

ANALISA KORELASI ANTARA FREKUENSI DENGAN BENTANG JEMBATAN BERDASARKAN UJI DINAMIK (CORRELATION ANALYSIS BETWEEN FREQUENCY AND BRIDGE SPAN BASED ON DYNAMIC TEST)

Hinawan T. Santoso¹⁾, Laely F. Hidayatiningrum²⁾, Adityo B. Utomo³⁾,
Juandra Hartono⁴⁾, Masrianto⁵⁾

^{1, 2, 3, 4, 5)}Politeknik Pekerjaan Umum

^{1, 2, 3, 4, 5)}Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Kota Semarang

e-mail: ¹⁾hinawan.santoso@politeknikpu.ac.id, ²⁾laely.hidayatiningrum@politeknikpu.ac.id,

³⁾adityo.utomo@politeknikpu.ac.id, ⁴⁾juandra.hartono@politeknikpu.ac.id, ⁵⁾masrianto167@yahoo.com

Diterima: 28 Januari 2021; direvisi: 3 Juni 2021; disetujui: 11 Juni 2021;

ABSTRAK

Populasi jembatan di jalan nasional pada tahun 2020 mencapai 21.054 buah dengan total panjang 587.309 meter. Sekitar 10,5% jembatan berada pada masa layan kurang dari 10 tahun, 68,1% pada rentang 10 - 50 tahun, dan 5,3% lebih dari 50 tahun. Seiring bertambahnya masa layan maka kondisi jembatan akan mengalami penurunan. Nilai kondisi ini diperoleh dari hasil pemeriksaan detail dengan metode visual. Keakuratan metode ini sangat tergantung pada objektivitas, kemampuan, dan pengalaman inspektur jembatan. Populasi jembatan yang besar, variasi umur layan dan kondisi, serta keterbatasan inspektur menjadi kendala dalam pemeriksaan jembatan secara konvensional. Sebagai alternatif, uji dinamik dapat digunakan untuk pemeriksaan kondisi jembatan secara lebih cepat dan akurat. Frekuensi alami dari uji dinamik dapat digunakan untuk mengetahui kondisi keutuhan dan tingkat kerusakan struktur, yaitu dengan membandingkannya terhadap frekuensi teoritisnya. Selama ini, frekuensi teoritis ditentukan berdasarkan perhitungan atau pemodelan struktur. Keterbatasan data spesifikasi teknis, gambar rencana, dan gambar terlaksana sering menjadi kendala. Pengalaman dan keahlian khusus juga sangat dibutuhkan dalam perhitungan dan pemodelan struktur ini. Penelitian ini bertujuan menganalisis korelasi antara frekuensi dan bentang jembatan berdasar data uji dinamik jembatan di Indonesia. Hasil penelitian diperoleh suatu rumusan matematis, dimana nilai frekuensi jembatan berkorelasi terhadap bentang jembatan dengan koefisien korelasi sebesar -0,85. Koefisien ini menunjukkan bahwa hubungan antar variabel yang ditinjau sangat kuat dan bersifat terbalik, dimana semakin panjang bentang jembatan maka nilai frekuensi vertikal jembatan tersebut semakin kecil.

Kata Kunci: uji dinamik, bentang jembatan, frekuensi vertikal, analisis korelasi, rumusan matematis

ABSTRACT

The population of bridges on National Road in 2020 has reached 21,054 units with a total length of 587,309 meters. About 10.5% of bridges have a service life of less than 10 years, 68.1% in the range of 10 - 50 years, and 5.3% more than 50 years. As the service life increases, the condition of the bridge will decrease. This bridge condition is obtained from the results of a detailed inspection using the visual method. The accuracy of this method is highly dependent on the objectivity, ability, and experience of the bridge inspector. The large population of bridges, variations in service life and conditions, and limited experienced inspectors are obstacles in conventional bridge inspections. As an alternative, the dynamic test method can be used to check bridge conditions more quickly and accurately. The natural frequency of the dynamic test can be used to determine the integrity condition and the level of structural damage, by comparing it to the theoretical frequency. So far, the theoretical frequency is determined based on calculations or structural modeling. The limited data of technical specifications, design drawings, and as-built drawings are often an obstacle. Experience and special skills are also needed in calculating or modeling this structure. This study aims to analyze the correlation between frequency and bridge span based on bridge dynamic test data in Indonesia. The results obtained a mathematical formula, where the value of the frequency of the bridge is correlated to the span of the bridge with a correlation coefficient of -0.85. This coefficient shows that the relationship between the variables under consideration is very strong and inverse, where the longer the bridge span, the smaller the vertical frequency value of the bridge

Keywords: dynamic test, bridge span, vertical frequency, correlation analysis, mathematical formula

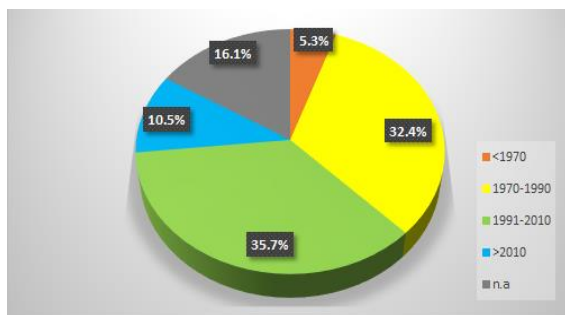
PENDAHULUAN

Berdasarkan data pemeriksaan jembatan *INVI-J* tahun 2020 terdapat 21.054 buah jembatan pada ruas Jalan Nasional dengan total panjang 587.309 meter (Indonesia 2020).

Tabel 1. Distribusi jembatan berdasar tahun bangun

Tahun Bangun	Umur (tahun)	Jumlah Jembatan	Persentase (%)
< 1970	> 50	1108	5,26
1970 – 1990	50 – 30	6823	32,41
1991 – 2010	30 – 10	7513	35,68
> 2010	< 10	2218	10,53
Tidak tersedia	n/a	3392	16,11

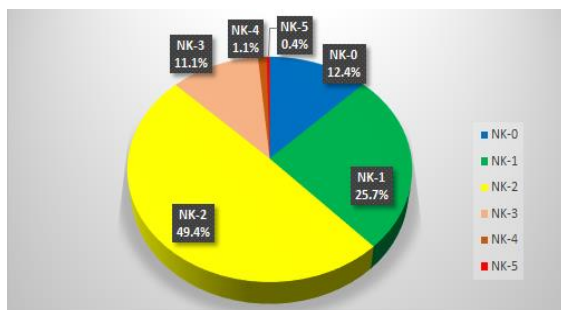
Sumber: Indonesia (2020)



Sumber: Indonesia (2020)

Gambar 1. Distribusi jembatan berdasar tahun bangun

Merujuk Tabel 1 dan Gambar 1 terdapat sekitar 5,3% jembatan dengan masa layan lebih dari 50 tahun. Mayoritas 68,1% jembatan berada pada rentang masa layan 10 - 50 tahun, dan hanya 10,5% yang tergolong jembatan baru dengan masa layan kurang dari 10 tahun, serta sekitar 16,1% tidak diketahui datanya. Menurut kriteria desain jembatan Kementerian PUPR 2017, umur rencana dari jembatan standar adalah 50 tahun untuk komponen-komponen utama jembatan.



Sumber: Indonesia (2020)

Gambar 2. Distribusi jembatan berdasar Nilai Kondisi (NK)

Gambar 2 menunjukkan distribusi nilai kondisi jembatan di Indonesia. Nilai kondisi (NK) ini menunjukkan kondisi kesehatan

jembatan berdasarkan metode survei yang dikembangkan oleh Departemen PU dalam *Bridge Management System (BMS) 1992*. NK-0: menunjukkan jembatan masih dalam kondisi baru dan tanpa kerusakan, NK-1: kondisi rusak ringan, NK-2: kondisi rusak sedang, NK-3: kondisi rusak berat dan kemungkinan menjadi kritis dalam 12 bulan, NK-4: kondisi kritis dan membutuhkan perhatian segera, serta NK-5: jembatan runtuh atau tidak berfungsi lagi (Indonesia 1993). Mayoritas sebesar 60,5% jembatan berada di NK-2 dan NK-3, yang artinya perlu segera dilakukan penanganan agar tidak berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius atau bahkan menjadi kritis.

Nilai kondisi jembatan tersebut diperoleh melalui penilaian terhadap kerusakan fisik jembatan, yaitu material dan struktural jembatan berdasarkan survei visual dan detail jembatan. Sisi pengalaman dan objektivitas dari inspektur jembatan menjadi kunci utama keakuratan hasil penilaian kondisi jembatan. Saat ini, keterbatasan jumlah peralatan dan inspektur jembatan yang kompeten serta berpengalaman tidak sebanding dengan besarnya populasi jembatan yang harus diperiksa, baik di Jalan Nasional, Jalan Propinsi, maupun Jalan Kabupaten/Kota. Oleh karena itu, dipandang perlu untuk digunakan suatu metode pemeriksaan jembatan yang efektif dan efisien dengan hasil yang *reliable*. Departemen Kimpraswil 2002 telah mengeluarkan *Pedoman Penilaian Kondisi Jembatan Untuk Bangunan Atas Dengan Cara Uji Getar* yang dapat dijadikan alternatif penilaian kondisi jembatan.

Uji getar atau dinamik merupakan metode pemeriksaan tidak merusak yang dilakukan dengan cara memberikan eksitasi beban sehingga didapatkan besaran parameter dinamik jembatan, antara lain: periode, frekuensi, rasio redaman, dan sebagainya. Setiap perubahan parameter dinamik yang terjadi pada struktur dapat menggambarkan korelasi antara kondisi struktural dengan laju kerusakannya (Indonesia 2002).

Bien dan Zwolski 2007 memberikan beberapa jenis uji getar atau dinamik yang lazim digunakan untuk memonitoring dan mengevaluasi suatu struktur jembatan, yaitu:

(a) *Ambient Vibration Test*

Metode ini menggunakan kekuatan eksitasi getaran sekitar yang pada dasarnya tidak

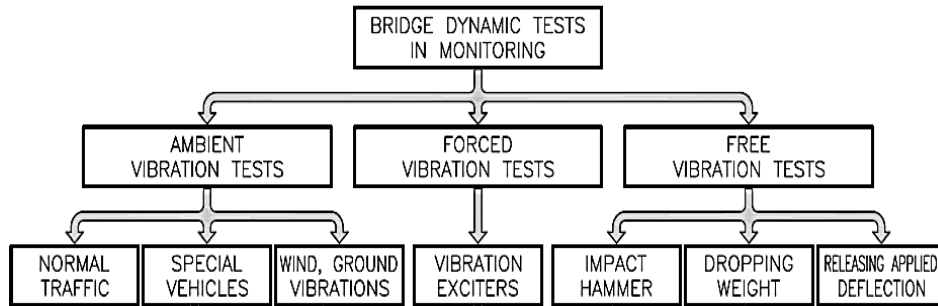
terukur. Beban eksitasi dapat berupa: lalu lintas normal, kendaraan khusus, getaran akibat angin dan gempa. Keterbatasan metode: analisis data banyak dikembangkan hanya untuk uji getaran paksa, sehingga penggunaan untuk metode ini harus dilakukan modifikasi

(b) *Forced Vibration Test*

Analisis dinamik pada struktur berat dan kaku, misal jembatan beton, kadang mensyaratkan metode eksitasi yang tepat agar semua mode ragam getar yang diselidiki dapat diamati. Struktur dengan redaman tinggi sering kali sulit untuk dieksitasi menggunakan lalu lintas normal. Diperlukan alat eksiter khusus yang didesain dapat menghasilkan beban kejut dalam rentang frekuensi yang berbeda.

(c) *Free Vibration Test*

Metode ini banyak digunakan dalam monitoring dan evaluasi jembatan, dimana eksitasi getaran yang dibutuhkan cukup satu impuls yang dihasilkan oleh beban eksitasi berupa: palu kejut (*impact hammer*), beban jatuh (*drop weight*), atau pelepasan defleksi secara tiba-tiba. Metode ini sangat efektif digunakan pada struktur fleksibel dengan redaman yang rendah. Metode uji getar ini memiliki kesamaan dengan metode *Forced Vibration Test* dan hasilnya juga dapat diproses dengan cara yang sama. Perbedaannya terletak pada jenis beban dan pengulangan beban eksitasinya.



Sumber: J. Bien dan J. Zwolski (2007)

Gambar 3. Jenis metode uji dinamik pada jembatan

Uji dinamik yang digunakan pada penelitian ini termasuk dalam metode *Free Vibration Test*, yaitu menggunakan beban eksitasi berupa truk bermuatan yang dijatuhkan dari ganjal dengan ketinggian 20 cm di atas lantai pada tengah bentang jembatan (Indonesia 2012). Getaran yang terjadi akan direkam oleh sensor akselerometer untuk selanjutnya diolah dan dianalisis menjadi parameter dinamik jembatan.



Sumber: PT. PDCM (2019)

Gambar 4. Pelaksanaan uji dinamik

Dalam pedoman Departemen Kimpraswil 2002 dijelaskan bahwa penilaian kondisi jembatan dengan uji getar dapat diperoleh beberapa parameter dinamik, salah satunya adalah frekuensi natural atau alami struktur. Frekuensi merupakan ukuran kekakuan dan keutuhan suatu struktur, dimana perubahan periodik dalam parameter dinamik memberikan korelasi kondisi struktural dengan tingkat laju kerusakan. Rumus perhitungan nilai kerusakan struktural relatif ($D_{relatif}$) dihitung dengan menggunakan rumus:

$$D_{relatif} = \frac{(f_{teoritis} - f_{aktual})}{f_{teoritis}} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

f_{aktual} : frekuensi alami hasil uji.

$f_{teoritis}$: frekuensi alami teoritis/rencana.

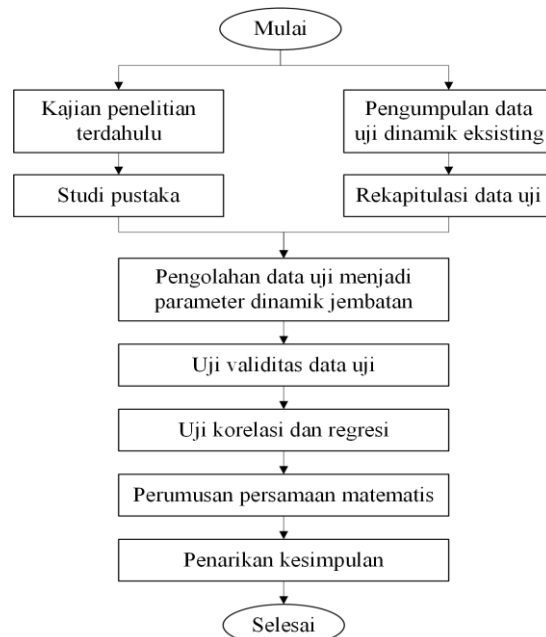
Namun demikian, terdapat kendala yang ditemui di lapangan dalam menghitung kerusakan struktural relatif ini, yaitu penentuan besarnya nilai frekuensi teoritis. Nilai frekuensi teoritis dapat diperoleh melalui perhitungan dan/atau pemodelan struktur jembatan menggunakan metode elemen hingga (*FEM*). Keterbatasan data spesifikasi teknis, gambar perencanaan (*DED*), gambar terlaksana (*asbuilt drawing*), serta diperlukannya pengalaman dan keahlian khusus dalam pemodelan struktur menjadi kendala dalam mendapatkan nilai frekuensi teoritis. Merujuk pada latar belakang tersebut, dirasa perlu untuk dilakukan suatu penelitian untuk mendapatkan pendekatan empiris frekuensi struktur melalui analisis korelasi antara frekuensi jembatan terhadap bentang jembatan berdasarkan data uji dinamik eksisting. Harapannya, dengan didapatkannya korelasi serta rumusan frekuensi tersebut, maka dapat digunakan sebagai alternatif referensi dalam penentuan frekuensi teoritis pada penilaian kondisi jembatan dengan uji getar.

HIPOTESIS

Frekuensi struktur jembatan dapat dibuat menjadi suatu rumusan matematis berdasarkan data hasil uji dinamik eksisting, dimana frekuensi jembatan sangat dipengaruhi dan berkorelasi terhadap panjang bentang jembatan yang ditinjau.

METODOLOGI

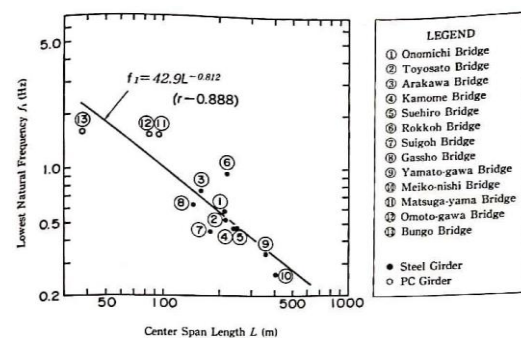
Tahapan penelitian diawali dengan kajian terhadap penelitian terdahulu yang relevan dan studi pustaka terkait. Tahapan ini dilakukan secara paralel dengan kegiatan pengumpulan dan rekapitulasi data uji dinamik eksisting. Tahapan berikutnya berupa pengolahan data uji menjadi parameter dinamik, uji validitas data, uji korelasi dan uji regresi, serta berturut-turut hingga tahap akhir berupa perumusan persamaan matematis dan penarikan kesimpulan. Tahapan dari penelitian disajikan dalam diagram alir pada Gambar 5.



Gambar 5. Bagan alir metodologi penelitian

Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang relevan dan dijadikan referensi pada penelitian ini adalah kajian eksperimental oleh Kawashima, Unjoh, dan Tsunomoto 1991 pada 13 jembatan *cable-stayed* dengan rentang bentang antara 40 – 400 m.



Sumber: Kawashima, Unjoh, dan Tsunomoto (1991)

Gambar 6. Frekuensi alami terendah vs panjang bentang tengah (rerata pada segala arah)

Dalam kajiannya, Kawashima et al. memberikan korelasi antara frekuensi alami dengan panjang bentang tengah jembatan:

$$f_1 = 42,9 L^{-0,812} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- f_1 : frekuensi alami rerata segala arah (Hz).
- L : panjang bentang tengah jembatan (m).

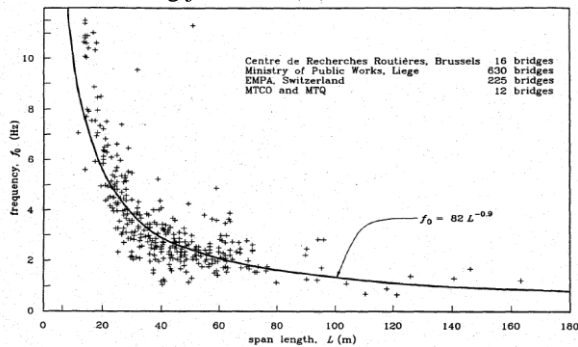
Chaallal dan Shahawy 2002 juga melakukan kajian eksperimental pada jembatan dengan kesimpulan bahwa frekuensi alami (f_o) berkorelasi dengan bentang maksimum (L_{max}) jembatan, yaitu:

$$f_o = 82 L_{max}^{-0.9} \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

f_o : frekuensi fundamental jembatan (Hz).

L_{max} : bentang jembatan (m).



Sumber: O. Chaallal dan M. Shahawy (2002)

Gambar 7. Frekuensi fundamental terhadap bentang untuk 898 buah jembatan jalan raya

Rumus korelasi tersebut diturunkan berdasar uji getar yang dilaksanakan terhadap 898 jembatan jalan raya di Belgia dan Swiss untuk mendapatkan hubungan antara nilai frekuensi fundamental dengan panjang bentang jembatan. Persamaan ini sering digunakan karena memberikan hasil korelasi deterministik yang cukup baik untuk jembatan dalam rentang bentang yang sama. Namun demikian, korelasi tersebut terbatas untuk jembatan dengan bentang jembatan 10meter sampai dengan maksimum 180meter.

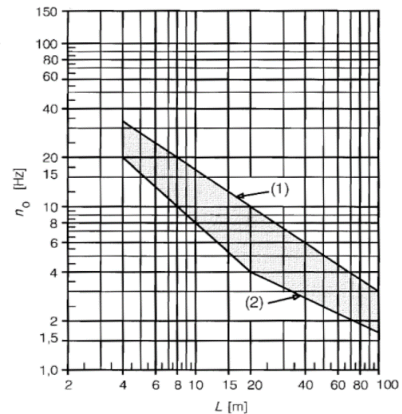
Kajian selanjutnya dilakukan oleh Graße 2009 dimana frekuensi alami (n_o) berhubungan dengan bentang jembatan (L) dengan korelasi:

▪ Batas atas:
 $n_o = 94.76 L^{-0.748} \dots \dots \dots (4)$

▪ Batas bawah:
 $n_o = 80/L$ untuk $4m \leq L \leq 20m \dots \dots \dots (5)$

$n_o = 23.58 L^{-0.592}$ untuk $20m \leq L \leq 100m \dots \dots \dots (6)$

Namun demikian, penggunaan rumus korelasi ini terbatas pada jembatan dengan panjang bentang 4 meter sampai dengan maksimum 100 meter.



Key
 (1) Upper limit of natural frequency
 (2) Lower limit of natural frequency

Sumber: Graße (2009)

Gambar 8. Batasan frekuensi alami jembatan sebagai fungsi bentang jembatan

Data penelitian

Data dasar yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Data luaran uji dinamik, yaitu data percepatan yang dihasilkan oleh sensor akselerometer, bersifat masih mentah, belum diolah, atau belum mengalami proses normalisasi dan penyaringan (*filtering*). Data percepatan selanjutnya diolah menjadi data parameter dinamik jembatan, meliputi: frekuensi alami, periode, dan rasio redaman dari struktur. Data yang digunakan berasal dari pengujian dinamik terhadap 117 buah jembatan di Indonesia sejak tahun 2009 sampai dengan tahun 2020, dengan berbagai variasi jenis/tipe bangunan atas jembatan, bentang, material, serta sistem perletakan jembatan. Dalam kajian ini memiliki keterbatasan dalam jumlah sampel untuk tipe jembatan gantung (*suspension*) yang ada 1 data dari jumlah 117 sampel.
2. Data perencanaan dan data teknis jembatan terhadap jembatan yang diuji dapat berupa: dokumen perencanaan, gambar rencana, gambar terlaksana, dan hasil pemodelan jembatan menggunakan metode elemen hingga (*FEM*) atau program komputer. Dalam kondisi dimana data tersebut tidak tersedia, maka digunakanlah data dukung lain yang relevan berupa: hasil pemeriksaan inventarisasi jembatan, hasil pemeriksaan visual dan detail jembatan, serta gambar standar jembatan yang dikeluarkan Ditjen Bina Marga.

3. Data luaran uji dinamik dan data teknis lainnya didapatkan dari Ditjen Bina Marga - PUPR, PT. LAPI Ganeshatama Consulting, PT. PDCM, PT. Testindo, serta pihak-pihak terkait lainnya.

Skenario pengujian

Skenario pengujian terhadap data uji dinamik eksisting dilaksanakan dalam 3 tahapan, yaitu: tahap awal, antara, dan akhir. Tahap awal pengujian data berupa pembuatan hipotesis yang akan dibuktikan, yaitu:

- a. Hipotesis H_0 : Tidak terdapat hubungan antara variabel bentang jembatan dengan frekuensi;
- b. Hipotesis H_1 : Terdapat hubungan antara variabel bentang jembatan dengan frekuensi.

Tahapan selanjutnya adalah tahap antara, yaitu uji korelasi. Namun, sebelum uji korelasi dilaksanakan maka perlu dilakukan uji normalitas dari distribusi data. Apabila data berdistribusi normal, maka uji korelasi dapat dilanjutkan dengan menggunakan uji korelasi *Pearson*. Namun, apabila variabel yang diuji tidak berdistribusi normal, maka uji korelasi non-parametrik dilakukan menggunakan uji *Spearman's Rho*. Uji korelasi bertujuan menguji hubungan variabel frekuensi vertikal dan bentang jembatan dengan tipe:

- a. Material bangunan atas jembatan, yaitu berupa: beton dan baja;
- b. Sistem perletakan, yaitu berupa: tumpuan sederhana (*simply supported*) dan tumpuan menerus (*continuous span*).

Tahap akhir berupa pembuatan model hubungan dengan analisis regresi dan uji model tersebut dengan uji F dan uji T untuk mendapatkan rumusan matematis frekuensi jembatan.

Uji Normalitas

Uji normalitas dilakukan dengan tujuan untuk menilai sebaran data pada sekelompok data atau variabel, sehingga dapat diketahui apakah sebaran data tersebut berdistribusi normal ataukah tidak. Uji normalitas berguna untuk menentukan data yang telah dikumpulkan berdistribusi normal atau diambil dari populasi normal. Apabila data berdistribusi normal, maka uji korelasi dapat dilakukan menggunakan korelasi *Pearson*. Namun bila tidak berdistribusi normal, maka

uji korelasi dapat dilakukan menggunakan korelasi *Spearman*.

Uji Korelasi

Korelasi atau teknik pengukuran asosiasi digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan antara dua variabel atau lebih. Pengukuran asosiasi ini mempergunakan nilai numerik untuk mengetahui tingkatan asosiasi atau kekuatan hubungan antar variabel. Dua variabel dikatakan berasosiasi jika perilaku variabel yang satu mempengaruhi variabel yang lain. Jika tidak terjadi pengaruh, maka kedua variabel tersebut disebut independen.

Terdapat banyak teknik uji korelasi dalam statistik, dua diantaranya yang populer digunakan adalah korelasi *Pearson* dan korelasi *Spearman*. Korelasi *Pearson* cocok digunakan untuk data kontinu dan data diskrit. Korelasi ini digunakan untuk statistik parametrik dengan data berjumlah besar dan memiliki ukuran parameter seperti *mean* dan standar deviasi populasi. Korelasi *Pearson* menghitung korelasi dengan menggunakan variasi data, dimana keragaman data dapat menunjukkan korelasi antar variabel. Korelasi ini dapat menghitung data apa adanya dan tidak membuat ranking atas data yang digunakan seperti pada korelasi *Spearman*.

Korelasi *Spearman* digunakan untuk uji statistik non-parametris apabila ingin mengetahui hubungan antara 2 (dua) subjek dengan sumber data yang berasal dari subjek yang berbeda. Dalam hal ini, koefisien korelasi digunakan untuk mengukur derajat erat dan tidaknya hubungan antara satu variabel terhadap variabel lainnya, dimana pengamatan pada masing-masing variabel tersebut didasarkan pada pemberian peringkat tertentu yang sesuai dengan pengamatan serta pasangannya.

Diantara beberapa asumsi dasar yang digunakan pada uji korelasi, yaitu bahwa kedua variabel yang ditinjau bersifat independen satu dengan lainnya, artinya masing-masing variabel berdiri sendiri dan tidak tergantung satu dengan lainnya. Beberapa karakteristik dari uji korelasi adalah sebagai berikut:

- a. Kisaran nilai korelasi mulai dari 0 sampai dengan 1 dan dapat bernilai positif atau juga negatif.

- b. Korelasi sama dengan 0 (nol), artinya tidak ada hubungan antara dua variabel.
- c. Korelasi sama dengan +1 (positif satu), artinya kedua variabel mempunyai hubungan linier sempurna positif. Korelasi ini mempunyai makna jika nilai x naik, maka nilai y juga naik.
- d. Korelasi sama dengan -1 (minus satu), artinya kedua variabel mempunyai hubungan linier sempurna negatif. Korelasi ini mempunyai makna jika nilai x naik, maka nilai y turun dan berlaku sebaliknya.

Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi menunjukkan kekuatan dari hubungan linier dan arah hubungan dua variabel acak. Besarnya koefisien korelasi berkisar antara +1 sampai dengan -1. Jika koefisien korelasi positif, maka kedua variabel mempunyai hubungan searah. Sebaliknya, jika koefisien korelasi negatif, maka kedua variabel mempunyai hubungan terbalik.

Untuk memudahkan interpretasi mengenai kekuatan hubungan antara dua variabel, berikut ini diberikan beberapa kriteria koefisien korelasi menurut Sarwono 2006:

- 0 : Tidak ada korelasi antara dua variabel,
- > 0,00 – 0,25: Korelasi sangat lemah,
- > 0,25 – 0,50: Korelasi cukup,
- > 0,50 – 0,75: Korelasi kuat,
- > 0,75 – 0,99: Korelasi sangat kuat,
- 1 : Korelasi sempurna.

Signifikansi atau Alpha (α)

Signifikansi atau alpha (α) dalam ilmu statistik dimaknai sebagai “benar” yang didasarkan tidak secara kebetulan. Signifikansi ini memberikan gambaran mengenai bagaimana hasil penelitian itu mempunyai kesempatan untuk benar. Jika kita menentukan signifikansi sebesar 0,01, maka artinya hasil penelitian nanti mempunyai kesempatan untuk benar sebesar 99% dan untuk salah sebesar 1%. Nilai 99% ini disebut sebagai tingkat kepentingan (*confidence interval*), sedang nilai 1% disebut toleransi kesalahan.

Secara umum, penggunaan angka signifikansi diambil sebesar 0,01; 0,05; dan 0,10. Pertimbangan tersebut didasarkan pada tingkat kepercayaan yang diinginkan oleh peneliti. Angka signifikansi sebesar 0,01 mengandung arti bahwa tingkat kepercayaan atau keinginan untuk memperoleh kebenaran

dalam penelitian adalah sebesar 99% dengan toleransi kesalahan sebesar 1%. Jika angka signifikansi sebesar 0,05, maka tingkat kepercayaan atas kebenaran penelitian sebesar 95% dengan toleransi kesalahan 5%, dan seterusnya.

Salah satu pertimbangan penggunaan angka signifikansi adalah menyangkut jumlah data atau sampel yang akan digunakan dalam penelitian. Semakin kecil angka signifikansi, maka ukuran sampel akan semakin besar. Sebaliknya semakin besar angka signifikansi, maka ukuran sampel akan semakin kecil. Dalam penelitian ini digunakan angka signifikansi (α) sebesar 0,05.

Analisis Regresi

Regresi merupakan kajian tentang ketergantungan suatu variabel, yaitu variabel tergantung terhadap satu atau lebih variabel lainnya (disebut variabel eksplanatori), dengan tujuan untuk membuat estimasi dan atau memprediksi rata - rata variabel tergantung dalam kaitannya dengan nilai - nilai yang sudah diketahui dari variabel eksplanatorinya (Gujarati 2010). Dalam regresi, variabel pertama disebut juga sebagai variabel tergantung (*dependent variable*) dan variabel kedua disebut juga sebagai variabel bebas (*independent variable*). Jika variabel bebas tersebut lebih dari satu, maka disebut analisis regresi berganda.

Berdasarkan pola hubungan, analisis regresi terbagi atas analisis regresi *linier* dan *non-linier*. Model regresi *linier* mengamati hubungan linier variabel bebas dengan variabel tergantung. Secara matematis, model regresi *linier* dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$y_i = f(x_i, \beta) + \varepsilon_i \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan:

- y_i : nilai pengamatan ke- i dari variabel tergantung.
- x_i : nilai pengamatan ke- i dari variabel bebas.
- β : vektor parameter yang diduga.
- Σ_i : residual (galat).

Fungsi f adalah fungsi regresi dengan parameter β yang harus diduga dan Σ_i adalah galat dengan sifat berdistribusi normal dengan rata-rata 0 dan variasi σ^2 atau dapat ditulis dengan simbol $N(0, \sigma^2)$. Dengan kata lain,

fungsi f merupakan fungsi *linier* dalam parameter β .

Model regresi *non-linier* digunakan apabila tidak tersedianya informasi yang pasti mengenai bentuk hubungan antara variabel bebas dan variabel tergantung. Beberapa model regresi *non-linier* dapat berupa model parabolik, model eksponensial, model logistik, dan lain-lain. Model regresi *non-linier* secara umum dapat ditulis dalam bentuk persamaan:

$$y_i = f(x_i, \theta) + \varepsilon_i \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan:

- y_i : nilai pengamatan ke- i dari variabel tergantung.
- x_i : nilai pengamatan ke- i dari variabel bebas.
- θ : vektor parameter yang diduga.
- Σ_i : residual (galat).

Fungsi f adalah fungsi regresi yang harus diduga dan merupakan fungsi *non-linier* dalam parameter θ . Walaupun model regresi *linier* sama dengan *non-linier*, kecuali bahwa y_i merupakan fungsi *non-linier* dari parameternya, tetapi dalam model regresi *non-linier* setidaknya terdapat salah satu turunan dari fungsi tersebut yang diharapkan tergantung pada sekurang-kurangnya salah satu parameter lain. Untuk menekankan perbedaan antara model regresi *linier* dan *non-linier*, maka digunakan parameter θ .

Salah satu jenis dari model regresi *non-linier* adalah regresi eksponensial. Model regresi ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan matematis sebagai berikut:

$$y_i = \theta_0 e^{\theta_1 x_i} + \varepsilon_i \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan:

- y_i : nilai pengamatan ke- i dari variabel tergantung.
- x_i : nilai pengamatan ke- i dari variabel bebas.
- θ_0, θ_1 : vektor parameter yang diduga.
- Σ_i : residual (galat).

HASIL DAN ANALISIS

Analisis data dilakukan terhadap data hasil uji dinamik pada 117 buah jembatan di Indonesia sejak tahun 2009 sampai dengan tahun 2020, dengan variasi pada tipe struktur bangunan atas, bentang, material, serta sistem perletakan jembatan. Dari pengolahan data uji diperoleh parameter dinamik jembatan, salah satunya frekuensi alami. Frekuensi alami uji

dinamik dapat dibagi ke dalam 3 arah, yaitu: vertikal, transversal, dan longitudinal. Pada sebagian besar uji dinamik yang dilakukan juga disertai dengan perhitungan frekuensi teoritis sebagai nilai pembanding dari frekuensi uji tersebut. Mengingat jumlah data hasil uji dinamik untuk frekuensi pada arah transversal dan longitudinal yang belum memadai, maka penelitian ini difokuskan pada kajian frekuensi dalam arah vertikal, yaitu frekuensi vertikal hasil uji dan frekuensi teoritis hasil pemodelan struktur dengan *finite element*.

Tabel 2. Distribusi sampel berdasar tipe bangunan atas jembatan

No	Tipe Bangunan Atas	Jumlah Sampel
1	Balok/Box Beton Bertulang	3
2	Gelagar/Box Beton Pratekan	34
3	Pelengkung Beton	3
4	Rangka Baja	26
5	Pelengkung Rangka Baja	18
6	Girder/Box Baja Komposit	27
7	Cable Stayed	5
8	Suspension (Gantung)	1
Total		117

Tabel 3. Distribusi sampel berdasar material bangunan atas jembatan

No	Material Bangunan Atas	Jumlah Sampel
1	Beton	45
2	Baja	72
Total		117

Tabel 4. Distribusi sampel berdasar sistem perletakan jembatan

No	Sistem Perletakan	Jumlah Sampel
1	Tumpuan Sederhana (Simply Supported)	83
2	Tumpuan Menerus (Continuous Supported)	34
Total		117

Untuk dapat memodelkan dan merumuskan persamaan matematis frekuensi jembatan, maka terlebih dahulu dilakukan uji statistik terhadap sampel data, meliputi uji normalitas, uji korelasi, dan analisis regresi. Uji normalitas dilakukan terhadap sampel data dengan hipotesis:

- a. H_0 : Data berdistribusi normal
- b. H_1 : Data tidak berdistribusi normal

Apabila dari uji normalitas didapat nilai sig (p -value) $< \alpha$ ($=5\%$) maka hipotesis H_0 ditolak. Hasil uji normalitas untuk variabel

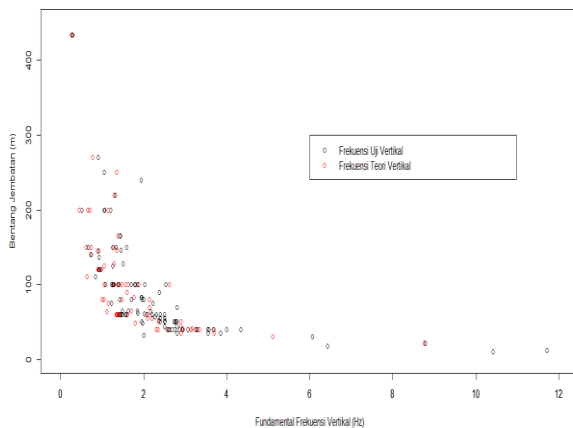
yang ditinjau disajikan pada Tabel 5, 6, dan 7 di bawah ini.

Tabel 5. Hasil uji normalitas data berdasar jenis frekuensi vertikal

No	Frekuensi Vertikal	sig (p-value)	
		Variabel frekuensi	Variabel bentang
1	Uji	$3,688 \times 10^{-15}$	$2,513 \times 10^{-13}$
2	Teoritis	$3,298 \times 10^{-9}$	$1,423 \times 10^{-10}$

Dari Tabel 5 di atas dapat diperoleh:

- Nilai *p-value* untuk variabel frekuensi vertikal uji sebesar $3,298 \times 10^{-9}$ dan vertikal teoritis sebesar $3,298 \times 10^{-9}$. Artinya, pada taraf signifikansi 5%, H_0 ditolak sehingga data tidak berdistribusi normal.
- Nilai *p-value* untuk variabel bentang sebesar $2,513 \times 10^{-13}$ dan $1,423 \times 10^{-10}$. Artinya, pada taraf signifikansi 5%, H_0 ditolak sehingga data tidak berdistribusi normal.



Gambar 9. Sebaran data frekuensi vertikal uji dan teoritis terhadap bentang jembatan

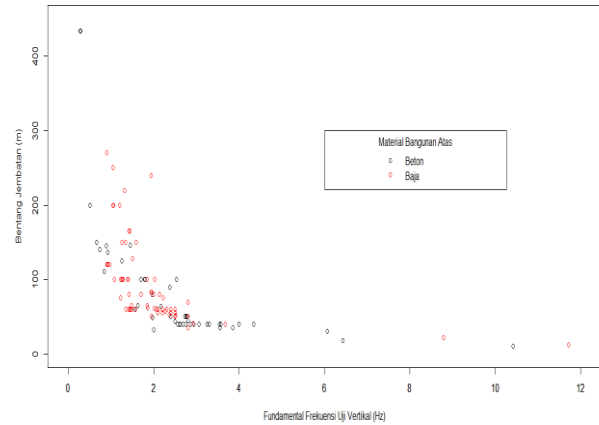
Tabel 6. Hasil uji normalitas data berdasar jenis material bangunan atas jembatan

No	Material Bangunan Atas	sig (p-value)	
		Variabel frekuensi uji	Variabel bentang uji
1	Beton	$3,351 \times 10^{-6}$	$5,751 \times 10^{-10}$
2	Baja	$2,026 \times 10^{-14}$	$7,010 \times 10^{-8}$

Dari Tabel 6 di atas dapat diperoleh:

- Nilai *p-value* untuk variabel frekuensi vertikal uji material beton sebesar $3,351 \times 10^{-6}$ dan material baja sebesar $2,026 \times 10^{-14}$. Artinya, pada taraf signifikansi 5%, H_0 ditolak sehingga data tidak berdistribusi normal.

- Nilai *p-value* untuk variabel bentang uji material beton sebesar $5,751 \times 10^{-10}$ dan material baja sebesar $7,010 \times 10^{-8}$. Artinya, pada taraf signifikansi 5%, H_0 ditolak sehingga data tidak berdistribusi normal.



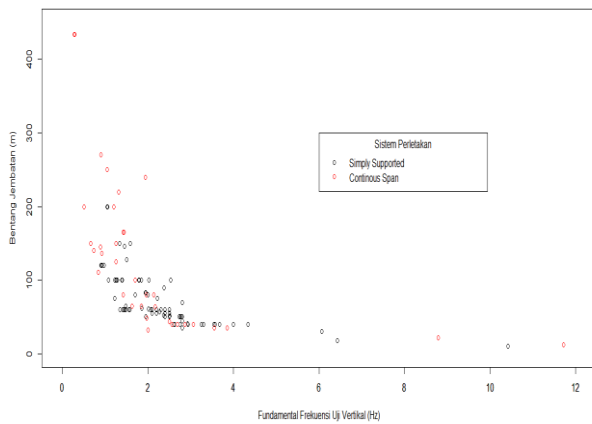
Gambar 10. Sebaran data frekuensi vertikal uji berdasar material bangunan atas jembatan

Tabel 7. Hasil uji normalitas data berdasar sistem perletakan jembatan

No	Sistem Perletakan	sig (p-value)	
		Variabel frekuensi uji	Variabel bentang uji
1	Tumpuan sederhana	$8,849 \times 10^{-12}$	$5,53 \times 10^{-7}$
2	Tumpuan menerus	$1,794 \times 10^{-8}$	$2,318 \times 10^{-4}$

Dari Tabel 7 di atas dapat diperoleh:

- Nilai *p-value* untuk variabel frekuensi vertikal uji dengan tumpuan sederhana sebesar $8,849 \times 10^{-12}$ dan tumpuan menerus sebesar $1,794 \times 10^{-8}$. Artinya, pada taraf signifikansi 5%, H_0 ditolak sehingga data tidak berdistribusi normal.
- Nilai *p-value* untuk variabel bentang uji dengan tumpuan sederhana sebesar $5,53 \times 10^{-7}$ dan tumpuan menerus sebesar $2,318 \times 10^{-4}$. Artinya, pada taraf signifikansi 5%, H_0 ditolak sehingga data tidak berdistribusi normal.



Gambar 11. Sebaran data frekuensi vertikal uji berdasar material bangunan atas jembatan

Dari uji normalitas yang dilakukan terhadap kedua variabel, baik frekuensi dan bentang jembatan didapatkan nilai $p\text{-value} < \alpha$, sehingga dapat disimpulkan bahwa data tidak berdistribusi normal, maka uji korelasi dilakukan menggunakan uji *Spearman's Rho*.

Untuk uji korelasi *Spearman's Rho* digunakan hipotesis sebagai berikut:

H0 : Tidak ada hubungan antara frekuensi dan bentang jembatan

H1 : Terdapat hubungan antara frekuensi dan bentang jembatan

Apabila dari uji korelasi tersebut didapat nilai $sig (p\text{-value}) < \alpha (=5\%)$ maka hipotesis H0 ditolak.

Hasil uji korelasi untuk variabel yang ditinjau disajikan pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Hasil uji korelasi data uji dinamik

No	Korelasi frekuensi vertikal dan bentang jembatan	$sig (p\text{-value})$
1	f_{uji}	$< 2,2 \times 10^{-16}$
2	$f_{teoritis}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$
3	f_{uji} pada material beton	$< 2,2 \times 10^{-16}$
4	f_{uji} pada material baja	$< 2,2 \times 10^{-16}$
5	f_{uji} pada tumpuan sederhana	$< 2,2 \times 10^{-16}$
6	f_{uji} pada tumpuan menerus	$6,536 \times 10^{-11}$

Dari uji korelasi antara variabel frekuensi dan bentang jembatan didapatkan nilai $p\text{-value} < \alpha$. Artinya, pada taraf signifikansi 5%, H0 ditolak sehingga terdapat hubungan antara variabel bentang jembatan dengan variabel frekuensi vertikal.

PEMBAHASAN

Pembahasan difokuskan pada pengujian hipotesis awal, yaitu frekuensi suatu jembatan sangat dipengaruhi dan berkorelasi terhadap panjang bentang jembatan yang ditinjau. Selain itu, ditinjau pula korelasi antara jenis material bangunan atas dan sistem perletakan jembatan terhadap frekuensi dan bentang jembatan.

Uji statistik dilakukan terhadap data uji dinamik, yaitu berupa uji normalitas data, uji korelasi, serta estimasi model dengan menggunakan metode regresi berikut uji kecocokan modelnya, signifikansi parameter, serta besaran koefisien determinasi pada model tersebut.

Hasil uji normalitas terhadap data uji dinamik diperoleh hasil bahwa nilai $p\text{-value} < \alpha (=5\%)$, baik pada variabel frekuensi teoritis/uji maupun variabel bentang uji, sehingga disimpulkan bahwa data tersebut tidak berdistribusi normal. Oleh sebab itu, uji korelasi dilakukan dengan metode *Spearman Rho's* dengan kesimpulan terdapat hubungan antara variabel bentang jembatan dengan variabel frekuensi vertikal. Besarnya hubungan antara dua variabel tersebut dinyatakan dalam koefisien korelasi seperti tersaji pada Tabel 9.

Tabel 9. Koefisien korelasi *Spearman's Rho*

No	Korelasi frekuensi vertikal terhadap bentang jembatan	Koefisien korelasi
1	f_{uji}	-0,851
2	$f_{teoritis}$	-0,862
3	f_{uji} pada material beton	-0,889
4	f_{uji} pada material baja	-0,782
5	f_{uji} pada tumpuan sederhana	-0,826
6	f_{uji} pada tumpuan menerus	-0,848

Dari Tabel 9 dapat dilihat bahwa seluruh parameter yang dilakukan uji korelasi ini memberikan nilai koefisien korelasi paling kecil sebesar 0,782 dengan hubungan antar kedua variabel tersebut bernilai negatif. Merujuk pada kriteria koefisien korelasi (Sarwono 2006), nilai koefisien korelasi termasuk pada rentang antara $>0,75 - 0,99$ atau mempunyai korelasi sangat kuat antar variabel yang diuji, yaitu frekuensi jembatan dan bentang jembatan. Adapun koefisien korelasi bernilai negatif menunjukkan bahwa kedua variabel yang diuji mempunyai hubungan

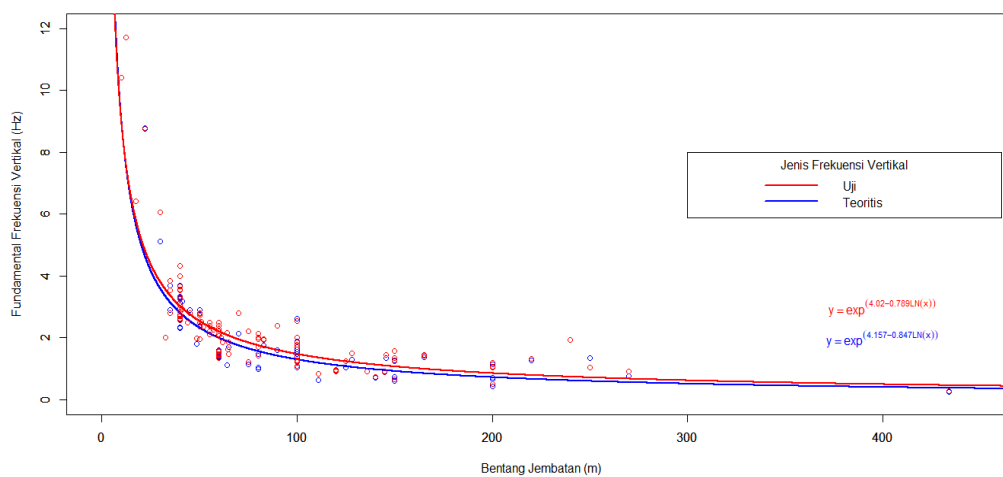
terbalik, dimana semakin panjang bentang jembatan maka semakin kecil nilai frekuensi jembatan tersebut.

Untuk dapat merumuskan persamaan matematis dari frekuensi jembatan dibuatlah model hubungan antara frekuensi jembatan dengan bentang jembatan menggunakan analisis regresi. Analisis regresi dilakukan terhadap model hubungan antara: (1) frekuensi vertikal teoritis terhadap bentang jembatan, dan (2) frekuensi vertikal uji terhadap bentang jembatan. Kedua model tersebut digunakan untuk merumuskan persamaan matematis dari frekuensi jembatan. Hasil analisis regresi dan

penggambaran model hubungan tersaji pada Gambar 12. Selanjutnya, pada model tersebut dilakukan uji kecocokan model dengan uji F, uji signifikansi parameter dengan uji T, serta perhitungan koefisien determinasinya (R^2). Hasil uji F, uji T, dan koefisien R^2 tersebut disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Uji F, uji T, dan R^2 pada model regresi

Model hubungan	p-value		Koefisien R^2
	Uji F	Uji T	
Frekuensi teoritis vs bentang jembatan	< 2,2 x 10^{-16}	< 2,0 x 10^{-16}	0,7475
Frekuensi uji vs bentang jembatan	< 2,2 x 10^{-16}	< 2,0 x 10^{-16}	0,7612



Gambar 12. Model regresi frekuensi vertikal jembatan terhadap bentang jembatan

Uji F dilakukan untuk mengetahui kesesuaian terhadap asumsi model yang digunakan. Sedangkan uji T digunakan untuk mengetahui tingkat signifikansi pengaruh variabel independen terhadap variabel dependennya. Dari Tabel 10 didapatkan nilai p -value pada uji F dan uji T lebih kecil atau kurang dari nilai signifikansi yang telah ditetapkan, yaitu 5%. Hal ini mengindikasikan bahwa asumsi model yang digunakan sudah cocok/tepat dan koefisien regresi pada variabel independen (bentang jembatan) juga signifikan, artinya terdapat pengaruh bentang jembatan terhadap frekuensi vertikal uji.

Untuk model regresi (1) frekuensi vertikal teoritis dan bentang jembatan, diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7475. Artinya, frekuensi vertikal teoritis jembatan dipengaruhi oleh variabel bentang jembatan sebesar 74,75% dan sisanya 25,25% dipengaruhi oleh faktor lain di luar fokus penelitian. Untuk model regresi (2)

frekuensi vertikal uji dan bentang jembatan, diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7612. Artinya, frekuensi vertikal uji jembatan dipengaruhi oleh variabel bentang jembatan sebesar 76,12% dan sisanya 23,88% dipengaruhi oleh faktor lain di luar fokus penelitian.

Frekuensi suatu jembatan dapat ditentukan nilainya berdasarkan grafik pada Gambar 12 dan besaran nilainya terletak pada rentang diantara kedua grafik model regresi tersebut.

Selanjutnya, dari kedua model regresi tersebut juga dapat diperoleh rumusan persamaan matematis frekuensi jembatan, yaitu:

- Frekuensi vertikal teoritis:

$$y = e^{(4.157-0.847\ln x)} \dots\dots\dots(10)$$

sebagai batas bawah frekuensi yang ditinjau;

- Frekuensi vertikal uji:

$$y = e^{(4.020 - 0.789 \ln x)} \dots \dots \dots (11)$$

sebagai batas atas frekuensi yang ditinjau;

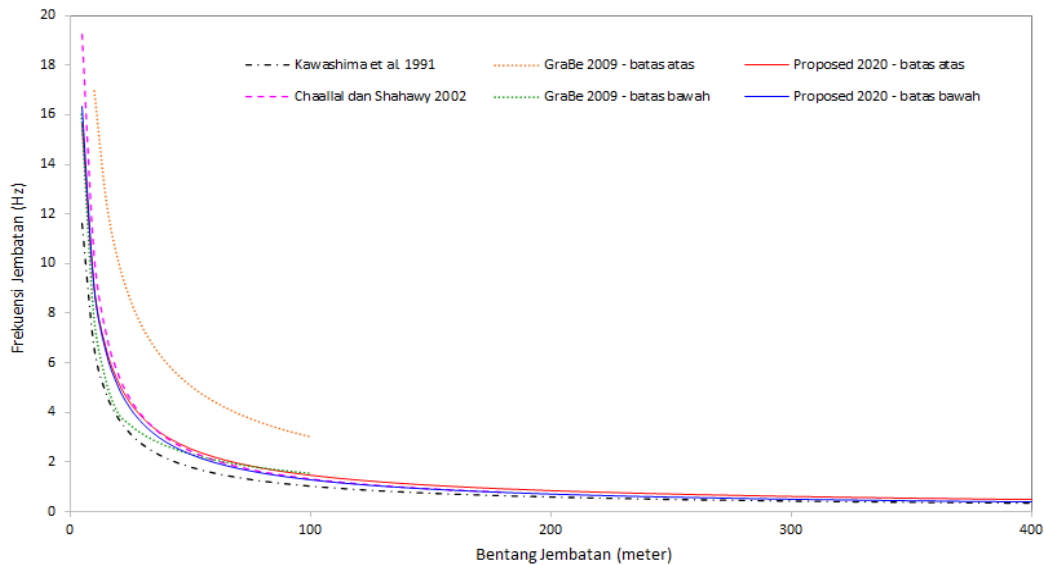
Keterangan:

y : frekuensi vertikal (Hz).

x : bentang jembatan (meter).

Gambar 13 menunjukkan komparasi antara beberapa model pendekatan empiris menurut studi terdahulu terhadap grafik hasil penelitian ini. Terlihat bahwa grafik batas atas dan batas bawah hasil penelitian berada di dalam rentang grafik Chaallal dan Shahawy

2002 dan Graße 2009. Namun demikian, apabila dibandingkan dengan grafik Kawashima et al. 1991 terlihat bahwa grafik hasil penelitian relatif berada sedikit di atasnya. Hal ini terjadi karena pendekatan empiris Kawashima et al. 1991 berfokus hanya meninjau sampel jembatan dengan tipe *cable stayed*, sedangkan dalam penelitian ini digunakan sampel dengan berbagai tipe jembatan.



Gambar 13. Grafik komparasi beberapa model pendekatan empiris antara frekuensi vertikal terhadap bentang jembatan

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Model regresi dari frekuensi vertikal dan bentang jembatan menunjukkan nilai koefisien determinasi (*R-square*) sebesar 74,75% untuk frekuensi vertikal teoritis dan 76,12% untuk frekuensi vertikal uji. Artinya, frekuensi vertikal jembatan sangat dipengaruhi oleh bentang jembatan sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar fokus penelitian. Hasil ini juga menguatkan hipotesis awal penelitian. Dari model regresi yang telah dilakukan dapat diperoleh rumusan matematis dari frekuensi jembatan, seperti tersaji pada Persamaan 10 dan 11.

Kajian ini memiliki keterbatasan dalam jumlah sampel untuk tipe jembatan gantung (*suspension*) yang hanya ada 1 data dari jumlah 117 sampel. Persamaan 10 dan 11 dapat dibuat persamaan tunggal dengan meninjau pengaruh faktor lain di luar fokus

penelitian ini yaitu perbedaan kriteria dinamika antara jembatan konvensional dan jembatan khusus.

Saran

Mengingat terbatasnya jumlah tipe jembatan suspensi yang digunakan dalam penelitian, maka perlu dilakukan kajian untuk penambahan jumlah tipe suspensi tersebut. Selain peninjauan rumusan frekuensi jembatan dalam arah vertikal, perlu dilanjutkan dengan peninjauan rumusan frekuensi dalam arah transversal dan longitudinal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai wujud penghargaan terhadap pihak-pihak yang terlibat dalam penyediaan data, pelaksanaan penelitian dan penyusunan jurnal, kami ucapkan terimakasih yang tak terhingga kepada Direktur Politeknik Pekerjaan Umum, Direktur Pembangunan Jembatan - Ditjen Bina Marga, Direktur Bina

Teknik Jalan dan Jembatan - Ditjen Bina Marga, Pimpinan PT. LAPI Ganeshatama Consulting, Pimpinan PT. Pratama Daya Cahya Manunggal (PDCM), Pimpinan PT. Testindo, serta pihak-pihak terkait lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

Bien, J. and J. Zwolski. 2007. Dynamic Test in Bridge Monitoring – Systematics and Applications.

http://zits.pwr.wroc.pl/zwolski/download/Zwolski_IMAC2007.pdf (diakses pada 30 April 2020)

Chaallal, O. and M. Shahawy. 2002. Technical Report No.ETS.DRDR.98.1: Experimental Evaluation of Dynamic Amplification for Evaluation of Bridge Performance.

<https://www.semanticscholar.org/paper/EXPERIMENTAL-EVALUATION-OF-THE-DYNAMIC-FACTOR-FOR-Shahawy/0ad16f27d113dbcd986467d0c47e6e793456ccd9> (diakses pada 26 Februari 2020)

Graße, W. 2009. Lasten und Einwirkungen auf Brücken einschlie①lich Kombinationsregeln DIN-Fachbericht 101 (Muatan dan Pengaruh pada Jembatan termasuk Aturan Kombinasi menurut DIN-Fachbericht 101).

<https://www.scribd.com/document/375842119/FB-101-pdf> (diakses pada 28 Februari 2020)

Gujarati, D.N. 2010. *Dasar-Dasar Ekonometrika Buku 1*, Jakarta: Salemba Empat

Kawashima, K., Unjoh, S, and Tsunomoto, M. 1991. Damping Characteristics of Cable Stayed Bridges for Seismic Design. *Journal of Research* 27.

Indonesia, Departemen PU. 1993. *Bridge Management System (BMS) - Panduan Pemeriksaan Jembatan*, Jakarta: Departemen PU.

Indonesia, Departemen Perhubungan dan Prasarana Wilayah (Kimpraswil). 2002. *Pedoman Konstruksi dan Bangunan Nomor: Pt T-05-2002-B tentang Penilaian Kondisi Jembatan Untuk Bangunan Atas Dengan Cara Uji Getar*. Jakarta: Departemen Perhubungan dan Prasarana Wilayah.

Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). 2012. *Laporan Swakelola Penilaian Kondisi Jembatan Untuk Laik Fungsi Dengan Uji Getar*. Jakarta: Kementerian PUPR.

Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). 2017. *Surat Edaran No. 05/SE/Db/2017 tentang Penyampaian Ketentuan Desain dan Revisi*

Desain Jalan dan Jembatan, serta KAK Pengawasan Teknis. Jakarta: Kementerian PUPR.

Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2020. *Data Jembatan di Indonesia Berdasarkan INVI-J status 13 Januari 2020*. Jakarta: Kementerian PUPR.

PT. Pratama Daya Cahya Manunggal (PT. PDCM). 2019. *Laporan Hasil Loading Test Jembatan Kolonel Sunandar II (Tanggulangin), Kudus, Jawa Tengah*. Bekasi: PT. Pratama Daya Cahya Manunggal

Sarwono, J. 2006. <https://www.jonathansarwono.info/korelasi/korelasi.htm> (diakses pada 3 Desember 2020)