

UJI BEBAN DINAMIK DAN ANALISIS MODAL OPERASIONAL JEMBATAN BAJA KOMPOSIT UNDERPASS BEKAMBIT

*DYNAMIC LOAD TESTING AND OPERATIONAL MODE ANALYSIS OF
COMPOSITE STEEL BRIDGE AT BEKAMBIT UNDERPASS*

Heri Khoeri^{*1,2}, Sofia W. Alisjahbana³, Panji Nugroho¹

*Email: heri.khoeri@umj.ac.id

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

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

³Civil Engineering Program, Faculty of Engineering and Computer Science, Universitas Bakrie, Jakarta, Indonesia

Abstrak

Uji beban dinamik bertujuan untuk mengetahui tingkat keselamatan, keamanan dan kondisi awal kelaikan operasi jembatan. Penentuan kelaikan didasarkan dari penilaian parameter dinamik seperti frekuensi, rasio redaman, kekakuan dan pola getar diperoleh dari analisis modal operasional data percepatan yang diperoleh dari rekaman 6 (enam) buah *accelerometer* yang dipasang di atas jembatan dalam kondisi kondisi operasionalnya. Frekuensi alami mode pertama dari tiap sensor diperoleh dengan melakukan transformasi data dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan transformasi fourier. Selanjutnya frekuensi jembatan, rasio redaman dan *mode shape* diperoleh dengan *Stochastic Subspace Identification, SSI*. Kriteria kelaikan adalah jika performa hasil uji tidak kurang disbanding teoritisnya. Nilai teoritis diambil dari data teknis perencanaan. Dari hasil uji diperoleh frekuensi alami 3,227 Hz sementara nilai teoritisnya 3,162 Hz, ini menunjukkan kekakuan aktual lebih tinggi dibanding teoritisnya. Begitupun rasio redaman 3,646% dalam range 2-5% mengindikasikan beton dalam keadaan utuh. Selain itu mode shape 1, 2 dan 3 mendekati *mode shape* teoritisnya dengan nilai frekuensi lebih tinggi dari teoritisnya untuk ketiga mode tersebut. Secara berturut-turut, frekuensi mode 1, 2, dan 3 yaitu 3,227 Hz, 22,073 Hz dan 44,022 Hz, sementara teoritisnya 3,162 Hz, 12,168 Hz dan 25,525 Hz. Dengan acuan tersebut, maka jembatan laik untuk difungsikan.

Kata kunci: frekuensi, getaran, modal, operasional, percepatan

Abstract

The dynamic load test aims to determine the level of safety, security, and initial operational fitness condition of the bridge. The fitness determination is based on the bridge's dynamic parameters, ie.: frequency, damping ratio, stiffness, and mode shape are obtained from the operational modal analysis of acceleration data recorded by six accelerometers installed on the bridge under its operational conditions. The natural frequency of 1st mode for each sensor is obtained by transforming the time-domain data to the frequency domain using Fourier transformation. Subsequently, the bridge frequency, damping ratio, and mode shape are determined using Stochastic Subspace Identification (SSI). The fitness criteria are met if the test results' not less than the theoretical values. The theoretical values of modal analysis correspond to the design technical data. From the test results, the natural frequency is determined to be 3,227 Hz, while the theoretical value is 3,162 Hz, indicating that the actual stiffness is higher than the theoretical one. Similarly, a damping ratio of 3.646% within the 2-5% range indicates that the concrete is in good condition. Additionally, 1st, 2nd and 3rd modes closely approximate their theoretical counterparts, with frequencies higher than their theoretical values. The respective frequencies for 1st, 2nd and 3rd modes are 3,227 Hz, 22,073 Hz, and 44,022 Hz, compared to theoretical values of 3,162 Hz, 12,168 Hz, and 25,525 Hz. With these references, the bridge is suitable for operation.

Keywords: frequency, vibration, modal, operational, acceleration

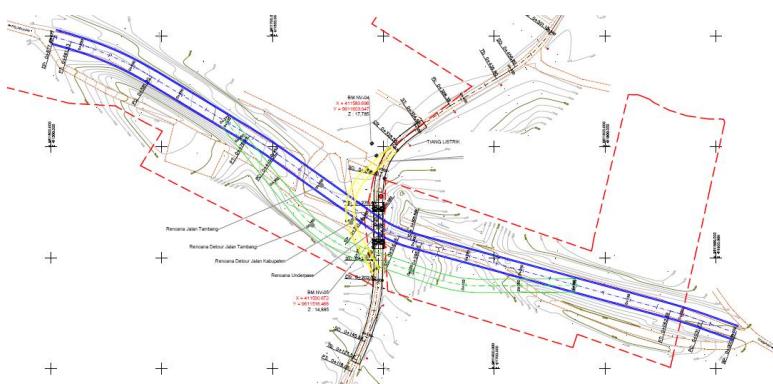
I. PENDAHULUAN

Mengetahui parameter dan karakteristik mode dinamis jembatan berdasarkan respons dinamis yang diukur pada kondisi operasional saat jembatan digunakan menjadi informasi yang sangat bermanfaat untuk menilai kondisi jembatan dan pengambilan keputusan tentang kelaikan fungsi suatu jembatan, disamping investigasi lainnya yang dilakukan seperti pengamatan visual, non destructive test, uji beban statik atau investigasi lainnya.

Data yang diperlukan untuk analisis ini adalah data percepatan getar yang direkam dengan accelerometer saat jembatan digunakan. Semakin

banyak accelerometer ditempatkan pada titi-titik yang tepat maka analisis akan semakin kompleks dan akurat. Selain diperlukan sebagai bagian dari dasar penentuan kelaikan fungsi suatu jembatan, analisis ini juga dapat digunakan untuk memantau perubahan karakteristik mode getar seiring waktu, jika pengujian dilakukan secara berkala. Tentunya hal ini bermanfaat untuk menentukan Langkah-langkah preservasi yang diperlukan.

Jembatan persimpangan underpass bekambit (Gambar 1) adalah jembatan bentang 30 m, lebar 10 m dengan 6 buah girder komposit mengacu pada standart jembatan gelagar komposit A30 yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga [1].



Gambar 1. Jembatan gelagar komposit A30 Persimpangan Underpass Bekambit

Sebelum *open traffic* untuk umum, sesuai dengan Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan [2], perlu dilakukan uji jembatan untuk mengetahui tingkat keselamatan dan keamanan jembatan terhadap beban layan. Uji beban dinamik merupakan alternatif pengujian untuk mendapatkan respon struktur terhadap beban yang bekerja di atasnya dengan waktu pelaksanaan pengujian relative lebih cepat dibandingkan uji beban static, namun tetap memiliki akurasi yang tinggi [3], [4].

Tujuan utama *OMA* untuk mengidentifikasi frekuensi alami, pola getaran, dan faktor redaman dari struktur tanpa harus mengganggu operasi berbeda dengan *EMA* (*experimental Modal Analysis*) yang dilakukan dengan mengeksitas struktur menggunakan sumber getaran buatan [5]. Menemukan model modal struktur bukanlah tujuan akhir. Hasil *OMA* dapat diadopsi untuk berbagai aplikasi signifikan [6].

Parameter dinamik yang diperoleh berupa frekuensi getar, redaman dan pola getar akan digunakan untuk identifikasi kapasitas beban, tingkat keutuhan dan tingkat kerusakan jembatan. Frekuensi adalah ukuran untuk kekakuan dan keutuhan struktur.

Setiap perubahan periodik dalam parameter dinamis memberikan korelasi kondisi struktural dengan tingkat laju kerusakan. Kriteria penilaian kondisi dengan cara uji getar diterapkan untuk berbagai tipe jembatan beton bertulang, beton prategang, rangka baja dan gelagar komposit [7].

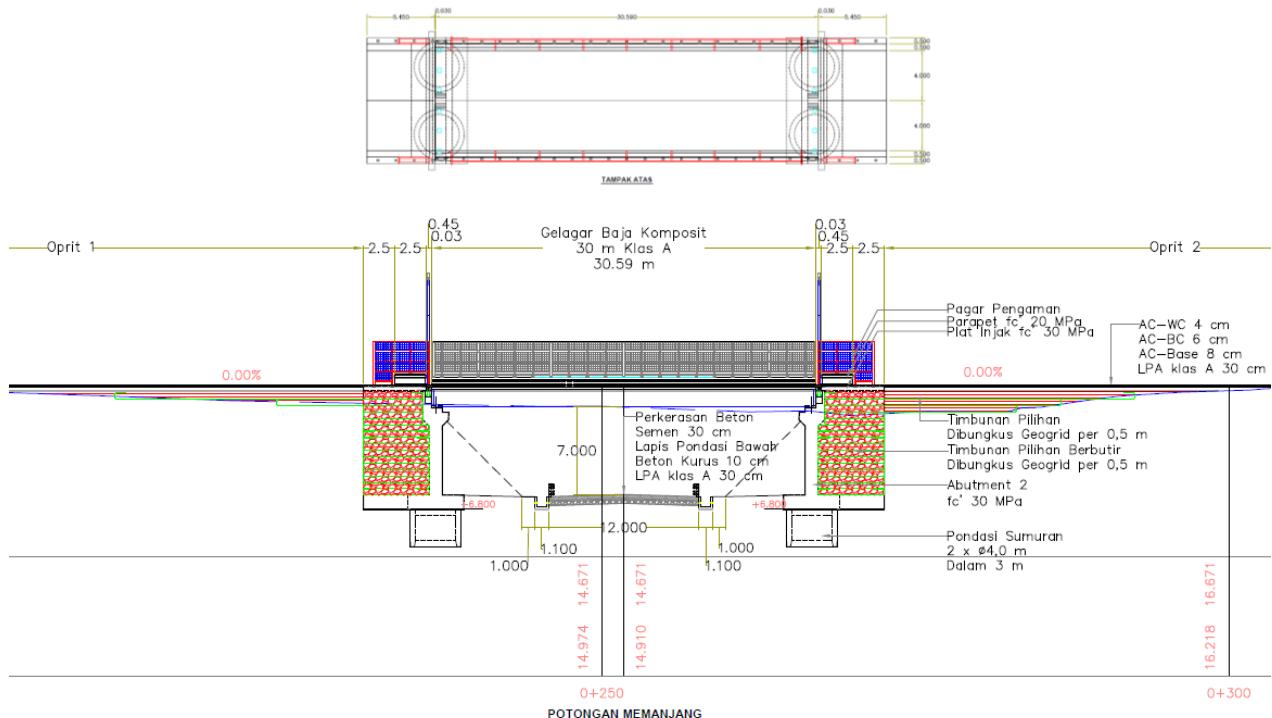
OMA mengidentifikasi frekuensi, bentuk modal, dan faktor redaman struktur dengan algoritma Stochastic Subspace Identification, SSI, yang didasarkan pada tiga asumsi: i) sistem berperilaku dalam rentang liniernya, ii) sistem adalah invariant waktunya, dan iii) eksitasi input merupakan realisasi dari proses stokastik dengan perilaku Gaussian white noise dan tidak berkorelasi dengan respon sistem [9], [10], algoritma ini untuk mengantisipasi perkiraan yang bias [8].

Teknik Stochastic subspace identification, SSI telah terbukti dapat diandalkan untuk identifikasi modal, diantaranya untuk pemantauan online sistem suspensi kendaraan kereta api (Bogie Y25), dimana SSI digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi alami dari mode-mode sistem suspense [11], jembatan jalan raya dan kereta api [12], jembatan pedestrian [13], aplikasi industri [14], dalam

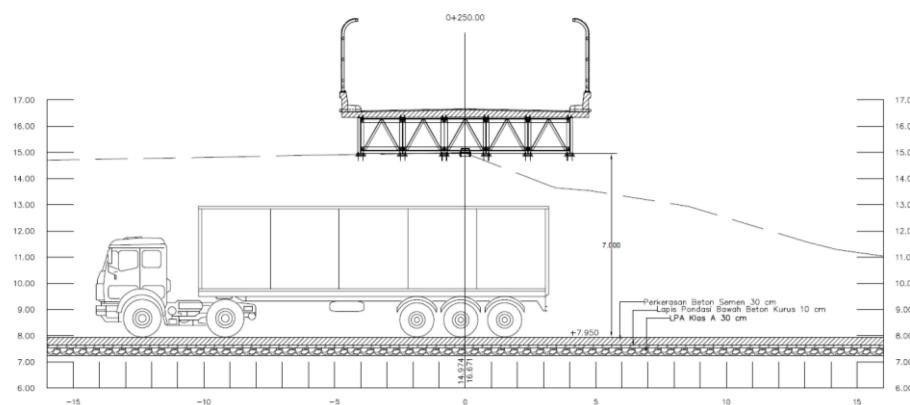
pemantauan infrastruktur sipil [15] dan dalam identifikasi dinamis bangunan bersejarah [16], dan aplikasi lainnya.

II. METODE PENELITIAN

Span jembatan yang dibahas adalah jembatan gelagar baja komposit A30 dengan bentang 30 m, seperti pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Tampak atas dan potongan memanjang jembatan



Gambar 3. Potongan melintang STA 0+250

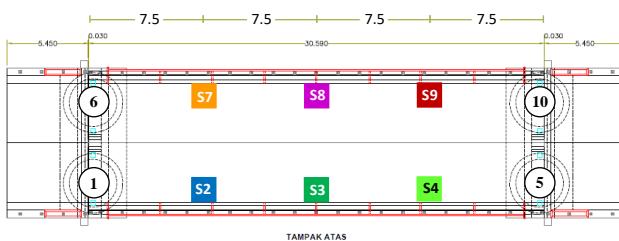
Tahapan Penelitian yang dilakukan:

1) Pengukuran getaran pada Jembatan

Pengukuran dilakukan dengan menempatkan *accelerometer* tepi di $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$ bentang jembatan (Gambar 4), dengan sensor S2, S3, S4, S7, S8 dan S9.

Perekaman data percepatan dilakukan dalam waktu beberapa menit dengan beban operasional

yaitu dengan beban acak kendaraan yang melintas dengan frekuensi sampling data 200 Hz (200 data per detik) yang direkam dalam waktu yang bersamaan dari sensor ke data logger yang terkoneksi ke komputer.



Gambar 4. Penempatan sensor *accelerometer*

2) Pemrosesan data percepatan

Selama melakukan pengujian beban dinamik pada struktur jembatan, data yang didapat adalah data percepatan (accelerogram). Data tersebut selanjutnya diolah untuk mendapatkan data frekuensi. Proses tersebut dilakukan dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transformation (FFT)*.

FFT merupakan teknik perhitungan operasi matematika yang dapat diaplikasikan untuk mentransformasi data percepatan dalam domain waktu menjadi sinyal dalam domain frekuensi. *FFT* membagi data percepatan dalam frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks. Fourier Transform untuk pengolahan data percepatan dapat didefinisikan:

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

Dengan:

- $S(f)$ = sinyal dalam domain frekuensi
- $a(t)$ = sinyal percepatan dalam domain waktu [m/det^2]
- $e^{-j2\pi ft}$ = fungsi kernel
- f = frekuensi [Hz]
- t = waktu [detik]

Pemrosesan data percepatan untuk mendapatkan Fungsi Respons Frekuensi (*FRF*). dilakukan dengan bantuan SIGVIEW 5.3.2.0.

3) Operational Modal Analysis, SSI

Tahapan SSI untuk mendapatkan realisasi sistem adalah sebagai berikut: i) membangun matriks blok Hankel dengan data respons getaran sistem; ii) membagi matriks menjadi dua komponen, past dan future; iii) menghitung proyeksi ortogonal ruang baris komponen past dari matriks ke ruang baris komponen future; iv) terapkan dekomposisi nilai tunggal ke proyeksi dan hitung matriks observabilitas dengan matriks yang terdekomposisi. Matriks observabilitas merupakan fungsi dari matriks state dan matriks output yang merupakan representasi state space dari sistem. v) Nilai eigen dari matriks state berisi informasi tentang frekuensi natural dan rasio redaman

sistem, dan vektor eigen yang dioperasikan pada matriks output menghasilkan mode shape. Dari simulasi dengan algoritma berbeda, pendekatan subspace ditemukan memiliki kinerja kompetitif dengan metode error prediksi, asalkan sistem dieksitasi dengan baik [17].

a. Kriteria Kepastian Modal, *Modal Assurance Criterion, MAC*

MAC digunakan untuk analisis data statistik sebagai indikator kualitas *mode shape* yang ditemukan. Hal ini didasarkan pada analisis regresi linier dengan pendekatan kuadrat terkecil, implikasinya lebih sensitif terhadap perbedaan yang besar dan relatif sensitif terhadap perbedaan yang kecil. *MAC* dibatasi diantara nol ketika *mode shape* sama sekali tidak berhubungan dan tunggal, ketika keduanya berkorelasi sempurna untuk mengukur derajat konsistensi atau linearitas *mode shape*.

b. Proses Stabilisasi

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

4) Analisis Parameter Dinamis

Penilaian kondisi bangunan atas jembatan dengan menggunakan frekuensi alami aktual dimaksudkan untuk melakukan penyederhanaan dalam melakukan analisis. Analisis yang dimaksud tersebut adalah perhitungan ulang frekuensi alami berdasarkan dimensi struktur jembatan yang ditinjau [18]. Dengan parameter penilaian dinamis [7]. Frekuensi alami pertama atau fundamental terukur, f_{aktual} yang berasal dari getaran bebas, (b) Kekakuan lentur, EI_{aktual} dan (c) Redaman kritis, ζ_{aktual} .

a. Frekuensi Alami

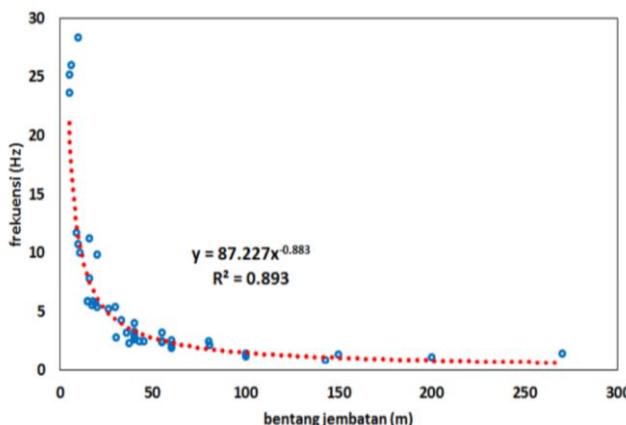
Penurunan frekuensi alami aktual terhadap nilai frekuensi alami teoritis menunjukkan penurunan dari keutuhan struktural. Frekuensi aktual alami pertama yang sesuai dengan

frekuensi teoritis menyatakan kapasitas yang memadai.

Hubungan bentang dan frekuensi alami dapat ditentukan melalui hasil regresi pengujian beban dinamik dari 50 jembatan (Gambar 1), yaitu:

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

dengan: f_0 = frekuensi alami (Hz); L = bentang jembatan (m). Hasil regresi menunjukkan korelasi yang baik, dengan koefisien determinasi, $R^2 = 0.893$ [20].



Gambar 5. Frekuensi Alami dan Bentang Jembatan [20]

Sementara *British Committee* melalui *Eurocode* [22] memberikan frekuensi alami jembatan harus dalam range:

$$f_0 = 23,58 \cdot L^{-0.592} \quad (3)$$

Untuk bentang 20 m sampai 100 m. Sementara untuk bentang lebih dari 100 m frekuensi natural:

$$f_0 = 94,76 \cdot L^{-0.745} \quad (4)$$

Respon jembatan berkaitan erat dengan kondisi kerusakan struktural. Nilai kerusakan struktural relative adalah sebagai berikut [7]:

$$D_{realtif} = \frac{(f_{teoritis} - f_{aktual})}{f_{teoritis}} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana:

- $D_{realtif}$ = nilai kerusakan struktur relatif
- f_{aktual} = frekuensi alami aktual [Hz]
- $f_{teoritis}$ = frekuensi alami teoritis [Hz]

Untuk simple beam, frekuensi alami teoritisnya [21] adalah:

$$f_{teoritis} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{48EI}{mL^3}} \quad (6)$$

Dimana:

L = Panjang jembatan [m]

EI = kekakuan lentur dinamis [$\text{kN}\cdot\text{m}^2$]

m = massa jembatan [$\text{kN}\cdot\text{det}^2/\text{m}$]

$E_{dinamis}$ diperoleh dari rumus berikut:

$$E_{dinamis\ baja} = E_{statis\ baja} [\text{kN}/\text{m}^2] \quad (7)$$

Analisis moda pertama dikakukan dengan pers., sedangkan analisis moda yang lebih tinggi dilakukan dengan bantuan program struktur analisis.

b. Kekakuan lentur

Parameter kekakuan lentur (EI) langsung terkait dengan frekuensi alami aktual. Penurunan kekakuan lentur aktual, EI_{aktual} terhadap kekakuan lentur teoritis, $EI_{teoritis}$ menunjukkan penurunan kapasitas daya pikul.

Penurunan frekuensi aktual terhadap frekuensi teoritis sebesar 10-20% menunjukkan kondisi cukup buruk. Rentang ini ekuivalen dengan penurunan kekakuan lentur, EI aktual terhadap kekakuan teoritis sebesar 20-40%.

Nilai penurunan kapasitas ditentukan dengan:

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

Dimana:

D_{kap} = nilai penurunan kapasitas

$EI_{teoritis}$ = kekakuan lentur teoritis [$\text{kN}\cdot\text{m}^2$]

EI_{aktual} = kekakuan lentur aktual [$\text{kN}\cdot\text{m}^2$]

c. Redaman kritis

Peningkatan redaman kritis aktual, ζ_{aktual} terhadap redaman kritis teoritis, $\zeta_{teoritis}$ dari beton utuh menunjukkan tingkat kerusakan retakan. Redaman kritis ditentukan dengan:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{1}{n} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{A_o}{A_n} \times 100\% \quad (9)$$

Dimana:

δ = penurunan logaritmik

n = jumlah osilasi

A_o = Amplitudo ke-1

A_n = Amplitudo ke-n

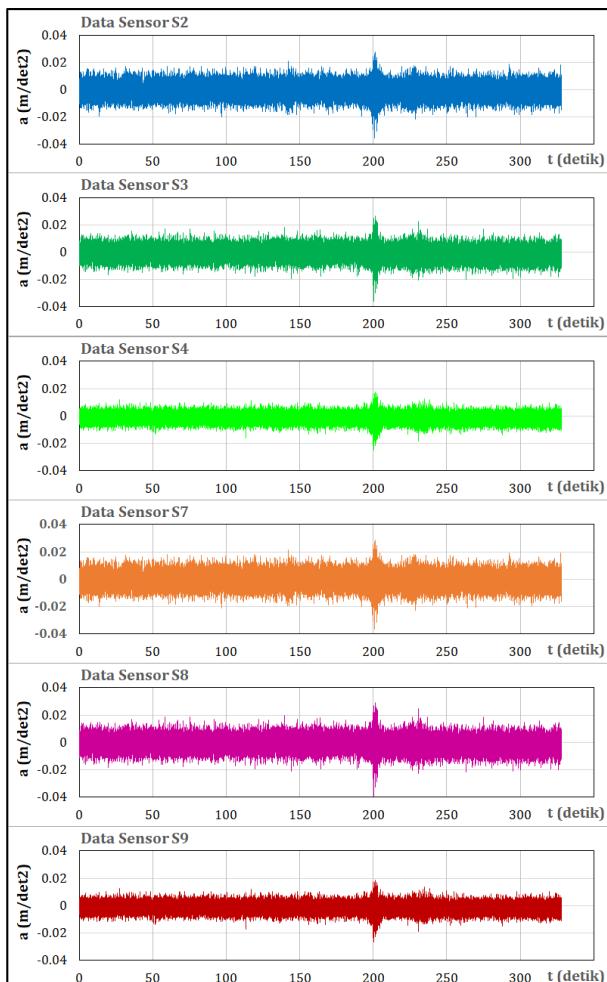
Rasio redaman yang tinggi sering disebabkan oleh penyerapan energi lewat retakan dalam beton. Beton utuh rasio redaman kritisnya 2-5%, sementara beton retak 7-10% [7].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Rekaman sinyal percepatan

Data percepatan (m/det^2) tiap sensor selama 328.22 detik dengan frekuensi data 200 Hz atau 200 data per detik (65.645 data), diplotkan dalam grafik dalam domain waktu dalam Gambar 6.

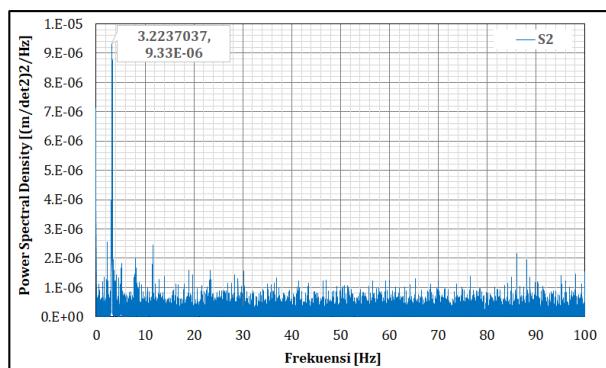
Dari data percepatan Gambar 6, terlihat percepatan pada waktu yang sama memiliki pola yang sama, karena struktur merupakan satu sistem, namun pada tiap sensor memiliki amplitude berbeda, tergantung posisi beban dan intensitas beban relatif terhadap sensor tersebut.



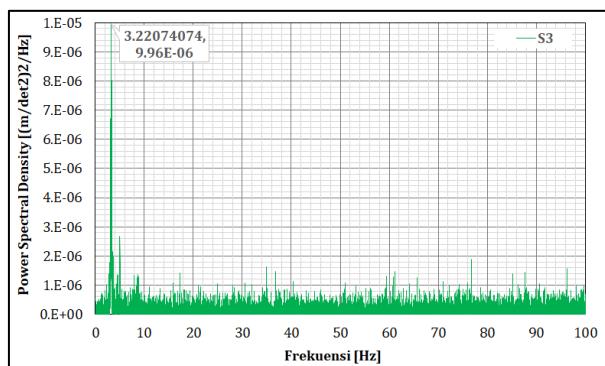
Gambar 6. Data *accelerometer*

B. Hasil Transformasi Sinyal Percepatan ke Domain Frekuensi

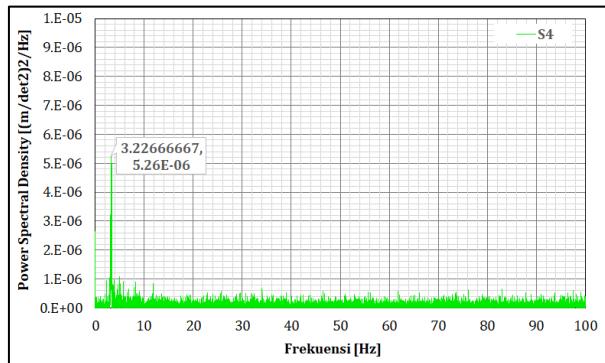
Data dari domain waktu ditransformasi ke dalam domain frekuensi menggunakan pers. (1) dengan bantuan SIGVIEW 5.3.2.0. *Power spectral density* [$(\text{m}/\text{det}^2)^2/\text{Hz}$] diplotkan ke dalam grafik dalam domain frekuensi (Hz), secara berurutan untuk data sensor S2, S3, S4, S7, S8 dan S9 dalam Gambar 7 sampai dengan Gambar 12.



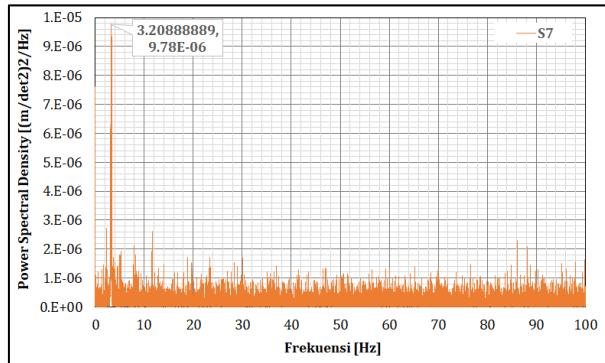
Gambar 7. Power Spectral Density S2



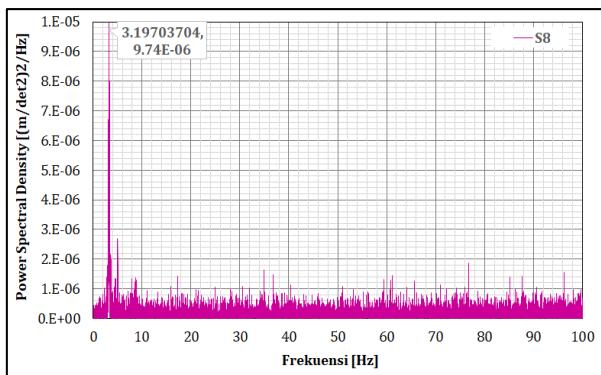
Gambar 8. Power Spectral Density S3



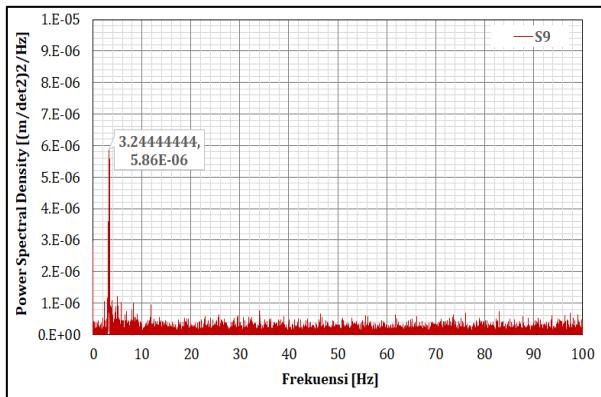
Gambar 9. Power Spectral Density S4



Gambar 10. Power Spectral Density S7



Gambar 11. Power Spectral Density S8



Gambar 12. Power Spectral Density S9

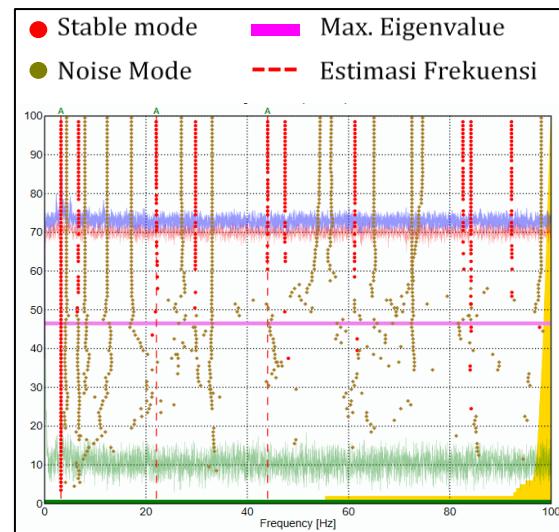
Nilai maksimum *Power spectral density* [$(\text{m}/\text{det}^2)^2/\text{Hz}$] menunjukkan frekuensi alami dominan dari struktur. Dari grafik pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 12, dapat diketahui frekuensi alami dominan mode-1 untuk tiap sensor seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Frekuensi alami mode-1 dari FFT data percepatan

Sensor ID	Frekuensi Hz	Power Spectral Density $10^{-6}(\text{m}/\text{det}^2)^2/\text{Hz}$
2	3.2237	9.3263
3	3.2207	9.9609
4	3.2267	5.2612
7	3.2089	9.7784
8	3.2326	9.9532
9	3.2444	5.8620

C. Mode Shape hasil Identifikasi Stokastik Subspace, SSI

Dengan menerapkan algoritma *Subspace Stochastic Identification*, SSI dengan menggabungkan seluruh data percepatan dari semua sensor, dapat dipilah dan diidentifikasi antara *mode stabil*, *mode noise* dan *mode shape*, yang hasilnya seperti Gambar 13.



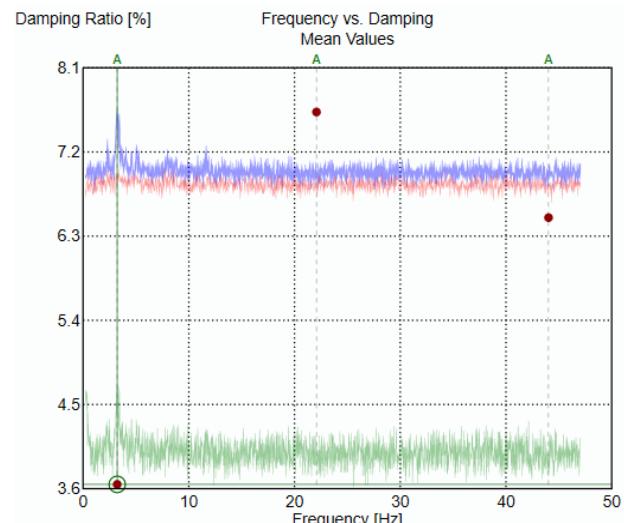
Gambar 13. Diagram stabilisasi dari model state space yang diestimasi (*estimated state space models*)

Dari diagram pada Gambar 13 terestimasi frekuensi dan redaman beberapa mode getaran seperti diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Mode Shape Global

Mode Shape	Frequency [Hz]	Damping [%]
1	3.227	3.646
2	22.073	7.627
3	44.022	6.498

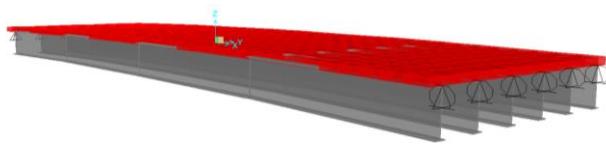
Diagram rata-rata frekuensi *versus* Redaman dan interval seperti diberikan pada Gambar 14.



Gambar 14. Frekuensi vs. Redaman

D. Analisis modal data perencanaan

Frekuensi teoritik didapatkan dengan memodelkan jembatan menggunakan SAP2000 V22.0.0, seperti pada Gambar 15.



Gambar 15. Pemodelan jembatan dalam SAP2000

Dimensions	
Outside height (t3)	1.381
Top flange width (t2)	0.3
Top flange thickness (tf)	0.015
Web thickness (tw)	0.015
Bottom flange width (t2b)	0.42
Bottom flange thickness (tfb)	0.015

Properties	
Cross-section (axial) area	0.0311
Moment of Inertia about 3 axis	8.072E-03
Moment of Inertia about 2 axis	1.267E-04
Product of Inertia about 2-3	0.
Shear area in 2 direction	0.0207
Shear area in 3 direction	9.000E-03
Torsional constant	2.298E-06
Section modulus about 3 axis	0.0111
Section modulus about 2 axis	6.035E-04
Plastic modulus about 3 axis	0.0142
Plastic modulus about 2 axis	1.075E-03
Radius of Gyration about 3 axis	0.5097
Radius of Gyration about 2 axis	0.0639
Shear Center Eccentricity (x3)	0.

Gambar 16. Dimensi dan properti girder A30 WF 1381

Dimana pelat lantai dimodelkan sebagai elemen *shell* dan gelagar baja dimodelkan sebagai elemen *frame* yang *disconstraint* dalam arah melintangnya dengan properti gelagar baja seperti pada Gambar 16. Pada ujung-ujung gelagar diberi tumpuan sendi pada salah satu sisinya dan rol pada sisi lainnya.

Hasil analisis modal untuk 3 mode pertama, seperti diberikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil analisis modal

Mode	Periode detik	Frekuensi Hz	Frekuensi sudut rad/detik	Eigenvalue rad ² /detik ²
1	0,316	3,162	19,865	394,62
2	0,082	12,168	76,451	5844,83
3	0,039	25,525	160,376	25720,35

E. Analisis modal hasil uji vs hasil analisis data perencanaan

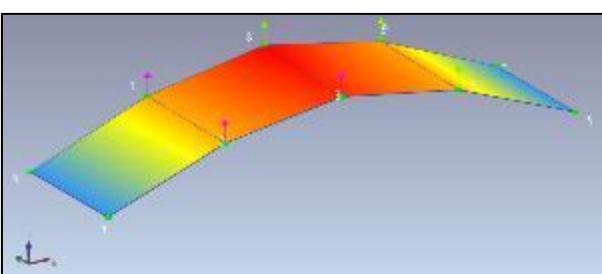
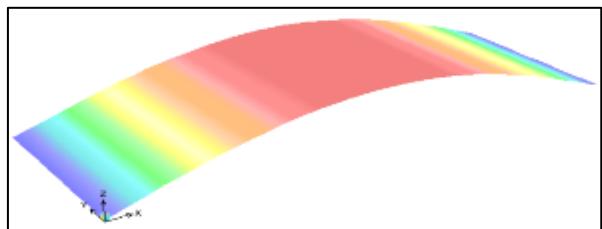
Frekuensi alami aktual yang diidentifikasi dengan algoritma *SSI*, dibandingkan dengan frekuensi analitik untuk *mode-1*, *2* dan *3* seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Frekuensi aktual vs analitik

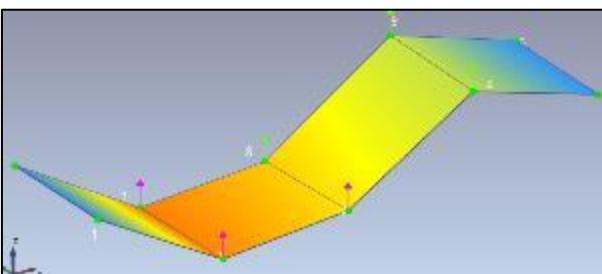
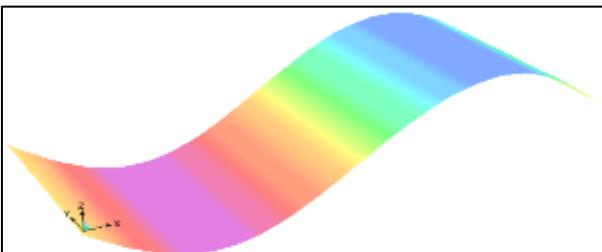
Mode	Frekuensi	
	Aktual	Analitik
1	3,227	3,162
2	22,073	12,168
3	44,022	25,525

Frekuensi aktual mode-1 nilainya lebih besar dari nilai teoritiknya, ini mengindikasikan jembatan yang memiliki kekakuan yang lebih besar dari desainnya.

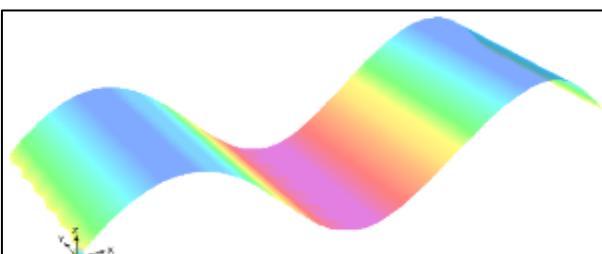
Perbandingan *Mode shape* aktual dengan teoritis *mode-1*, *2* dan *3*, secara berurutan dapat dilihat pada Gambar 17 sd. Gambar 19. Terlihat bahwa *mode shape* actual mendekati teoritisnya, perbedaan yang terjadi karena keterbatasan pemasangan sensor.

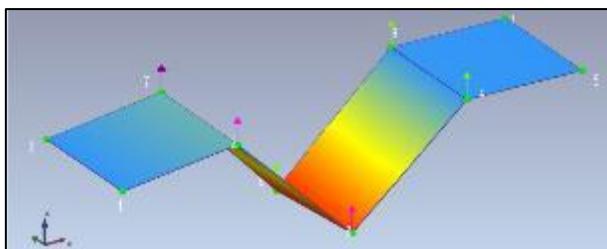


Gambar 17. Mode Shape-1 Analitik Vs Aktual



Gambar 18. Mode Shape-2 Analitik Vs Aktual





Gambar 19. Mode Shape-3 Analitik Vs Aktual

F. Hasil Penilaian atas Parameter Dinamis

Penilaian kerusakan struktur relatif dilakukan dengan menggunakan pers. (5) :

$$D_{realtif} = \frac{(3,162 - 3.227)}{3,162} \times 100\% < 0$$

Menunjukkan tidak ada kerusakan struktural pada jembatan. Selanjutnya dengan hubungan empirik penurunan frekuensi aktual terhadap teoritisnya ekuivalen dengan penurunan kekakuan lentur, maka dengan f_{aktual} diketahui, maka EI aktual dapat diperkirakan dari pers. (6) sebagai berikut:

$$EI_{aktual} = \frac{(2\pi f_{aktual})^2 mL^3}{48} = 1617339.28 \text{ kN.m}^2$$

Berdasarkan pers. (8) :

$$D_{kap} = \frac{(16114400 - 1617339.28)}{16114400} \times 100\% \\ = -0.182\%$$

Kapasitas beban aktual = $100\% - D_{kap}$ = 100.182%

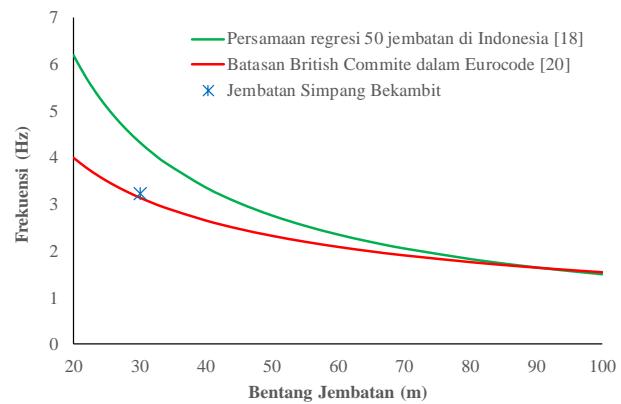
Hal ini menunjukkan kapasitas aktual jembatan lebih dari kapasitas teoritisnya.

Dengan pers. (9) dan dari Tabel 2 diketahui nilai rasio redaman kritis adalah 3.646%. Nilai tersebut masih dalam range 2-5% artinya tidak ada indikasi keretakan struktural pada beton jembatan.

G. Frekuensi Jembatan Dilihat dari Data Empirik Frekuensi

Data frekuensi dan Panjang jembatan diplotkan ke dalam pers (2) dan (3), untuk melihat apakah frekuensi jembatan dalam range jembatan yang sudah terbangun dan batasan frekuensi, hasilnya ditunjukkan pada Gambar 20.

Dari Gambar 20 terlihat frekuensi alami jembatan persimpangan underpass Bekambit 3.148 Hz lebih tinggi dari batasan yang diberikan British Committee untuk bentang 30 m.



Gambar 20 Frekuensi Jembatan gelagar baja komposit underpass Bekambit dibandingkan data empirik [19]

IV. KESIMPULAN

Frekuensi alami aktual jembatan 3.227 Hz lebih tinggi dari nilai teoritiknya yaitu 3.162 Hz, mengindikasikan jembatan dalam kondisi baik sesuai desain, tidak terindikasi adanya kerusakan dan penurunan kapasitas dari desainnya. Rasio redaman aktual jembatan 3.646%, mengindikasikan beton jembatan dalam kondisi utuh, mengacu pada rasio redaman kritis beton utuh 2-5% sementara beton retak rasio redaman kritisnya 7-10%. Frekuensi aktual 3,227 Hz berada di bawah garis regresi, dimana untuk bentang 30 m nilainya 4,329 Hz, namun masih di atas range British committee dalam Eurocode yaitu 3,148 Hz. Frekuensi alami mode-2 dan mode-3 aktual lebih tinggi dari hasil modal analisis dengan mode yang sesuai, ini mengindikasikan kekakuan aktual dan kapasitas bebananya lebih besar dari desainnya.

Berdasarkan analisis parameter dinamik operasional, Jembatan Gelagar Baja Komposit Persimpangan Underpass Bekambit dapat dinyatakan laik untuk difungsikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, *Panduan Perakitan dan Pemasangan Jembatan Gelagar Baja Komposit Bentang 20 m sampai dengan 30 m*. Jakarta, 1996.
- [2] Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, *Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. Jakarta, 2020.
- [3] H. Khoeri, S. W. Alisjahbana, J. Widjajakusuma, and N. Najid, "Estimasi Lendutan Pelat Untuk Menghitung Kapasitas Beban Dengan Akurasi Tinggi Menggunakan

- Uji Getar," *Konstruksia*, vol. 14, no. 2, pp. 175–188, Jul. 2023, doi: 10.24853/jk.14.2.175-188.
- [4] 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.
- [5] F. Bin Zahid, Z. C. Ong, and S. Y. Khoo, "A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 8. Springer, Aug. 01, 2020. doi: 10.1007/s40430-020-02470-8.
- [6] M. Ghalishooyan and A. Shooshtari, "Operational Modal Analysis Techniques and Their Theoretical and Practical Aspects: A Comprehensive Review and Introduction," in *6th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC'15*, Gijón, Spain: IOMAC'15, May 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/281786721>
- [7] Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, *Penilaian Kondisi Jembatan untuk Bangunan atas dengan Cara Uji Getar. Pt T-05-2002-B. Pedoman Konstruksi dan Bangunan*. 2002.
- [8] M. D. A. Hasan, Z. A. B. Ahmad, M. S. Leong, and L. M. Hee, "Enhanced frequency domain decomposition algorithm: A review of a recent development for unbiased damping ratio estimates," *Journal of Vibroengineering*, vol. 20, no. 5. EXTRICA, pp. 1919–1936, Aug. 01, 2018. doi: 10.21595/jve.2018.19058.
- [9] J. Kang, L. Liu, S.-D. Zhou, and Y.-P. Shao, "A novel time-domain representation of transmissibility and its applications on operational modal analysis in the presence of non-white stochastic excitations," *J Sound Vib*, vol. 457, pp. 157–180, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2019.05.047.
- [10] M. Maddipour Farrokhifard, M. Hatami, and V. M. Venkatasubramanian, "Performance of Stochastic Subspace Identification Methods in Presence of Forced Oscillations," in *2019 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA)*, IEEE, May 2019, pp. 1–8. doi: 10.1109/SGSMA.2019.8784613.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] P. Van Overschee and B. De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems*. Boston, MA: Springer US, 1996. doi: 10.1007/978-1-4613-0465-4.
- [18] A. H. Purboyo and I. Zarkasi, "Akuisisi Data Vibrasi Uji DINamik Jembatan," *Jurnal HPJI*, vol. 7, no. 2, pp. 79–96, Jul. 2021, doi: 10.26593/jhpji.v7i2.5053.79-96.
- [19] 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/l92-032.

- [20] Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, “Laporan Uji Dinamik Jembatan,” Jakarta, 2014.
- [21] Y. Bai and Z. Dong Xu, *Dynamics of Structures*, 1st ed. New York: Wiley, 2019. doi: 10.1002/9781119605775.
- [22] “EN 1991-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges,” 1991.