

Uji Beban Statik dan Dinamik untuk Asesmen Reliabilitas Jembatan Baja Komposit Bentang 20m, 25m dan 30m

Heri Khoeri^{1,2*}, Roberto Pradana² dan Muhammad Tasrim²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Indonesia

²PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>

^{1,*}heri.khoeri@umj.ac.id, ²kontak@hesa.co.id

Artikel dimasukkan: 3-3-2024, Artikel direvisi: 7-3-2024, Artikel diterbitkan: 31-3-2024

Abstrak

Jembatan adalah salah satu prasarana transportasi vital yang berdampak pada bidang sosial, ekonomi, pertahanan dan keamanan, sehingga aspek keselamatan dan kenyamanan penggunaannya harus benar-benar terpenuhi sebagaimana dinyatakan dalam Permen PUPR 10 tahun 2022 tentang Keamanan Jembatan dan Terowongan. Penilaian reliabilitas jembatan dapat diperoleh dari parameter statik pada kondisi layannya dengan tidak terlampauinya batas lendutan dan batas tegangan saat operasional termasuk saat pembebanan maksimum terjadi, juga terpenuhinya kriteria penilaian parameter dinamik yang salah satunya dari frekuensi alami. Untuk mengetahui reliabilitas 3 (tiga) buah jembatan baja komposit pada akses jalan Mukut, Sumatera Selatan, maka dilakukanlah uji beban statik dan dinamik. Dari uji beban dinamik diketahui tingkat kerusakan jembatan 2, 3, dan 4 secara berurutan sebesar 2.1%, 22.4% dan 25%. Dari hasil uji beban baik statik maupun dinamik teridentifikasi kapasitas jembatan 2, 3 dan 5 secara berurutan 95% (61 ton), 54% (43 ton), dan 49% (46 ton) dari rencananya. Karena ketiga jembatan tersebut dalam satu akses jalan, maka total beban yang diijinkan berada diatas jembatan adalah 43 ton. Diperoleh nilai akurasi yang cukup tinggi dari uji beban dinamik untuk penilaian reliabilitas bangunan atas jembatan dimana perbedaannya dengan uji beban statik hanya 0.04% ± 0.8%. Dengan perbedaan yang sangat kecil mengingat uji beban dinamik memerlukan waktu yang relatif lebih singkat, maka dapat dinyatakan bahwa uji beban dinamik cukup efektif dan efisien untuk menilai reliabilitas struktur bangunan atas jembatan, selama jembatan masih berperilaku linear elastis.

Kata kunci: dinamik, jembatan, lendutan, regangan, statik, uji beban

Pendahuluan

Jembatan sebagai salah satu prasarana perhubungan merupakan unsur penting dalam usaha pengembangan kehidupan bangsa. Keberadaan jembatan akan memberikan dampak pada bidang sosial, ekonomi, pertahanan dan keamanan. Jembatan sebagai salah satu prasarana publik mampu menghubungkan daerah-daerah yang terisolir dan membuka akses transportasi pada daerah tersebut.

Seperti halnya pada fasilitas infrastruktur 5 jembatan di Desa Mukut, Kota Palembang, Sumatera Selatan. Jembatan ini dibangun oleh sebuah perusahaan swasta untuk keperluan

logistik bisnis yang berada pada *access road* Mukut. Kelima jembatan ini mulai dibangun pada tahun 2014 dengan 2 tipe sistem bangunan atas. yaitu 4 jembatan (Jembatan-2, Jembatan-3, Jembatan-4 dan Jembatan-5) bertipe *composite bridge* (gelagar baja + pelat lantai beton) dan 1 jembatan (Jembatan-1) dengan bentang terpanjang bertipe *steel truss bridge* (Gb 1).

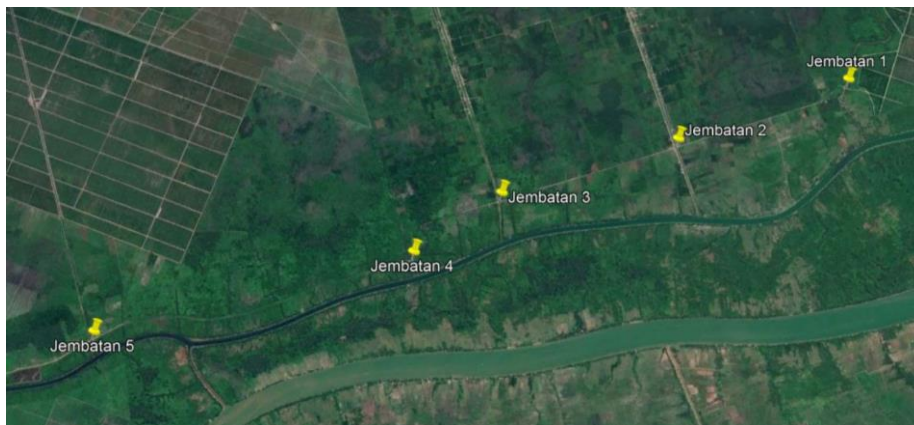
Saat ini, salah satu jembatan tersebut yaitu jembatan-4 sudah tidak bisa dilewati karena kegagalan pada bangunan bawah sehingga *access road* Mukut tidak dapat dilalui. Jembatan-4 sudah tidak dapat diperbaiki ataupun diperkuat, sehingga akan *demolish* dan dibangun ulang.

Untuk menghindari kejadian serupa, diperlukan pemeriksaan khusus pada jembatan lainnya.

Uji beban adalah salah satu metode penilaian untuk jembatan eksisting (Lantsoght, 2023). Uji beban statis adalah metode deteksi yang efektif untuk menilai kinerja jembatan, mengetahui keadaan operasional, dan mengidentifikasi masalah dalam upaya meningkatkan dan mengoptimalkan kualitas jembatan (Tu, Ye, Wu, Zhou, & Deng, 2023), (Li, Liu, Jian, & Gao, 2023). Terdapat korelasi kuat antara perilaku jembatan saat uji beban dan perilaku jangka panjangnya (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012). Sementara uji beban dinamik dengan cara uji getar adalah cara untuk mengidentifikasi kapasitas aktual suatu jembatan lama atau baru, memprediksi tingkat keutuhan dan tingkat kerusakan jembatan. Pengujian getaran dilakukan untuk mengidentifikasi parameter dinamis berupa frekuensi getar. Frekuensi adalah ukuran untuk kekakuan dan keutuhan struktur. Setiap perubahan periodik parameter dinamis berkorelasi dengan kondisi struktural (tingkat kerusakan). Kriteria penilaian kondisi dengan cara uji getar diterapkan untuk berbagai tipe jembatan beton bertulang, beton

prategang, rangka baja dan gelagar baja komposit [(Khoeri, Alisjahbana, & Nugroho, 2024), (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2002)]. Perkiraan kapasitas jembatan dengan parameter uji beban statik 6%-10% lebih besar dibanding menggunakan parameter hasil uji beban dinamik (Khoeri, Isvara, Widjajakusuma, Natasa, & Sofiana, 2024). Pengukuran respon struktur terhadap beban menggunakan uji dinamik juga memiliki akurasi yang cukup tinggi terhadap uji beban statik (Khoeri, Alisjahbana, Widjajakusuma, & Najid, 2023).

Pada penelitian ini akan diuji baik dengan uji beban statik maupun uji beban dinamik untuk mengidentifikasi kapasitas aktual jembatan, menilai tingkat kerusakan jembatan dari dua metode pengujian tersebut. Dengan penelitian ini diharapkan selain untuk dapat memberikan rekomendasi berapa batasan beban yang dapat melalui ketiga jembatan yang diuji tersebut, juga mendapatkan hubungan antara nilai kapasitas yang diperoleh pada uji statik dan uji dinamik untuk 3 buah jembatan baja komposit bentang 20 m, 25 m dan 30 m, yang dalam hal ini disebut berturut-turut sebagai jembatan-2, jembatan-3 dan jembatan-5.



Gb 1. Lokasi jembatan-2, jembatan-3 dan jembatan-5 yang diuji (jembatan baja komposit)

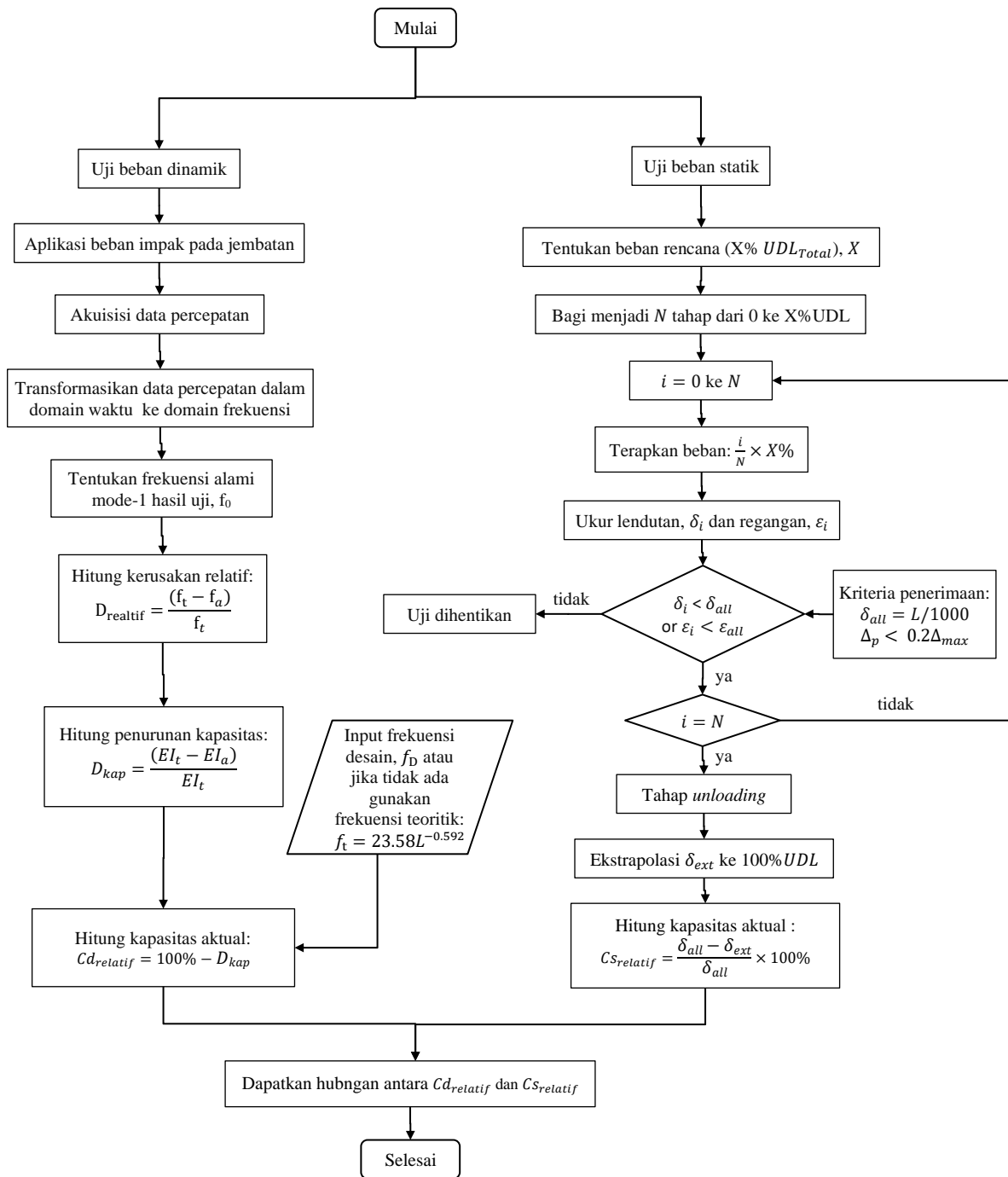
Tabel 1. Data teknis jembatan yang diuji

Jembatan	bentang	Lebar	Gelagar Utama	Diafragma	
				Atas	Bawah
2	20	0.65 m + 4.5 m + 0.65 m	WB.850.250.10.14.17	V brace 1/2 WF.250.125.6.9	diagonal bracing L.75.75.6
3	25	0.65 m + 4.5 m + 0.65 m	WB.950.300.10.14.19		
5	30	0.65 m + 4.5 m + 0.65 m	WB.1100.350.10.14.20		

Metode

Data teknis ketiga jembatan yang akan diuji seperti diberikan pada Tabel 1. Selanjutnya alur penelitian seperti diberikan pada Gb 2 dan secara lebih detail selanjutnya akan dipaparkan masing-

masing tahapan, proses akuisisi data, alat yang digunakan dan instrumentasi pemasangan alat ukur/ sensor.

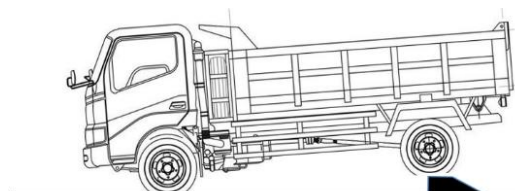


Gb 2. Alur penelitian Uji Beban Statik dan Dinamik untuk Asesmen Reliabilitas Jembatan Baja Komposit Bentang 20m, 25m dan 30m

Selanjutnya untuk uji beban dinamik dan analisisnya secara umum tahapannya adalah (1) akuisisi data getaran pada jembatan; (2) Transformasi data percepatan dalam domain waktu ke domain frekuensi; (3) Penilaian parameter dinamik.

Pengukuran getaran pada Jembatan. Pengukuran dilakukan dengan 3D-accelerometer pada 1/2 bentang jembatan yang dilakukan dalam waktu 60 detik. Trigger getaran menggunakan

beban imppak dengan menjatuhkan roda truk 10 ton dari ketinggian 20 cm (Gb 3).



Gb 3. 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 persamaan (1) berikut (Pamungkas, Kurniawan, & Simamora, 2021):

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

Dengan $S(f) = \text{spectral density}$ (sinyal percepatan dalam domain frekuensi) dengan satuan $m^2 \cdot \text{det}^{-4} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $a(t) =$ sinyal percepatan dalam domain waktu (m/det^2), $e^{-j2\pi ft} =$ fungsi kernel, $f =$ frekuensi (Hz) dan t adalah waktu (detik).

Selain menggunakan persamaan (1) 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 SIGVIEW*.

Penilaian kondisi bangunan atas jembatan menggunakan parameter dinamik dari hasil uji beban dinamik dilakukan untuk memperkirakan keutuhan dan kapasitas jembatan, Parameter dinamik yang dianalisis untuk pemilaian performa aktual (hasil uji) adalah frekuensi alami pertama, f_a dari getaran bebas, kekakuan lentur, EI_a dan redaman kritis, ζ_a .

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

$$D_{realtif} = \frac{(f_t - f_a)}{f_t} \times 100\% \quad (2)$$

dengan $D_{realtif}$ adalah nilai kerusakan struktur relative, f_a adalah frekuensi alami aktual (Hz), dan f_t adalah frekuensi alami teoritis (Hz).

Karena data frekuensi rencana tidak tersedia, maka sebagai ukuran adalah menggunakan batasan frekuensi alami berdasarkan hubungannya dengan bentang jembatan (untuk

bentang, $20 < L < 100m$) seperti persamaan (3) berikut (British Standards Institution, 2003):

$$f_t = 23.58L^{-0.592} \quad (3)$$

dengan f_t adalah frekuensi alami teoritik (Hz), dan L adalah bentang jembatan (m).

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 Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2002):

$$D_{kap} = \frac{(EI_t - EI_a)}{EI_t} \times 100\% \quad (4)$$

dengan D_{kap} adalah nilai penurunan kapasitas, EI_t adalah kekakuan lentur teoritis ($kN \cdot m^2$), dan EI_a adalah kekakuan lentur aktual ($kN \cdot m^2$). Pada pengujian statik beban uji yang digunakan adalah truk, adapun perhitungan konfigurasi truk uji adalah sebagai berikut (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012):

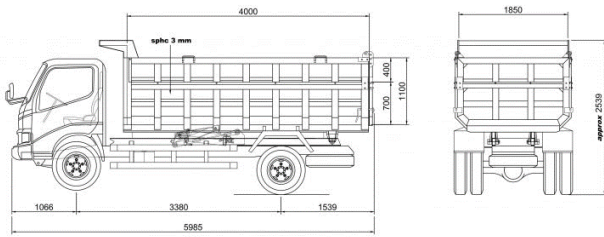
- Bentang utama, L (meter)
- Lebar lalu lintas, b (meter)
- $L < 30$ m, BM70, $UDL = 0,9 \times 70\%$ ton/ m^2
- $UDL/m' = 5,5UDL + 50\%UDL(b - 5,5)$
Keterangan: lebar lalu lintas, $b < 5,5m$ maka UDL dikalikan 5,5, jika melebihi, maka sisa lebar lalu lintas dikali 50% UDL .
- $UDL_{Total} = UDL/m' \times L$
- Beban UDL_{Total} dibagi dengan berat satuan truk uji sehingga dihasilkan jumlah truk yang dibutuhkan untuk maksimum beban uji.

Mengikuti ketentuan di atas, beban minimal yang diaplikasikan saat uji beban statik untuk masing-masing jembatan seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan UDL tiap jembatan

Jembatan	2	3	5
L (m)	20.00	25.00	30.00
b (m)	4.50	4.50	4.50
UDL/m^2 (ton/ m^2)	0.63	0.63	0.63
UDL/m' (ton/ m')	3.15	3.15	3.15
UDL total (ton)	63.00	78.75	94.50

Spesifikasi truk yang digunakan seperti Gb 4.



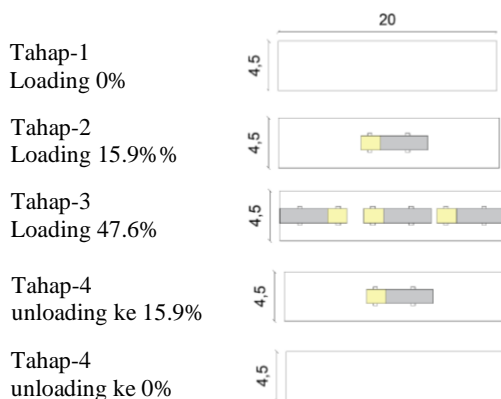
Gb 4. Rencana truk yang digunakan sebagai beban (berat total 10 ton termasuk muatan)

Dengan pertimbangan kondisi, panjang dan asumsi linearitas jembatan, maka tahapan pembebanan yang digunakan saat pengujian disusun seperti pada Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3. Tahapan Pembebanan

Tahapan Pengujian	Jumlah Truk	Beban (Ton)	% UDL
Jembatan-2			
Tahap-1	0	0	0.0%
Tahap-2 (Loading)	1	10	15.9%
Tahap-3 (loading)	3	30	47.6%
Tahap-4 (unloading)	1	10	15.9%
Tahap-5 (unloading)	0	0	0.0%
Jembatan-3			
Tahap-1	0	0	0.0%
Tahap-2 (Loading)	1	10	12.7%
Tahap-3 (loading)	3	30	38.1%
Tahap-4 (unloading)	1	10	12.7%
Tahap-5 (unloading)	0	0	0.0%
Jembatan-5			
Tahap-1	0	0	0.0%
Tahap-2 (Loading)	1	40	21.2%
Tahap-3 (loading)	3	40	42.3%
Tahap-4 (unloading)	1	40	21.2%
Tahap-5 (unloading)	0	0	0.0%

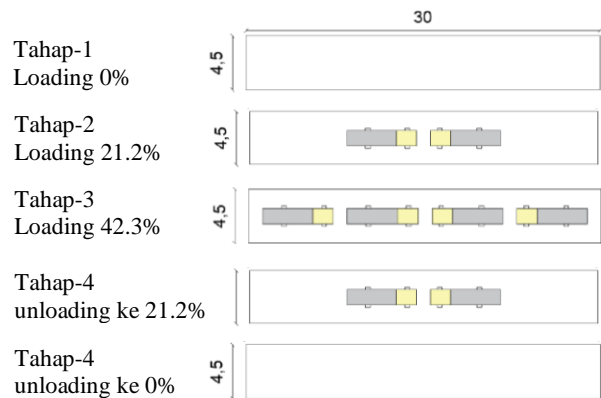
Tahapan dan konfigurasi pembebanan truk untuk jembatan-2, jembatan-3 dan jembatan-5 seperti pada Gb 7 berikut:



Gb 5. Tahapan dan konfigurasi pembebanan jembatan-2 (bentang 20 m)



Gb 6. Tahapan dan konfigurasi pembebanan jembatan-3 (bentang 25 m)



Gb 7. Tahapan dan konfigurasi pembebanan jembatan-4 (bentang 30 m)

Perpindahan struktur akibat pembebanan statis dapat diukur dalam arah horisontal dan arah vertikal tetapi perpindahan vertikal, dinyatakan pada umumnya sebagai lendutan elemen struktural, diukur dalam setiap kasus, menggunakan dial gauge (*strain gauge*), LVDT yang difabrikasi, pengukuran kerataan atau teknik pengukuran lain (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012).

Nilai-nilai perpindahan yang diukur adalah lendutan yang akan *dicrosscheck* dengan regangan. Idealnya nilai yang terukur lebih kecil dibanding teoritisnya, sebab model perhitungan (bahkan yang sangat kompleks pun) selalu lebih sederhana dibanding aktualnya. Ketika situasi yang berlawanan terjadi, berarti proses kerusakan struktur telah mencapai tahap yang sangat lanjut. Bagaimanapun, ketika interaksi transversal elemen struktural diuji di bawah pembebanan tidak seragam, nilai-nilai yang dihitung dapat kurang dari yang terukur dalam beberapa bagian struktur. Kemudian hal tersebut menunjukkan bahwa interaksi transversal yang

nyata menjadi lebih baik dibanding yang dihasilkan dalam model [(Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012), (PT. Hesa Laras Cemerlang, 2019b, 2019a, 2021) dan lainnya].

Lendutan maksimum ijin jembatan tanpa pedestrian seperti pada persamaan (5) [(BSN, 2016; Directorate General of Highways Ministry of Public Works Republic of Indonesia, 1992)]:

$$\delta_{max} = L/800 \quad (5)$$

Salah satu ukuran kualitas struktur adalah perilaku elastisnya di bawah siklus *loading* dan *unloading*. Lendutan permanen izin maksimum (Δ_p) setelah *unloading* umumnya diberikan dalam regulasi atau standar relevan sebagai fraksi dari lendutan maksimum (Δ_{max}) di bawah pembebanan (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012). Dalam pengujian ini diambil batasan lendutan permanen (BSN, 2019):

$$\Delta_p < 0.2\Delta_{max}$$

Tegangan umumnya diukur dengan menggunakan dengan teknik elektrik menggunakan strain gauge yang menggunakan batasan ketahanan atau kapasitas listrik, dari. Dengan hubungan antara tegangan, σ , modulus elastisitas, E dan regangan, ϵ , maka tegangan dapat dinyatakan sebagai (Karupphasamy, P. S., & Sahoo, 2020):

$$\Delta\sigma = \Delta\epsilon E \quad (7)$$


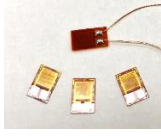





dengan $\Delta\sigma$ adalah perubahan tegangan, $\Delta\epsilon$ perubahan regangan dan E modulus elastisitas material. Dengan pers. (7) maka $\Delta\sigma$ dapat dikalkulasi dari $\Delta\epsilon$. Untuk $\Delta\sigma$ pada 100% *UDL* (UDL_{total}), jika saat pengujian struktur dinilai masih berperilaku elastis, maka dapat diextrapolasi dari *trendline* perubahan tegangan. Jika lendutan dan perubahan regangan (tegangan) memiliki hubungan linear, maka kapasitas jembatan dapat diestimasi baik dari lendutan maupun regangan dibandingkan dengan bilai teoritik atau rencananya. Estimasi kapasitas jembatan relatif terhadap kapasitas teoritisnya, $C_{srelatif}$ dilakukan dengan persamaan (8):

$$C_{srelatif} = \frac{\delta_{all} - \delta_{ext}}{\delta_{all}} \times 100\% \quad (8)$$

Dengan δ_{all} adalah lendutan ijin dan δ_{ext} lendutan estimasi pada UDL_{total} .

Sensor dan alat ukur yang digunakan untuk uji beban statik seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Sensor dan alat ukur yang digunakan untuk uji beban statik

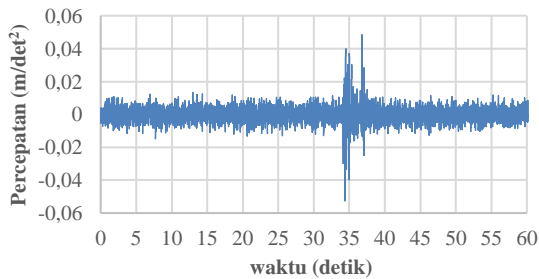
No	Deskripsi	Data Teknis
1	LVDT (Linear Variable Differential Transformer) Hesa GT2 - H50 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detection System = Scale Shot System, Absolute (No Tracking Errors) Type ▪ Measuring Range = 50 mm ▪ Resolution (20°C) = 0.5 μm ▪ Indicate Accuracy = 3.5 μm (P-P) ▪ Measuring Force <ul style="list-style-type: none"> ✓ Downward Mounting = 3.2 N ✓ Side Mounting = 2.8 N ✓ Upward Mounting = 2.4 N ▪ Sampling Cycle = 1 ms ▪ Mechanical Response = 7 Hz ▪ Vibration = 10 to 55 Hz Double Amplitude 1.5 mm in The X, Y, Z Axis Directions Respectively, 2 Hours
2	Rosette Strain Gauge 3 Axis Hesa GT2 - H50 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gage Factor 120 (23oC, 50%) = 2.04 1.0% ▪ Gage Length = 1 mm ▪ Gage Resistance (23oC, 50%) = 120.4 Ohm 0.4% ▪ Adoptable Thermal Expansion = 11.7 x 10-6 / oC ▪ Aplicable Adhesive = CC-33A, EP-340
(6) 3	3-Axis Accelerometer Hesa MPU9250 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensor = MPU 9250 Gyro + Accelerometer ▪ MEMS 3-axis accelerometer and 3-axis gyroscope values combined ▪ In-built Temperature sensor ▪ Komunikasi data = NRF2410 N (2, 4 ghz), Rs485 ▪ Data Sampel Interval = 0.005 s / 200 Hz
4	Data Logger & Acquisition Hesa RS485 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clock speed = 16 MHz ▪ Memory = up to 64 gb ▪ Komunikasi data = NRF2410 N 2,4 Ghz, Rs485, USB 3.0 ▪ UP to 12 Channel
5	Dial Gauge 3052S-19 MITUTOYO 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Measuring force: 2.5 N or less ▪ Maximum Measurement : 0-30 mm ▪ Additional Features : Shockproof, Jeweled Bearing, Revolution Counter ▪ Displa y : 0-100 ▪ Item Weight : 0.62 pounds ▪ Measurement Accuracy : +/-0.025 mm ▪ Range : 0-30 mm ▪ Resolution : 0.01 mm
6	Total Station Nikon Nivo 5C 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Akurasi Sudut : 5" ▪ Tampilan : ▪ F1 – QVGA, 16Bit Colour, TFT LCD, Backlit (320x240 pixel) with QWERTY touch-screen alpha-numeric and transcriber keypad ▪ Kompensator : Dual Axis <ul style="list-style-type: none"> ✓ EDM Type : Reflecterless ✓ Akurasi Jarak : 3 mm + 2 ppm ✓ Jangkauan Jarak : 5,000 m Single Prism / 300 m Prismless
7	Reflector Sheet 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ukuran = 5 cm x 5 cm ▪ Bahan = Serat Kaca

LVDT, Dial Gauge, Strain Gauge dan reflector sheet ditempatkan pada 1/2 bentang dan diletakkan pada bagian bawah jembatan.

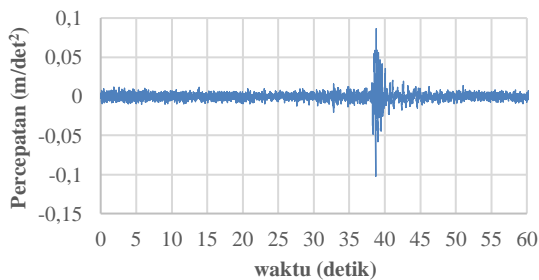
Data LVDT, data dial gauge dan data TS semuanya untuk mengukur lendutan, dan sifatnya saling mengcrosscheck, dimana LVDT dengan ketelitian sampai dengan 10^{-6} m, Dial gauge 10^{-5} m dan TS 10^{-3} m. Karena tahapan pembebanan bersifat linear, dan titik ukur ditempatkan pada posisi yang dapat dihitung secara teoritik, maka jika ada anomali data akan didekati dengan nilai alat ukur yang mendekati nilai teoritis. Namun jika Data LVDT, data dial gauge dan data TS, nilainya mendekati, maka akan digunakan data dari LVDT mengingat ketelitiannya sampai dengan μm .

Hasil dan Pembahasan

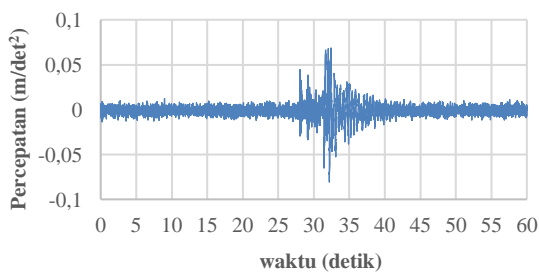
Pembahasan akan dimulai dari uji dinamik. Hasil akuisisi data percepatan untuk jembatan 2, 3 dan 5 secara berurutan seperti pada Gb 8, Gb 9, dan Gb 10.



Gb 8. Data percepatan jembatan-2

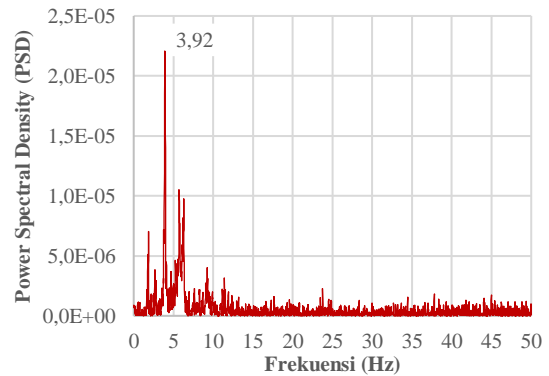


Gb 9. Data percepatan jembatan-3

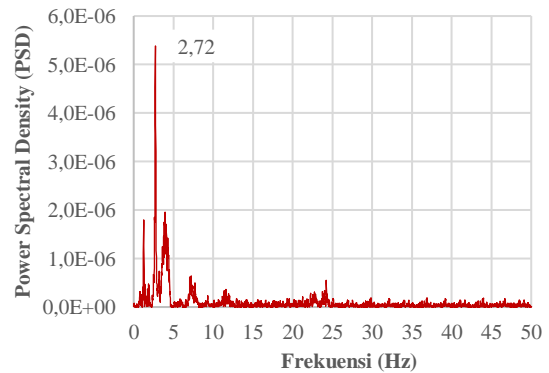


Gb 10. Data percepatan jembatan-5

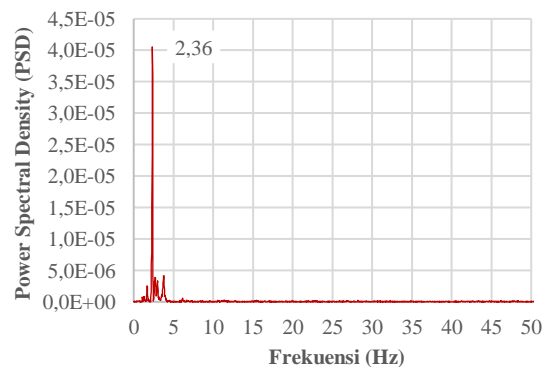
Data percepatan pada Gb 8, Gb 9, dan Gb 10 yang berada pada domain waktu selanjutnya ditransformasi ke dalam domain frekuensi dengan FFT, hasilnya untuk jembatan 2, 3 dan 5 secara berurutan seperti pada Gb 11, Gb 12, dan Gb 13 berikut:



Gb 11. Power spectral density jembatan-2



Gb 12. Power spectral density jembatan-3



Gb 13. Power spectral density jembatan-5

Berdasarkan Gb 11, Gb 12, dan Gb 13 frekuensi alami aktual (hasil uji) mode-1 (vertikal) untuk jembatan 2, 3, dan 5, secara berurutan adalah 3.92 Hz, 2.72 Hz dan 2.36 Hz. Sementara frekuensi teoritik yang digunakan mengacu pada persamaan (3). Selanjutnya dihitung tingkat kerusakan relatif menggunakan

persamaan (2), dan penurunan kapasitas menggunakan persamaan (4). Dari penurunan kapasitas maka kapasitas aktual relatif terhadap teoritiknya, $Cd_{relatif}$ dapat dihitung dengan:

$$Cd_{relatif} = 100\% - D_{kap} \quad (9)$$

Hasilnya ditabulasi seperti pada Tabel 5 berikut:

Tabel 5. Frekuensi dan Kapasitas aktual relatif

Jembatan	L (m)	f_a (Hz)	f_t (Hz)	$D_{relatif}$ (%)	$Cd_{relatif}$ (%)
2	20	3.92	4.0	2.1%	95.88%
3	25	2.72	3.51	22.4%	55.11%
5	39	2.36	3.15	25.0%	49.92%

Uji beban statik dilakukan sesuai dengan tahapan dan konfigurasi beban yang telah disampaikan dalam metode. Respon struktur dari setiap tahapan pembebanan seperti pada Tabel 6 dan secara visual respon lendutan pada Gb 14, dan hubungan lendutan dan regangan pada

Tabel 6. Data lendutan statik

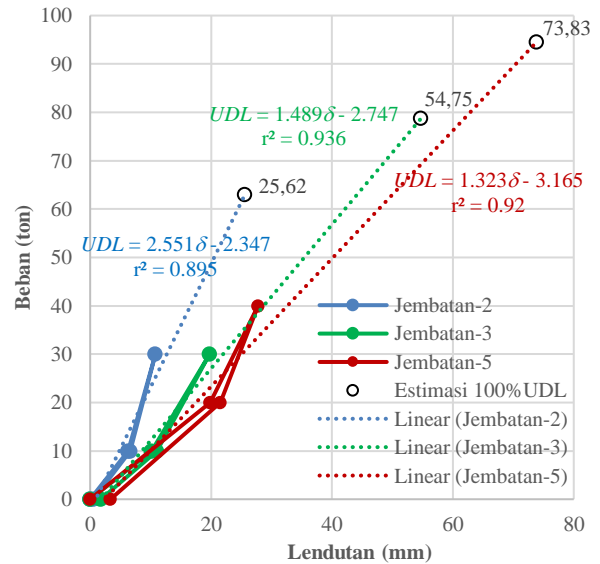
Jembatan	Beban (ton)	%UDL	Lendutan (mm)	$\Delta\varepsilon$ (μ)
2	0	0.0%	0	0
	10	15.9%	6.3	135
	30	47.6%	10.8	178
	10	15.9%	6.6	143
	0	0.0%	0.5	9
3	0	0.0%	0	0
	10	12.7%	10.2	140
	30	38.1%	19.8	217
	10	12.7%	11.1	153
	0	0.0%	1.8	20
5	0	0.0%	0	0
	20	21.2%	19.83	185
	40	42.3%	27.78	255
	20	21.2%	21.4968	201
	0	0.0%	3.3336	31

Pada Gb 14, terlihat pada ketiga jembatan, kemiringan grafik hubungan beban dan lendutan (grafik kekakuan) tidak linier sempurna, untuk itu dibuat *trendline* dimana secara berurutan untuk jembatan 2, 3, dan 5 secara berurutan seperti pada persamaan (10), (11), dan (12).

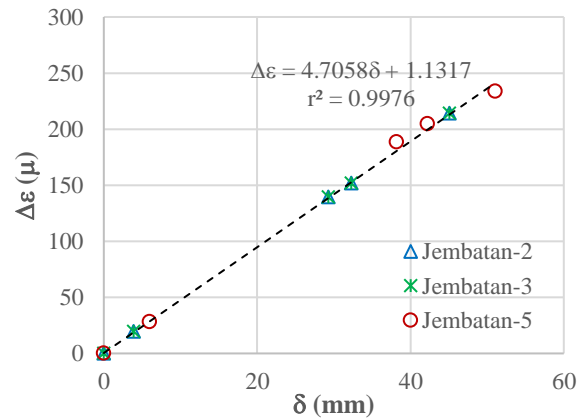
$$UDL = 2.551\delta - 2.347 \quad (10)$$

$$UDL = 1.489\delta - 2.747 \quad (11)$$

$$UDL = 1.323\delta - 3.165 \quad (12)$$



Gb 14. Data dan *trendline* beban vs lendutan, dan estimasi lendutan pada 100%UDL



Gb 15. Hubungan perubahan regangan dan lendutan

Respon struktur terhadap beban adalah deformasi dan gaya dalam (BSN, 2020). Gb 15 menunjukkan linearitas hubungan antara perubahan regangan dengan lendutan pada tiap tahap pembebanan yang ditunjukkan dengan koefisien determinasi, r^2 mendekati 1. Hal ini selain menunjukkan bahwa struktur selama tahapan pembebanan masih bersifat linear elastis, juga menunjukkan akuisisi data telah dilakukan dengan benar. Analisis kapasitas jembatan selanjutnya akan dilakukan pada data lendutan.

Dari persamaan *trendline* (10), (11), dan (12), estimasi lendutan pada 100% beban maksimum jembatan 2, 3 dan 5 (UDL_{total}) seperti yang disampaikan dalam Tabel 2 secara berurutan yaitu 63 ton, 78.75 ton dan 94.5 ton dapat diperoleh seperti yang diberikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Pemenuhan kriteria lendutan ijin

Jembatan	Estimasi lendutan pada 100%UDL	Lendutan Ijin	Pemenuhan Kriteria lendutan ijin
2	25.62	25	tidak terpenuhi
3	54.75	31.25	tidak terpenuhi
5	73.83	37.5	tidak terpenuhi

Pengecekan berikutnya adalah pada lendutan sisa, dimana idealnya ketika beban dihilangkan lendutan yang terukur adalah Kembali 0, namun seperti terlihat pada Tabel 6 dan Gb 14, ketika beban dihilangkan masih ada sisa lendutan. Pemenuhan kriteria lendutan sisa seperti diberikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Pemenuhan kriteria lendutan sisa

Jembatan	Lendutan Sisa	Rasio lendutan (sisa per maksimum saat uji)	Pemenuhan Kriteria lendutan sisa
1	0.5	5.0%	<20% → terpenuhi
2	1.8	9.1%	<20% → terpenuhi
3	3.3	12.0%	<20% → terpenuhi

Hasil yang ditunjukkan Tabel 8 sejalan dengan yang ditunjukkan pada Gb 15, yang menunjukkan selama tahap pembebanan struktur masih bersifat linear elastis. Kendati demikian lendutan pada beban UDL_{total} yang diperoleh dengan ekstrapolasi pada ketiga jembatan melampaui lendutan ijinnya (Tabel 9).

Tabel 9. Kapasitas jembatan relatif berdasarkan hasil uji statik

Jembatan	Beban saat lendutan mencapai batas ijin	Kapasitas rencana	Kapasitas relatif
2	61.0	63.00	95.88%
3	43.3	78.75	55.11%
5	46.6	94.50	49.92%

Dari beban maksimum rencana dan estimasi beban pada saat lendutan mencapai batas ijinnya dapat diestimasi kapasitas jembatan aktual dengan persamaan (8) yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 9.

Perbandingan estimasi kapasitas relatif jembatan terhadap nilai teoritisnya (desainnya) yang dihasilkan dari uji beban statik dan uji beban dinamik seperti ditunjukkan pada

Tabel 10. Perbandingan estimasi kapasitas jembatan relatif berdasarkan hasil uji beban statik dan uji beban dinamik

Jembatan	C_d	C_s	perbedaan
1	96.79%	95.88%	0.91%
2	54.96%	55.11%	-0.15%
3	49.27%	49.92%	-0.65%
Rata-rata			0.04%
Standar deviasi			0.8%

Hasil penelitian menunjukkan bahwa estimasi kapasitas relatif jembatan menggunakan uji beban dinamik lebih besar $0.04\% \pm 0.8\%$, dengan nilai perbedaan yang sangat kecil tersebut dapat disimpulkan bahwa uji beban dinamik dapat digunakan untuk memperkirakan kapasitas jembatan secara akurat selama struktur masih dalam batas linear elastis. Dengan alasan keamanan maka pembatasan beban dilakukan menggunakan nilai yang lebih kecil antara hasil uji beban dinamik dan uji beban statik.

Kesimpulan

Dari hasil uji beban dinamik diketahui tingkat kerusakan jembatan 2, 3, dan 4 secara berurutan sebesar 2.1%, 22.4% dan 25%. Untuk itu dari hasil uji beban baik statik dan uji beban dinamik teridentifikasi kapasitas beban jembatan 2, 3 dan 5 secara berurutan sebesar 95% (61 ton), 54% (43 ton), dan 49% (46 ton) dari kapasitas rencananya. Karena ketiga jembatan tersebut dalam satu ruas jalan distribusi logistik, maka kapasitas maksimum beban yang diijinkan melewati jembatan adalah 43 ton. Dari hasil penelitian juga diperoleh nilai akurasi yang cukup tinggi dari uji beban dinamik dalam penilaian reliabilitas bangunan atas jembatan dimana perbedaannya dengan uji beban statik hanya $0.04\% \pm 0.8\%$. Dengan perbedaan yang sangat kecil mengingat uji beban dinamik memerlukan waktu yang relatif lebih singkat, maka dapat dinyatakan bahwa uji beban dinamik cukup efektif dan efisien untuk menilai reliabilitas struktur bangunan atas jembatan.

Referensi

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

- BSN. (2016). *SNI 1725: 2016, Pembebanan untuk Jembatan* (No. SNI 1725:2016).
- BSN. *SNI 2847: 2019; Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.*, Pub. L. No. SNI 2847:2019 (2019).
- BSN. *SNI 1727: 2020; Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain.*, (2020).
- Directorate General of Highways Ministry of Public Works Republic of Indonesia. *Bridge Design Manual, Vol-1.*, (1992).
- 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 Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia. *Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan.*, Pub. L. No. 004/BM/2012 (2012).
- Karuppasamy, K. S. K., P. S., B., & Sahoo, N. (2020). *Introduction to Stress-Strain Relationship and Its Measurement Techniques.* <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., Alisjahbana, S. W., Widjajakusuma, J., & Najid, N. (2023). Estimasi Lendutan Pelat Untuk Menghitung Kapasitas Beban Dengan Akurasi Tinggi Menggunakan Uji Getar. *Konstruksia*, 14(2), 175–188. <https://doi.org/10.24853/jk.14.2.175-188>
- Khoeri, H., Isvara, W., Widjajakusuma, J., Natasa, F., & Sofiana, D. (2024). Static Load Testing of PCI-Bridges for Assessing Functional Suitability and Its Comparison with Dynamic Testing. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 9(1).
- 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>
- 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>
- PT. Hesa Laras Cemerlang. (2019a). *Laporan Akhir Pengujian Jembatan Tri Martani PT. Borneo Indobara di Kalimantan Selatan.* Retrieved from <https://hesa.co.id>
- PT. Hesa Laras Cemerlang. (2019b). *Laporan Uji beban Statik dan Dinamik Fly Over Tarahan, Lampung.* Retrieved from <https://hesa.co.id>
- PT. Hesa Laras Cemerlang. (2021). *Laporan Uji Statik dan Dinamik 4 (Empat) Jembatan PT. Hindoli-Cargill di Provinsi Jambi.* Retrieved from <https://hesa.co.id>
- 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>