

ASESMEN RELIABILITAS JEMBATAN RANGKA BAJA BENTANG 55 M DENGAN UJI BEBAN STATIK DAN DINAMIK

Heri Khoeri^{1,2,*}, Roberto Pradana¹, Panji Nugroho¹

¹ PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta

*Corresponding Author: heri.khoeri@umj.ac.id

Abstrak

Uji beban jembatan baik statik maupun dinamik bertujuan untuk memastikan keamanan dan kenyamanan penggunaannya selama masa layan. Pada uji beban dinamik penilaian didasarkan parameter dinamik berupa frekuensi alami, rasio redaman, kekakuan dan pola getar, sementara pada uji beban statik menggunakan parameter tidak terlampauinya batas tegangan dan lendutan saat operasional termasuk saat pembebanan maksimum. Uji beban dinamik dilakukan dengan memberikan eksitasi buatan dengan menjatuhkan roda depan truk dari ketinggian 20 cm, percepatan direkam mulai sebelum sampai sesudah aplikasi beban. Dari hasil analisis modal eksperimental (EMA) data percepatan diperoleh frekuensi alami 2,906Hz lebih dari rencana (1.44Hz) dan rata-rata jembatan bentang 55m di Indonesia (2.53Hz), namun rasio redaman 5.222%+0.705% mengindikasikan adanya disipasi energi yang besar, yang bisa jadi akibat adanya defect. Sementara dari uji beban statik, lendutan pada bentang tengah dengan beban 52UDL adalah 15mm yang diextrapolasi ke 100%UDL menjadi 28.85mm, masih di bawah lendutan ijin 45 mm. Begitupun pada bentang tepi lendutan 52%UDL terukur 9.26mm yang diextrapolasi ke 100%UDL menjadi 17.81mm juga masih di bawah lendutan ijin 28mm, namun rasio lendutan sisa terhadap lendutan maksimum 0.385+0.034 melebihi batas ijin yaitu 0.2 menunjukkan perilaku inelastis saat loading-unloading. Uji beban statik dan dinamik menunjukkan kesesuaian hasil pada perkiraan kapasitas dan adanya indikasi kerusakan.

Kata kunci: asesmen, dinamik, jembatan, statik, uji beban

Abstract

Both static and dynamic bridge load tests aim to ensure the safety and comfort of users during their service life. In dynamic load testing, assessment is based on dynamic parameters such as natural frequency, damping ratio, stiffness, and vibration pattern, while in static load testing, parameters include not exceeding the limits of stress and deflection during operational conditions, including maximum loading. Dynamic load testing is conducted by artificially exciting the bridge with a front truck wheel dropped from a height of 20 cm, with acceleration recorded before and after load application. From the results of Experimental Modal Analysis (EMA), acceleration data yielded a natural frequency of 2,906Hz, exceeding the planned (1.44Hz) and the average for 55m span bridges in Indonesia (2.53Hz). However, the damping ratio of 5.222%+0.705% indicates significant energy dissipation, possibly due to defects. Meanwhile, in static load testing, the deflection at mid-span with a 52% UDL load is 15mm, extrapolated to 100% UDL, it becomes 28.85mm, still below the allowable deflection limit of 45 mm. Similarly, at the edge span, the measured deflection with 52% UDL is 9.26mm, extrapolated to 100% UDL, it becomes 17.81mm, also below the allowable deflection limit of 28mm. However, the remaining deflection ratio to maximum deflection of 0.385+0.034 exceeds the allowable limit of 0.2, indicating inelastic behavior during loading-unloading. Static and dynamic load tests show alignment in results regarding estimated capacity and indications of defects.

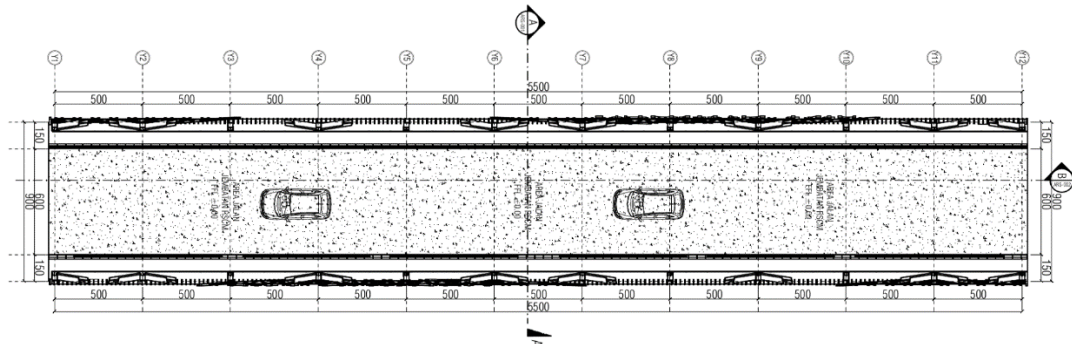
Keywords : assessment, dynamic, bridge, static, loading test

PENDAHULUAN

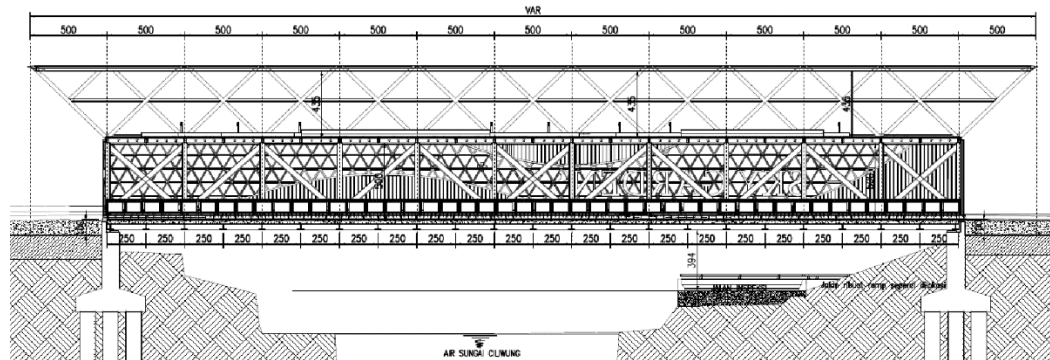
Jembatan Sungai Ciliwung Penghubung dua buah bangunan (Gambar 1) adalah rangka baja jembatan dengan bentang 55 m dan lebar 9 m yang terdiri dari 6 m lebar lalu lintas dan 2 x 1.5 m lebar pedestrian. Denah jembatan berdasarkan *as built drawing* (PT. Adik Abang Qanita Pratama, 2023) seperti pada Gambar 2, potongan memanjang pada Gambar 3, dan potongan melintang pada Gambar 4.



Gambar 1. Jembatan Sungai Ciliwung penghubung dua bangunan (rangka baja 55 m)

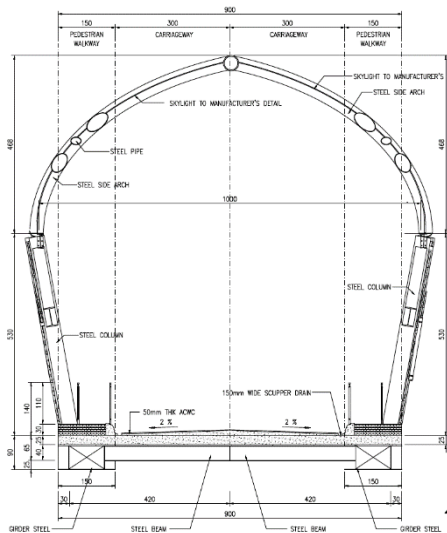


Gambar 2. Denah jembatan Sungai Ciliwung penghubung 2 gedung



Gambar 3. Potongan memanjang jembatan Sungai Ciliwung penghubung 2 gedung

Gambar 4. Potongan melintang jembatan Sungai Ciliwung penghubung 2 bangunan



Untuk mengetahui tingkat keselamatan dan menentukan tingkat keamanan struktur terhadap beban layan pada saat beroperasi perlu dilakukan uji beban (Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan (Revisi 2), 2018). Uji beban jembatan merupakan salah satu metode penilaian untuk jembatan eksisting maupun jembatan baru (Lantsoght, 2023). Hasil uji beban memungkinkan verifikasi kelayakan jembatan dan pemeriksaan perhitungan desain. Uji beban juga berfungsi sebagai titik awal yang penting untuk memantau operasi. Terdapat korelasi kuat antara perilaku jembatan saat uji beban dan perilaku jangka panjangnya (Hassan et al., 1995).

Uji beban statis adalah metode deteksi yang umum dan efektif untuk menilai kinerja, mengetahui keadaan aktual (Khoeri, Nugroho, et al., 2024), dan untuk mengidentifikasi masalah yang ada untuk meningkatkan dan mengoptimalkan kualitas jembatan (Tu et al., 2023), (Li et al., 2023), juga berfungsi sebagai titik awal untuk pemantauan lanjutan. Terdapat korelasi kuat antara perilaku jembatan saat uji beban dan perilaku jangka panjangnya (Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan, 2012).

Sementara uji beban dinamik dilakukan untuk mengidentifikasi kapasitas aktual jembatan, mengidentifikasi tingkat keutuhan dan kerusakan jembatan berdasarkan parameter dinamik dari interpretasi hasil pengujian. Parameter yang dimaksud adalah frekuensi alami pertama terukur, f_{aktual} dari getaran bebas, kekakuan lentur, EI_{aktual} dan redaman kritis, ζ_{aktual} . Setiap perubahan periodik dalam parameter dinamis memberikan korelasi kondisi struktural dengan tingkat laju kerusakan. Kriteria penilaian kondisi dengan cara uji getar diterapkan untuk berbagai tipe jembatan beton bertulang, beton prategang, rangka baja dan gelagar baja komposit (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2002).

Analisis modal eksperimental (*Experimental Modal Analysis, EMA*) adalah teknik identifikasi parameter modal dengan mengeksitasi struktur dengan getaran buatan, sementara analisis modal operasional (*Operational Modal Analysis, OMA*) dilakukan dengan getaran saat kondisi operasionalnya (Zahid et al., 2020). Algoritma yang digunakan untuk memperkirakan sifat dinamis sistem dilakukan dengan teknik *Stochastic subspace identification, SSI* yang telah menjadi alat untuk identifikasi modal, diantaranya pemantauan kondisi online sistem suspensi kendaraan kereta api (Bogie Y25), identifikasi frekuensi alami dari *mode-mode* sistem suspense (Liu et al., 2020), jembatan *PC-I girder* jalan raya (Khoeri, Isvara, et al., 2024), jembatan baja komposit, (Khoeri, Alisjahbana, et al., 2024), kereta api (Xu et al., 2019), jembatan pedestrian (Ali et al., 2019), aplikasi industri (Salehi et al., 2018), pemantauan infrastruktur sipil (Gres et al., 2019), pemeriksaan bangunan gedung, bangunan bersejarah (Ercan, 2018), dan lainnya.

Secara empirik dari beberapa penelitian sebelumnya didapatkan hubungan antara

frekuensi dan bentang jembatan, seperti pada persamaan (1) sampai (5), dan pada **Gambar 5**.

$$f_0 = 87.227L^{-0.883} \text{ (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014)} \quad (1)$$

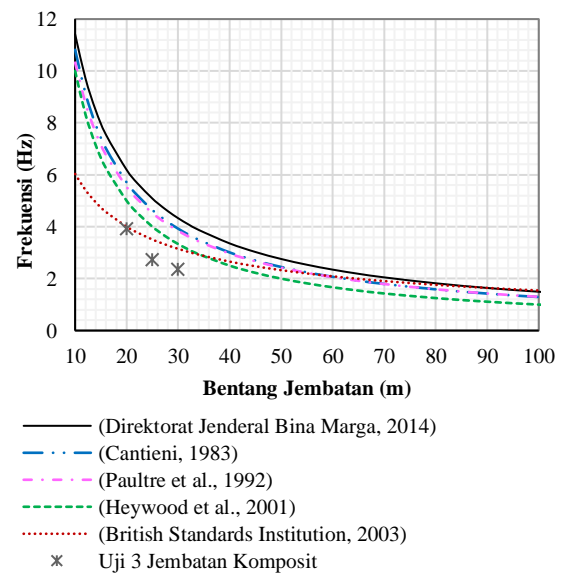
$$f_0 = 90.6L^{-0.923} \text{ (Cantieni, 1983)} \quad (2)$$

$$f_0 = 82L^{-0.9} \text{ (Paultre et al., 1992)} \quad (3)$$

$$f_0 = 100/L \text{ dengan range bentang pendek ke panjang } 80/L \text{ sd } 120/L \text{ (Heywood et al., 2001)} \quad (4)$$

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

$$\text{dan } f_0 = 23.58L^{-0.592} \text{ untuk } L > 100 \text{ m} \text{ (British Standards Institution, 2003)}$$



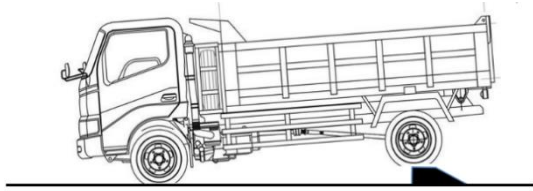
Gambar 5. Hubungan frekuensi alami dan bentang jembatan dari beberapa penelitian sebelumnya

METODE PENELITIAN

Uji Beban Dinamik

Secara umum tahapan dalam uji beban dinamik dan analisisnya adalah (1) akuisisi data getaran pada jembatan; (2) Pemrosesan data rekaman data getaran (percepatan); (3) Analisis Modal; (4) Penilaian parameter dinamik.

Pengukuran getaran dilakukan dengan 3D-*accelerometer* di $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$ bentang jembatan pada gelagar tepi (Gambar 9 dan Tabel 3) yang dilakukan dalam waktu 75 sampai dengan 125 detik sebelum sampai sesudah aplikasi beban. Impak dilakukan dengan menjatuhkan roda truk 15 ton dari ketinggian 20 cm (Gambar 6).



Gambar 6. Beban yang digunakan sebagai trigger getaran pada jembatan

Data yang direkam oleh *accelerometer* berupa data percepatan dalam rentang waktu tertentu tiap waktu tertentu. Dalam penelitian ini digunakan interval data 0,01 detik, atau frekuensi data 100 Hz. Data dalam domain waktu tersebut selanjutnya akan ditransformasi ke dalam domain frekuensi. Untuk merubah sinyal percepatan, $a(t)$ dalam domain waktu (t) ke dalam domain frekuensi (f) dapat dilakukan dengan *discrete fourier transformation (DFT)* seperti pers. (6) berikut (Pamungkas et al., 2021):

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

Dengan $S(f) = \text{spectral density}$ (sinyal percepatan dalam domain frekuensi) dengan satuan $\text{m}^2 \cdot \text{det}^{-4} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $a(t) = \text{sinyal percepatan}$ dalam domain waktu (m/det^2), $e^{-j2\pi ft} = \text{fungsi kernel}$, $f = \text{frekuensi (Hz)}$ dan t adalah waktu (detik). Selain menggunakan pers. (6) algoritma cepat untuk penyelesaian *DFT* dikenal dengan *Fast Fourier Transform (FFT)*. Metode *FFT* bekerja secara rekursif dengan membagi vektor asli menjadi dua bagian, menghitung *FFT* masing-masing bagian, dan kemudian menggabungkannya. Ini mengindikasikan bahwa *FFT* sangat efisien. Pemrosesan data dilakukan dengan bantuan *software Modal Analysis*.

Untuk mengidentifikasi frekuensi dan bentuk modal, dan faktor redaman struktur untuk memverifikasi model disesuaikan kondisi aktual. Analisis modal dilakukan menggunakan algoritma *Stochastic Subspace Identification, SSI*, dengan bantuan program *modal analysis*. Algoritma ini didasarkan pada tiga asumsi utama: i) sistem berperilaku dalam rentang liniernya, ii) sistem adalah invarian waktu, dan iii) eksitasi input merupakan realisasi dari proses stokastik dengan perilaku *Gaussian white noise* dan tidak berkorelasi dengan respon sistem (Kang et al., 2019), (Maddipour Farrokhifard et al., 2019). Dari simulasi dengan algoritma berbeda, pendekatan *subspace* memiliki kinerja kompetitif dengan metode error prediksi, asalkan

sistem dieksitasi dengan baik (Van Overschee & De Moor, 1996).

Respon jembatan berkaitan erat dengan kondisi kerusakan struktural. Nilai kerusakan struktural relative adalah sebagai berikut (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2002):

$$D_{\text{realtif}} = \frac{(f_{\text{teoritis}} - f_{\text{aktual}})}{f_{\text{teoritis}}} \times 100\% \quad (7)$$

dengan,

D_{realtif} = nilai kerusakan struktur relative

f_{aktual} = frekuensi alami aktual (Hz)

f_{teoritis} = frekuensi alami teoritis (Hz)

Kekakuan lentur (EI) langsung terkait dengan frekuensi alami. Penurunan kekakuan aktual, EI_{aktual} terhadap kekakuan teoritis, EI_{teoritis} menunjukkan penurunan kapasitas daya pikul. Penurunan frekuensi aktual terhadap frekuensi teoritis sebesar 10-20% ekuivalen dengan penurunan kekakuan lentur sebesar 20-40%. Nilai penurunan kapasitas ditentukan dengan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2002):

$$D_{\text{kap}} = \frac{(EI_{\text{teoritis}} - EI_{\text{aktual}})}{EI_{\text{teoritis}}} \quad (8)$$

dengan,

D_{kap} = nilai penurunan kapasitas

EI_{teoritis} = kekakuan lentur teoritis ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)

EI_{aktual} = kekakuan lentur aktual ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)

Rasio redaman diestimasi menggunakan metode domain waktu dekremen logaritmik (Chopra, 2012):

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

di mana x_n dan x_{n+1} adalah dua puncak berturut-turut dalam respons getaran bebas struktur dan ζ adalah rasio redaman. Untuk rasio redaman kecil dengan $\zeta < 0.2$ dan $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1$, maka rasio redaman ζ dapat diperoleh dari persamaan (10):

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

Untuk meningkatkan ketepatan, dua puncak untuk m siklus, dapat menggunakan persamaan:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{1}{2\pi m} \ln \frac{x_n}{x_{n+m}} \quad (11)$$

Peningkatan redaman kritis aktual, ζ_{aktual} terhadap redaman kritis teoritis, ζ_{teoritis} menunjukkan tingkat kerusakan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2002)

Uji Beban Statis

Secara umum tahapan dalam uji beban statik dan Analisa yang akan dilakukan adalah (1) Penentuan besaran, konfigurasi dan tahapan pembebanan; (2) Pelaksanaan dan ketentuan selama proses pengujian; (3) Penilaian parameter hasil uji beban statik.

Perhitungan konfigurasi truk uji (Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan, 2012):

- Beban terbagi rata (UDL):

$$UDL = 0,9 \times \left(0,5 + \frac{L}{15}\right) \text{ ton/m}^2 \quad (12)$$

dengan, L = bentang jembatan (m)

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

$$UDL/m' = 5,5UDL + 50\%UDL(b - 5,5) \quad (13)$$

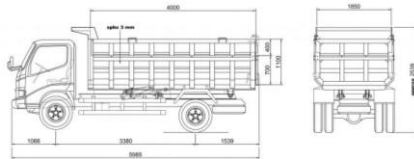
dengan, b = lebar lalu lintas (m), jika $b < 5,5m$ maka UDL dikalikan 5,5, jika melebihi, maka sisa lebar lalu lintas dikali 50% UDL .

- Beban terbagi rata total, UDL_{Total} :

$$UDL_{Total} = UDL/m' \times L \quad (14)$$

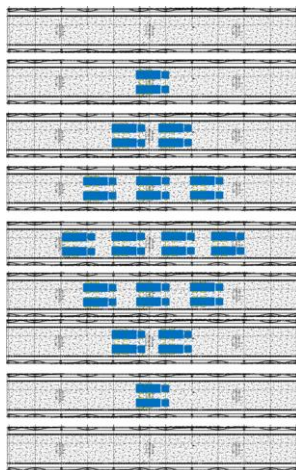
- Mengikuti konsep linearitas, maka beban UDL dapat diambil minimal 50%UDL

Mengikuti ketentuan di atas dengan target 52% UDL, maka digunakan 8 unit truk dengan berat 1 unit 14.3 ton, total beban = 114 ton, dengan spesifikasi truk seperti Gambar 7.



Gambar 7. Rencana truk yang akan digunakan

Tahapan dan konfigurasi pembebanan truk seperti pada Gambar 8 dan Tabel 1.



Gambar 8. Tahapan loading-unloading

Tabel 1. Tahapan Pembebanan

Tahapan Pengujian	Jumlah Truk	Beban (Ton)	%UDL
Tahap-1	0	0.0	0%
Tahap-2 (Loading)	2	28.6	13%
Tahap-3 (loading)	4	57.2	26%
Tahap-4 (Loading)	6	85.8	39%
Tahap-5 (loading)	8	114.4	52%
Tahap-6 (unloading)	6	85.8	39%
Tahap-7 (unloading)	4	57.2	26%
Tahap-8 (unloading)	2	28.6	13%
Tahap-9 (unloading)	0	0.0	0%

Parameter penilaian uji beban statis dilihat dari (1) Perpindahan (Lendutan); dan (2) Tegangan. Lendutan hasil uji biasanya lebih kecil dibandingkan hasil perhitungan [(Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan, 2012), (Khoeri, Alisjahbana, et al., 2024) dan lainnya], maka jika hasil uji menunjukkan hal sebaliknya berarti ada indikasi kerusakan struktur. Salah satu ukuran kualitas struktural adalah perilaku elastis jembatan di bawah siklus pembebanan dan penghilangan beban. Lendutan maksimum yang diijinkan mengacu pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Lendutan Ijin (BSN, 2016), (Bridge Design Manual, Vol-1, 1992)

Jenis Elemen	Defleksi yang Ditinjau	Defleksi Maksimum yang Diizinkan	
		Beban Kendaraan	Beban Kendaraan +Pejalan Kaki
Bentang sederhana atau menerus	Defleksi seketika akibat beban hidup dan beban dampak	$L/800$	$L/1000$
Kantilever		$L/400$	$L/375$

Lendutan permanen ijin (Δ_p) (Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan, 2012):

$$\Delta_p < 0.2 \Delta_{max} \quad (15)$$

dengan Δ_{max} adalah lendutan ijin maksimum.

Dengan hubungan antara tegangan, σ , modulus elastisitas, E dan regangan, ϵ , maka tegangan dapat dinyatakan sebagai (Karuppasamy et al., 2020):

$$\Delta\sigma = \Delta\epsilon E \quad (16)$$

dengan $\Delta\sigma$ perubahan tegangan, $\Delta\epsilon$ perubahan regangan dan E modulus elastisitas. Dengan pers. (16) nilai tegangan dapat dikalkulasi. Kenaikan tegangan pada pembebanan 52%UDL diekstrapolasi ke 100% UDL. Nilai kenaikan tersebut dibandingkan dengan tegangan leleh

A992, $f_y = 345$ MPa. Dalam analisis layan, tegangan dapat dinyatakan (BSN, 2020):

$$fa = \frac{fy}{FK} = \frac{345}{1.67} = 207 \text{ MPa} \quad (17)$$

dengan fa adalah tegangan perlu, fy tegangan leleh, dan FK faktor keamanan.

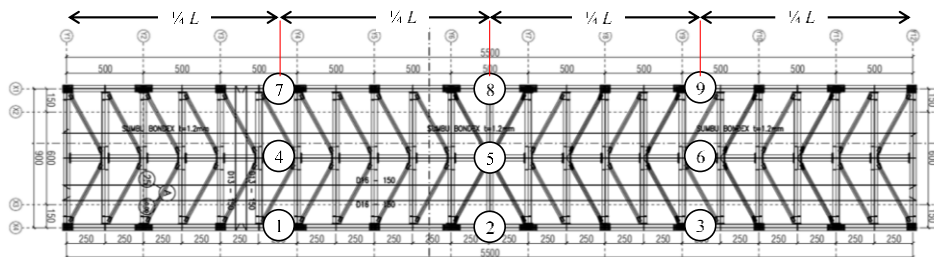
Sebelum pengaplikasian beban hidup struktur sudah mengalami tegangan akibat beban mati dan lainnya. Jika beban hidup 25% dari beban layan total, maka sudah ada tegangan dan regangan akibat beban mati dan lainnya sebesar:

$$\sigma_0 = 70\%fa = 144.6 \text{ MPa} \quad (18)$$

Beban Pedestrian total, $TP_{total} = 5 \times 55 \times 2 \times 1.5 = 825 \text{ kN} = 84 \text{ ton}$, sementara beban $100\%UDL_{total} = 220 \text{ ton}$, maka perubahan tegangan yang diijinkan akibat $100\%UDL_{total}$:

$$\Delta\sigma = 35\%fa \times \frac{228}{(84 + 228)} = 45.29 \text{ MPa} \quad (19)$$

Penomoran lokasi sensor seperti pada Gambar 9 dan penempatan sensor pada Tabel 3.



Gambar 9. Penomoran lokasi sensor

Dengan adanya batasan saat pelaksanaan, maka tidak semua sensor dapat ditempatkan sesuai Gambar 9, namun semua posisi tetap diwakili setidaknya oleh 1 sensor, pada 1 lokasi yang ditempatkan lebih dari 1 (satu) sensor akan berfungsi untuk saling memvalidasi antar sensor.

Tabel 3. Sensor dan penempatan

Jenis sensor/ pengukuran	Lokasi sensor								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Total Station (TS)				✓	✓	✓			
Dial Gauge (DG)				✓		✓	✓		
LVDT				✓		✓			
Strain Gauge (SG)				✓	✓	✓			
Acceleration ACS-1)	✓	✓	✓						
Acceleration ACS-2)		✓					✓		✓
Acceleration ACS-3)		✓						✓	

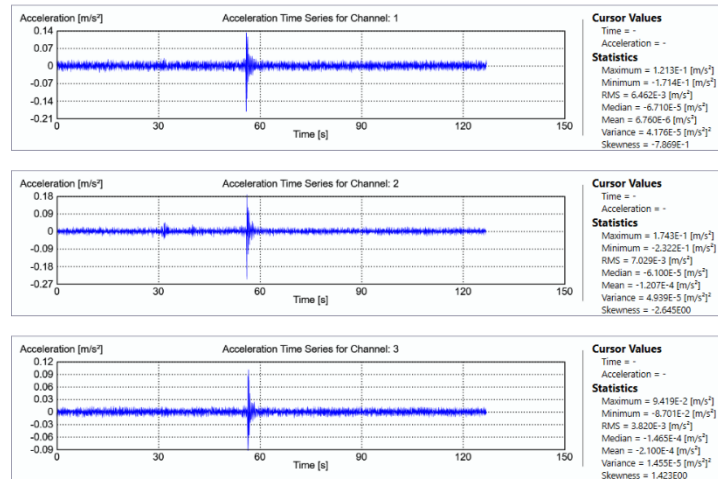
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyajian hasil akan dimulai dari uji beban dinamik kemudian dilanjut dengan uji beban statik, yang masing-masing akan mengulas dari *raw data*, analisis dan pengolahan data, sampai dengan penilaian parameter hasil uji.

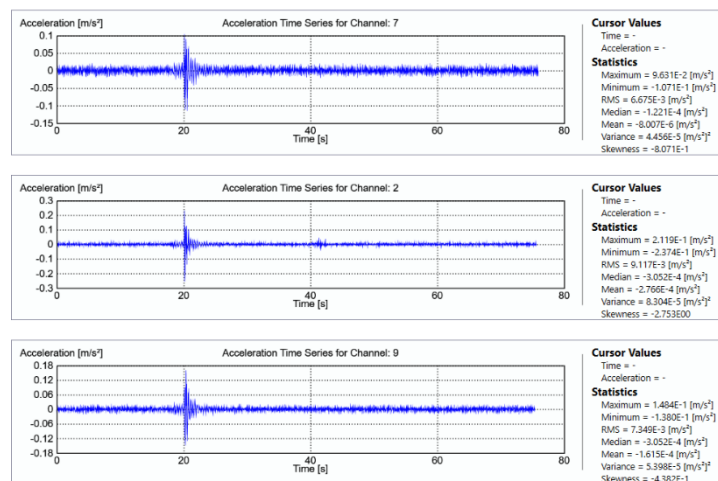
Uji beban dinamik

Uji beban dinamik dilakukan dengan 3 kali beban impact sebagai sumber eksitasi dengan 1 (satu) konfigurasi setup alat yang berbeda, namun dengan tetap 1 (satu) sensor sebagai referensi. Konfigurasi yang dilakukan adalah:

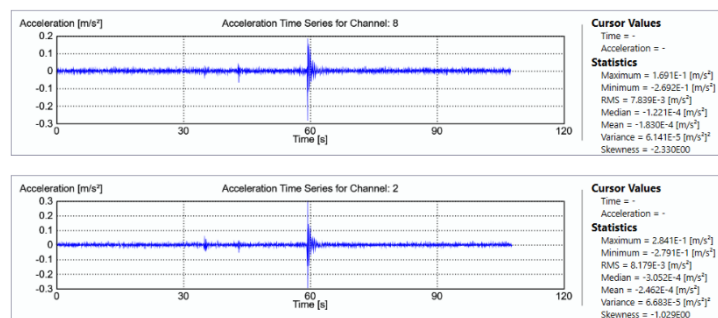
- setup-1: S1, S2 (ref.) dan S3 (**Gambar 10**);
- setup-2: S7, S2 (ref.), dan S9 (**Gambar 11**);
- setup-3: S2 (ref.) dan S8 (**Gambar 12**).



Gambar 10. Rekaman data percepatan uji setup-1, channel-1, 2 (referensi), dan 3

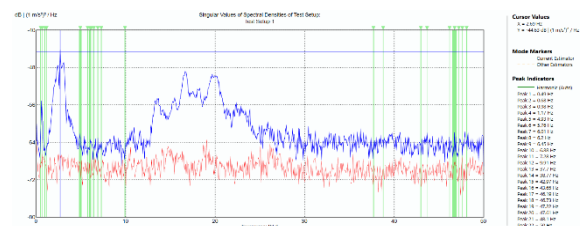


Gambar 11. Rekaman data percepatan uji setup-2, channel-7, 2 (referensi), dan 9

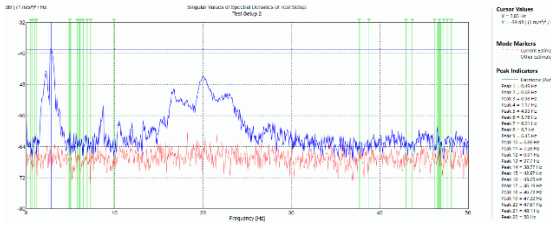


Gambar 12. Rekaman data percepatan uji setup-3, 2 (referensi), dan 8

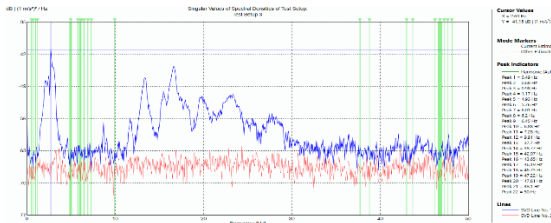
Data percepatan dalam domain waktu selanjutnya ditransformasi ke dalam domain frekuensi menggunakan *FFT* dengan persamaan (5). Hasilnya untuk secara berurutan untuk setup-1, setup-1, setup-1 dan semua channel secara berurutan diberikan pada Gambar 13 sampai dengan Gambar 16.



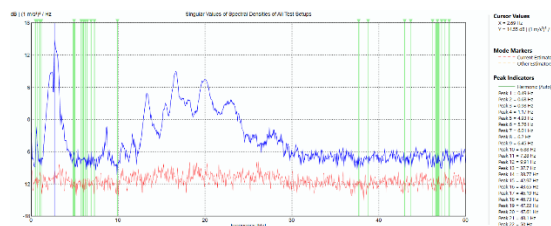
Gambar 13. Singular desnsitas spectral (setup-1)



Gambar 14. Singular desnsitas spectral (setup-2)

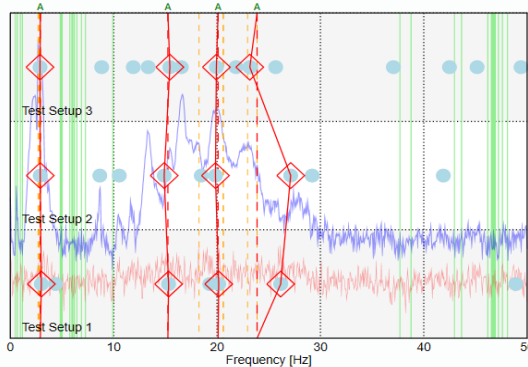


Gambar 15. Singular desnsitas spectral (setup-3)



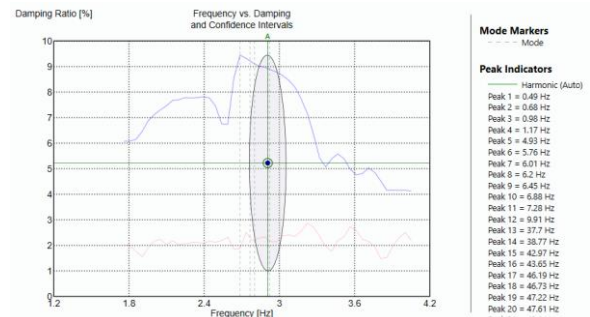
Gambar 16. Nilai singular desnsitas spektral (setup-1, 2 dan 3)

Dengan menggunakan algoritma SSI, parameter dinamik berupa frekuensi alami, rasio redaman dan mode shape dapat diidentifikasi. Teridentifikasi 4 (empat) Frekuensi pertama dari sistem, seperti diberikan pada Gambar 17.



Gambar 17. Frekuensi alami sistem struktur

Frekuensi alami vs rasio redaman sistem mode-1 dan interval konfidensi seperti diberikan pada Gambar 18.



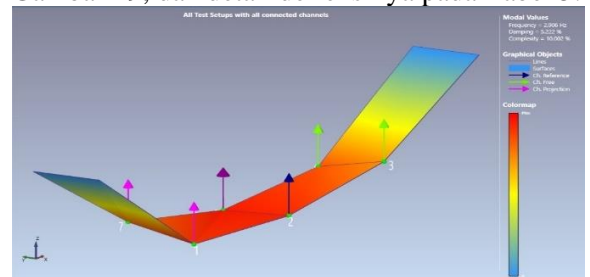
Gambar 18. Frekuensi alami vs rasio redaman sistem mode-1 dan interval konfidensi

Frekuensi alami dan rasio redaman dari mode shape sistem struktur, selanjutnya ditabulasi berikut deviasi standarnya seperti diberikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Paramater dinamik yang teridentifikasi

Frequency [Hz]	Std. Frequency [Hz]	Damping [%]	Std. Damping [%]	Complexity [%]
2.906	0.024	5.222	0.705	10.002
15.251	0.17	3.751	0.742	30.743
20.104	0.035	2.443	0.228	23.601
23.872	0.074	2.355	0.421	37.507

Respon struktur pada saat terkena beban yang akan muncul pertama kali adalah mode shape-1 yang paling dominan. Dimana dengan mode shape-1 ini dapat didekati lendutan statik sistem struktur saat merespon beban statik. Secara umum mode shape yang teridentifikasi menunjukkan sistem struktur jembatan dalam kondisi normal, dimana mode shape yaitu mode vertikal dengan defleksi vertikal terbesar di bagian bentang tengah seperti diberikan pada Gambar 19, dan detail defleksinya pada Tabel 5.



Gambar 19. Mode shape-1

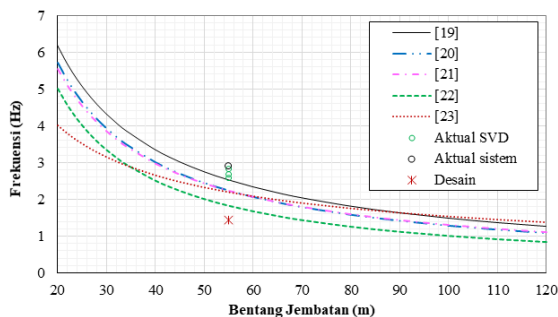
Tabel 5. Shape detail

DOFs	Dir.	Mag.	Phase [Degree]	Real	Imag
1	Z	0.884	-21.562	0.822	-0.325
2	Z	1	0	1	0
3	Z	0.753	-0.16	0.753	-0.002
7	Z	0.897	7.936	0.888	0.124

8	Z	1.001	-4.186	0.998	-0.073
9	Z	0.874	-5.496	0.87	-0.084

Walaupun mendekati respon jembatan pada umumnya, namun jika dari detailnya shapenya, antara as X4 (1, 2, 3) dengan as X1 (7, 8, 9) tidak simetris, begitupun antara *DOF* 1,3 dengan 7,9.

Dari Tabel 4 diperoleh frekuensi alami mode-1 2.906 Hz + 0.024 Hz, nilai ini lebih besar dibandingkan dengan informasi frekuensi teoritik (dari perencanaan) sebesar 1.44 Hz. Jika mengacu kepada nilai frekuensi rencana sebesar 1.44 Hz, artinya kapasitas aktual jembatan jauh di atas kapasitas rencananya. Namun melihat secara empirik hubungan frekuensi alami dan bentang jembatan (Gambar 5), nilai 1.44 Hz di bawah dari frekuensi jembatan pada umumnya. Sehingga untuk penilaian akan digunakan frekuensi alami berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kementerian Pekerjaan Umum (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014). Frekuensi aktual, frekuensi desain jika diplotkan ke dalam Gambar 5, dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Perbandingan frekuensi aktual dibandingkan hasil penelitian sebelumnya

Perbedaan frekuensi aktual terhadap teoritis sebesar 10-20% ekuivalen dengan perbedaan kekakuan lentur 20-40%. Perbedaan kekakuan aktual, EI_{aktual} terhadap teoritis, $EI_{teoritis}$ menunjukkan perbedaan kapasitas strukturnya. Dengan pendekatan tersebut, mengacu pada nilai frekuensi empirik bentang jembatan 55 m (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014) 2.534 Hz, maka:

$$Kap_{aktual} = \left(1 - 2 \times \frac{f_{empirik} - f_{aktual}}{f_{empirik}} \right) \times 100\% = 129.31\%$$

Dengan perkiraan kapasitas jembatan 129.31% dibanding jembatan bentang 55m di Indonesia, maka berdasarkan parameter frekuensi jembatan memenuhi persyaratan. Namun rasio redaman (Tabel 4) menunjukkan nilai rasio

redaman lebih dari 5%, yaitu 5.222%+ 0.705%. Umumnya struktur beton normal secara empirik rasio redaman tidak lebih dari 5% dan pada baja tidak lebih dari 2% (Kudu et al., 2015).

Hasil Uji beban statik

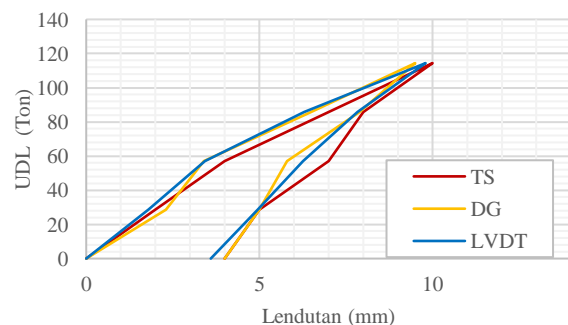
Data hasil pengukuran lendutan seperti pada Tabel 6 dan data regangan pada Tabel 7.

Tabel 6. Hasil pengukuran lendutan

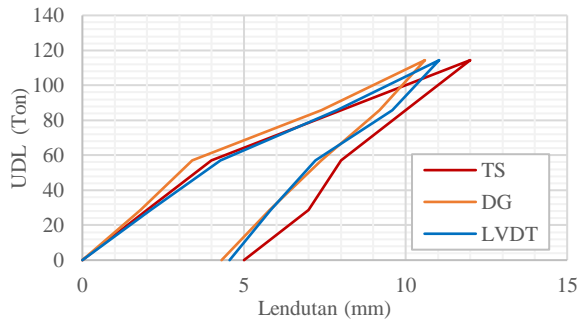
Loading	Lendutan (mm)								
	S4		S5		S6		S7		
Unloading	UDL	TS	DG	LVDT	TS	TS	DG	LVDT	DG
L0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
L13%	2	2.3	1.8	3	2	2	2.11	1.7	
L26%	4	3.4	3.43	5	4	3	4.28	3.1	
L38%	7	6.5	6.29	10	8	7	7.87	6.1	
L52%	10	9.5	9.8	15	12	11	11	8.3	
UL38%	8	7.9	7.84	14	10	9	9.59	7.9	
UL26%	7	5.8	6.26	12	8	7	7.21	5.6	
UL13%	5	5	4.95	9	7	6	5.82	4.4	
UL0%	4	4	3.6	7	5	4	4.55	3.1	

Tabel 7. Pembacaan sensor regangan

Loading	Unloading	UDL	ton	Regangan (μ)		
				S4	S5	S6
L0%		0	0.000	0.000	0.000	
L13%		28.6	11.522	19.203	13.506	
L26%		57.2	21.955	32.005	27.396	
L38%		85.8	40.262	64.010	50.376	
L52%		114.4	62.730	96.015	70.667	
UL38%		85.8	50.184	89.614	61.386	
UL26%		57.2	40.070	76.812	46.151	
UL13%		28.6	31.685	57.609	37.254	
UL0%		0	23.044	44.807	29.125	



Gambar 21. Grafik hubungan lendutan (mm) dan beban UDL (ton) S4



Gambar 22. Grafik hubungan lendutan (mm) dan beban UDL (ton) S6

Dari Tabel 6 pada S4 dan S5 ada 3 sensor pada titik yang sama, dan hasilnya menunjukkan standar deviasi yang kecil yaitu 0.34 mm, artinya salah satu dari ketiga sensor dapat dijadikan acuan. Karena LVDT akurasi tertinggi, maka jika pada suatu titik ada LVDT, yang digunakan adalah LVDT. Selanjutnya, lendutan di S1, S2, S3, S6, S7, S8 didekati dari mode shape yang dihubungkan dengan S7, maka lendutan S1 sampai S9 dapat ditabulasi (Tabel 8).

Tabel 8. Beban %UDL (ton) dan lendutan (mm)

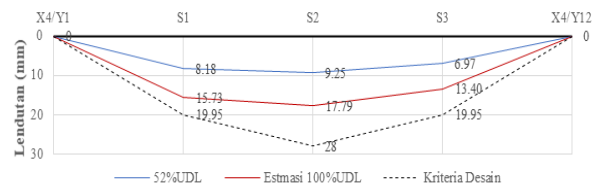
Loading Unloading	Lendutan (mm)									
	UDL	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
L0%	0.00	0	0	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0	0
L13%	1.68	1.9	1.43	1.80	3	2.11	1.70	1.9	1.66	
L26%	3.06	3.46	2.6	3.43	5	4.28	3.10	3.46	3.02	
L38%	6.06	6.86	5.16	6.29	10	7.87	6.15	6.86	5.99	
L52%	8.18	9.25	6.97	9.80	15	11.04	8.30	9.26	8.09	
UL38%	7.79	8.81	6.63	7.84	14	9.59	7.90	8.82	7.7	
UL26%	5.52	6.24	4.7	6.26	12	7.21	5.60	6.25	5.46	
UL13%	4.34	4.91	3.69	4.95	9	5.82	4.40	4.91	4.29	
UL0%	3.03	3.42	2.58	3.60	7	4.55	3.07	3.43	2.99	

Lendutan ijin pada jembatan dengan pedestrian (Bridge Design Manual, Vol-1, 1992), (BSN, 2016) adalah $L/1000 = 55$ mm, namun karena perencana menetapkan batas lendutan lebih kecil maka digunakan acuan dari perencana, seperti diberikan pada Tabel 9.

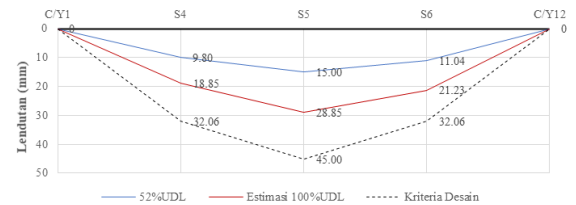
Tabel 9. Kriteria lendutan

Struktur	Beban	Lendutan (mm)
Balok tengah	100%UDL	45
	Pejalan kaki	8.1
	Total	53.1
Balok tepi (rangka)	100% UDL	28
	Pejalan kaki	7.5
	Total	35.5

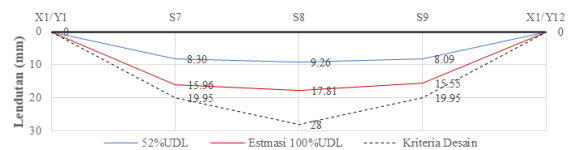
Dengan asumsi jembatan masih linear elastis maka kondisi aktual dan batas ijin seperti pada Gambar 23, Gambar 24, dan Gambar 25.



Gambar 23. Lendutan 52%UDL, estimasi 100%UDL dan kriteria desain balok tepi as X4



Gambar 24. Lendutan 52%UDL, estimasi 100%UDL dan kriteria desain balok tengah



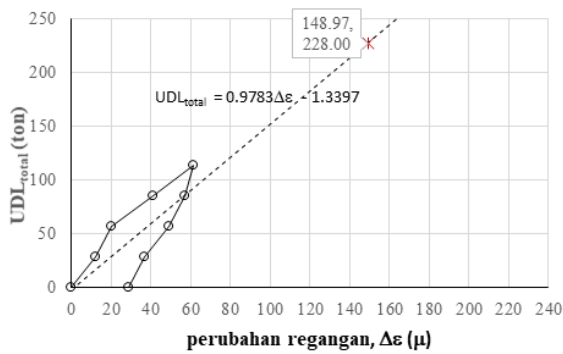
Gambar 25. Lendutan 52%UDL, estimasi 100%UDL dan kriteria desain balok tepi as X4

Tabel 10. Pengecekan persyaratan lendutan sisa

Lokasi Sensor	Δ_{max} (mm)	Δp (mm)	$\frac{\Delta p}{\Delta_{max}}$	Status
S1	8.18	3.03	0.3704	>0.2 (Tidak memenuhi kriteria)
S2	9.25	3.42	0.3697	
S3	6.97	2.58	0.3702	
S4	9.80	3.60	0.3673	
S5	15.00	7.00	0.4667	
S6	11.04	4.55	0.4121	
S7	8.30	3.07	0.3699	
S8	9.26	3.43	0.3704	
S9	8.09	2.99	0.3696	

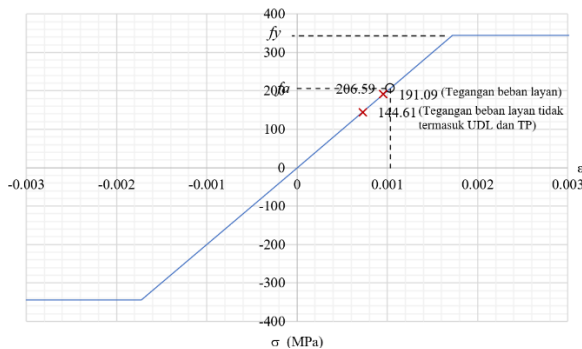
Lendutan sisa aktual semuanya melewati batas pers. (15) yaitu 0.2, sementara yang terjadi rata-ratanya 0.385 ± 0.034 . Salah satu ukuran pokok kualitas struktur adalah perilaku elastis di bawah siklus pembebanan dan penghilangan beban. Lendutan permanen ijin setelah penghilangan beban umumnya diberikan dalam regulasi atau standar relevan sebagai fraksi dari lendutan maksimum (Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan, 2012). Dalam code yang lain menetapkan $0.25\Delta_{max}$, namun dengan batasan ini pun masih tidak terpenuhi.

Dari Tabel 7 terlihat bahwa regangan terbesar adalah S5 yang berada di tengah bentang. Hubungan beban (UDL) dan regangan pada S5 seperti diberikan pada Gambar 26.



Gambar 26. Grafik hubungan perubahan regangan, $\Delta\varepsilon$ (μ) dan beban, UDL_{total} (ton) S5

Dari Gambar 26 terlihat ada perubahan kekakuan pada beban 26%UDL, maka untuk memproyeksikan $\Delta\varepsilon$ ke 100%UDL dibuat trendline $\Delta\varepsilon$ (μ) dan beban, UDL_{total} (ton), diperoleh proyeksi pada 100%UDL, $\Delta\varepsilon=148.97\mu$. Berdasarkan persamaan (16), diperoleh $\Delta\sigma = \Delta\varepsilon E = 29.79$ MPa, sementara kriteria ijin, $\Delta\sigma_{ijin} = 45.29$ MPa seperti pers. (19). Artinya saat pembebanan maksimum tegangan tidak melebihi batas ijin (Gambar 27).



Gambar 27. Tegangan-regangan baja A992 dan tegangan-regangan akibat beban layan

Sehingga Kapasitas relatif aktual jembatan terhadap desainnya dapat dinyatakan:

$$1 + \left(\frac{fa - 191.09}{fa - 144.61} \right) \times 100\% = 125\%$$

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari interpretasi parameter hasil uji beban dinamik diperoleh estimasi kapasitas aktual jembatan adalah 129.31% dari kapasitas rencananya, sementara dari interpretasi parameter hasil uji beban statik 125%, atau dapat dinyatakan estimasi kapasitas dari interpretasi parameter hasil uji beban dimamik 1.03 kali lebih besar dari uji beban statik. Sementara baik dari uji beban dinamik dan statik menunjukkan adanya

indikasi defect pada struktur. Dimana pada uji beban dinamik ditandai dengan rasio redaman 5.222%+ 0.705% melebihi kriteria antara 2%-5%, dan pada uji beban statik ditandai dengan rasio lendutan sisa disbanding lendutan maksimum saat uji 0.385 ± 0.034 , yang melebihi kriteria maksimum 0.2. Uji beban dinamik dan staik menunjukkan kesesuaian hasil pada perkiraan kapasitas dan adanya indikasi kerusakan.

Dengan hasil ini merekomendasikan untuk melakukan pengecekan ulang struktur terhadap kemungkinan adanya defect yang belum teridentifikasi, memeriksa seluruh koneksi, sekaligus melakukan perbaikan sesuai dengan kerusakan yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, A., Sandhu, T., & Usman, M. (2019). Ambient Vibration Testing of a Pedestrian Bridge Using Low-Cost Accelerometers for SHM Applications. *Smart Cities*, 2(1), 20–30.
<https://doi.org/10.3390/smartcities2010002>

Bridge Design Manual, Vol-1 (1992).

British Standards Institution. (2003). *BS EN 1991-2:2003; Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*. BSI.

BSN. (2016). *SNI 1725: 2016, Pembebanan untuk Jembatan* (SNI 1725:2016).

BSN. (2020). *SNI 1729: 2020; Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*.

Cantieni, R. (1983). *Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland*.

Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall.

Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia. (2002). *Penilaian Kondisi Jembatan untuk Bangunan atas dengan Cara Uji Getar. Pt T-05-2002-B. Pedoman Konstruksi dan Bangunan*.

Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. (2014). *Laporan Uji Dinamik Jembatan*.

Ercan, E. (2018). Assessing the impact of retrofitting on structural safety in historical buildings via ambient vibration tests. *Construction and Building Materials*, 164, 337–349.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.154>
- Gres, S., Andersen, P., Hoen, C., & Damkilde, L. (2019). *Orthogonal Projection-Based Harmonic Signal Removal for Operational Modal Analysis* (pp. 9–21). https://doi.org/10.1007/978-3-319-74476-6_2
- Hassan, M., Burdet, O., & Favre, R. (1995). Analysis and Evaluation of Bridge Behavior Under Static Load Testing Leading to Better Design and Judgment Criteria. *Fourth International Bridge Engineering Conference*, 296–303.
- Heywood, R., Roberts, W., & Bouilly, G. (2001). Dynamic loading of bridges. *Transportation Research Record*, 1770, 58–66. <https://doi.org/10.3141/1770-09>
- Kang, J., Liu, L., Zhou, S.-D., & Shao, Y.-P. (2019). A novel time-domain representation of transmissibility and its applications on operational modal analysis in the presence of non-white stochastic excitations. *Journal of Sound and Vibration*, 457, 157–180. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.05.047>
- Karuppasamy, K. S. K., P. S., B., & Sahoo, N. (2020). *Introduction to Stress-Strain Relationship and Its Measurement Techniques* (pp. 22–38). <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1690-4.ch002>
- Khoeri, H., Alisjahbana, S. W., & Nugroho, P. (2024). Uji Beban Dinamik dan Analisis Modal Operasional Jembatan Baja Komposit Underpass Bekambit. *Dinamika Rekayasa*, 20(1), 65–75. <https://doi.org/10.20884/1.dinarek.2024.20.1.20>
- Khoeri, H., Isvara, W., Sofiana, D., & Natasa, F. (2024). Penilaian Kelaikan Jembatan Berdasarkan Parameter Dinamis Experimental pada Jembatan PC-I Girder 40 m. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*.
- Khoeri, H., Nugroho, P., & Isvara, W. (2024). Pemeriksaan Kelaikan Fungsi Dengan Uji Beban Statik Pada Jembatan Gelagar Komposit. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 8(1), 26–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.35334/be.v8i1>
- Kudu, F. N., Uçak, Ş., Osmancikli, G., Türker, T., & Bayraktar, A. (2015). Estimation of damping ratios of steel structures by Operational Modal Analysis method. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.04.019>
- Lantsoght, E. O. L. (2023). Assessment of existing concrete bridges by load testing: barriers to code implementation and proposed solutions. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2264825>
- Li, B., Liu, H., Jian, J., & Gao, H. (2023). Static Load Test Analysis of T-Beam Bridge Shear Strengthening by Prestressed Steel Wire Rope Embedded in Polyurethane Cement (PSWR-PUC). *Sustainability*, 15(13), 10514. <https://doi.org/10.3390/su151310514>
- Liu, F., Wang, J., Li, M., Gu, F., & Ball, A. D. (2020). Operational Modal Analysis of Y25 Bogie via Stochastic Subspace Identification for the Condition Monitoring of Primary Suspension Systems. In M. Abdel Wahab (Ed.), *ICDAS: International Conference on Damage Assessment of Structures* (pp. 166–181). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8331-1_12
- Maddipour Farrokhifard, M., Hatami, M., & Venkatasubramanian, V. M. (2019). Performance of Stochastic Subspace Identification Methods in Presence of Forced Oscillations. *2019 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/SGSMA.2019.8784613>
- Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan, Pub. L. No. 004/BM/2012 (2012).
- Pamungkas, D., Kurniawan, S. R., & Simamora, B. F. (2021). Perbandingan Antara Domain Waktu dan Frekuensi untuk Pengenalan Sinyal EMG. *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, 17(1), 36–41. <https://doi.org/10.17529/jre.v17i1.16844>
- Paultre, P., Chaallal, O., & Proulx, J. (1992). Bridge dynamics and dynamic amplification factors — a review of analytical and experimental findings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(2), 260–278. <https://doi.org/10.1139/192-032>
- PT. Adik Abang Qanita Pratama. (2023). *As Built Drawing Pembangunan Jembatan*

*Kendaraan dan Pedestrian Penghubung
RSCM Kencana - RSCM Kirana.*

- Salehi, M., Esfarjani, S. M., & Ghorbani, M. (2018). Modal Parameter Extraction of a Huge Four Stage Centrifugal Compressor Using Operational Modal Analysis Method. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(3), 1–11. <https://doi.org/10.1590/1679-78254117>
- Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan (Revisi 2), Pub. L. No. Surat Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 16.1/SE/Db/2020 (2018).
- Tu, K., Ye, Y., Wu, D., Zhou, Y., & Deng, W. (2023). Technical Analysis of Highway Bridge Static Load Test. *Journal of Architectural Research and Development*, 7(3), 58–63. <https://doi.org/10.26689/jard.v7i3.4829>
- Van Overschee, P., & De Moor, B. (1996). *Subspace Identification for Linear Systems*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0465-4>
- Xu, Y., Brownjohn, J. M. W., & Hester, D. (2019). Enhanced sparse component analysis for operational modal identification of real-life bridge structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 585–605. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.07.026>
- Zahid, F. Bin, Ong, Z. C., & Khoo, S. Y. (2020). A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification. In *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (Vol. 42, Issue 8). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02470-8>