

# EVALUASI GAYA ELEMEN HANGER PADA JEMBATAN TIPE PELENGKUNG BAJA DENGAN PENDEKATAN METODE UJI GETAR (EVALUATION OF HANGER TENSION ON STEEL ARCH BRIDGE BY VIBRATION METHOD ASSESMENT)

Gatot Sukmara

Puslitbang Jalan dan Jembatan  
Jl. AH. Nasution No. 264 Bandung 40294  
e-mail: gatot.sukmara@gmail.com

Diterima: 02 Juni 2014; direvisi: 14 Juli 2014; disetujui: 07 Agustus 2014

## ABSTRAK

Jumlah jembatan tipe pelengkung yang memiliki elemen hanger sebagai penopang utama lantai jembatan sudah banyak dibangun di Indonesia. Pemeriksaan kondisi jembatan dilakukan secara rutin baik secara visual maupun pemeriksaan khusus untuk mengetahui tingkat keamanan struktur dimana berhubungan langsung dengan tingkat keselamatan pengguna jembatan. Pengukuran besar gaya tarik hanger pada elemen jembatan dapat diketahui dengan cara lift off dan cara uji getar. Teknologi pemeriksaan jembatan berdasarkan cara uji getar semakin berkembang dimana salah satu aplikasi dari teknologi ini berupa pemeriksaan gaya hanger eksisting jembatan melalui pengukuran frekuensi alami elemen hanger dan konsep formula string theory. Pengujian dengan cara tidak merusak dilakukan untuk mengetahui mutu material dan parameter getaran dari hanger jembatan dimana parameter tersebut digunakan untuk evaluasi dan analisis kapasitas elemen hanger jembatan. Dari hasil evaluasi eksperimental dan analisis pemodelan struktur jembatan diperoleh bahwa kondisi eksisting hanger jembatan akibat beban lalu lintas kendaraan dalam kondisi linier elastis. Tingkat akurasi hasil pengujian di lapangan berada pada rentang nilai 4% sampai dengan 6,71% terhadap hasil analisis perhitungan gaya kabel pada pemodelan analisis struktur jembatan tipe pelengkung baja yang sudah dikalibrasikan terhadap parameter hasil eksperimental uji tarik elemen hanger jembatan.

**Kata kunci:** uji getar, gaya tarik hanger, jembatan pelengkung baja, teori string, frekuensi alami

## ABSTRACT

A lot of arch bridges built in Indonesia have hanger elements as main support for the bridge deck. Bridge condition inspection performed periodically both visually and special inspections determine the capacity level that is directly related to safety of bridge users. Measurement of the tensile force on the hanger elements can be determined by the lift - up and vibration test methods. Bridge inspection technology based on vibration test method is developing, where one of the main applications of this technology is the hanger tension force estimation on existing bridges. It measures the natural frequencies of the hanger elements of bridge and is evaluated with the string theory formula. Non destructive tests are done to determine the quality of the material. The vibration parameters of bridge structure are used for the evaluation and analysis of the capacity of the bridge hanger elements. The results of experimental evaluation and analysis of structural modeling show that the condition of the existing bridge hanger due to live load is in linear elastic condition. Accuracy result from field testing compared to modeling analysis of the bridge structures are in the range of 4% to 6.71% are and calibrated against experimental tension test result of hanger elements.

**Keywords:** vibration test, hanger tension, steel arch bridge, string theory, natural frequency

## PENDAHULUAN

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 34 tahun 2006 tentang Jalan, yang dimaksud dengan jembatan adalah jalan yang terletak di atas permukaan air dan/atau di atas permukaan tanah dimana monitoring jembatan secara periodik maupun berdasarkan riwayat waktu secara kontinu diperlukan untuk mengetahui keamanan infrastruktur jembatan dan sangat penting bagi keselamatan pengguna jalan yang melintas di atasnya. Infrastruktur jembatan sudah dibangun di Indonesia sejak 1971, dimana sebanyak 2% dikategorikan ke dalam jembatan bentang panjang (Vaza 2013) dan secara periodik dilakukan monitoring dan pemeriksaan sesuai tata cara pada *Bridge Management System (BMS)*. Dari data survey dan pemeriksaan visual pada 40 buah jembatan bentang panjang di Indonesia terdapat didalamnya beberapa tipe jembatan yang menggunakan elemen hanger menjadi elemen utama penopang lantai kendaraan seperti Jembatan Siak 3, Jembatan Seruyan, dan Jembatan Batanghari 2, dimana sampai dengan tahun 2010 pemeriksaan yang bertujuan untuk menginisiasi nilai kapasitas tarik elemen hanger terutama elemen hanger untuk jembatan tipe pelengkung yang baru dibangun belum dilakukan. Hal ini mengakibatkan tidak diperolehnya data riwayat kondisi elemen tersebut dalam masa layannya.

Untuk mengetahui seberapa besar fungsi dari aplikasi metode uji getar pada identifikasi gaya tarik eksisting elemen hanger jembatan ini maka perlu dilakukan evaluasi tingkat akurasi dengan melakukan perbandingan nilai uji eksperimental (*lift off method*) elemen hanger terhadap analisis pemodelan elemen, perbandingan nilai hasil pengujian cara uji getar pada elemen hanger eksisting jembatan dan pemodelan struktur jembatan, serta mengevaluasi faktor elastisitas dan linearitas dari sistem elemen hanger jembatan.

Selain itu perlu juga dilakukan evaluasi pengaruh dari nilai dan besaran hasil pengujian struktur jembatan terhadap metode penyesuaian parameter pemodelan struktur jembatan (*tuning*) (Bayraktar, A. *et al.* 2009) sehingga dapat disimulasikan kondisi dan perilaku jembatan terhadap beban-beban baik pada masa layan

(*service load*) maupun beban ultimit (*ultimate load*) sehingga dapat dievaluasi batas respon elemen hanger jembatan maupun struktur jembatan dengan kaidah beberapa asumsi yang digunakan.

## KAJIAN PUSTAKA

Seiring dengan perkembangan jaman pemeriksaan terhadap pendekatan besaran nilai gaya tarik dari elemen hanger atau penggantung pada jembatan sudah dapat dilakukan dimana salah satunya adalah dengan menggunakan uji getar. Pemeriksaan jembatan menggunakan cara uji getar dapat dilakukan pada struktur jembatan bentang pendek dan bangunan bawah jembatan (Tristanto 1990), struktur jembatan bentang panjang, dan elemen hanger jembatan (Caetano 2011). Metode penilaian gaya hanger pada jembatan eksisting ini berdasarkan pada konsep *string theory* (BH Kim 2007), dimana metode pemeriksaan ini semakin berkembang seiring dengan perkembangan *taxonomy* teknologi pengujian dinamis jembatan (Bien 2007) yang merupakan bagian dari pemeriksaan jembatan dengan pengujian tidak merusak (*non destructive test*), selain pemeriksaan visual setiap 1 tahun sekali dan pemeriksaan khusus setiap 5 tahun sekali.

Secara umum kegiatan cara uji getar mengacu pada *taxonomy* pengujian dinamis jembatan terutama pengujian getaran bebas dengan beban eksitasi palu getar (*impulse hammer*) dan beban lingkungan (*ambient*), baik pada elemen maupun struktur jembatan seperti dijelaskan pada Gambar 1.

Parameter hasil uji getar diolah dari *time domain data* ( $m/s^2$ ) menjadi *frequency domain data* (Hz) melalui proses transformasi *Fourier* (BH Kim, *et al.* 2007 dan Bien 2007). (Gambar 2) sehingga diperoleh puncak amplitudo (*Peak*) frekuensi alami yang mewakili sifat parameter-parameter dinamis baik elemen maupun struktur jembatan.

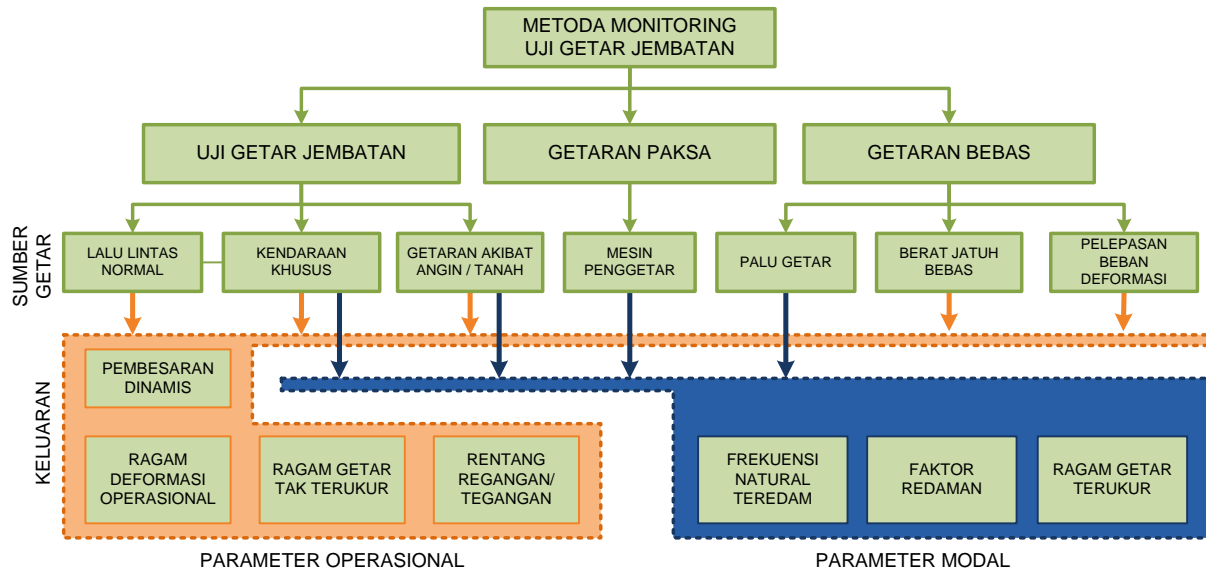
Pengolahan data perekaman dinamis menghasilkan nilai Faktor Pembesaran Dinamis (Brady, O'Brien, and Žnidarič 2006) (*Dynamic Load Allowance*) dan dengan melakukan *curve fitting* dari data respon dinamis akan

mengindikasikan sifat elastis bahan yang terbebani (*reversible*).

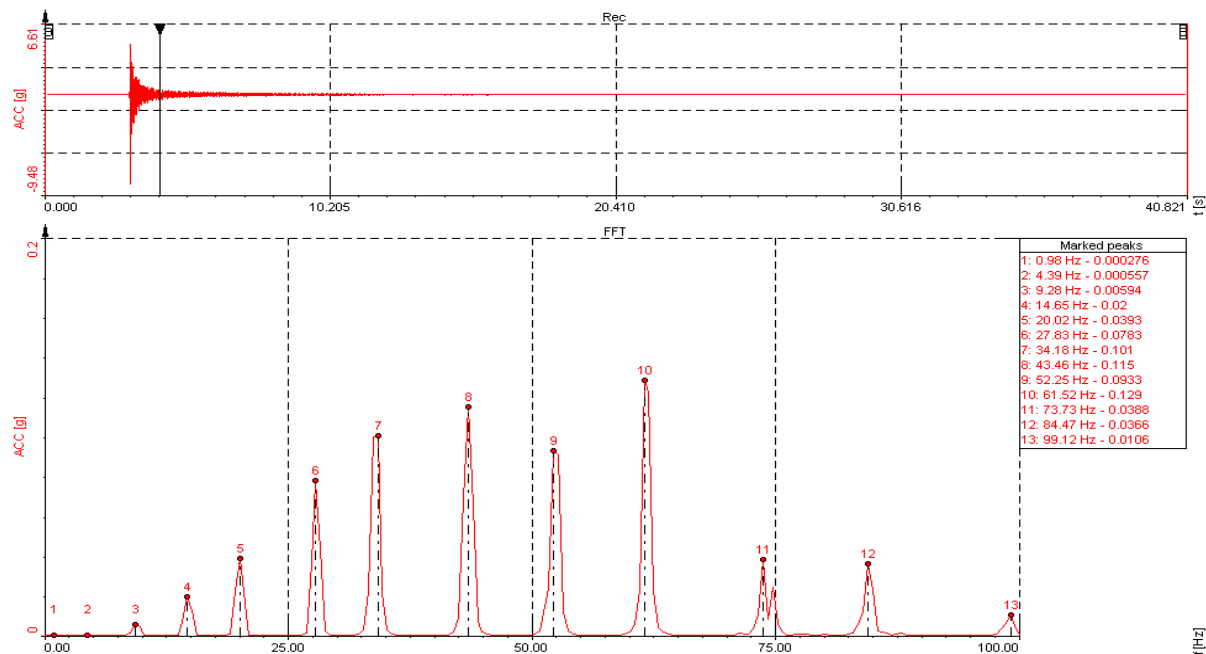
Dari data hasil pengujian lapangan dengan menggunakan massa ( $m$ ), panjang hanger ( $L$ ), frekuensi alami ke- $n$  ( $f_n$ ), jumlah nilai puncak amplitudo (*Peak*) frekuensi ( $n$ ) sebagai input

formulasi *string theory* (Persamaan 1) (BH Kim, *et al.* 2007, Bien 2007, K Maes, *et al.* 2012 dan Kangas, S., *et al.* 2012, Fang 2012) diperoleh gaya tarik hanger.

$$T = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 \dots\dots\dots (1)$$



Gambar 1. Taksonomi uji dinamis pada jembatan, Bien and Zwolski (2007)



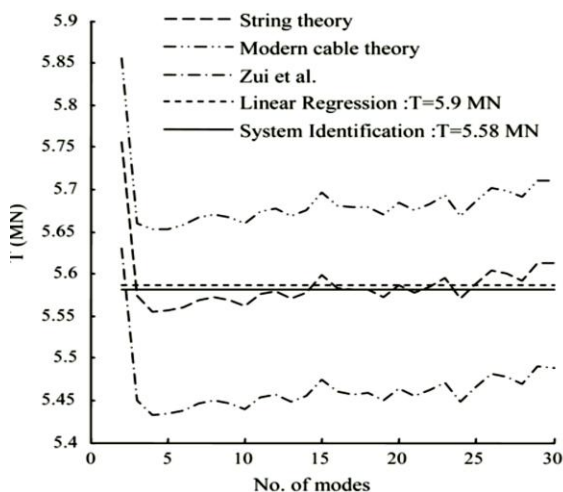
Gambar 2. Transformasi Fourier

Nilai gaya hanger diperoleh dengan menggunakan analisis rata-rata terhadap *gradien* grafik gaya hanger dari setiap puncak amplitudo frekuensi alami elemen pada mode getar ke- $n$  ( $f_n$ ) (Kim, BH. *et al.* 2007, Bien and Zwolski 2007, dan Kangas, S., *et al.* 2012) seperti dijelaskan pada Gambar 3.

Pendekatan parameter pemodelan elemen dengan cara penyesuaian parameter pada model elemen hingga dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara model matematis dan model aktual dengan memasukan nilai hasil uji perilaku di lapangan (Bayraktar, A. *et al.* 2009). Penggunaan program bantu analisis struktur saat ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak analisis elemen seperti ANSYS atau perangkat lunak CAD/CAM lainnya, dimana pemodelan elemen merupakan perhitungan metode elemen hingga.

## HIPOTESIS

Identifikasi gaya tarik pada elemen hanger untuk jembatan eksisting pada jembatan tipe pelengkung dapat dilakukan dengan menggunakan cara uji getar dengan memperhitungkan sifat elastis linier dari elemen hanger jembatan dan struktur jembatan.



**Gambar 3.** Nilai rata-rata gaya hanger

## METODOLOGI

Pemeriksaan jembatan dilakukan pada Jembatan Siak 3 (Gambar 4 dan Gambar 5) yang merupakan jembatan pelengkung dengan panjang bentang 170 m (25 m + 120 m + 25 m) yang berlokasi di Kota Pekanbaru Propinsi Riau. Metode penelitian berupa metode eksperimental di lapangan dengan cara melakukan pengumpulan data pengukuran berupa data sifat fisik elemen struktur jembatan baik material maupun geometri, pengumpulan data literatur yang berkaitan dengan struktur Jembatan Siak 3 serta analisis dan evaluasi baik struktur maupun elemen jembatan. (Gambar 5).

Tahap pertama dilakukan pengumpulan data sekunder terdiri dari data teknis dan gambar (*as built drawing*) struktur jembatan dan spesifikasi elemen hanger menurut data perencanaan, data hasil uji tarik material elemen hanger, uji frekuensi alami elemen yang terbebani beban statis bertahap (Bukaka Teknik Utama, PT 2012), untuk dijadikan acuan analisis dan evaluasi elemen dan struktur jembatan.

Tahap berikutnya adalah pengambilan data pengujian lapangan pada lokasi jembatan pelengkung baja yaitu Jembatan Siak 3. Data yang dikumpulkan berupa data *primer* yang dilakukan melalui pemeriksaan visual jembatan sesuai *Bridge Management System* (BMS), pengujian mutu kekerasan baja dengan metode tidak merusak (*Non Destructive Test*), pengukuran dimensi dan geometri jembatan baik elemen jembatan ataupun struktur jembatan, dan pengukuran parameter getaran elemen dengan metode uji getar pada struktur dan elemen hanger jembatan, dimana digunakan eksitasi beban berupa beban lalu lintas dan beban lingkungan sekitar, yaitu berupa getaran bebas (*ambient*) maupun getaran bebas terbebani (*impulse*) untuk mendapatkan parameter frekuensi alami (*natural frequency*) dan mode getar (*mode shape*) aktual dari struktur jembatan dan hanger jembatan pada kondisi terbebani oleh berat sendiri struktur jembatan.



(a)

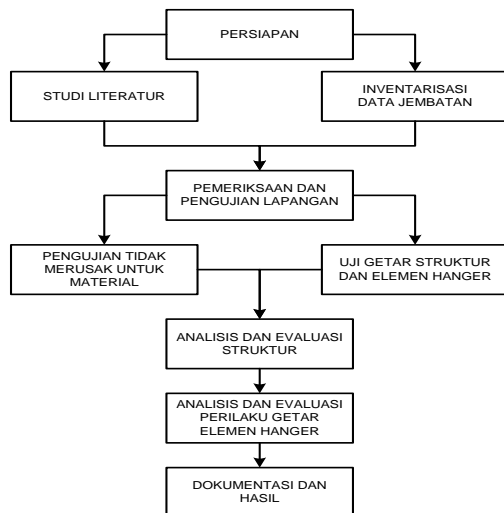


(b)

**Gambar 4.** Jembatan Siak 3 (a) Tampak memanjang (b) Elemen pelengkung jembatan

### Uji getar struktur jembatan

Pengujian perilaku getaran struktur jembatan menggunakan 3 buah akselerometer yang dipasang pada lantai jembatan, dimana masing-masing pada jarak seperempat ( $1/4L$ ) dan setengah ( $1/2L$ ) dari panjang bentang utama jembatan. Beban eksitasi menggunakan beban lalu lintas kendaraan yang melintas pada jembatan.



**Gambar 5.** Diagram alir metodologi

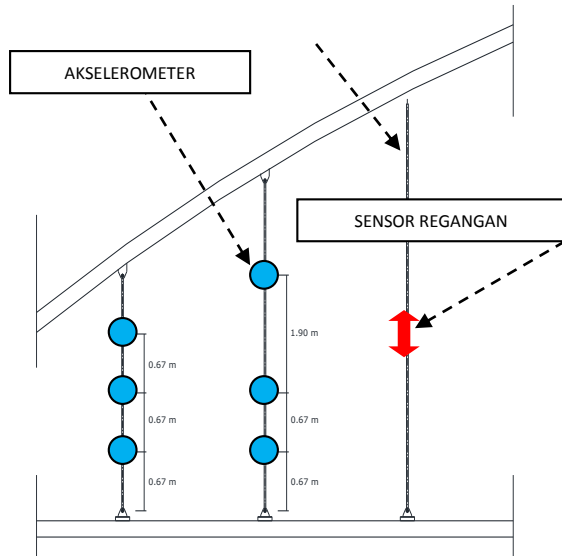
### Uji getar hanger

Uji getar elemen hanger menggunakan 1 buah akselerometer atau 3 buah sensor akselerometer yang diberi eksitasi getaran menggunakan palu penggetar (*impulse hammer*) seperti dijelaskan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

### Uji regangan dinamis

Selain itu dilakukan juga pengujian regangan dinamis pada elemen hanger jembatan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perilaku *linearitas* dan *reversibilitas* regangan pada elemen hanger, dimana pengukuran respon regangan diukur akibat beban hidup berupa kendaraan yang melintas jembatan atau beban lingkungan (*ambient*) berupa beban angin, dengan menggunakan sensor regangan (*strain gage*) yang ditempatkan pada arah gaya tarik pada elemen hanger jembatan seperti pada Gambar 6.

Pengolahan data dilakukan untuk menginventarisir dan mengevaluasi data hasil pemeriksaan visual dan data pengujian berupa nilai parameter-parameter yang diperoleh dari kegiatan pengumpulan data baik data primer maupun data sekunder.



**Gambar 6.** Pemasangan sensor akselerometer dan sensor regangan



**Gambar 7.** Sumber getar menggunakan palu penggetar

Data perilaku respon getaran jembatan diidentifikasi dan digunakan sebagai proses analisis komparasi terhadap analisis pemodelan struktur jembatan.

Evaluasi analisis struktur perilaku *linier* dan karakteristik elastis dari material elemen hanger dievaluasi mengacu pada standar faktor pembesaran dinamis (FBD) dengan melakukan *curve fitting* dari data respon dinamis regangan untuk mengetahui perilaku *reversible* dari elemen hanger yang ditinjau. Sedangkan parameter hasil uji getar hanger diolah dari *time domain data* ( $m/s^2$ ) menjadi *frequency domain data* (Hz) untuk lebih lanjut dianalisis sebagai input parameter perhitungan gaya kabel. Dari puncak amplitudo frekuensi pada rentang mode getar yang berlainan diperoleh puncak

amplitudo (*Peak*) frekuensi alami yang mewakili mode getar elemen hanger akibat beban yang bekerja.

Pada tahap analisis dan evaluasi dilakukan analisis terhadap hasil uji material tidak merusak untuk komponen struktur baja, analisis pemodelan struktur jembatan dan analisis elemen hanger jembatan. Asumsi analisis menggunakan pemodelan 3 dimensi baik struktur jembatan maupun elemen hanger jembatan. Untuk pemodelan elemen hingga hanger, besar gaya hanger diestimasi dengan menggunakan iterasi beban pergerakan tumpuan (*support displacement*) pada sampai kondisi model elemen sesuai dengan frekuensi alami dan ragam ragam getar dari hasil pengukuran di lapangan. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui perilaku dinamis baik struktur maupun elemen jembatan berdasarkan frekuensi natural jembatan sebagai verifikasi pemodelan struktur dan selanjutnya dilakukan evaluasi nilai kapasitas struktur jembatan dan besar estimasi nilai gaya hanger pada struktur jembatan eksisting berdasarkan syarat batas perencanaan dan pengujian material hanger jembatan.

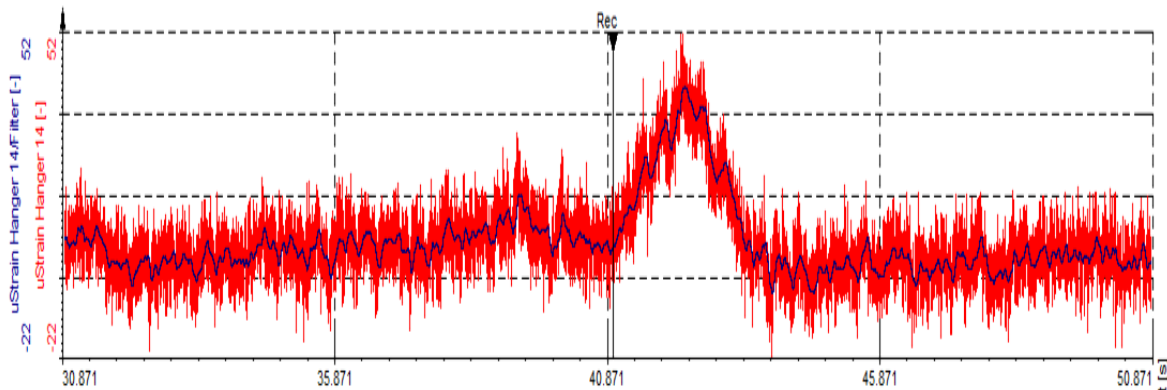
## HASIL DAN ANALISIS

Data hasil pemeriksaan visual dan uji tidak merusak kekerasan baja pada elemen hanger dijelaskan pada Tabel 1.

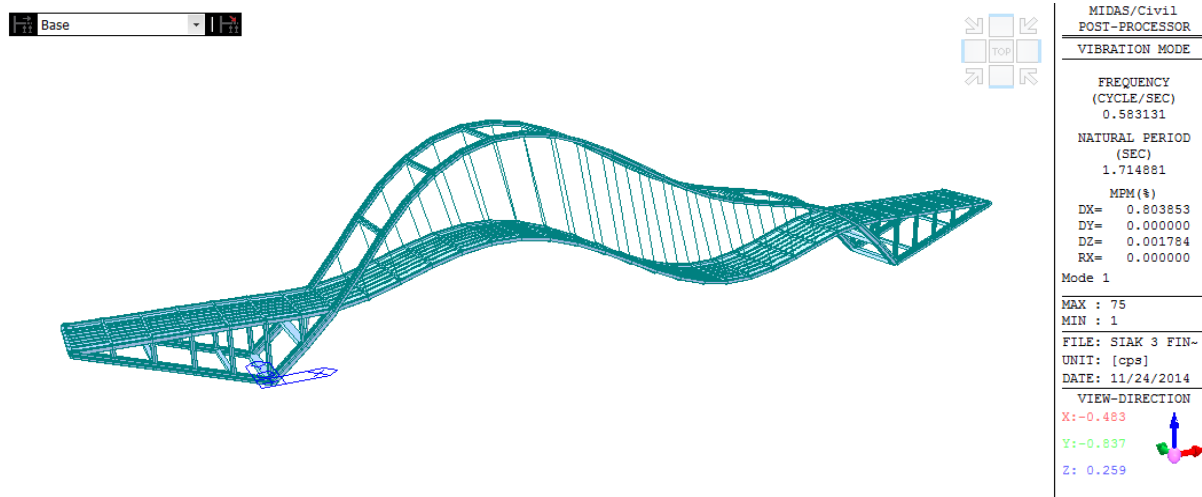
**Tabel 1.** Parameter dan standar acuan

Parameter	Jembatan	Standar Acuan
	Siak 3	
Nilai Kondisi	1	BMS
Mutu Baja(MPa)	807.1	> SM490 $f_y = 490$ MPa $f_u = 610$ MPa
FBD	1.2	< 1.4

Hasil pengukuran regangan dinamis di lapangan pada elemen hanger H14 pada sisi hilir (Y1) mempunyai nilai amplitudo simpangan regangan pembacaan sebesar  $47 \mu strain$  pada saat terbebani kendaraan dan kembali ke posisi awal pada saat kendaraan sudah melintas jembatan (Gambar 8).



Gambar 8. Pembacaan regangan hanger 14Y1



Gambar 9. Ragam getar pertama struktur jembatan

### Analisis struktur jembatan

Analisis dan evaluasi pemodelan dilakukan dengan menggunakan pemodelan elemen hingga (*finite elemen model*) untuk kondisi elastis linier elemen hanger maupun struktur dimana parameter geometri, properti material, dan beban mengacu pada hasil pengumpulan data lapangan.

Dari hasil uji getar struktur jembatan diketahui bahwa respon dinamis struktur mempunyai puncak amplitudo (*Peaks*) frekuensi alami seperti dijelaskan pada Tabel 2 pada rentang frekuensi 0 - 15Hz.

Tabel 2. Hasil pengukuran frekuensi alami Jembatan Siak 3

Puncak Amplitudo	Frekuensi (Hz)	
	Data 1	Data 2
Amplitudo 1	0.73	0.67
Amplitudo 2	1.13	1.16
Amplitudo 3	1.56	1.53
Amplitudo 4	1.92	1.83
Amplitudo 5	2.08	2.08
Amplitudo 6	2.47	2.56
Amplitudo 7	3.02	3.60
Amplitudo 8	3.36	6.71
Amplitudo 10	6.38	7.93
Amplitudo 11	8.45	8.85
Amplitudo 12	9.98	9.40
Amplitudo 13	10.89	10.13
Amplitudo 14	14.83	10.86
Amplitudo 15	-	14.77

Nilai puncak frekuensi alami dari hasil pengukuran di lapangan mendekati nilai pada pemodelan struktur jembatan dengan puncak mode getar untuk frekuensi alami pertama pada rentang 0,58 Hz - 0,82 Hz. Bentuk ragam getar pertama dijelaskan pada Gambar 9.

Dari pemodelan tersebut diperoleh besarnya gaya tarik pada masing-masing elemen hanger yang kemudian menjadi acuan teoritis untuk evaluasi perbandingan gaya hanger yang dihitung dari hasil pengujian di lapangan.

### Uji eksperimental dan pemodelan elemen hanger

Dari hasil uji tarik elemen hanger (*lift-off*) dan hasil pengukuran menggunakan uji getar di lapangan, diperoleh perilaku konstitutif material hanger yang kemudian digunakan pada pemodelan elemen hanger Jembatan Siak 3 menggunakan metode elemen hingga (*finite elemen*). Besar tegangan yang terjadi pada pemodelan struktur untuk titik pengamatan yang sama (*strain gage* no. 9) dijelaskan pada Tabel 3.

Pemodelan elemen hanger menggunakan asumsi pembebanan berupa peningkatan pergerakan tumpuan searah sumbu memanjang elemen dan secara bertahap disesuaikan dengan frekuensi alami dan ragam getar dari hasil pengukuran di lapangan. Dengan nilai ketelitian rata-rata sebesar 1%, parameter elastisitas ( $E$ ) dan inersia ( $I$ ) pada pemodelan struktur yang diperoleh dari hasil uji tarik elemen hanger digunakan untuk menganalisis hanger pada Jembatan Siak 3 di lapangan. Faktor gravitasi dikonversikan dari arah sumbu utama elemen hanger dari arah mendatar (Bukaka Teknik Utama, PT. 2012) pada saat pengujian tarik hanger (Cho, S., *et al.* 2013) (*lift-off method*) menjadi arah tegak sesuai dengan sumbu utama elemen hanger pada jembatan eksisting seperti dijelaskan pada Gambar 10, Gambar 11 dan Gambar 14.

**Tabel 3.** Hasil evaluasi eksperimental dan metode elemen hingga (*Strain gauge* no.9)

Displacement (mm)	Hasil Uji Tarik (MPa)	Metode Elemen Hingga (MPa)	Gaya tarik (kN)	Ketelitian (%)
<i>Strain gauge</i> no.9				
6,37	420	426	993	1,4
8.67	698	702	1500	0,6



(a)

**Gambar 10.** Uji tarik horisontal bertahap (Bukaka, PT. 2012)



(b)

**Gambar 11.** Sumbu orientasi vertikal uji lapangan

## PEMBAHASAN

Dengan perilaku dinamis struktur jembatan diketahui bahwa baik pemodelan elemen hingga struktur jembatan maupun pemodelan elemen hingga hanger jembatan mempunyai sifat elastis linier dengan mengacu pada data respon getar jembatan (Tabel 3) dan perilaku regangan dinamis pada elemen hanger jembatan (Gambar 8).

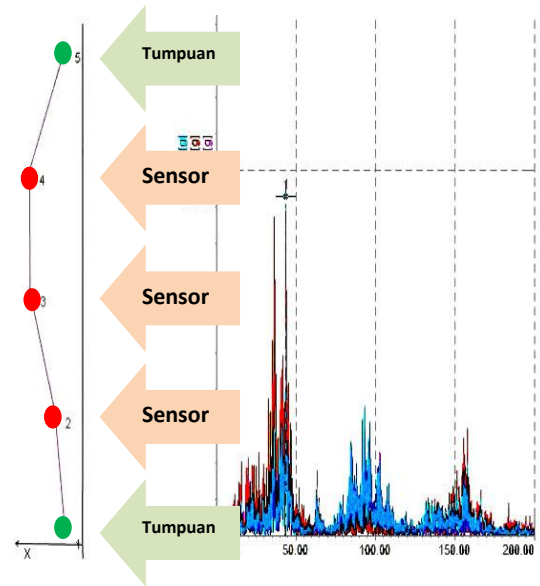


Sifat regangan yang *reversible* terhadap beban kendaraan yang melintas di atas jembatan dengan nilai Faktor Pembesaran Dinamis sebesar 1,2 (Tabel 1) dijadikan acuan dalam perhitungan dan analisis elemen hingga untuk mengetahui estimasi gaya *hanger* pada kondisi linier sesuai faktor beban yang diberikan pada tahap perencanaan.

Pengukuran respon getaran elemen hanger jembatan H1-Y1 pada uji getar dengan menggunakan input pengukuran menggunakan 3 sensor lebih mendekati nilai dari hasil perhitungan elemen hingga ( $\Delta T = 9,9$  kN) sedangkan pengukuran menggunakan input 1 sensor mempunyai selisih ( $\Delta T = 52,3$  kN).

Dari pengukuran ragam getar di lapangan dengan menggunakan parameter input besar gaya impuls dari palu penggetar menghasilkan respon getar pada 3 buah sensor akselerometer (*Shock Response Spectrum*) yang mewakili ragam getar elemen hanger dengan parameter frekuensi sesuai dengan kondisi di lapangan (Gambar 12).

Hasil iterasi dari analisis pemodelan elemen hingga dengan merubah parameter pergerakan tumpuan elemen menghasilkan perubahan pada ragam getar, frekuensi alami, dan tegangan-regangan dari model elemen hingga hanger jembatan. Gaya estimasi elemen *hanger* dihitung melalui hubungan luas geometri penampang hanger dan tegangan yang terjadi dari hasil proses iterasi (*tuning*) pada kondisi parameter yang sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

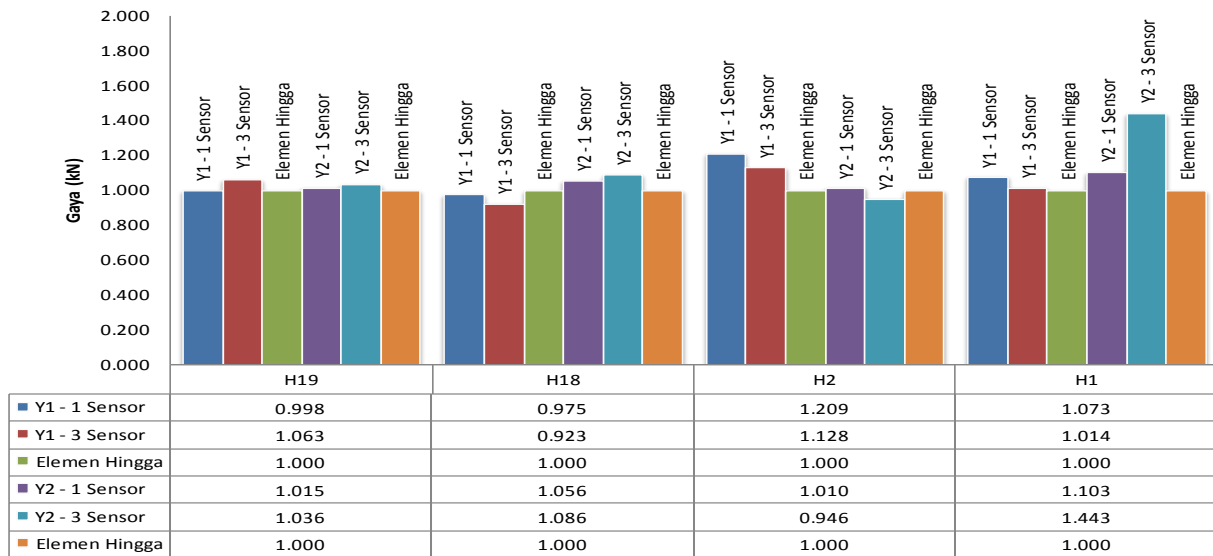


**Gambar 12.** Pengukuran ragam getar lentur elemen hanger di lapangan

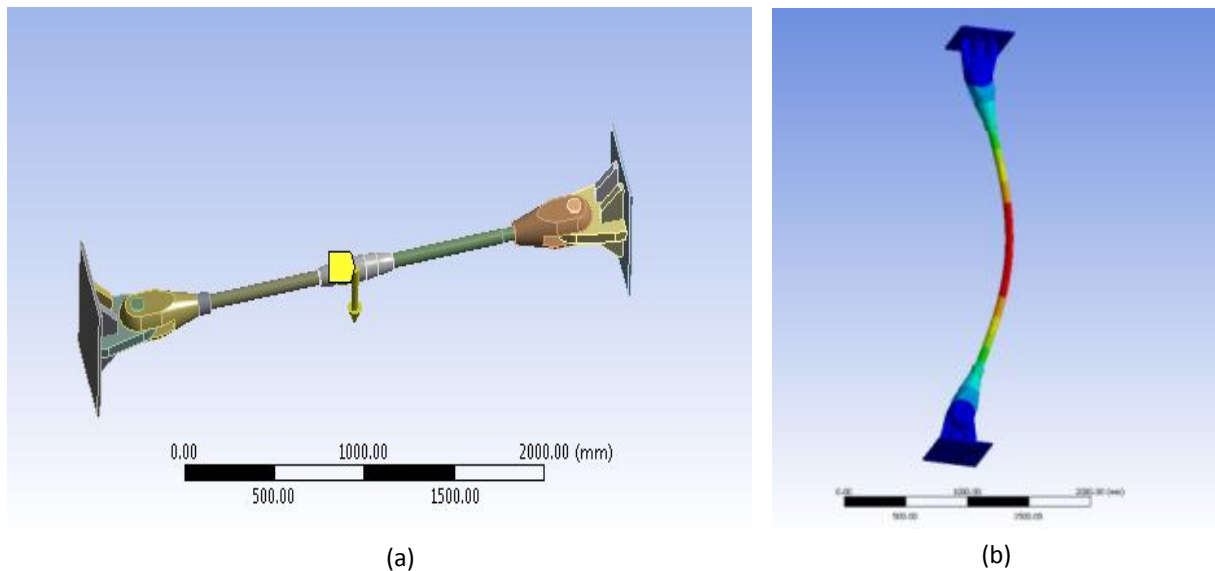
Evaluasi dari perbandingan evaluasi dari perhitungan menurut persamaan Rumus 1 (*string theory*) dan hasil analisis gaya tarik hanger dari pemodelan elemen hingga struktur jembatan untuk kondisi elastis linier (Gambar 13) mempunyai nilai rentang perbandingan sebesar 0,923 sampai dengan 1,443 dengan nilai rata-rata rasio sebesar 1,067, dimana nilai tersebut adalah besarnya akurasi metode uji getar untuk menentukan prediksi nilai gaya tarik hanger jembatan dengan ketelitian sebesar 6,7%.

**Tabel 4.** Hasil evaluasi eksperimental dan Metode Elemen Hingga (Hanger H1-Y1)

Data	Frekuensi alami (Hz) : H1 - Y1						Gaya (kN)
	f(1)	f(2)	f(3)	f(4)	f(5)	f(6)	
1 buah sensor	40.04	47.36	87.40	-	-	-	767.0
3buah sensor	41.99	60.55	80.08	86.91	92.92	98.63	724.6
Metode Elemen Hingga	41.77	50.83	91.21	100.85	163.62	166.15	714.7



Gambar 13. Nilai gaya hanger hasil uji getar dan pemodelan



Gambar 14. Pemodelan finite elemen hanger (a) Sumbu horisontal (b) Sumbu vertikal

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari uraian di atas dapat diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu sebagai berikut:

1. Dari hasil evaluasi, diketahui bahwa identifikasi gaya tarik pada elemen hanger pada jembatan eksisting untuk jembatan tipe pelengkung dapat diidentifikasi menggunakan cara uji getar baik

2. Pendekatan perilaku sistem elemen hanger dari hasil uji tarik elemen di laboratorium dan hasil evaluasi uji getar di lapangan mempunyai sifat elastis linier sehingga analisis metode elemen hingga dari elemen hanger jembatan dapat digunakan sampai dengan ketelitian 1%.
3. Nilai pengukuran dan estimasi gaya tarik elemen hanger dengan metode uji getar

mempunyai akurasi antara 4%-6,71% terhadap hasil eksperimental dan analisis pemodelan elemen hanger jembatan maupun pemodelan struktur jembatan.

### Saran

Untuk meningkatkan tingkat akurasi pengukuran maka beberapa hal yang harus dilakukan adalah:

1. Diperlukan pengembangan dari aplikasi cara uji getar untuk identifikasi gaya elemen hanger jembatan dan dikaji lebih dalam baik secara analisis dan eksperimen.
2. Perlu dilakukan pencatatan riwayat waktu perubahan frekuensi alami elemen hanger jembatan untuk evaluasi perubahan nilai gaya hanger eksisting pada suatu jembatan pada masa layannya.

### DAFTAR PUSTAKA

- Bayraktar, A. *et al.* 2009. "Modal Testing, Finite-Element Model Updating, and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge". *J. Perform. Constr. Facil.*, 23(2), 81–89.
- Bien, Jan and Jaroslaw Zwolski. 2007. "Dynamic Tests In Bridge Monitoring - Systematics and Applications". *IMAC-XXV: Conference & Exposition On Structural Dynamics*. Wroclaw : Wroclaw University of Technology.
- Brady, S., O'Brien, E., and Žnidarič, A. 2006. "Effect of Vehicle Velocity on the Dynamic Amplification of a Vehicle Crossing a Simply Supported Bridge". *J. Bridge Eng.*, 11(2), 241–249.
- Bukaka Teknik Utama, PT. 2012. *Uji Tarik Hanger Jembatan - Proyek Jembatan Siak 3*. Pekanbaru: Laporan Balai Besar Kekuatan Struktur.
- Caetano, Elsa. 2011. "On the Identification of Cable Force from Vibration Measurements". *IABSE-IASS Symposium*. London: IABSE.
- Cho, S., et al, M. 2013. "Comparative Field Study of Cable Tension Measurement for a Cable-Stayed Bridge". *J. Bridge Eng.*, 18(8), 748–757.
- Fang, Z. and Wang, J. 2012. *Practical Formula for Cable Tension Estimation by Vibration Method: J. Bridge Eng.*, 17(1), 161–164.
- K. Maes, E. Reynders, G. De Roeck, G. Lombaert, KU Leuven. 2012. 9th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Brussels. *Determination of axial forces by local vibration measurements*. Department of Civil Engineering, Kasteel park Arenberg 40, B-3001 Heverlee, Belgium.
- Kangas, S., *et al.* J. 2012. "Cable-Stayed Bridges: Case Study for Ambient Vibration-Based Cable Tension Estimation.". *J. Bridge Eng.* 17, 839–846. SPECIAL ISSUE: Non destructive Evaluation and Testing for Bridge Inspection and Evaluation.
- Kim, BH., *et al.* 2007. "A Comparative Study of the Tension Estimation Methods for Cable Supported Bridges". *International Journal of Steel Structures*, 7(2007), 77-84.
- Tristante, Lanneke. 1990. "Bridge Vibration Criteria". *6th REAAA Conference Malaysia*. Malaysia: REAAA.
- Vaza, Herry. 2013. "Dukungan Penelitian dan Advisi Teknis dalam Penyelenggaraan Jembatan Bentang Panjang". *Seminar Bentang Panjang*. Bandung: Pusjatan.