

Available online at www.jurnal.untidar.ac.id**JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING**Journal homepage: <http://jurnal.untidar.ac.id/index.php/mechanical/index>

Pengembangan Struktur Model Jembatan untuk Menentukan Korelasi Fenomena Fisik terhadap Pola Modus Getarnya

Susilo Adi Widyanto^{a*}, Sukamta^b, Ojo Kurdi^a, Bagus Acung Billahi^b, Angga Alfiannur^b

^aDepartemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro, Indonesia

^bDepartemen Teknik Sipil Universitas Diponegoro, Indonesia

susiloadiw@gmail.com

Keyword:

real structure
model structure
vibration testing
frequency domain

ABSTRACT

The Observations of bridge construction need to be carried out regularly to ensure operational safety. The application of the observation method using a structural health diagnosis application device based on vibration mode analysis is the potential method to increase accuracy of the results and it can facilitate the implementation of the work. This paper presents the design method of the bridge structure model and its analysis method to obtain dynamic characteristics that can represent the actual bridge structure. Furthermore, with the model structure, the correlation of physical phenomena toward the vibration mode pattern can be determined in order to build a database system as part of the developed structural health diagnosis application. The results show that the developed model has the same characteristics of the vibration mode as the actual construction at the 1:23 scale aspect. The actual structural component in the form of the HWF profile 300.300.10.15 can be approximated by the hollow structure 15.15.1,4.1,4 in the developed model structure. The results of vibration testing at a frequency of 30Hz vibrator showed that, the amplitude pattern of the two constructions shows the same pattern with a maximum error of 6.37%.

Kata Kunci:

Struktur
sesungguhnya
Struktur model
Pengujian getaran
Frekuensi domain

ABSTRAK

Observasi konstruksi jembatan perlu dilakukan secara regular untuk memastikan keamanan operasionalnya. Penerapan metode observasi dengan menggunakan perangkat aplikasi diagnosis kesehatan struktur yang didasarkan pada analisis modus getar berpotensi untuk meningkatkan akurasi hasil dan dapat mempermudah pelaksanaan pekerjaannya. Dalam paper ini disajikan metode desain model struktur jembatan dan metode analisisnya untuk memperoleh karakteristik dinamik yang dapat mewakili struktur jembatan yang sesungguhnya. Selanjutnya dengan struktur model tersebut, korelasi fenomena fisik terhadap pola modus getarnya dapat ditentukan dalam rangka untuk membangun sistem database sebagai bagian dari perangkat aplikasi diagnosis kesehatan struktur yang dikembangkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model yang dikembangkan memiliki karakteristik modus getar yang sama dengan konstruksi yang sesungguhnya pada aspek skala 1:23. Komponen struktur sesungguhnya yang berupa profil HWF 300.300.10.15 dapat didekati dengan struktur hollow 15.15.1,4.1,4 pada struktur model yang dikembangkan. Dari hasil pengujian getaran pada frekuensi penggetar 30Hz, pola amplitudo kedua konstruksi menunjukkan pola yang sama dengan error maksimum yang terjadi sebesar 6,37%.

PENDAHULUAN

Kegagalan konstruksi jembatan berpotensi berdampak fatal bagi para penggunanya, oleh karena itu metode observasi secara regular (termasuk dalam prosedur *preventive maintenance*) mutlak diperlukan. Observasi struktur secara keseluruhan juga penting dilakukan setelah kondisi ekstrem terjadi, seperti pada kondisi pasca gempa bumi (Putra dkk., 2018). Namun pada kenyataannya, akurasi dan kemudahan pelaksanaan observasi tersebut sangat tergantung pada kondisi lapangannya dimana konstruksi tersebut berada. Selain itu observasi visual hanya bisa dilakukan untuk mendeteksi ciri-ciri kegagalan konstruksi yang berada di permukaan.

Penggunaan metode diagnosis yang didasarkan pada hasil analisis pola modus getar suatu konstruksi merupakan metode observasi yang berpotensi untuk dikembangkan. Hal ini didasarkan bahwa setiap konstruksi memiliki nilai kekakuan spesifik dimana nilai tersebut dapat diwakili oleh karakteristik modus getarnya pada saat konstruksi tersebut diberikan stimulasi beban. Pada kondisi awal dioperasikan, pola modus getar konstruksi yang bersangkutan dapat digunakan sebagai rujukan untuk menilai kondisi aktual konstruksi tersebut setelah sekian waktu dioperasikan. Penilaian dapat dilakukan terhadap pola amplitudo dominan pada fungsi frekuensi respon yang terjadi.

Studi analisis struktur jembatan telah dilakukan oleh banyak peneliti sebelumnya. Respon dinamis struktur jembatan yang disebabkan oleh gerakan kendaraan telah dianalisis oleh Zhong dkk (2015), (Memory dan Brameld, 1995), (Yoshimura dkk, 2006) dan (Zhong dkk, 2005). Struktur jembatan dimodelkan sebagai beam kontinyu dengan tegangan awal eksentris, dan sebuah model kendaraan dengan 4 derajat kebebasan digunakan untuk mewakili kendaraan yang melewatinya. Suatu model jembatan-kendaraan yang menggunakan prinsip virtual works dengan mempertimbangkan pengaruh tegangan awal dibuat dan diinvestigasi untuk memperoleh respon interaksinya. Konstanta koreksi dan ketelitian model divalidasi dengan hasil *review literature* dan pemodelan Abaqus. Hasil investigasi menunjukkan bahwa *pre-stress* secara signifikan berpengaruh pada akselerasi vertikal maksimum dari kendaraan yang dapat digunakan sebagai indeks yang baik untuk mendeteksi perubahannya (Zhong dkk, 2015).

Respon dinamik struktur jembatan juga digunakan untuk mengestimasi sisa umurnya. Kondisi ini penting untuk memastikan aspek keamanan dan investasi (Coppolino, 2014). Yoshimura dkk (2006) telah menguji sifat getaran natural dari struktur jembatan. Mereka juga menganalisis respon jembatan pada saat kendaraan bergerak di atasnya. Analisis dinamik secara eksperimental dan analitis dari jembatan berstruktur *concrete-filled steel tubular* (CFST) diteliti oleh Zong dkk (2005). Dalam penelitian mereka, model

finite element (FE) tiga dimensi dikembangkan dan suatu analisis model analitik dilakukan untuk memperoleh frekuensi natural dan bentuk modusnya. Pengujian dinamik pada kondisi tereksitasi telah dilakukan sebelum jembatan dioperasikan. Tiga teknik identifikasi modal output yang independen digunakan untuk identifikasi sistem. Ada korelasi yang baik antara parameter modal yang diidentifikasi dari tiga teknik identifikasi independen. Model FE awal kemudian dikoreksi dengan bantuan frekuensi natural yang diukur dan bentuk modusnya dengan memvariasikan beberapa parameter jembatan yang berpengaruh dengan menggunakan intuisi teknik. Model yang diperoleh dapat diperlakukan sebagai model FE dasar dan bisa digunakan untuk pemantauan jangka panjang serta evaluasi keselamatan jembatan dalam kondisi yang bervariasi yang diakibatkan oleh berbagai bencana seperti gempa bumi atau angin ribut.

Interaksi antara jembatan-angin, angin-kendaraan dan jembatan-kendaraan diteliti oleh Wang dkk (2014). Dalam paper tersebut, parameter kritis arus lalu lintas diteliti dan diubah menjadi karakteristik statistik. Selanjutnya parameter tersebut digunakan untuk mensimulasikan arus lalu lintas secara acak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah arus lalu lintas hanya sedikit berpengaruh pada respon dinamis jembatan, respon rata-rata terutama ditentukan oleh beban kendaraan yang bergerak.

Studi mengenai analisis dinamik gabungan antara kendaraan dan sistem jembatan tiga dimensi di bawah terpaan angin dilakukan oleh Chai dan Chen (2004). Dalam studinya, kendaraan yang melintasi jembatan dimodelkan sebagai suatu *rigid body* yang terdiri dari blok massa, pegas dan damper. Parameter yang dimasukkan ke dalam proses analisis antara lain berupa kondisi angin dan kondisi jalan. Pengaruh kecepatan kendaraan terhadap kinerja dinamik juga dibahas. Ditemukan bahwa kecepatan kendaraan berpengaruh penting pada respon vertikal relatif kendaraan, tetapi tidak berpengaruh secara signifikan pada respon *rolling* kendaraan. Respon jembatan secara dominan terjadi pada kecepatan angin tinggi, sedangkan pada kecepatan angin rendah respon absolut kendaraan didominasi oleh kekasaran jalan.

Sistem database yang mengkorelasikan aspek fisik terhadap karakteristik modus getar merupakan bagian penting dalam pengembangan sistem diagnosis kesehatan struktur jembatan. Dalam prakteknya, penyusunan sistem database sistem diagnosis akan dipermudah dengan observasi pada model yang dikembangkan. Namun, pada tahap awal validitas model perlu dipastikan dengan membandingkan karakteristik dinamikinya. Paper ini menyajikan metode desain model suatu struktur jembatan yang diuji validitasnya dengan membandingkan hasil analisis modus getarnya.

1.1 Model Struktural

Model struktural yang dinyatakan dalam

aspek skala secara dimensional harus memiliki karakteristik khusus yang identik dengan struktur yang sesungguhnya. Karakteristik khusus tersebut antara lain dapat diturunkan dari fenomena fisik yang dimiliki oleh strukturnya. Menurut Harris dan Sabnis (1999), model struktur dapat dikategorikan menjadi tiga bagian, antara lain:

- a. *True models*, dimana kesamaan dari seluruh parameter dipertahankan pada modelnya (*complete similarity*), misalnya:

$$S_Q = S_1^2 S_E,$$

$$S_M = \frac{S_1^2 S_E}{S_a},$$

$$S_\sigma = S_E, \quad S_\varepsilon = 1 \quad S_\delta = S_l \quad S_v = 1$$

di mana ,

S_Q : Skala faktor gaya

S_M : Skala faktor massa

S_l : Skala faktor Panjang

S_v : Skala faktor Rasio Poisson

S_E : Skala faktor modulus elastisitas

S_ε : Skala faktor regangan

S_σ : Skala faktor tegangan

S_δ : Skala faktor lendutan

S_a : Skala faktor percepatan

- b. *Adequate models*, dimana bila kesamaan dari beberapa parameter utamanya dipertahankan disebut sebagai *first-order model* sedangkan kesamaan pada parameter-parameter setelahnya disebut dengan *second-order model*.
- c. *Distorted models*, dimana satu atau lebih parameter tidak bisa dipertahankan pada model sehingga diperlukan kondisi batas pada saat pengujiannya.

Pemahaman mengenai Buckingham Pi Theorem sangat penting dalam analisis dimensional. Teorema ini menyatakan bahwa setiap persamaan yang dimensinya homogen dengan besaran-besaran fisik tertentu dapat direduksi menjadi suatu persamaan ekuivalen yang tidak berdimensi (Buckingham, 1914). Jika ada n variabel dalam suatu persamaan dan variabel-variabel tersebut mengandung m dimensi primer (misalnya M, L, T), maka persamaan ekuivalennya akan memiliki (n-m) kelompok tanpa dimensi. Dalam implementasi model struktural, secara umum teori tersebut menyatakan bahwa:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1)$$

dapat dinyatakan secara setara dalam bentuk:

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad (2)$$

Istilah pi adalah fungsi tidak berdimensi dari variable fisik X_1, X_2, \dots, X_n .

1.2 Getaran Struktur

Variabel yang mewakili perilaku struktur bergetar selain panjang (L) dan gaya (F) adalah variabel waktu (T). Panjang tipikal dalam struktur model mengandung variable yang mewakili karakteristik material seperti modulus elastisitas E, rasio Poisson's (ν) dan densitas (ρ). Parameter lainnya yang harus dipertimbangkan untuk diintegrasikan adalah parameter defleksi (δ), frekuensi alami (f) dan tegangan dinamis (σ).

Variabel waktu pada struktur yang sesungguhnya sama dengan $S_l^{1/2}$, sedangkan yang berlaku pada model elastis sama dengan S_l di mana efek gravitasi diabaikan, sedangkan frekuensi getaran pada struktur yang sesungguhnya dan struktur model dapat dinyatakan dalam $S_l^{-1/2}$ dan S_l^{-1} . Kondisi ini menjelaskan bahwa model akan memiliki frekuensi yang lebih tinggi dari struktur yang sesungguhnya. Korelasi analisis dimensional akibat gravitasi secara lengkap ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Korelasi Parameter antara Struktur yang Sebenarnya dan Struktur Model (Harris dan Sabnis, 1999)

Grup (1)	Besaran (2)	Dimensi (3)	Aspek Skala	
			Skala eksak (4)	Gravitasi diabaikan (5)
Loading	Gaya, Q	F	$S_E S_l^2$	$S_E S_l^2$
	Gravitasi, g	LT^{-2}	1	1
	Waktu, t	T	$S_l^{1/2}$	S_l
Geometri	Panjang, l	L	S_l	S_l
	Defleksi, δ	L	S_l	S_l
	Frekuensi, f	T^{-1}	$S_l^{-1/2}$	S_l^{-1}
Material properties	Modulus, E	FL^{-2}	S_E	S_E
	Tegangan, σ	FL^{-2}	S_E	S_E
	Poisson ratio, ν	-	1	1
	Berat jenis, γ	FL^{-3}	S_E / S_l	Diabaikan

METODE

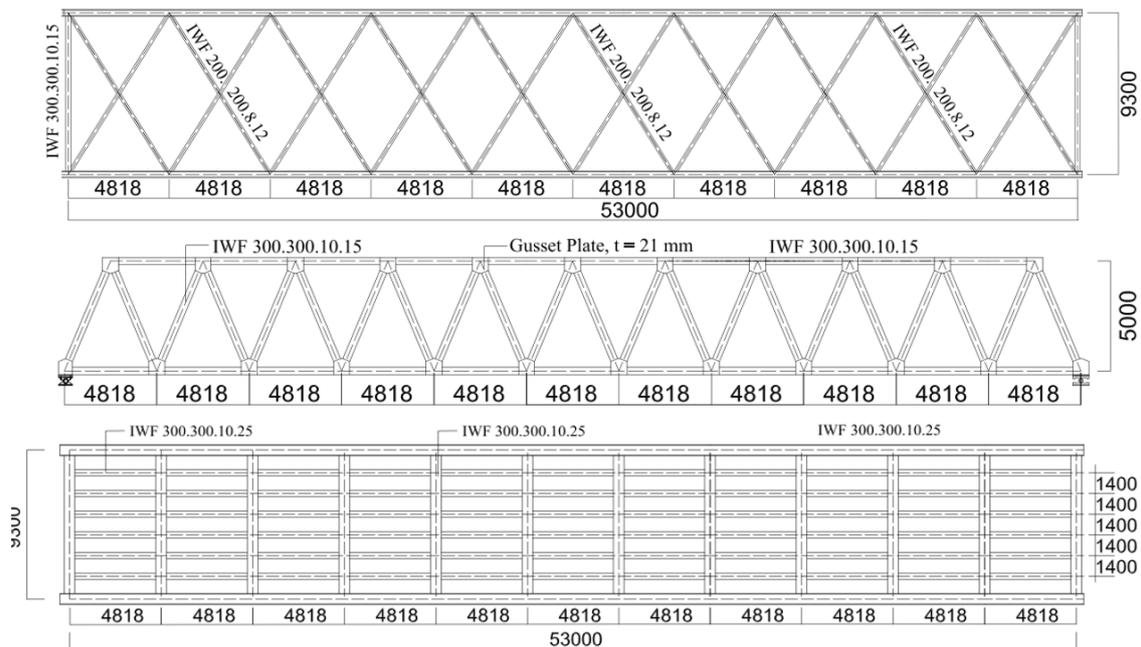
Pelaksanaan penelitian mengikuti diagram alir pada Gambar 8, dan secara detail tiap tahapannya diuraikan sebagai berikut:

a. Pengukuran Dimensi Struktur Jembatan

Pengukuran dimensi struktur jembatan dilakukan termasuk didalamnya proses pengumpulan data seperti jenis struktur baja untuk setiap komponen, jenis tumpuan, jenis sambungan dan jumlah/ukuran baut. Gambar 1 dan 2 menunjukkan kondisi fisik dan dimensi dari struktur jembatan yang sesungguhnya akan didesain struktur modelnya.



Gambar 1. Struktur jembatan baja yang digunakan sebagai dasar desain struktur model.



Gambar 2. Dimensi struktur jembatan sesungguhnya.

b. Pengujian Getaran Konstruksi Jembatan

Untuk mengukur respon dinamikanya, struktur jembatan yang sesungguhnya diuji getaran dengan menggunakan penggetar (exciter) berupa alat stamper dengan spesifikasi teknik sesuai Tabel 2. Posisi penggetar dan sensor getaran (accelerometer) didasarkan pada nilai perbandingan terhadap panjang struktur jembatan yang dibuat identik dengan set-up pengujian pada struktur modelnya.

Tabel 2. Spesifikasi Teknis Alat Stamper

Data pengujian	Nilai	Satuan
Berat	74	kg
Gaya	12209	N
Frekuensi	30	Hz
Jumping Stroke	50 – 70	mm

c. Penurunan Faktor Skala pada Desain Model dan Desain Penggetar

Penurunan dimensi pada struktur model ditentukan berdasarkan aspek skala dari konstruksi

jembatan sesungguhnya. Didasarkan pada kesesuaian aspek skala terhadap parameter keseluruhan (Tabel 1) dari komponen-komponen struktur untuk model terhadap konstruksi yang sesungguhnya, maka nilai skala yang memenuhi adalah 1:23. Keterangan mengenai dimensi maupun jenis material komponen struktur model serta bentuk fisik model ditunjukkan dalam Gambar 3.

Aspek skala untuk komponen struktur dipilih berdasarkan nilai inersia penampang terbesar dari komponen dengan profil IWF 300.300.10.25 dengan nilai sebesar 297395833 mm^4 . Pada skala 1:23, inersia penampang struktur model diperoleh sebesar $1062,731 \text{ mm}^4$, dimana nilai tersebut dapat didekati oleh profil *hollow* dengan ukuran 15.15.1,4.1,4 dengan nilai inersia penampang aktual sebesar $1367,9 \text{ mm}^4$. Perhitungan aspek skala untuk exciter diuraikan sebagai berikut:

$$\text{Berat jenis profil model } (\rho_m) = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Berat jenis profil struktur sesungguhnya } (\rho_p) = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Berat massa unbalance (m) = 3 gram
 Radius putaran (r) = 10 mm
 Putaran massa unbalance (n) = 1800 rpm
 Panjang jembatan yang sesungguhnya (Lp) = 53 m
 Panjang jembatan model (Lm) = 2,304 m
 Gaya stamper (wp) = 11209 N

➤ Perhitungan aspek skala beban pada model

$$wm = \left(\frac{\rho m}{\rho p} \times \frac{Lm^3}{Lp^3}\right) \times wp = 1,0174 N$$

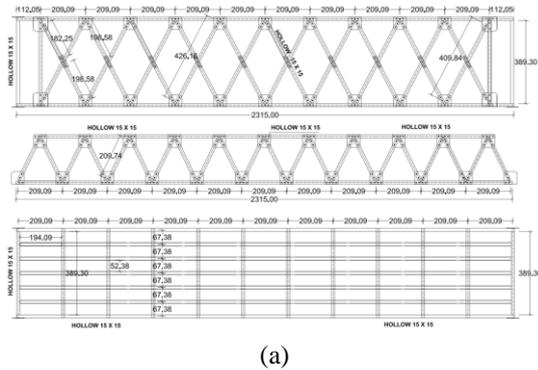
➤ Perhitungan kecepatan angular massa unbalance

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60} = 188,4 \text{ rad/s}$$

➤ Perhitungan gaya sentrifugal massa unbalance

$$F = m \times \omega^2 \times r = 1,065 N$$

Hasil desain penggetar ditunjukkan dalam Gambar 4 dengan spesifikasi teknis sesuai dengan Tabel 3.



(a)

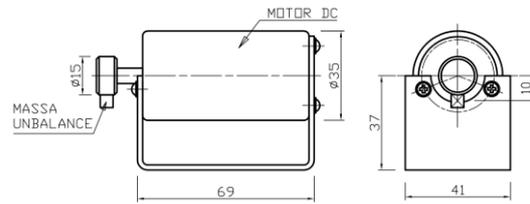


(b)

Gambar 3. a. Dimensi struktur model yang didesain berdasarkan aspek skala, b. Bentuk fisik struktur model jembatan yang dibuat.

Tabel 3. Spesifikasi Teknis Exciter untuk Pengujian Getaran pada Struktur Model

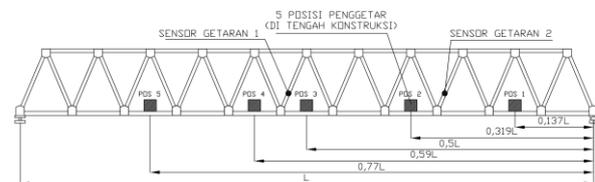
Data pengujian	Nilai	Satuan
Massa unbalance	3	g
Gaya	0,681 – 1,533	N
Frekuensi	24 – 36 Hz (1440 - 2160)	Hz (RPM)
Radius putar massa unbalance	10	mm



Gambar 4. Konstruksi penggetar yang digunakan pada pengujian getaran struktur model.

d. Pengujian Getaran

Pengujian getaran dilakukan baik pada struktur yang sesungguhnya maupun struktur model yang telah dibuat. Variasi pemosisian sistem penggetar (stamper dan exciter) terhadap sensor getaran (accelerometer) pada pengujian getaran yang dilakukan ditunjukkan dalam Gambar 5. Sedangkan Gambar 6 memperlihatkan proses pengujian getaran yang dilakukan pada struktur model, dimana data hasil pengukuran amplitudo terhadap fungsi waktu secara langsung disimpan ke dalam sistem data akuisisi.



Gambar 5. Posisi penggetar dan sensor pada pelaksanaan uji getaran baik pada struktur jembatan yang sesungguhnya maupun pada struktur model.

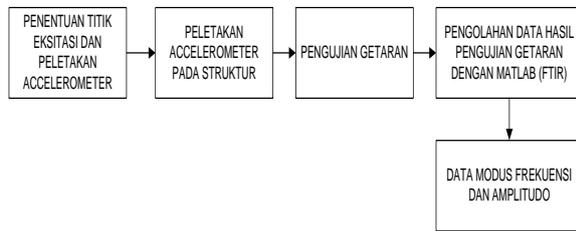


Gambar 6. Pengujian getaran pada struktur model.

e. Analisis Modus Getar

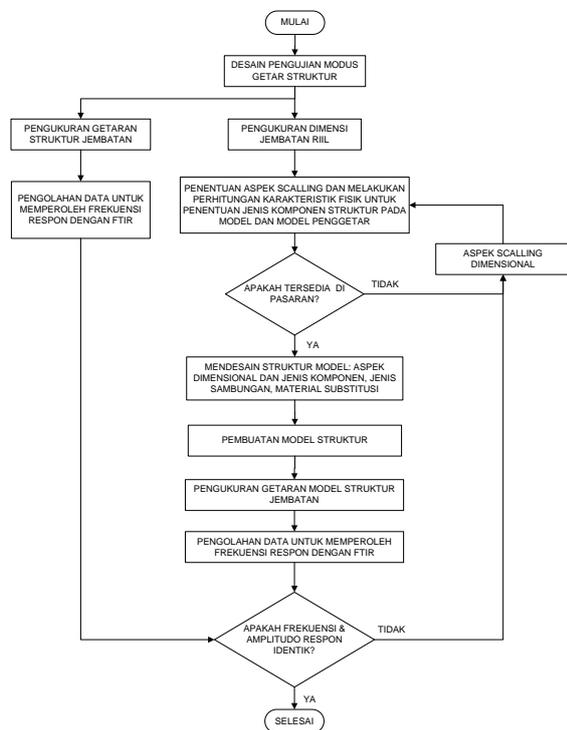
Kesesuaian karakteristik dinamik antara struktur jembatan sesungguhnya dan struktur model dilihat dari pola amplitudo dominan terhadap fungsi frekuensi yang terjadi pada modus getarnya akibat

eksitasi beban pada masing-masing struktur. Oleh karena itu dengan bantuan software Matlab, respon modulus getar yang terukur ditampilkan dalam bentuk frekuensi domain dengan menggunakan fungsi Fast Fourier Transform (FFT). Prosedur pengolahan data tersebut seperti ditunjukkan dalam diagram blok Gambar 7.



Gambar 7. Diagram blok pengolahan data hasil pengukuran getaran.

Metodologi pengembangan model struktur jembatan ditunjukkan dalam bentuk diagram alir Gambar 8.

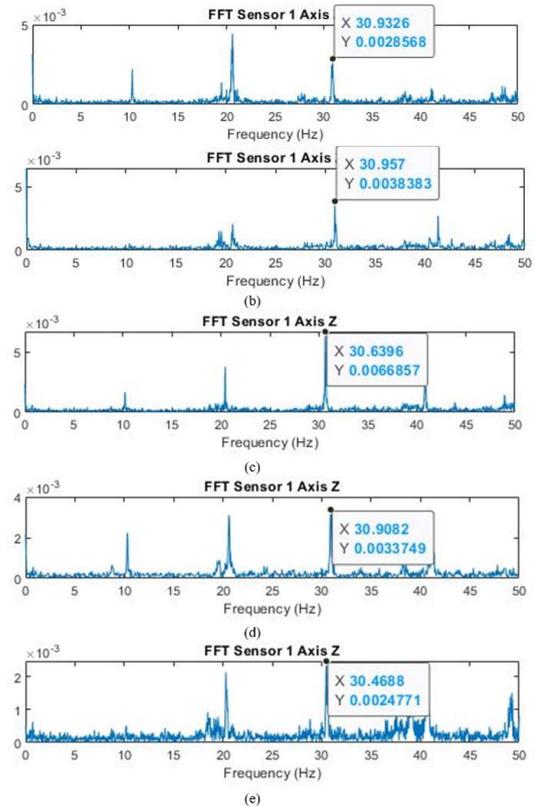


Gambar 8. Diagram alir pembuatan model jembatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

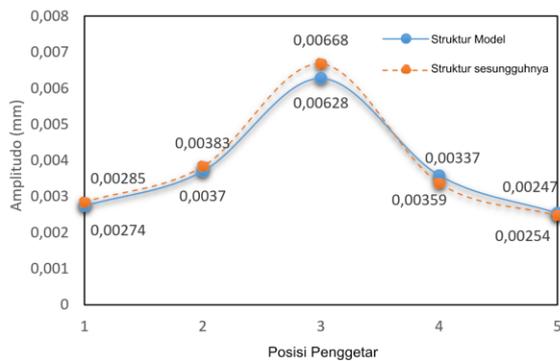
Sensor yang digunakan dalam pengujian getaran merupakan sensor tiga sumbu (X, Y dan Z), dan merujuk pada arah yang dimaksudkan, maka hasil pengukuran pada sumbu Z yang digunakan sebagai rujukan pada analisis modulus getarnya. Merujuk pada Gambar 5, plotting hasil pengukuran getaran struktur model dalam frekuensi domain seperti ditunjukkan dalam Gambar 9. Pada seluruh posisi penggetar, pola amplitudo dominan terjadi di

sekitar frekuensi 30Hz. Kondisi tersebut dapat diidentifikasi sebagai frekuensi alami dari struktur model tersebut. Nilai amplitudo terbesar terjadi pada posisi yang berada di tengah struktur (POS 3, dekat dengan posisi sensor). Nilai amplitudo semakin mengecil untuk posisi yang semakin jauh dari sensor.



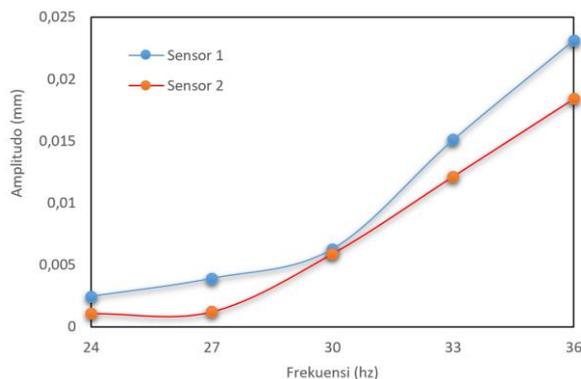
Gambar 9. Plotting hasil pengujian getaran dalam frekuensi domain dengan variasi posisi penggetar: a. Sensor 1 - POS 1, b. Sensor 1 - POS 2, c. Sensor 1 - POS 3, d. Sensor 1 - POS 4, e. Sensor 1 - POS 5.

Dibandingkan dengan hasil pengukuran getaran pada struktur yang sesungguhnya menunjukkan bahwa kedua struktur memiliki pola amplitudo dominan yang sama yaitu di sekitar frekuensi 30 Hz. Besar amplitudo terhadap posisi sensor getaran juga menunjukkan pola yang sama seperti ditunjukkan dalam Gambar 10. Selisih nilai amplitudo terbesar terjadi pada posisi penggetar di tengah konstruksi (POS 3) dengan error sebesar 6,37%. Dari perbandingan kedua kurva amplitudo terhadap posisi penggetarnya (Gambar 10), maupun pola amplitudo dominan yang terjadi menunjukkan bahwa kedua struktur (struktur jembatan yang sesungguhnya dan struktur model) memiliki karakteristik dinamik yang mirip. Oleh karena itu struktur model dapat digunakan sebagai obyek observasi yang dapat mengkorelasikan antara fenomena fisik dan pola modulus getarnya yang mewakili struktur jembatan yang sesungguhnya.



Gambar 10. Pola amplitudo kedua struktur terhadap variasi posisi penggetar pada frekuensi 30 Hz.

Hasil pengujian getaran dengan memvariasikan posisi sensor (Gambar 5, posisi 1 dan 2) dan frekuensi penggetar pada struktur model menunjukkan bahwa korelasi antara amplitudo dan frekuensi untuk kelima posisi penggetar memiliki kesamaan pola seperti ditunjukkan dalam Gambar 11. Amplitudo yang terjadi memiliki nilai yang hampir sama pada pengukuran sensor 1 dan sensor 2 pada frekuensi penggetar 30 Hz, sedangkan pada frekuensi lainnya amplitudo yang terukur pada sensor 1 lebih besar dibandingkan nilai yang terukur oleh sensor 2. Kondisi terkait dengan jarak relatif sensor terhadap tumpuannya.



Gambar 11. Korelasi antara amplitudo dan frekuensi dengan posisi penggetar pada POS 3.

SIMPULAN

Hasil analisa pengujian getaran menunjukkan karakteristik dinamik yang mirip antara struktur jembatan yang sesungguhnya dan struktur model. Hal ini ditunjukkan oleh pola amplitudo dominan yang terjadi pada frekuensi 30 Hz. Selisih nilai amplitudo yang terjadi kurang dari 10 % pada semua posisi penggetar, dimana *error* maksimum terjadi pada posisi penggetar di tengah struktur dengan besar sekitar 6,128 %. Dari pengujian getaran juga diperoleh bahwa posisi penggetar terhadap sensor menentukan besar amplitudo yang terjadi. Pada posisi penggetar di tengah struktur (paling dekat dengan sensor), besar amplitudo maksimumnya mencapai sekitar 6,7 mikron sedangkan amplitudo

minimumnya adalah 2,5 mikron bila penggetar diletakkan di ujung struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Putra, SA., Sani, GAA., Nurwijaya, AT., Anandadiga A., Wijayanto, PB., Trilaksono, BR, dan Riyansyah, M., 2018., Sistem Penilaian Kondisi Jembatan Menggunakan Respons Dinamik dengan Wireless Sensor Network. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, 7(3), 338–343. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v7i3.444>
- [2] Buckingham, E., 1914., On physically similar systems. *Physical Review*, IV(4), 345.
- [3] Harris, GH, and Sabnis, MG., 1999., *Structural modeling and experimental techniques* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- [4] Cai, CS, and Chen, SR., 2004., Framework of vehicle–bridge–wind dynamic analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92, 579–607
- [5] Wang, T., Han, W., Yang, F, and Kong, W., 2014., Wind-vehicle-bridge coupled vibration analysis based on random traffic flow simulation, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 1 (4), 293-308
- [6] Zhong, H., Yang, M, and Gao, ZJ., 2015., Dynamic responses of prestressed bridge and vehicle through bridge–vehicle interaction analysis, *Engineering Structures*, 87, 116–125
- [7] Yoshimura, M., Wi, Q., Takahashi, K., Nakamura, S, and Furukawa, K., 2006. Vibration analysis of the second Saiki Bridge – a concrete filled tubular (CFT) arch bridge, *Journal of Sound and Vibration* 290, 388-409.
- [8] Coppolino, RN, 2014. Structural Dynamic Test – Analysis Correlation, *Proceeding of the 32nd IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics*.
- [9] Memory, TJ., 1995. Thambaritnam, DP and Brameld GH, Free vibration analysis of bridge, *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 10, pp. 705-713.