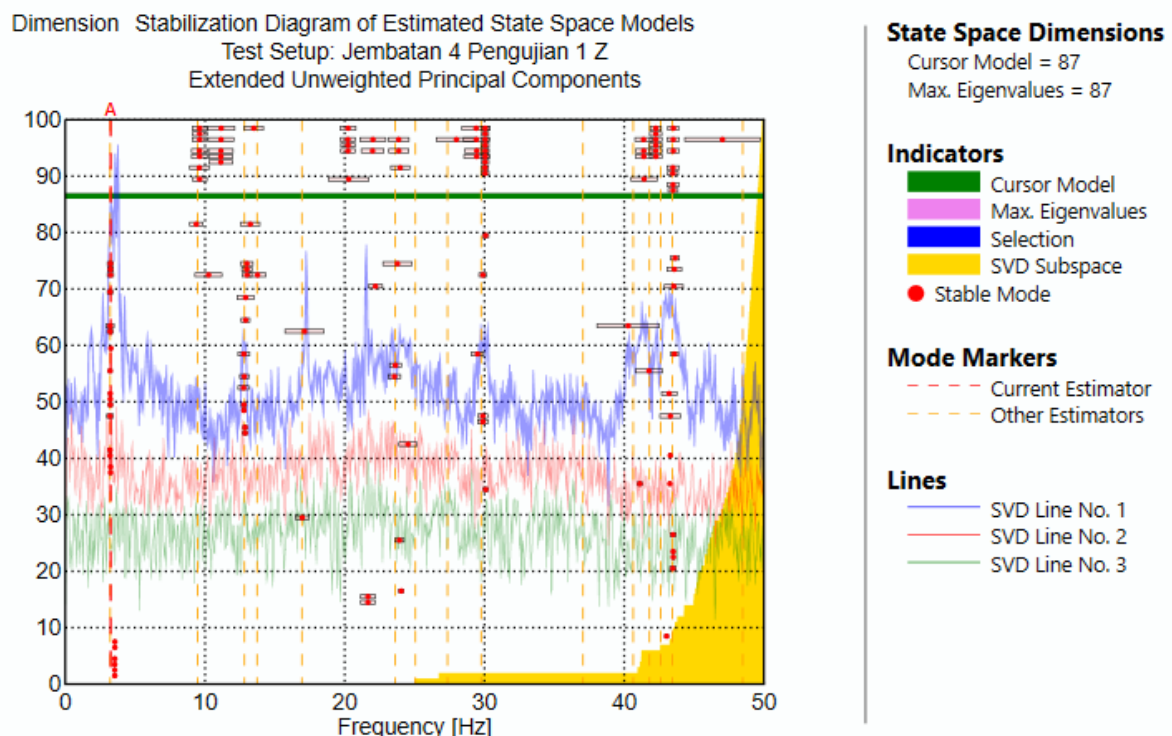
Gambar 5. Rekaman data percepatan uji dinamis

Data percepatan pada domain waktu kemudian dikonversi ke domain frekuensi menggunakan *FFT*, dan hasil pengolahan tersebut ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Singular desnsitas spektral

Dengan algoritma *SSI*, parameter dinamis berupa frekuensi natural, rasio redaman dan bentuk modal dapat diidentifikasi. Teridentifikasi 1 (satu) Frekuensi dominan pada arah-z dari sistem struktur, seperti diberikan pada **Gambar 7**.



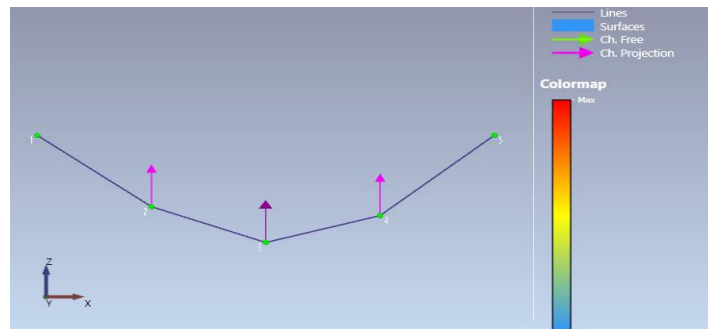
Gambar 7. Frekuensi natural

Frekuensi natural dan rasio redaman sistem struktur berdasarkan data percepatan yang terekam dengan eksitasi beban impak seperti diberikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Paramater dinamis yang teridentifikasi

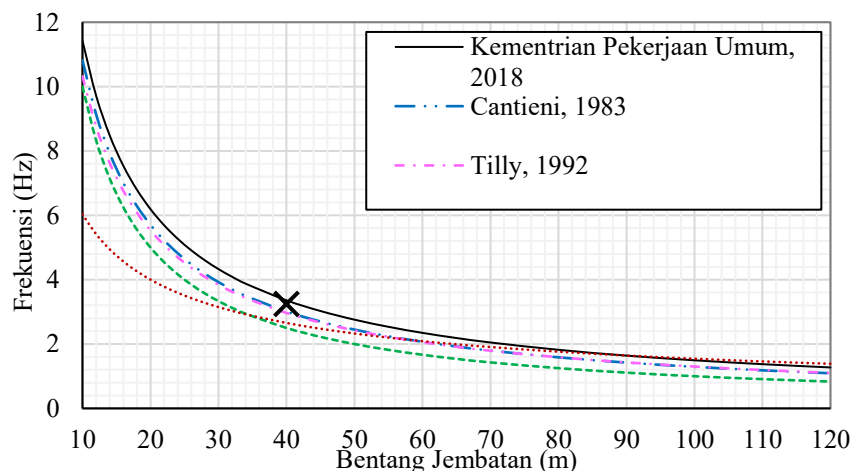
Frekuensi [Hz]	Standar Deviasi Frekuensi [Hz]	Rasio Redaman [%]	Standar Deviasi Rasio Redaman [%]	Kompleksitas [%]
3.248	0.049	7.636	1.312	3.996

Ketika beban dikenakan pada struktur, respons awal biasanya dikuasai oleh mode bentuk pertama. Mode ini dapat digunakan untuk memperkirakan perilaku lendutan statis sistem. Mode bentuk yang teridentifikasi mengindikasikan bahwa struktur jembatan berada dalam kondisi normal, ditunjukkan oleh defleksi vertikal maksimum yang berlokasi di tengah bentang, sebagaimana pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Bentuk modal-1

Dari **Tabel 2** diperoleh frekuensi natural mode-1 $7.636 \text{ Hz} \pm 0.049 \text{ Hz}$. Frekuensi aktual jika diplotkan ke dalam Gambar 1, dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Perbandingan frekuensi aktual dibandingkan dengan data empiris

$$D_{\text{realtif}} = \frac{(f_{\text{theoretical}} - f_{\text{actual}})}{f_{\text{theoretical}}} \times 100\% = \frac{(3.248 - 3.358)}{3.358} \times 100\% = 3.265\% \quad (14)$$

Nilai kekakuan lentur (EI) berhubungan langsung dengan frekuensi alami struktur. Selisih antara frekuensi natural aktual dan teoritisnya sebesar 10–20% umumnya setara dengan perbedaan kekakuan lentur sekitar 20–40%. Perbedaan antara kekakuan aktual (EI_{actual}) dan teoritisnya ($EI_{\text{theoretical}}$) mencerminkan variasi kapasitas struktural. Berdasarkan pendekatan ini, kapasitas jembatan aktual adalah sebagai berikut:

$$Kap_{\text{actual}} = \left(1 - 2 \times \frac{f_{\text{empiric}} - f_{\text{actual}}}{f_{\text{empiric}}} \right) \times 100\% = 93.5\% \quad (15)$$

Meskipun demikian, data pada **Tabel 2** memperlihatkan bahwa rasio redaman berada di atas 5%, yaitu $7.636\% \pm 1.312\%$. Dimana nilai redaman yang lebih dari 5% mengindikasikan adanya disipasi energi

berlebih yang bisa jadi karena adanya defect pada struktur, baut yang longgar, ataupun gesekan antar elemen struktur. erdasarkan temuan empiris, struktur beton normal umumnya menunjukkan rasio redaman $\leq 5\%$, sedangkan struktur baja memiliki nilai redaman yang umumnya $\leq 2\%$ [23].

3.2. Hasil Uji beban statis

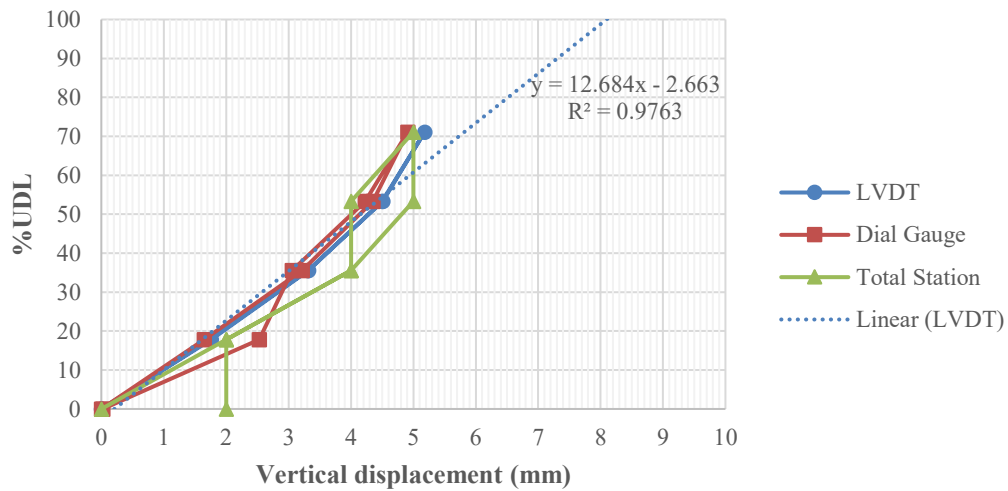
Data lendutan dan regangan yang diukur dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil pengukuran lendutan dan regangan

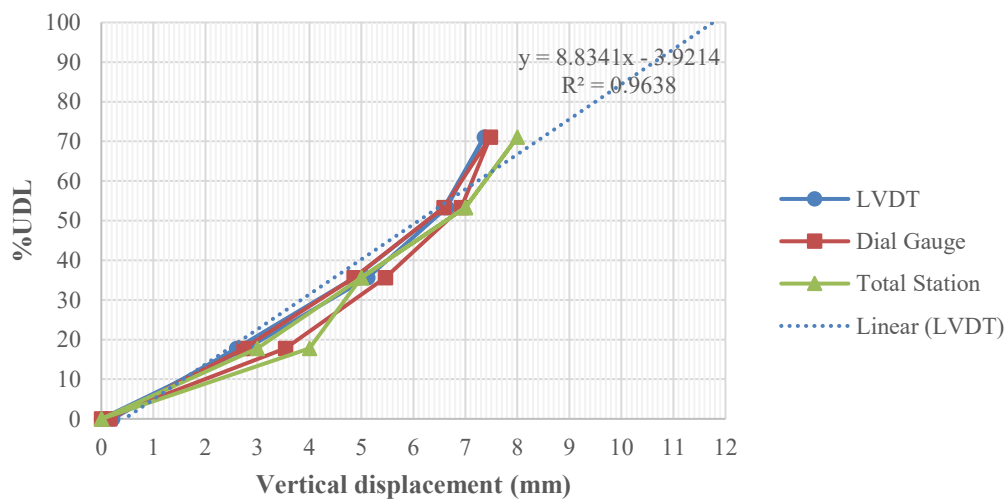
Type	UDL	ID Sensor															
	%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Total Station (mm)	0										0.00	0.00	0.00				
	17.8										2.00	3.00	1.00				
	35.6										4.00	5.00	3.00				
	53.3										5.00	7.00	3.00				
	71.1										5.00	8.00	5.00				
	53.3										4.00	7.00	4.00				
	35.6										4.00	5.00	3.00				
	17.8										2.00	4.00	2.00				
	0										2.00	0.00	0.00				
	0										0.00	0.00	0.00				
Dial gauge (mm)	17.8										1.65	3.54	1.20				
	35.6										3.22	5.46	2.23				
	53.3										4.35	6.92	3.03				
	71.1										4.91	7.48	4.41				
	53.3										4.23	6.59	3.47				
	35.6										3.06	4.86	2.63				
	17.8										2.53	2.74	1.56				
	0										0.02	0.16	0.35				
	0										0.00	0.00	0.00				
	17.8										1.74	2.80	1.06				
LVDT (mm)	35.6										3.31	5.12	2.08				
	53.3										4.51	6.64	2.28				
	71.1										5.18	7.36	3.38				
	53.3										4.50	6.59	3.02				
	35.6										3.32	4.87	2.19				
	17.8										1.76	2.60	1.03				
	0										0.00	-0.22	-0.15				
	0											0					
	17.8				6.23							15.76					
	35.6				37.9							46.39					
Strain gauge (μ)	53.3				43							76.34					
	71.1				46.4							94.9					
	53.3				53							91.34					
	35.6				45.9							62.39					
	17.8				12.2							27.76					
	0				4							8					
	0																
	17.8													0			
	35.6													0.01			
	53.3													0.01			
Tiltmeter (0)	71.1													0.02			
	53.3													0.02			
	35.6													0.01			
	17.8													0			
	0													-0			

Pada S10, S11 dan S12 ada 3 (tiga) buah sensor yang dijadikan alat ukur pada titik yang sama, dan hasilnya menunjukkan standar deviasi rata-rata sebesar 0.39 mm, dengan standar deviasi yang kecil artinya salah satu dari ketiga sensor dapat dijadikan rujukan untuk mengidentifikasi lendutan pada

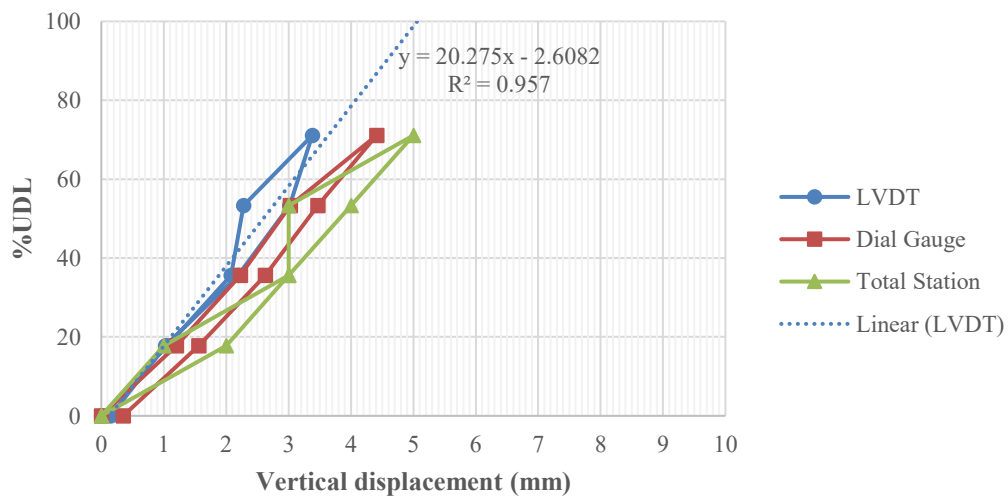
tahapan loading dan unloading. Karena antara TS, DG dan LVDT, yang memiliki nilai akurasi tertinggi sampai dengan μm adalah LVDT, maka nilai yang dijadikan acuan adalah LVDT.



Gambar 10. Grafik hubungan lendutan (mm) dan %UDL S10

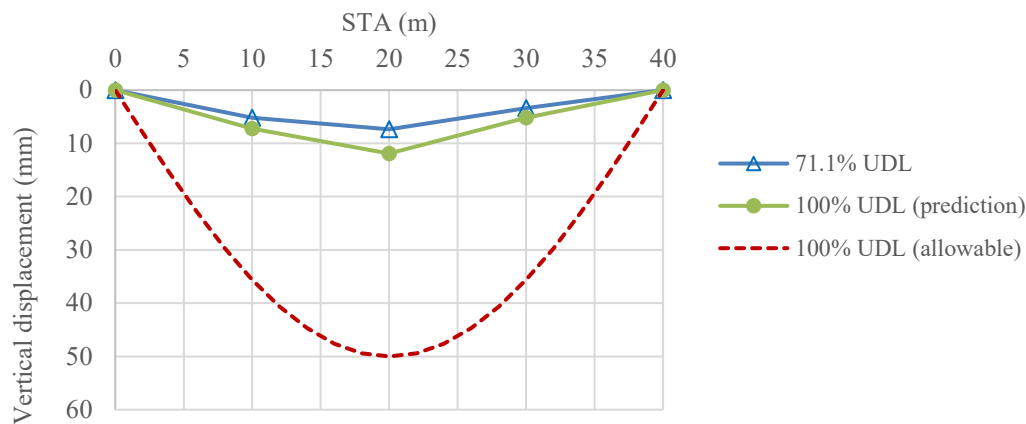


Gambar 11. Grafik hubungan lendutan (mm) dan %UDL S11



Gambar 12. Grafik hubungan lendutan (mm) dan %UDL S12

Dengan asumsi awal bahwa jembatan masih bersifat linear elastis maka lendutan pada beban maksimum hasil pengujian, perkiraan pada 100%UDL berdasarkan hasil uji dan batas ijin seperti diperlihatkan pada **Gambar 13**.



Gambar 13. Lendutan hasil uji, prediksi pada 100%UDL dan batas ijin

Dari **Gambar 13** dan **Tabel 4** terlihat bahwa perkiraan lendutan yang terjadi pada 100% UDL masih di bawah lendutan ijin.

Tabel 4. Pengecekan Pemenuhan Kriteria Lendutan Maksimum

Beban	Lendutan (mm)	
	Hasil Uji	Ijin (L/800)
Lalu lintas 100%UDL	11.9	50 mm

Untuk mengecek apakah struktur masih dalam kondisi linier elastis dilakukan dengan pengecekan pemenuhan persyaratan lendutan sisa, yang mana lendutan permanen dapat diterima selama tidak melampaui batas ijinnya (Δ_p) [22]:

$$\Delta_p < 0.2 \Delta_{max} \quad (16)$$

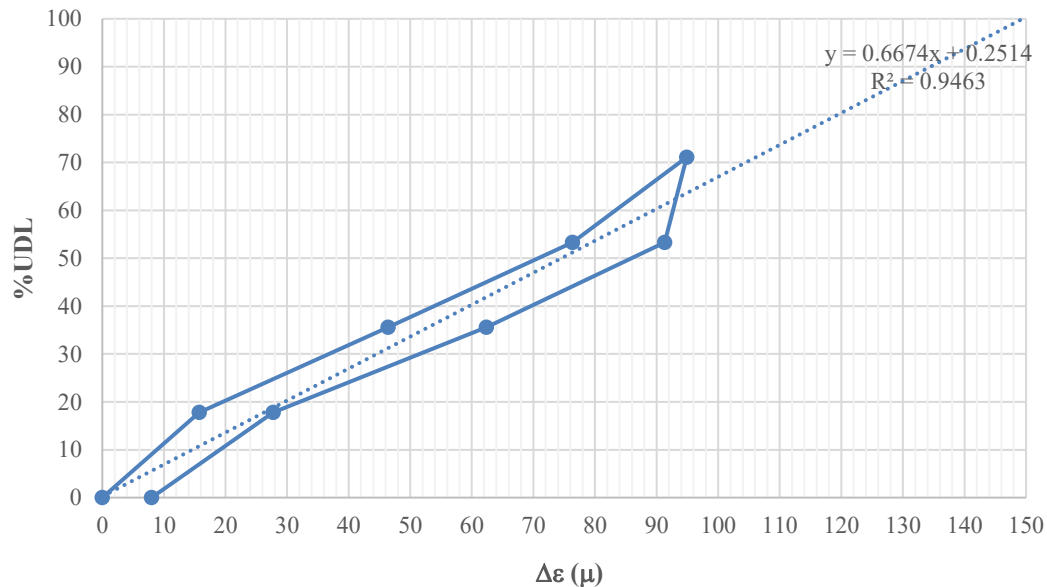
Hasilnya seperti diberikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Pengecekan Syarat Lendutan Sisa

Lokasi Sensor	Δ_{max} (mm)	Δ_p (mm)	$\frac{\Delta_p}{\Delta_{max}}$	Status
S10	4.91	0.00	0.000	< 0.2 (memenuhi kriteria)
S11	7.36	0.22	0.030	< 0.2 (memenuhi kriteria)
S12	3.38	0.15	0.044	< 0.2 (memenuhi kriteria)

Lendutan sisa aktual semuanya memenuhi persyaratan maksimal yang disampaikan dalam pers. (16) yaitu 0.2, sementara yang terjadi rata-ratanya 0.025 ± 0.023 . Salah satu indikator utama kualitas struktur adalah kemampuan elastisnya saat mengalami siklus pembebanan dan pelepasan beban. Batas lendutan permanen yang diizinkan setelah beban dilepas umumnya ditetapkan dalam regulasi atau standar yang berlaku sebagai proporsi tertentu dari lendutan maksimum. [22]. Dengan kondisi ini struktur dinyatakan memenuhi kriteria yang disyaratkan.

Data hasil pengukuran regangan seperti diberikan pada **Tabel 3**. Dari tabel tersebut terlihat bahwa regangan terbesar adalah S11 yang berada di tengah bentang. Hubungan %UDL dan regangan pada S11 seperti diberikan pada **Gambar 14**.



Gambar 14. Grafik hubungan perubahan regangan, $\Delta\epsilon (\mu)$ dan %UDL S11 bridge4

Dari **Gambar 14** terlihat ada perubahan kekakuan pada beban 71.1%UDL, maka untuk memproyeksikan $\Delta\epsilon$ pada 100%UDL dibuat trendline $\Delta\epsilon (\mu)$ dan beban, %UDL. Berdasarkan trendline tersebut diperoleh proyeksi perubahan regangan pada beban 100%UDL, yaitu $\Delta\epsilon=145\mu$. Selanjutnya berdasarkan hukum hooke, diperoleh perubahan tegangan sebagai berikut:

$$\Delta\sigma = \Delta\epsilon E = 145\mu \times 200000 = 29 \text{ MPa}$$

Sementara kriteria yang diijinkan $\Delta\sigma_{ijin} = 45.29 \text{ MPa}$. Dengan kondisi ini berarti pada saat pembebanan lalu lintas maksimum tegangan yang terjadi masih di bawah batas yang diijinkan.

Dengan pendekatan prediksi lendutan pada 100% UDL dibandingkan dengan syarat lendutan maksimum, dengan prinsip bahwa linieritas selama masih dalam batas elastis hubungan antara lendutan dengan kekakuan, maka rasio kapasitas relatif jembatan terhadap kapasitas disain minimum dapat dinyatakan:

$$Kap_{relatif} = \left(1 - \frac{\delta_{max} - \delta_{ijin}}{\delta_{ijin}}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{11.9 - 50}{50}\right) \times 100\% = 172\% \quad (17)$$

Dari kedua hasil uji dinamis dan statis, maka diperoleh kapasitas relatif jembatan hasil uji dinamis, [persamaan (15)] lebih konservatif dibandingkan uji statis [persamaan (17)].

4. KESIMPULAN

Hasil uji getaran menunjukkan frekuensi natural 3.248Hz, lebih rendah dari batas minimum 3,357 Hz menunjukkan kekakuan struktur jembatan cukup memadai mengacu pada data empiris Bina Marga, dan dengan rasio redaman sebesar 7.636, mengindikasikan adanya disipasi energi berlebih. Namun melihat hasil uji beban statis yang menunjukkan lendutan maksimum pada 100% UDL sebesar hanya 11.9 mm, masih jauh di bawah batas 50 mm, dengan rasio lendutan sisa juga hanya 0,044 masih jauh di bawah batas ijin yaitu 0,2. Maka rasio redaman yang berlebih dan frekuensi yang lebih rendah diperkirakan akibat defect non-structural. Dengan hasil tersebut, maka jembatan dinyatakan laik fungsi, namun memerlukan pemeriksaan visual merekomendasikan untuk memeriksa lebih lanjut sambungan-sambungan baja, untuk memastikan bahwa penurunan frekuensi bukan karena kerusakan struktural. Dengan membandingkan rasio kapasitas relatif jembatan yang diperoleh dari uji dinamis dan uji beban statis, dapat disimpulkan bahwa uji beban dinamis dapat dijadikan alternatif metode pengujian yang lebih mudah, lebih cepat, serta memberikan hasil yang cenderung lebih konservatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. 2018.
- [2] E. O. L. Lantsoght, "Assessment of existing concrete bridges by load testing: barriers to code implementation and proposed solutions," *Structure and Infrastructure Engineering*, pp. 1–13, Oct. 2023, doi: 10.1080/15732479.2023.2264825.
- [3] K. Tu, Y. Ye, D. Wu, Y. Zhou, and W. Deng, "Technical Analysis of Highway Bridge Static Load Test," *Journal of Architectural Research and Development*, vol. 7, no. 3, pp. 58–63, May 2023, doi: 10.26689/jard.v7i3.4829.
- [4] B. Li, H. Liu, J. Jian, and H. Gao, "Static Load Test Analysis of T-Beam Bridge Shear Strengthening by Prestressed Steel Wire Rope Embedded in Polyurethane Cement (PSWR-PUC)," *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10514, Jul. 2023, doi: 10.3390/su151310514.
- [5] 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.
- [6] H. Khoeri, W. Isvara, D. Sofiana, and F. Natasa, "Penilaian Kelaikan Jembatan Berdasarkan Parameter Dinamis Experimental pada Jembatan PC-I Girder 40 m," *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 2024.
- [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] 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.ymssp.2018.07.026.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, "Laporan Uji Dinamik Jembatan," Jakarta, 2014.
- [15] R. Cantieni, "Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland," Dübendorf, Switzerland, 1983.
- [16] 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.
- [17] R. Heywood, W. Roberts, and G. Bouilly, "Dynamic loading of bridges," in *Transportation Research Record*, National Research Council, 2001, pp. 58–66. doi: 10.3141/1770-09.
- [18] British Standards Institution, *BS EN 1991-2:2003; Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*. London: BSI, 2003.

- [19] D. Pamungkas, S. R. Kurniawan, and B. F. Simamora, “Perbandingan Antara Domain Waktu dan Frekuensi untuk Pengenalan Sinyal EMG,” *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 17, no. 1, pp. 36–41, Mar. 2021, doi: 10.17529/jre.v17i1.16844.
- [20] Direktorat Jenderal Bina Marga, *Pedoman Konstruksi dan Bangunan Pt T-05-2002-B, Penilaian Kondisi Jembatan untuk Bangunan atas dengan Cara Uji Getar*. Jakarta, Indonesia: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2002.
- [21] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. in Civil Engineering and Engineering Mechanics Series. Prentice Hall, 2012.
- [22] Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, *Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan*. 2012.
- [23] F. N. Kudu, Ş. Uçak, G. Osmancikli, T. Türker, and A. Bayraktar, “Estimation of damping ratios of steel structures by Operational Modal Analysis method,” *J Constr Steel Res*, vol. 112, pp. 61–68, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.04.019.