

ANALISA FREKUENSI ALAMI DAN REGANGAN OLEH KENDARAAN BERMOTOR MENGGUNAKAN FIBER BRAGG GRATING

Michael Tan¹, Saktioto², Tengku Emrinaldi²

¹**Mahasiswa Jurusan Fisika**

²**Dosen Jurusan Fisika**

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Kampus Binawidya Pekanbaru 28293, Indonesia

**Michaelchen7.mc@gmail.com*

ABSTRACT

Vibration-induced strain and natural frequency of Siak I Bridge were investigated in this research. A Strain was calculated from laser power measured by powermeter. Natural frequency was calculated using manual calculation with single-girder analysis. The research has been done at five measurement points at Siak I Bridge. The five measurement points were 10 m, 87,5 m, 175 m, 265 m, dan 287,5 m from the one point of the bridge in Senapelan Subdistrict. The car used to induce vibration was Xenia and the power measurement was conducted in predawn. The instruments used were laser diode, Fiber Bragg Grating ($\lambda_B = 1550$ nm), and powermeter. The results showed that five measuring points almost experienced strain below $20\mu\epsilon$. The natural frequency of the five measuring points at Siak I Bridge were 2,68 Hz, 2,68 Hz, 2,48 Hz, 2,99 Hz, and 2,68 Hz

Keywords: Fiber Bragg Grating, Strain, Natural Frequency, Siak I Bridge

ABSTRAK

Peregangan karena getaran dan frekuensi alami Jembatan Siak I diinvestigasi dalam penelitian ini. Regangan dihitung dari laser yang diukur dengan powermeter. Frekuensi alami dihitung secara kalkulasi manual dengan analisa single-girder. Penelitian dilakukan di lima titik pada Jembatan Siak I. Kelima titik pengukuran adalah 10 m, 87,5 m, 175 m, 265 m, dan 287,5 m dari ujung jembatan di Kecamatan Senapelan. Kendaraan yang digunakan untuk menghasilkan getaran adalah Xenia dan pengukuran dilakukan pada dini hari. Peralatan yang digunakan adalah Laser dioda, Fiber Bragg Grating ($\lambda_B = 1550$ nm) dan powermeter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelima titik pengukuran hampir mengalami regangan dibawah $20\mu\epsilon$. Frekuensi alami kelima titik pengukuran pada Jembatan Siak I adalah 2,68 Hz, 2,68 Hz, 2,48 Hz, 2,99 Hz, dan 2,68 Hz

Kata kunci: Fiber Bragg Grating, Regangan, Frekuensi Alami, Jembatan Siak I

PENDAHULUAN

Sistem Structural Health Monitoring (SHM) merupakan sistem pemantauan kondisi struktur-struktur publik seperti jembatan. Menurut Chang (1999), tujuan dari pemantauan kondisi suatu struktur adalah untuk mengetahui integritas dari struktur yang sedang digunakan oleh publik secara kontinyu dan *real-time*. Parameter-parameter yang dapat digunakan untuk mengetahui keadaan dari suatu jembatan dipilih berdasarkan pada kebutuhan dan juga jenis dari jembatan. Contohnya adalah percepatan, lengkungan, dan regangan.

Regangan pada jembatan bisa diukur dengan memanfaatkan getaran jembatan tersebut. Getaran yang digunakan dapat berupa getaran oleh satu kendaraan uji maupun getaran yang disebabkan oleh angin dan lalu lintas (*ambient vibration*). Data regangan yang didapat digunakan untuk berbagai keperluan pemantauan di bidang teknik sipil. Frekuensi alami jembatan dan tingkat kerusakan pada jembatan bisa diketahui dengan melihat data regangan jembatan.

Frekuensi alami adalah frekuensi dimana suatu benda bergetar ketika mengalami getaran bebas. Setiap struktur memiliki nilai frekuensi alami yang menjadi ciri khasnya sendiri. Frekuensi alami dari sebuah jembatan biasanya diukur dengan menggunakan eksperimen getaran, pemodelan, ataupun metode numerik (Cevik et al, 2002). Frekuensi alami juga dapat dihitung dengan kalkulasi manual (Mahargya dan Suangga, 2012).

Fiber optik dapat digunakan sebagai sensor getaran. Sensor fiber optik

memiliki kelebihan pada ukurannya yang kecil, ringan, dan tahan terhadap interferensi elektromagnetik serta korosi (Chaurasiya, 2012). Salah satu sensor fiber optik yang dapat digunakan sebagai sensor getaran adalah Fiber Bragg Grating. Fiber Bragg Grating merupakan sebutan untuk serat optik yang memiliki kisi di salah satu segmennya. Kisi ini akan memantulkan cahaya yang melewatinya dengan panjang gelombang tertentu dan melewatkan sisanya. Fiber Bragg Grating biasa digunakan sebagai sensor regangan dan temperatur. Fiber Bragg Grating memiliki berbagai kelebihan seperti kemudahannya untuk disusun sebagai sistem multi sensor.

Penelitian ini akan menganalisa regangan dan frekuensi alami Jembatan Siak I. Mobi uji dengan tipe Xenia akan dilewatkan di jembatan Siak. Kendaraan akan menyebabkan getaran pada titik pengukuran dan merubah daya yang terukur pada powermeter. Regangan pada titik pengukuran akan dihitung dari besarnya perubahan daya ketika mobil lewat. Frekuensi alami kelima titik pengukuran dihitung secara manual menurut struktur geometri jembatan.

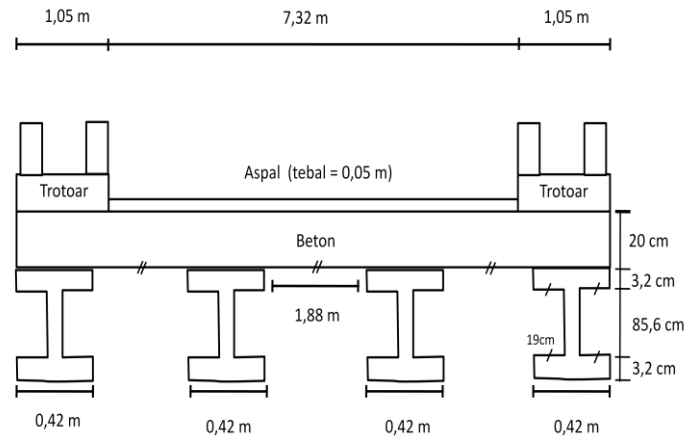
LANDASAN TEORI

Frekuensi Alami

Frekuensi alami merupakan frekuensi dimana sistem akan bergetar ketika ia mengalami getaran bebas. Suatu sistem biasanya memiliki beberapa frekuensi alami. Frekuensi alami yang paling pertama disebut sebagai frekuensi fundamental. Frekuensi alami struktur yang rumit seperti jembatan dapat dihitung dengan beberapa metode.



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Jembatan Siak I Pekanbaru (b) Struktur geometris melintang Jembatan Siak I

Frekuensi alami dapat dihitung dengan perhitungan manual tanpa permodelan dengan menyederhanakan struktur jembatan. Mahargya dan Suangga (2012) telah menurunkan rumus untuk menghitung frekuensi alami jembatan dengan menyederhanakannya menjadi balok diatas tumpuan dengan satu derajat kebebasan (SDOF) menggunakan penyederhanaan *generalized* SDOF. Frekuensi alami jembatan dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{M}} \quad (1)$$

Dimana

f : Frekuensi alami pertama jembatan(Hz)

L : Panjang bentang jembatan (m)

E : Modulus elastisitas jembatan (N/m²)

I : Momen inersia jembatan (m⁴)

m : Massa jembatan (kg)

Jembatan Siak I Pekanbaru

Jembatan Siak I merupakan jembatan dengan struktur bagian atas

gelagar komposit *multi-girders*. Jembatan gelagar komposit menggunakan baja sebagai gelagar (girder) dan beton sebagai plat lantai jembatannya. Baja dan beton dihubungkan oleh suatu penghubung geser yang ditempelkan diatas batang baja dan dibenamkan ke beton. Panjang dari jembatan Siak I adalah 350 m.

Fiber Bragg Grating

Fiber Bragg Grating merupakan suatu segmen pada inti fiber optik yang memiliki variasi indeks bias secara periodic. Fiber Bragg Grating dibuat dengan memaparkan inti fiber pada pola interferensi optik yang kuat. Fiber Bragg Grating bekerja dengan memantulkan cahaya yang diberikan padanya. Pemantulan maksimal terjadi pada panjang gelombang yang disebut panjang gelombang Bragg (λ_B). Panjang gelombang Bragg akan mengalami pergeseran ($\Delta\lambda_B$) jika FBG mengalami regangan ataupun perubahan suhu berdasarkan persamaan (2).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_\alpha)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

Dimana ρ_α adalah konstanta fotoelastik (0,22), α adalah konstanta pemuaian termal serat optik ($\sim 0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ untuk silika), ξ adalah koefisien thermo-optik ($8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ untuk serat berinti silika yang di-dope dengan germanium), $\Delta\epsilon$ adalah regangan, dan ΔT adalah perubahan suhu.

Fiber Bragg Grating memantulkan sinyal cahaya yang mengandung informasi pengukuran seperti penggeseran panjang gelombang. Sinyal cahaya ini memerlukan demodulator atau interrogator untuk pendeteksiannya. Salah satu interrogator yang dapat digunakan adalah interrogator daya. Pergeseran panjang gelombang Bragg akan mengakibatkan daya cahaya yang dipantulkan berubah. Daya cahaya yang dipantulkan FBG ditentukan oleh persamaan (3) (Oswald et al, 2011).

$$R = S_0 P \sqrt{\frac{\alpha_L}{\pi}} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_B + \alpha_L}} \exp\left[-\frac{\alpha_B \alpha_L}{\alpha_B + \alpha_L} (\lambda_B - \lambda_L)^2\right] \quad (3)$$

Dimana

- R : Daya cahaya yang dipantulkan FBG
- S_0 : Reflektivitas puncak dari FBG
- P : Total daya yang dihasilkan oleh laser
- α_B : Lebar Gaussian FBG
- α_L : Lebar Gaussian laser
- λ_B : Panjang gelombang Bragg
- λ_L : Panjang gelombang laser

Lebar Gaussian dapat ditentukan dari FWHM (Full Width at Half Maximum). persamaan (4) dan (5).

$$\alpha_B = \frac{\ln 16}{(FWHM)^2} \quad (4)$$

Dimana

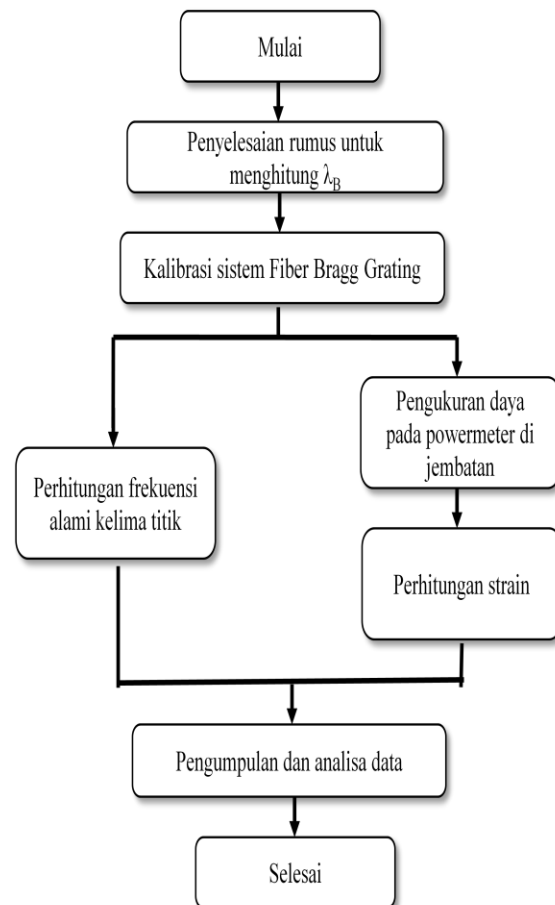
- α_B : Lebar Gaussian FBG
- FWHM : Full Width at Half Maximum FBG

$$\alpha_L = \frac{\ln 16}{(FWHM)^2} \quad (5)$$

Dimana

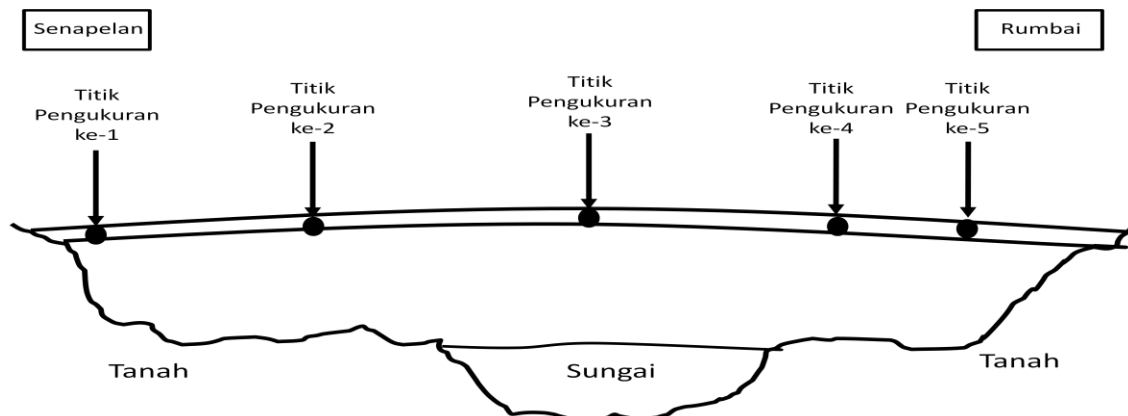
- α_L : Lebar Gaussian laser
- FWHM : Full Width at Half Maximum laser

METODE PENELITIAN



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Penelitian ini menghitung regangan menggunakan FBG dan frekuensi alami jembatan dengan kalkulasi manual. Rangkaian alat yang digunakan dalam



Gambar 3 Letak-titik pengukuran dengan FBG pada Jembatan Siak I

penelitian terdiri dari laser dioda dengan panjang gelombang 1550 nm dan daya -5dBm, Fiber Bragg Grating ($\lambda_B = 1550$ nm), dan powermeter. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. Penelitian diawali dengan memodifikasi persamaan (3) yang digunakan untuk menghubungkan daya pada powermeter dengan regangan. Modifikasi dilakukan karena rangkaian yang digunakan memiliki *loss* pada sambungannya. Sistem FBG dikalibrasi dengan mengukur perubahan suhu air panas. Pengukuran air panas dilakukan dengan mengukur suhu air panas menggunakan FBG dan termometer. Suhu air dicatat setiap 30 detik selama 5menit. Perbandingan suhu yang dibaca kedua alat ini akan menunjukkan akurasi persamaan yang digunakan

Pengukuran daya pada powermeter dilakukan di lima titik pada Jembatan Siak I. Letak titik pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3. Letak kelima titik dari ujung jembatan di Kecamatan Senapelan adalah 10 m, 87,5 m, 175 m, 265 m, dan 287,5 m. Pengukuran dilakukan pada dini hari untuk mencegah gangguan dari kendaraan lain. Sistem

FBG dibangun di salah satu titik pengukuran. FBG ditempel pada sisi samping badan jembatan. Sebuah mobil Xenia dilewatkan dengan kecepatan yang tetap diatas titik pengukuran sebanyak enam kali. Daya pada powermeter dicatat untuk keenam pengukuran tersebut. Rangkaian FBG dipindahkan ke titik pengukuran selanjutnya tanpa membongkar rangkaian ketika pengukuran pertama selesai dilakukan.

Frekuensi alami jembatan dihitung menggunakan kalkulasi manual berdasarkan analisa single-girder. Perhitungan frekuensi alami dilakukan berdasarkan struktur geometri dan data yang tersedia untuk publik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyelesaian Rumus Pergeseran Panjang Gelombang Bragg

Rangkaian alat yang digunakan mengalami kehilangan daya sehingga Daya *loss* dapat dieliminasi dengan menghitung selisih daya di powermeter sebelum dan ketika diberi perlakuan

seperti regangan. Daya sebelum diberi perlakuan disebut keadaan referensi. Besar daya pada powermeter dan suhu pada keadaan referensi harus diketahui. Konstanta-konstanta yang terkait seperti FWHM (5 nm untuk laser dioda dan 0,3 nm untuk FBG), reflektivitas FBG (99%), dan daya laser (316 μW) dimasukkan ke persamaan (3). Persamaan (3) disubstitusikan ke persamaan (6). Persamaan untuk selisih daya yang dibaca termometer adalah:

$$\Delta P_T = 18,7 \exp[-0,111(\lambda_{B,0} - \lambda_L)^2] - 18,7 \exp[-0,111(\lambda_{B,1} - \lambda_L)^2] \quad (7)$$

ΔP_T merupakan selisih daya sebelum dan ketika diberi perlakuan. $\lambda_{B,0}$ pada persamaan (7) merupakan panjang gelombang pada keadaan referensi dan $\lambda_{B,1}$ adalah panjang gelombang ketika mengalami perlakuan. $\lambda_{B,0}$ dan $\lambda_{B,1}$ tidak dapat diukur secara langsung karena keterbatasan alat sehingga harus dihitung. jenis FBG yang digunakan umumnya memiliki panjang gelombang Bragg sebesar 1550 nm saat suhu 20 °C dan tanpa peregangan. Panjang gelombang Bragg FBG pada suhu yang lain ataupun saat diregangkan dapat diketahui dengan menghitung besar pergeseran panjang gelombang Bragg dari saat suhu 20°C dan tanpa peregangan. Panjang Gelombang Bragg pada keadaan referensi dan saat diberi perlakuan dapat dinyatakan sebagai.

$$\lambda_B = 1550 \text{ nm} + \Delta\lambda_{B,0} \quad (8)$$

Dimana

$\lambda_{B,0}$: Panjang gelombang Bragg pada keadaan referensi

$\Delta\lambda_{B,0}$: Pergeseran panjang gelombang dari panjang gelombang saat referensi ke saat suhu 20°C dan tanpa peregangan

$$\lambda_{B,1} = 1550 \text{ nm} + \Delta\lambda_{B,1} \quad (9)$$

Dimana

$\lambda_{B,1}$: Panjang gelombang Bragg saat diberi perlakuan

$\Delta\lambda_{B,1}$: Pergeseran panjang gelombang dari panjang gelombang saat diberi perlakuan ke saat suhu 20°C dan tanpa peregangan

Panjang gelombang laser (λ_L) yang digunakan 1550 nm. Rumus ($\lambda_B - \lambda_L$) pada persamaan (7) hanya menyisakan $\Delta\lambda_B$ saja. Hasil modifikasi adalah persamaan (10).

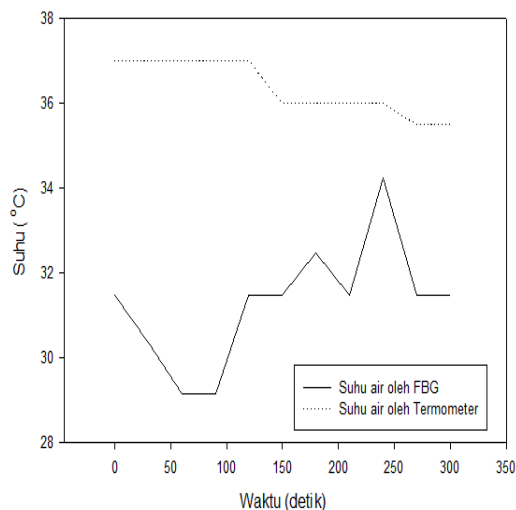
$$\Delta P_T = 18,7 \exp[-0,111(\Delta\lambda_{B,0})^2] - 18,7 \exp[-0,111(\Delta\lambda_{B,1})^2] \quad (10)$$

Persamaan (10) mengharuskan daya yang terbaca di powermeter dan suhu sebelum pengukuran dilakukan (keadaan referensi) diketahui terlebih dahulu.

Kalibrasi sistem Fiber Bragg Grating

Pengujian persamaan (10) bertujuan untuk mengetahui apakah rumus yang digunakan dapat menghitung perubahan suhu dan regangan. Grafik perubahan suhu air panas selama 5 menit dapat dilihat pada Gambar (4). Hasil pengukuran suhu oleh termometer dan FBG memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Rata-rata perbedaan suhu yang diukur keduanya adalah 13,90 %. Grafik suhu terhadap waktu pada Gambar (4)

menunjukkan suhu yang diukur oleh termometer cenderung turun sedangkan suhu yang diukur menggunakan FBG mengalami fluktuasi pada rentang 29 hingga 34 °C. Kecenderungan data termometer menurun disebabkan oleh air mengalami pendinginan selama pengukuran berlangsung. Besarnya perbedaan suhu yang dibaca antara termometer dan FBG dapat disebabkan oleh dua faktor utama. Faktor pertama adalah λ_B pada suhu 20°C bisa saja bukan 1550 nm karena FBG yang digunakan memiliki ketidakpastian sebesar 0,3 nm. Faktor kedua adalah daya yang sampai di FBG bukan 316 μW seperti yang diperkirakan. Rangkaian yang digunakan mengalami kehilangan daya hingga 97,5% selama penjalaran. Hal ini disebabkan *loss* pada *connector*.

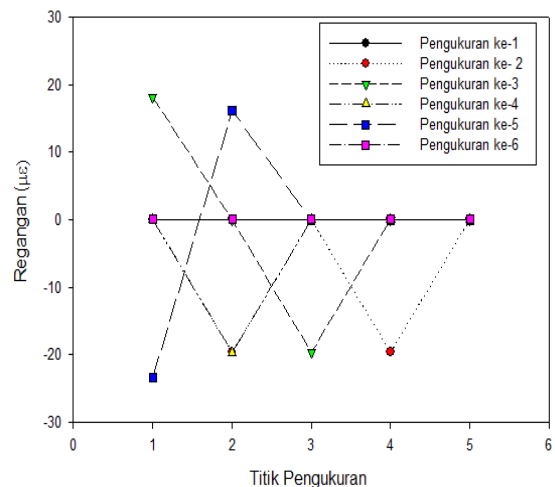


Gambar 4. Grafik perubahan suhu panas air dengan alat ukur

Regangan Jembatan oleh Kendaraan

Pengukuran yang dilakukan di kelima titik di jembatan Siak I menghasilkan data berupa daya yang

dilewatkan oleh FBG. Getaran yang disebabkan kendaraan hanya menyebabkan perubahan daya sebesar $\pm 0,01\mu\text{W}$ pada powermeter. Regangan dihitung menggunakan persamaan (10). Data regangan yang didapat dari kelima titik bersifat saling bebas. Data kelima titik tidak dapat memberikan fungsi yang menghubungkan posisi kelima titik terhadap besar regangan yang didapat. Data regangan tersebut tidak bisa digunakan untuk menjawab apakah semakin ke tengah jembatan, regangan suatu titik akan lebih besar.



Gambar 5. Grafik regangan kelima titik pengukuran dengan FBG

Banyak pengukuran yang menunjukkan bahwa titik pengukuran tidak mengalami regangan (regangan sebesar 0 $\mu\epsilon$). Penyebab pembacaan tersebut disebabkan oleh resolusi powermeter yang digunakan hanya 0,01 μW . Regangan yang dialami oleh titik pengukuran tidak cukup besar untuk menyebabkan perubahan 0,01 μW pada powermeter sehingga regangan tersebut tidak terdeteksi. Resolusi regangan dari

pengukuran ini diestimasi sebesar $\sim 20 \mu\epsilon$. Besar regangan yang dialami kelima titik pengukuran umumnya berada dibawah $20 \mu\epsilon$. Regangan yang dialami suatu titik di jembatan ketika dilewati kendaraan biasanya berada dibawah $100 \mu\epsilon$. Besar regangan tersebut tergantung pada titik pengukuran, kendaraan, dan jembatannya. Regangan pada Jembatan Siak I dapat dikategorikan cukup kecil dan normal. Data tersebut hanya menunjukkan regangan maksimal yang terjadi ketika titik pengukuran dilewati kendaraan. Data yang didapat memberikan gambaran seberapa besar skala regangan (amplitudo regangan) yang terjadi tapi tidaklah cukup untuk menjelaskan sepenuhnya getaran yang terjadi selama kendaraan melewati jembatan.

Perhitungan Frekuensi Alami Jembatan Siak I

Frekuensi alami Jembatan Siak I Pekanbaru dihitung secara manual tanpa menggunakan pemodelan komputer apapun. Kalkulasi manual ini menggunakan analisa single-girder untuk tiap bentang jembatan. Bentang yang berbeda akan memiliki frekuensi alami yang berbeda juga. Frekuensi alami yang dihitung tidak dimaksudkan untuk mewakili frekuensi alami jembatan secara keseluruhan. Frekuensi alami kelima titik pengukuran dapat dilihat pada tabel (1).

Frekuensi alami yang dihitung dengan kalkulasi manual menghasilkan nilai frekuensi yang berada pada rentang 2,48 Hz hingga 2,99 Hz. Bentang 20 m memiliki frekuensi alami terbesar, yaitu 2,99 Hz sedangkan bentang 29 m memiliki frekuensi alami terkecil (2,48 Hz). Frekuensi alami yang didapatkan

Tabel 1. Frekuensi alami titik pengukuran

Titik	Panjang bentang (m)	Frekuensi alami (Hz)
1	24,9	2,68
2	24,9	2,68
3	29	2,48
4	20	2,99
5	24,9	2,68

merupakan frekuensi alami pertama. Frekuensi alami jembatan, bergantung kepada massa dan kekakuan flexural (nilai EI) dari jembatan. Kedua parameter tersebut juga dipengaruhi bentuk geometri jembatan dan sifat bahan. Bentuk geometri seperti ukuran girder dan dimensi beton akhirnya akan sangat berpengaruh pada frekuensi alami jembatan. Infrastruktur, terutama jembatan, dengan ukuran yang besar akan memiliki frekuensi alami yang kecil. Jembatan dengan bentang 20-30 m umumnya memiliki frekuensi alami direntang 2 Hz - 5 Hz. Jembatan dengan panjang bentang melebihi 100 m dapat memiliki frekuensi alami serendah $\sim 0,2$ Hz.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari analisa pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa rata-rata persentase kesalahan pengukuran dengan sistem FBG dalam penelitian ini adalah 13,90%
2. Getaran karena mobil Xenia diatas Jembatan Siak I Pekanbaru menyebabkan perubahan daya yang

- kecil pada powermeter, yaitu sebesar 0,01 μ W
3. Peregangan yang dialami kelima titik pengukuran umumnya berada pada rentang $< 20 \mu\epsilon$ dan hanya menunjukkan besar kecil peregangan kelima titik saja.
 4. Frekuensi alami kelima titik pengukuran adalah berturut-urur 2,68 Hz; 2,68Hz; 2,48 Hz; 2,99; dan 2,68 Hz. Metode yang digunakan adalah kalkulasi manual secara analisa *single-girder*

Oswald, D.P., Richardson, S. J., dan Wild, G. 2011. *Numerical Modelling of Interrogation Systems for Optical Fibre Bragg Grating Sensors*. SPIE Smart Nano-Micro Materials and Devices. Melbourne, Australia. Proc. SPIE 8204. 82040Q

DAFTAR PUSTAKA

- Cevik, M., Özkaya, E, dan Pakdemirli, M. 2002. *Natural Frequencies of Suspension Bridges: An Artificial Neural Network Approach*. Journal of Sound and Vibration (2002) 257(3), 596-604.
- Chang, F.K. "What is Structural Health Monitoring?" Structural Health Monitoring: A Report of the First International Workshop. CRC Press, Boca Raton, FL, 1999. pp. 1062
- Chaurasiya, Himanshu. 2012. *Recent Trends of Measurement and Development of Vibration Sensors*. International Journal of Computer Science Issues, Volume 9, Issue 4, No 1, July 2012
- Mahargya, A. L. dan Suangga, M. 2012 *Analisa Pengaruh Korosi Pada Girder Terhadap Perubahan Kapasitas Penampang Dan Frekuensi Alamiah Jembatan Komposit (Baja-Beton)*. Undergraduate thesis, BINUS.

