

PENILAIAN KONDISI JEMBATAN UNTUK PERSYARATAN LAIK FUNGSI DENGAN UJI GETAR

Hinawan T. Santoso

Prodi Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Pekerjaan Umum
Jl. Prof. Sudarto, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50277
e-mail : hteguhsantoso@gmail.com

Abstrak — UU Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan dan UU Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu lintas dan Angkutan Jalan mengamanatkan bahwa pengoperasian jalan umum dilakukan setelah dinyatakan memenuhi persyaratan laik fungsi secara teknis dan administrasi oleh Penyelenggara Jalan. Tujuan dari penilaian kelaikan fungsi jalan adalah untuk memastikan bahwa jalan tersebut sesuai dengan standar kelaikan sehingga berkeselamatan bagi semua pengguna jalan. Jembatan sebagai bagian penting suatu jaringan jalan perlu juga dilakukan uji kelaikan untuk memastikan kekuatan dan keamanan strukturnya. Uji kelaikan jembatan dapat dilakukan dengan metode uji statik dan uji getar. Uji statik pada jembatan membutuhkan waktu dan biaya relatif besar, serta resiko kerusakan terhadap struktur. Metode lain yang lebih efektif yaitu uji getar, dimana hasil uji secara langsung memberikan nilai respons dinamik jembatan untuk dibandingkan dengan parameter dinamik teoritis berdasarkan pemodelan. Jembatan Kalikuto terletak pada ruas tol Semarang-Batang, Jawa Tengah merupakan bagian dari Jalan Tol Trans Jawa dengan bangunan atas berupa steel box arch bridge, memiliki bentang 100 meter dan lebar 32 meter. Sebelum dibuka untuk lalu lintas pada Desember 2018, telah dilakukan rangkaian pengujian untuk menilai kelaikan dari jembatan, diantaranya yaitu uji getar. Hasil uji getar diperoleh nilai frekuensi alami vertikal sebesar 1,251 Hz dimana nilainya di atas nilai frekuensi pemodelan (teoritis) sebesar 1.049 Hz, dengan rasio redaman sebesar 2,10% - 3,88%. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan aktual struktur jembatan lebih tinggi dibandingkan kekakuan rencananya, maka jembatan dikatakan mempunyai performa yang baik.

Kata Kunci : laik fungsi jalan, uji getar, parameter dinamik, jembatan.

Abstract — Law Number 38 of 2004 concerning Roads and Law Number 22 of 2009 concerning Road Traffic and Transport mandate that public road operations be carried out after being declared to meet the technical and administrative eligibility requirements of the Road Operator. The purpose of functional feasibility of road assessment is to ensure that the road complies with the feasibility standard so that it is safe for all road users. Bridges as an important part of a road network also need to be tested to ensure the strength and security of the structure. Bridge viability test can be done by static test and dynamic test methods. Static tests on bridges require a relatively large amount of time and cost, as well as the risk of damage to the structure. Another more effective method is the dynamic test, where the test results directly provide the dynamic response value of the bridge to be compared with theoretical dynamic parameters based on modeling. Kalikuto Bridge is located on the Semarang - Batang toll road, Central Java, which is part of the Trans Java Toll Road with the upper structure of a steel box arch bridge, having a span of 100 meters and a width of 32 meters. Before traffic opening in December 2018, a series of tests had been conducted to assess the feasibility of the bridge. Vibration test results obtained by the vertical natural frequency value of 1,251 Hz, where the value is still the modeling frequency value (theoretical) of 1,049 Hz, with the damping ratio of 2,10% - 3,88%. This shows that the actual stiffness of the bridge is higher than the design, so the bridge is said to have good performance.

Keywords : functional feasibility of road, dynamic test, dynamic parameter, bridge.

I. PENDAHULUAN

Pembangunan jembatan non-standar dengan bentang panjang di Indonesia mengalami kemajuan yang cukup signifikan. Hal ini terkait dengan meningkatnya kebutuhan akan sarana transportasi yang handal untuk mendukung pertumbuhan ekonomi. Pembangunan jembatan

non-standar ini perlu disertai dengan pemahaman yang baik mengenai perilaku strukturnya yang kompleks.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, dalam hal ini Direktorat Jenderal Bina Marga sebagai instansi pemerintah mempunyai tugas penyediaan, monitoring dan

evaluasi serta pemeliharaan infrastruktur jalan di Indonesia. Salah satu tugas pokok dan fungsinya antara lain yaitu fasilitas penetapan laik fungsi jalan dan jembatan. Hal ini juga selaras dengan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor: 11/PRT/M/2010 Tentang Tata Cara dan Persyaratan Laik Fungsi Jalan.

Jembatan sebagai bagian penting suatu jaringan jalan perlu juga dilakukan uji kelaikan untuk memastikan kekuatan dan keamanan strukturnya. Uji kelaikan jembatan sering dilakukan dengan metode uji statik dan uji getar, bertujuan untuk memverifikasi respon aktual struktur dibandingkan dengan prediksi teoritisnya pada saat perencanaan. Metode uji statik dengan pembebanan skala penuh membutuhkan usaha relatif besar, baik secara biaya, waktu, serta resiko kerusakan terhadap struktur itu sendiri.

Alternatif lain yang dinilai lebih efektif dari segi biaya dan waktu, serta minim resiko kerusakan pada struktur, yaitu metode uji getar. Uji getar dilaksanakan dengan menggunakan perangkat sensor untuk mencatat respon dinamik jembatan akibat eksitasi beban getaran. Hasil uji getar berupa respon dinamik aktual jembatan yang kemudian dibandingkan dengan parameter dinamik teoritisnya, sehingga akan didapatkan gambaran kinerja jembatan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Laik Fungsi Jalan

Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan dan Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu lintas dan Angkutan Jalan mengamanatkan bahwa pengoperasian jalan umum dilakukan setelah dinyatakan memenuhi persyaratan laik fungsi secara teknis dan administrasi oleh Penyelenggara Jalan. Selain itu, Undang-Undang No. 22 Tahun 2009 mengamanatkan bahwa ketentuan mengenai Uji Laik Fungsi Jalan diatur melalui pedoman pelaksanaan uji kelaikan yang ditetapkan oleh menteri terkait, yaitu Menteri Pekerjaan Umum. Pelaksanaan uji kelaikan ini mempertimbangkan standar keamanan dan keselamatan lalu lintas.

Ketentuan mengenai Laik Fungsi Jalan diamanatkan pula di dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.15 Tahun 2005 tentang Jalan Tol dan Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tahun 2006 tentang

Jalan. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 15 tahun 2005 menjelaskan tentang ketentuan Kelaikan Fungsi di Jalan Tol dimana ketentuannya sama dengan Jalan Non Tol, yaitu harus memenuhi ketentuan teknis dan administratif sebagai jalan umum. Selain itu, terdapat ketentuan tambahan yaitu kelaikan sistem tol yang meliputi pengumpulan tol dan perlengkapan sarana operasi jalan tol. Sedangkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 34 Tahun 2006 menjelaskan bahwa salah satu dokumen jalan yang harus dipenuhi adalah dokumen penetapan laik fungsi jalan.

Sebagai tindak lanjut pelaksanaan peraturan perundang-undangan dan Peraturan Pemerintah tersebut, Kementerian PU (2010) menerbitkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No.11/PRT/M/2010 tentang Tata Cara dan Persyaratan Laik Fungsi Jalan. Peraturan ini dimaksudkan untuk menetapkan pedoman dan standar teknis untuk melaksanakan uji dan evaluasi serta penetapan Laik Fungsi Jalan untuk jalan umum yang meliputi: Jalan Nasional (Jalan Non Tol dan Jalan Tol), Jalan Provinsi, dan Jalan Kabupaten/Kota.

Binamarga (2014) menjelaskan ruas jalan yang Laik Fungsi adalah kondisi suatu ruas jalan yang memenuhi persyaratan teknis kelaikan untuk memberikan keselamatan bagi penggunaannya dan persyaratan administrasi yang memberikan kepastian hukum bagi penyelenggara jalan dan pengguna jalan sehingga jalan tersebut dapat dioperasikan untuk umum. Tujuan dari pelaksanaan penilaian kelaikan fungsi jalan adalah untuk memastikan bahwa jalan tersebut sesuai dengan standar kelaikan sehingga berkeselamatan bagi semua pengguna jalan. Penilaian kelaikan fungsi jalan pada daerah sensitif seperti hutan konservasi, kawasan hutan suaka alam, kawasan hutan pelestarian alam harus memperhatikan perlintasan satwa dan apabila terdapat satwa melintas badan jalan, tidak akan mengganggu keselamatan pengguna jalan maupun satwa itu sendiri.

Jembatan sebagai salah satu bangunan pelengkap jalan mempunyai peranan cukup penting dalam menjaga ketersambungan antara ruas jalan yang satu dengan yang lain. Oleh karena itu, mutlak juga diperlukan laik fungsi terhadap bangunan pelengkap jalan. Fokus penilaian dilakukan terhadap keberfungsian

struktur bangunan pelengkap jalan, yaitu antara lain meliputi keberfungsian dan keamanan struktur jembatan tersebut.

Keluaran Uji Laik Fungsi Jalan (ULFJ) adalah sertifikat kelaikan suatu ruas jalan yang menyatakan kelaikan fungsi suatu ruas jalan untuk dapat dioperasikan sebagai jalan umum atau tidak, dan Berita Acara Uji dan Evaluasi Laik Fungsi Jalan yang berisikan rekomendasi untuk memenuhi kelaikan fungsi jalan dan tahun pemenuhannya (Binamarga, 2014).

Uji Getar Pada Jembatan

Menurut Bien dan Zwolski (2007) terdapat beberapa macam uji getar yang lazim digunakan untuk memonitoring dan mengevaluasi struktur jembatan, yaitu :

(a) *Ambient Vibration Test*

Metode ini menggunakan kekuatan eksitasi getaran sekitar yang pada dasarnya tidak terukur. Sebagai akibatnya, metode analisis data yang dikembangkan untuk uji getaran paksa dan berdasarkan pada *Frequency Response Function (FRF)* harus digunakan dengan modifikasi. Beban eksitasi dapat berupa: lalu lintas normal, kendaraan khusus, getaran akibat angin dan gempa.

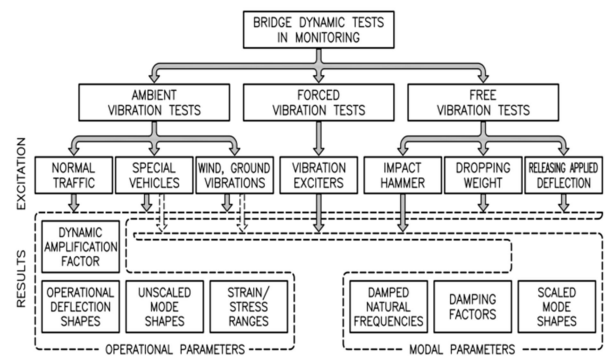
(b) *Forced Vibration Test*

Analisis ragam getar pada struktur jembatan kadang memerlukan metode eksitasi yang tepat agar semua mode ragam getar yang diselidiki dapat diamati. Struktur berat dan kaku, seperti jembatan beton bertulang, dengan redaman tinggi sering kali sulit untuk dilakukan eksitasi dengan beban lalu lintas normal. Diperlukan pembangkit getaran khusus yang didesain dapat menghasilkan beban kejut dalam rentang frekuensi yang berbeda. Beberapa diantaranya didasarkan pada prinsip rotasi-massa eksentris yang menghasilkan gaya vertikal atau horizontal dengan amplitudo yang bertambah secara eksponensial terhadap frekuensi eksitasinya. Selain itu, bisa juga dipergunakan perangkat yang dapat menghasilkan impuls tunggal ataupun seri dengan frekuensi pengulangan yang terkontrol, serta *shaker* elektro dinamis yang menghasilkan berbagai jenis sinyal (sinus, acak, kuasi-acak, dan sebagainya).

(c) *Free Vibration Test*

Metode uji getar ini banyak digunakan dalam monitoring dan evaluasi jembatan,

karena sifatnya yang sederhana, dimana eksitasi getaran dibutuhkan cukup satu impuls yang dihasilkan oleh beban eksitasi berupa: beban kejut (*impact hammer*), beban jatuh (*drop weight*), pelepasan defleksi secara tiba-tiba, dan lain-lain. Metode ini sangat efektif digunakan pada struktur fleksibel dengan redaman rendah. Metode uji getar ini memiliki kelebihan yang sama dengan metode *Forced Vibration Test* dan hasilnya dapat diproses dengan cara yang sama, perbedaannya hanya pada pengulangan beban eksitasinya.



Gambar 1. Uji getar pada jembatan (Bien dan Zwolski, 2007)

Uji getar yang dilakukan pada studi ini termasuk dalam metode *Free Vibration Test* dengan cara memberikan beban kejut (*impact load*) berupa truk yang melompati ganjal di atas lantai jembatan, sehingga getaran yang terjadi direkam dan diolah untuk akan mendapatkan parameter dinamik.

Parameter Dinamik

Uji getar yang dilakukan akan memberikan hasil berupa parameter dinamik, diantaranya frekuensi alami (*natural frequency*), rasio redaman (*damping ratio*) dan ragam getar (*mode shape*) suatu struktur (Bien dan Zwolski 2007, 2011). Berikut ini diuraikan parameter dinamik yang dapat diperoleh dari hasil uji getar, yaitu:

(a) Amplitudo

Waktu yang diperlukan oleh sistem untuk melakukan satu kali getaran disebut periode getar alami T_n (*natural period of vibration*) dan berhubungan dengan

frekuensi getar alami ω_n . Periode getar alami dinyatakan sebagai berikut :

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \text{ [det]} \dots \dots \dots (1)$$

(b) Frekuensi

Jumlah getaran yang dilakukan setiap detiknya disebut frekuensi f_n (*natural frequency*), dinyatakan sebagai berikut :

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [Hz/} \frac{\text{cyc}}{\text{sec}} \text{]} \dots \dots (2)$$

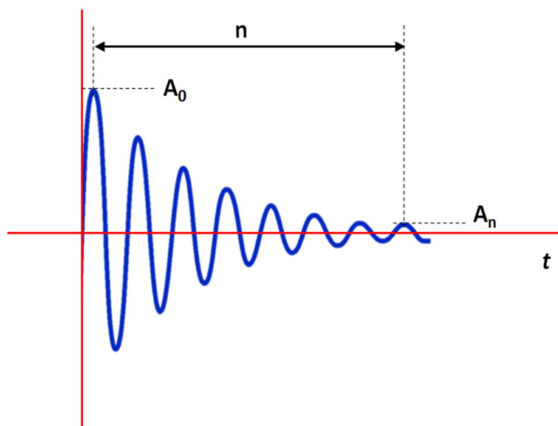
dimana, k = kekakuan struktur dan m = massa struktur.

(c) Rasio Redaman (ζ)

Rasio redaman adalah nilai redaman dalam bentuk bilangan non-dimensional yang menyatakan banyaknya disipasi energi untuk membatasi amplitudo getaran. Besarnya rasio redaman struktur dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{(2\pi)} \cdot \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \cdot 100 \text{ [%]} \dots \dots \dots (3)$$

dimana, ζ = redaman, δ = penurunan logarit-mik, n = jumlah osilasi, A_0 = amplitudo ke-1, dan A_n = amplitudo ke-n.



Gambar 2. Ilustrasi getaran teredam

Parameter dinamik hasil uji dapat digunakan untuk menilai kondisi kesehatan suatu struktur, termasuk didalamnya untuk mendeteksi adanya kerusakan struktur (Alampalli 2000, Maia et al 2003, Kimpraswil 2002). Menurut Ge dan Lui (2005), metode identifikasi kerusakan struktur dapat dilakukan dengan pendekatan fisik berdasarkan parameter dinamik, dimana perubahan properti kekakuan dan massa suatu sistem struktur dihubungkan oleh perubahan

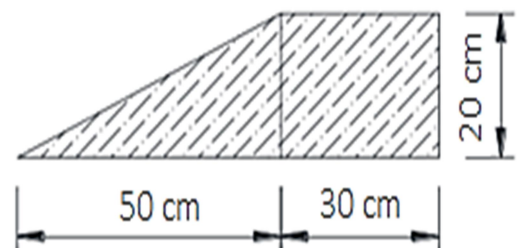
frekuensi alamiah dan ragam getarnya. Dari studi yang dilakukan pada sistem struktur dengan massa yang tetap, terjadi penurunan nilai frekuensi alami pada struktur yang mengalami kerusakan jika dibandingkan dengan struktur yang utuh, baik secara eksperimental maupun analitis. Dengan demikian, adanya perubahan kekakuan sistem struktur sangat erat kaitannya dengan perubahan nilai frekuensi alami struktur.

III. METODE PENELITIAN

Metode Pengujian

Binamarga (2012, 2018) menyajikan gambaran skema pelaksanaan uji getar pada jembatan, yaitu:

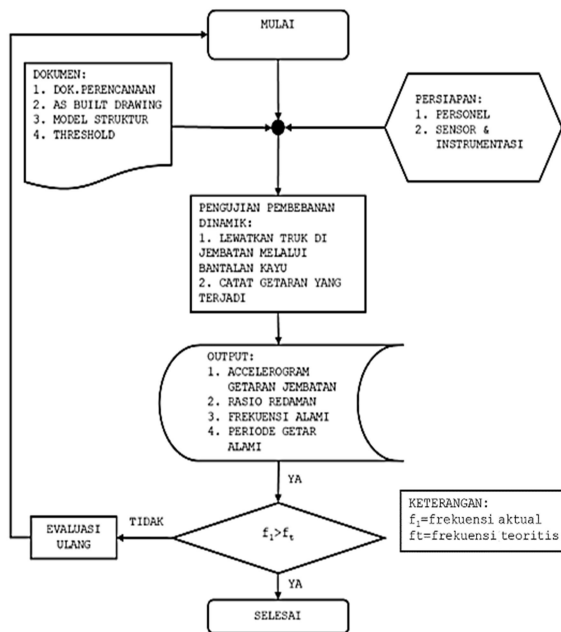
- Uji getar bertujuan mendapatkan parameter dinamik jembatan, seperti frekuensi alami, rasio redaman, dan ragam getar struktur sehingga dapat digunakan untuk menilai kondisi jembatan.
- Uji getar dapat dilaksanakan dengan eksitasi beban luar dengan *jumping test*, dimana roda depan truk akan melewati ganjal (*jumper*) dan kemudian akan terjun dari ketinggian 20 cm, sehingga menimbulkan beban kejut pada lantai jembatan.



Gambar 3. Ganjal atau *jumper*

- Alat uji yang diperlukan adalah sensor *accelerometer* yang diletakkan di titik-titik yang telah direncanakan atau di tengah bentang. Respon getaran jembatan akan direkam oleh sensor *accelerometer* dan selanjutnya diolah untuk menentukan *frequency respons fuction* (FRF) dan parameter dinamik lainnya.
- Evaluasi uji getar dengan cara membandingkan parameter dinamik hasil uji dengan teoritisnya. Kinerja jembatan dikatakan baik apabila frekuensi alami dan rasio redaman hasil uji minimal sama atau lebih besar dibandingkan nilai teoritisnya.

Metode uji getar jembatan secara runtut disajikan dalam diagram alir pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan alir pelaksanaan uji getar pada jembatan (Binamarga, 2018)

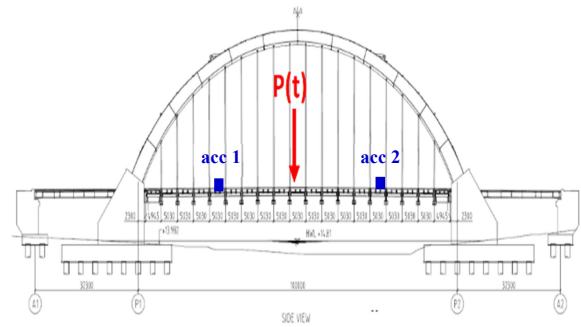
Data Jembatan

Jembatan Kalikuto terletak pada ruas tol Semarang-Batang, Kec. Weleri, Kab. Batang, Jawa Tengah yang merupakan bagian dari Jalan Tol Trans Jawa. Jembatan ini menyeberangi Kali Kuto dengan bangunan atas berupa pelengkung boks baja atau *steel box arch bridge*, memiliki bentang 100 meter dan lebar 32 meter dengan total 6 lajur. Masing-masing 3 lajur untuk arah Batang-Semarang dan sebaliknya 3 lajur untuk arah Semarang-Batang.



Gambar 5. Jembatan Kalikuto (google.com/maps)

Posisi beban kejut berupa truk dan *jumper* di tempatkan pada posisi tengah bentang. Sensor *accelerometer* dipasang tepat pada permukaan lantai jembatan dengan posisi pada L/4 dan L/3/4 dari bentang jembatan. Penempatan posisi beban dan sensor dapat dilihat pada Gambar 6, 7 dan 8.



Gambar 6. Posisi beban kejut dan sensor *accelerometer* (PT. Risen Eng. Consult, 2018)



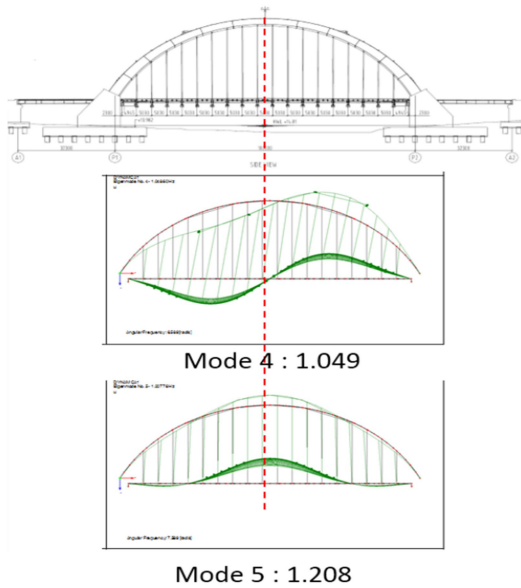
Gambar 7. Sensor *accelerometer* (PT. Risen Eng. Consult, 2018)



Gambar 8. Beban kejut truk dan *jumper* (PT. Risen Eng. Consult, 2018)

Pemodelan dan Frekuensi Teoritis

Untuk mendekati nilai frekuensi teoritis jembatan, dilakukan pemodelan struktur jembatan. Analisis struktur tiga dimensi ini dilakukan untuk mengetahui parameter dinamik pada saat struktur menerima eksitasi getaran. Output frekuensi hasil pemodelan (teoritis) dibandingkan dengan frekuensi hasil uji getar (aktual). Dalam hal ini, frekuensi yang ditinjau yaitu frekuensi arah vertikal, dimana kondisi struktur mengalami bending mode dalam arah vertikal (*vertical bending mode*).

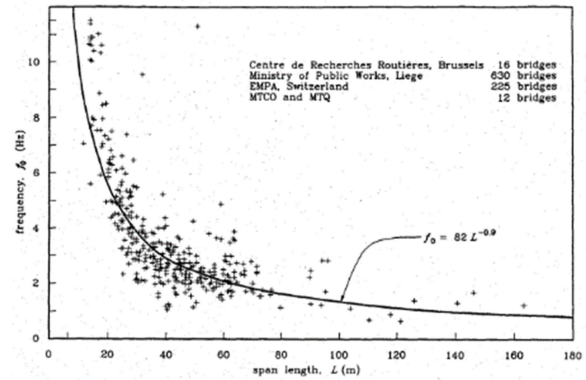


Gambar 11. Pola ragam getar (*mode shape*) ke-4 dan ke-5 arah vertikal hasil pemodelan (PT.Risen Eng. Consult, 2018)

Melihat pola ragam getar hasil pemodelan, didapatkan bahwa *vertical bending mode* terjadi pada ragam getar (*mode shape*) ke-4 dan ke-5, di mana *1st vertical bending* terjadi pada ragam getar ke-4 dengan nilai frekuensi rencana 1,049 Hz dan *2nd vertical bending* terjadi pada ragam getar ke-5 dengan nilai frekuensi rencana 1,208 Hz.

Sebagai pembanding hasil frekuensi uji, pendekatan frekuensi dapat dilakukan menggunakan rumus korelasi berdasar penelitian dari Chaallal dan Shahawy (1998), dimana nilai frekuensi alami (f_o) suatu jembatan berhubungan dengan bentang maksimum (L_{max}) jembatan dengan rumus korelasi sebagai berikut:

$$f_o = 82 L_{max}^{-0.9} [Hz] \dots \dots \dots (4)$$



Gambar 12. Nilai frekuensi fundamental vs bentang jembatan (Chaallal dan Shahawy, 1998)

Rumus korelasi tersebut didapatkan berdasarkan uji getar yang dilaksanakan terhadap 898 jembatan jalan raya di Eropa dalam hal untuk mendapatkan hubungan antara nilai frekuensi fundamental dengan panjang bentang jembatan. Persamaan tersebut sering digunakan karena memberikan hasil korelasi deterministik yang cukup baik untuk jembatan dengan bentang yang sama.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pelaksanaan uji getar dilakukan secara berulang dan dipastikan terekam pada setiap posisi sensor. Hal ini untuk memastikan bahwa data respon dinamik yang terekam memberikan nilai yang identik satu dengan yang lain sehingga dapat meminimalisir kesalahan dalam proses pengambilan data tersebut.

Data yang digunakan dalam studi merupakan data rekaman hasil pembacaan sensor *accelerometer*, dimana data tersebut dalam domain waktu (*time domain*) yang menggambarkan perubahan yang terjadi setiap waktu. Respon struktur dalam domain waktu tersebut diubah ke dalam domain frekuensi (*frequency domain*) dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT).

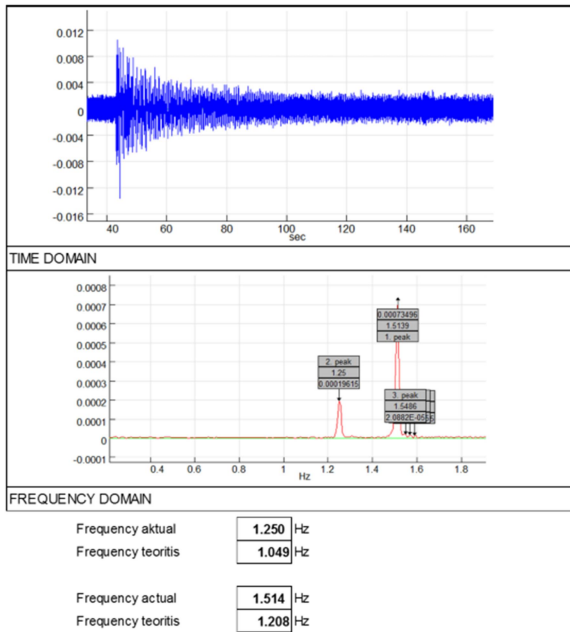
Proses pengolahan data rekaman sensor *accelerometer* dilakukan melalui tahapan:

- a) *Normalisasi*, dengan membuat nilai dari data awal sensor *accelerometer* menjadi sama dengan nol.
- b) *Filtering*, dengan mengeliminir data yang tidak masuk dalam rentang pemantauan.

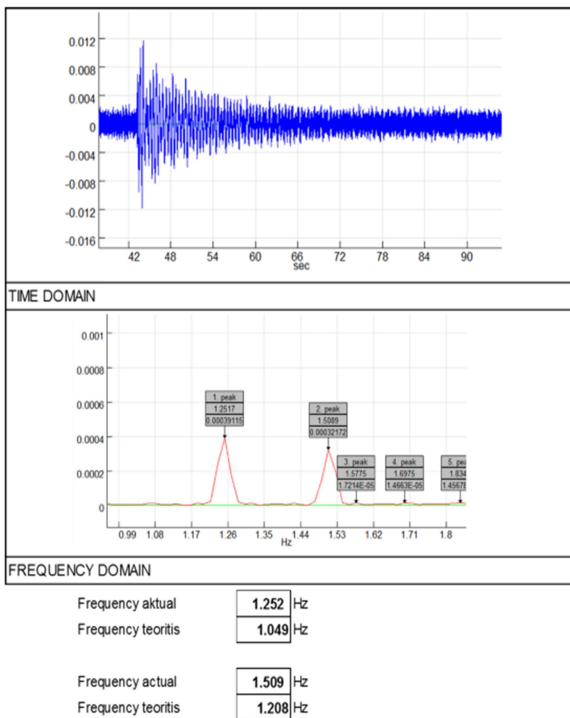
Proses *filtering* ini didasarkan pada frekuensi rencana yang akan ditinjau, yaitu frekuensi pada *mode shape* ke-4 dan ke-5 hasil pemodelan, di

mana nilainya berada pada rentang 1-2 Hz. Dalam hal ini, data frekuensi uji yang lebih kecil dari 0,5 Hz dan lebih besar dari 2,0 Hz tidak akan ditinjau.

Gambar 13 dan 14 memperlihatkan hasil pengukuran sensor *accelerometer* selama uji getar dalam domain waktu dan frekuensi.



Gambar 13. Hasil pembacaan uji getar pada sensor acc 1



Gambar 14. Hasil pembacaan uji getar pada sensor acc 2

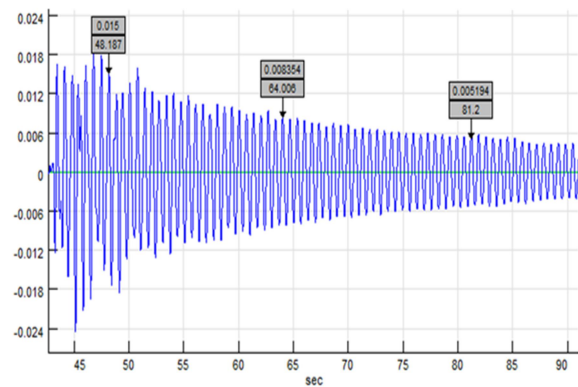
Tabel 1. Rekap frekuensi hasil uji getar

Vertical bending	f-teoritis (Hz)	f-uji (Hz)	Rerata f-uji (Hz)	Selisih relatif (%)
1st	1,049	1,250 1,252	1,251	16.15
2nd	1,208	1,514 1,509	1,512	20.10

Dari Tabel 1 didapatkan frekuensi rerata hasil uji yang berdekatan, yaitu 1,251 Hz untuk *1st vertical bending mode* dan 1,512 Hz untuk *2nd vertical bending mode*. Kedua nilai frekuensi terukur tersebut lebih besar dibandingkan frekuensi teoritis atau rencana hasil pemodelan, yaitu sebesar 16,15% terhadap 1,049 Hz dan 20,10 % terhadap 1,208 Hz.

Dengan menggunakan rumus korelasi pada persamaan (4), dimana bentang jembatan sebesar 100 meter, maka diperoleh nilai fundamental frekuensi (f_0) sebesar 1,300 Hz. Nilai tersebut mendekati frekuensi terukur hasil uji pada *1st vertical bending mode*, yaitu 1,251 Hz (selisih 3.92%), dimana membuktikan bahwa proses pengambilan dan pengolahan data uji sudah tepat.

Rasio redaman diperoleh dengan menggunakan persamaan (3) berdasarkan data hasil pengukuran sensor *accelerometer* yang disajikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Data *time history* hasil uji getar

Tabel 2. Rasio redaman jembatan

Titik	n	A_0	A_n	ζ (%)
1-25	24	0,01500	0,00835	3,88
15-51	36	0,00835	0,00519	2,10

Merujuk Tabel 2 di atas, didapatkan nilai rasio redaman jembatan sebesar 2,10% - 3,88%.

V. KESIMPULAN

Pengujian getar dapat dijadikan salah satu alternatif metode untuk penerimaan kelayakan struktur jembatan dan sebagai dokumen pendukung dalam penetapan laik fungsi jalan. Nilai frekuensi vertikal hasil uji masih di atas nilai frekuensi teoritis [$f_1 = 1,251 \text{ Hz} > f_t = 1,049 \text{ Hz}$]. Hal ini menunjukkan kekakuan aktual struktur jembatan lebih tinggi dibandingkan prediksi kekakuan teoritisnya, maka jembatan dikatakan mempunyai performa yang baik. Nilai frekuensi vertikal hasil uji mendekati frekuensi fundamental berdasarkan rumus korelasi antara frekuensi alami uji dan panjang bentang jembatan yang diusulkan oleh Chaallal dan Shahawy (1998). Rasio redaman jembatan berdasarkan hasil pengukuran sebesar 2,10% - 3,88%.

DAFTAR PUSTAKA

- Alampalli, S. 2000. Effects of Testing, Analysis, Damage, and Environment on Modal Parameters, *Mechanical Systems and Signal Processing* 14(1): 63–74
- Bien, J and Zwolski, J, 2007, *Dynamic Test in Bridge Monitoring – Systematics and Applications*, Polandia
- Bien, J and Zwolski, J, 2011, Modal Analysis of Bridge Structures by Means of Forced Vibration Test, *Journal of Civil Engineering and Management* Vol 17(4) hal.590-599, Polandia
- Binamarga, 2012, Laporan Swakelola Penilaian Kondisi Jembatan Untuk Laik Fungsi Dengan Uji Getar, Jakarta.
- Binamarga, 2014, Petunjuk Teknis Nomor: 09/P/BM/2014 tentang Petunjuk Pelaksanaan Kelaikan Fungsi Jalan, Jakarta
- Binamarga, 2018, Laporan Uji Pembebanan Statik dan Dinamik Jembatan Holtekamp-Provinsi Papua, Jakarta
- Chaallal, O and M. Shahawy, 1998, Technical Report No.ETS.DRDR.98.1: Experimental Evaluation of Dynamic Amplification for Evaluation of Bridge Performance, Canada
- Ge, M., Lui, E. M., 2005, Structural Damage Identification using System Dynamic Properties, *Journal Computers and Structures*, 83, 2185-2196
- Kementerian Pekerjaan Umum, 2010, Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor: 11/PRT/M/2010 tentang Tata Cara Dan Persyaratan Laik Fungsi Jalan, Jakarta
- Kimpraswil, 2002, Pedoman Konstruksi dan Bangunan Nomor: Pt T-05-2002-B tentang Penilaian Kondisi Jembatan Untuk Bangunan Atas Dengan Cara Uji Getar, Jakarta
- Maia, N. M. M.; Silva, J. M. M.; Almas, E. A. M.; Sampaio, R. P. C, 2003, Damage Detection in Structures: From Mode Shape to Frequency Response Function Methods, *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(3): 489–498
- PT. Risen Engineering Consult, 2018, Laporan Hasil Uji Beban Statik dan Dinamik Jembatan Kalikuto Jawa Tengah, Depok