

ANALISIS KARAKTERISTIK DINAMIK JEMBATAN BENTANG PANJANG TERHADAP INDUKSI GETARAN JEMBATAN AKIBAT BEBAN ANGIN

¹ Sariman, ² Malinda Sabrina, dan ³Matza Gusto A.

^{1,2,3}Laboratorium Aero Gas-dinamika dan Getaran, Deputi Bidang TIRBR, BPPT.
e-mail: ¹sariman.peneliti@gmail.com, ²malinda.sabrina@bppt.go.id, ³matza_136@yahoo.com

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan beberapa besaran aeroelastik untuk beberapa model jembatan bentang panjang yang pernah diuji di LAGG-BPPT. Besaran-besaran penting aeroelastik dibandingkan satu dengan yang lainnya. Hasil yang diperoleh bahwa besar kecilnya kecepatan angin terjadinya flutter, heaving dan torsion sulit diprediksi berdasarkan besar atau kecilnya nilai rasio frekuensi. Demikian juga peristiwa flutter, heaving dan torsion seakan-akan menjadi peristiwa yang saling independen.

Kata kunci: jembatan, aerodinamik, aeroelastik, terowongan angin.

1. Pendahuluan

Analisis aeroelastik pada jembatan bentang panjang dapat diketahui melalui perhitungan secara komputasional maupun eksperimental. Analisis secara komputasional biasanya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak komputer Dinamika Fluida Komputasional. Namun, analisis secara komputasional biasanya dilakukan hanya untuk menentukan gaya aerodinamika steady. Sedangkan interaksi dinamik dan fenomena aeroelastik akan memberikan hasil yang lebih handal jika dianalisis secara eksperimen di dalam terowongan angin.

LAGG-BPPT (Laboratorium Aero Gasdinamika dan Getaran BPPT) yang berlokasi di kawasan PUSPIPTEK Tangerang Selatan memiliki beberapa terowongan angin dengan kualitas tinggi. Sudah banyak model pesawat terbang dan model jembatan diuji di sini. Salah satu terowongan angin yang ada dan cukup besar yaitu terowongan angin sirkuit tertutup dengan penampang melintang seksi uji sebesar 4 m x 3 m.

Setiap jembatan memiliki karakteristik aerodinamika dan aeroelastik yang unik, sehingga beberapa besaran tersebut belum tentu dapat diprediksi menggunakan beberapa besaran yang lain. Penelitian ini akan menganalisis hubungan beberapa besaran aeroelastik dari beberapa model jembatan bentang panjang yang pernah diuji di LAGG-BPPT.

2. Kajian Teori

Ada beberapa fenomena aeroelastik dan induksi getaran yang terjadi dan sangat penting pada jembatan bentang panjang akibat beban angin, yaitu fenomena *flutter*, fenomena induksi resonansi dan fenomena *buffeting*.

Fenomena *flutter* adalah kejadian ketidakstabilan struktur akibat redaman aerodinamik dan struktur menjadi nol yang dapat terjadi pada kecepatan angin tertentu. Metode sederhana yang digunakan untuk memprediksi kecepatan angin terjadinya *flutter* pada struktur flat-plate dapat dilakukan berdasarkan pendekatan yang dibuat oleh Bleich yang dikenal dengan metode Selberg (Suangga dan Samuel, 2012). Selberg memprediksi kecepatan angin *Flutter* pada jembatan (V_{cr}) menggunakan persamaan berikut :

$$v_{cr} = k v_f \quad \dots(1)$$

dimana nilai k adalah suatu konstanta yang ditentukan oleh geometri dari penampang dan sudut angin α . Selberg memberikan nilai k yang didapat secara eksperimen untuk berbagai bentuk penampang jembatan dan menentukan secara empiris nilai v_f sebagai berikut

$$v_f = 0.44 B \omega_\alpha \left[\left(1 - \frac{\omega_h}{\omega_\alpha} \right)^2 \frac{v^{0.5}}{\mu} \right]^{0.5} \quad \dots(2)$$

dimana

$$v = 8 \left(\frac{r}{B} \right)^2 \quad \dots(3)$$

$$\mu = \frac{\pi \rho B^2}{2w} \quad \dots(4)$$

dengan ρ : kerapatan udara, w : massa deck jembatan, ω_h : frekuensi natural *Heaving*, ω_α : frekuensi natural *Torsion*, B : lebar deck jembatan. Persamaan di atas mengilustrasikan peran penting dari rasio frekuensi $\frac{\omega_h}{\omega_\alpha}$. Jika nilai dari rasio kedua frekuensi tersebut = 1, maka nilai v_f dan v_{cr} menjadi = 0.

Kemudian untuk struktur non flat-plate, Frandesen membuat kategori keterkaitannya sebagai berikut:

- untuk dek berupa bluff-box, mempunyai v_f sebesar 43% v_f flat-plate
- untuk dek berupa bluff-box dengan sidewalk, mempunyai v_f sebesar 62% v_f flat-plate
- untuk dek berupa truss-girder, mempunyai v_f sebesar 77% v_f flat-plate.

Prediksi batas flutter juga dapat dilakukan dengan pendekatan frekuensi dan redaman modal. Kemudian dihitung nilai frekuensi dan koefisien redaman model pada rentang kecepatan angin subkrititis. Batas flutter ditentukan berdasarkan pola nilai-nilai frekuensi dan koefisien redaman tersebut terhadap perubahan kecepatan atau tekanan dinamik angin (Sariman, 2014).

Perkembangan berikutnya penentuan batas flutter didasarkan pada persamaan karakteristik :

$$s^4 + P_3s^3 + P_2s^2 + P_1s + P_0 = 0 \quad \dots(5)$$

Ini adalah bentuk polynomial dengan domain kontinu. Kemudian Zimmermann mendefinisikan batas Flutter dengan

$$F = - \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 + P_2 \left(\frac{P_1}{P_3} \right) - P_0 \quad \dots(6)$$

berdasarkan kriteria stabilitas Routh. Nilai F menunjukkan batas stabilitas, yaitu F bernilai positif dalam rentang kecepatan angin subkrititis dan menjadi nol pada batas flutter (Torii, 2012).

Metode terbaru perhitungan prediksi flutter menggunakan model deret waktu ARMA. Pengambilan data dilakukan pada setiap waktu tertentu dalam satu periode pengambilan data, sehingga diperoleh data dalam domain waktu diskrit dan jarak waktu pengambilan antar data tetap. Kemudian data yang diperoleh dimodelkan dengan ARMA (Sariman, 2014). Kemudian batas flutter diperoleh berdasarkan kriteria stabilitas Jury, yaitu

$$F^-(i) = |X_i - Y_i| > 0 \quad \text{untuk } i=2M-1 \quad \dots(7)$$

dengan X_i dan Y_i adalah matrik $i \times i$ yang elemen-elemennya terdiri dari koefisien dari AR model ARMA, 1 dan 0. Sedangkan batas Flutter dengan derajat bebas M terjadi jika $F^-(2M-1) = 0$. (Matsuzaki, 2011).

Adapun fenomena induksi resonansi adalah peristiwa bergetarnya struktur akibat terinduksi getaran dari luar, yang terjadi pada kecepatan angin tertentu. Berdasarkan sumber getaran luarnya, induksi resonansi dapat dibedakan menjadi:

- a. Getaran induksi *vortex* (*Vortex induced vibration*), getaran terjadi akibat adanya *vortex* di belakang dek, menyebabkan terjadi gerakan dek baik itu *vertical bending*, *horizontal bending* dan torsion
- b. *Low Speed Heaving Resonance* (*LSHR*), getaran terjadi akibat adanya perbedaan tekanan pada permukaan atas dek dan bawah dek, menyebabkan terjadi gerakan dek secara vertikal

Fenomena *buffeting* adalah terjadinya getaran akibat adanya turbulensi angin yang dapat terjadi dalam rentang kecepatan angin yang lebar.

3. Eksperimen di Terowongan Angin

3.1 Mengukur Karakteristik Dinamik Jembatan Bentang Panjang

Dalam membuat model jembatan yang akan diuji di terowongan angin, konstruksi model harus memenuhi kaidah-kaidah kesetaraan aeroelastik yang ditentukan, agar model setara baik secara aerodinamika maupun dinamika strukturnya. Karakteristik dinamika struktur (*Flexural* dan *Torsional rigidity*) jembatan yang sesungguhnya (*prototype*) direplika dengan beberapa metal spine yang dikalibrasi terlebih dahulu. Sedangkan karakteristik aerodinamika direplika dengan bentuk geometri yang setara. Begitupula dengan derajat kebebasan gerak struktur, sekurang-kurangnya pada modus pertama, harus setara dengan jembatan *prototype*.

Kaidah kesetaraan dinamika struktur dibuat berdasarkan data hasil analisis FEM dynamics pada struktur *prototype*. Parameter rujukan utama yang digunakan adalah rasio frekuensi natural dari modus yang pertama untuk setiap derajat kebebasan. Frakuensi natural yang umum dijadikan rujukan mencakup 3 derajat kebebasan dari gerakan dek dan 2 derajat kebebasan untuk pylon :

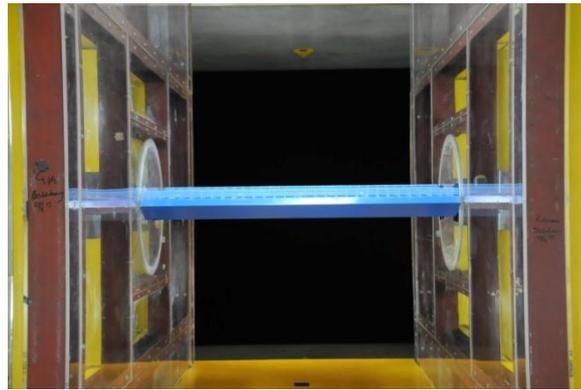
- *Vertical Bending* (*Heaving*) dari dek
- *Horizontal Bending* (*Swaying*) dari dek
- *Torsional Bending* (arah sudut pitch, alpha) dari dek
- *Lateral Bending* dari pylon
- *Torsional Bending* dari pylon

Karakteristik dinamika struktur dari model diukur dengan metode modal analisis. Dalam metode modal analisis, model dieksitasi dengan menggunakan *impact hammer* atau *exciter*. Hasilnya akan memberikan data frekuensi natural dari model. Identifikasi metode ini dilakukan terhadap kurva FRF (*Frequency Response Function*) (Simiu dan Scanlan, 1996).

Laboratorium Aero-Gasdinamika dan Getaran BPPT telah beberapa kali melakukan pengujian ini untuk beberapa jembatan bentang panjang yang ada di Indonesia.

3.2 Pengujian Aeroelastis Jembatan Bentang Panjang pada Terowongan Angin

Pengujian jembatan di terowongan angin LAGG-BPPT dapat dilakukan dengan dua metode seperti yang telah beberapa kali melakukan pengujian ini untuk beberapa jembatan bentang panjang yang ada di Indonesia yaitu pengujian *full model* dan *sectional model*. Pada pengujian *full model*, jembatan prototipe direplika dengan skala perkecilan yang disesuaikan dengan seksi uji pada terowongan angin. Sedangkan pengujian *Sectional model* hanya memodelkan bentang tengah jembatan. Pengujian *sectional model* terdiri dari pengujian *sectional static* dan *sectional dynamic*. Pengujian *sectional static* dilakukan untuk mendapatkan parameter gaya aerodinamika steady, sedangkan pengujian *sectional dynamic* sama halnya dengan pengujian *full model* yaitu untuk mendapatkan parameter fenomena aeroelastik.



Gambar 1. Pengujian jembatan sectional model di terowongan angin LAGG-BPPT



Gambar 2. Pengujian jembatan full model di terowongan angin Laboratorium Aero-Gasdinamika dan Getaran BPPT

4. Hasil dan Analisis

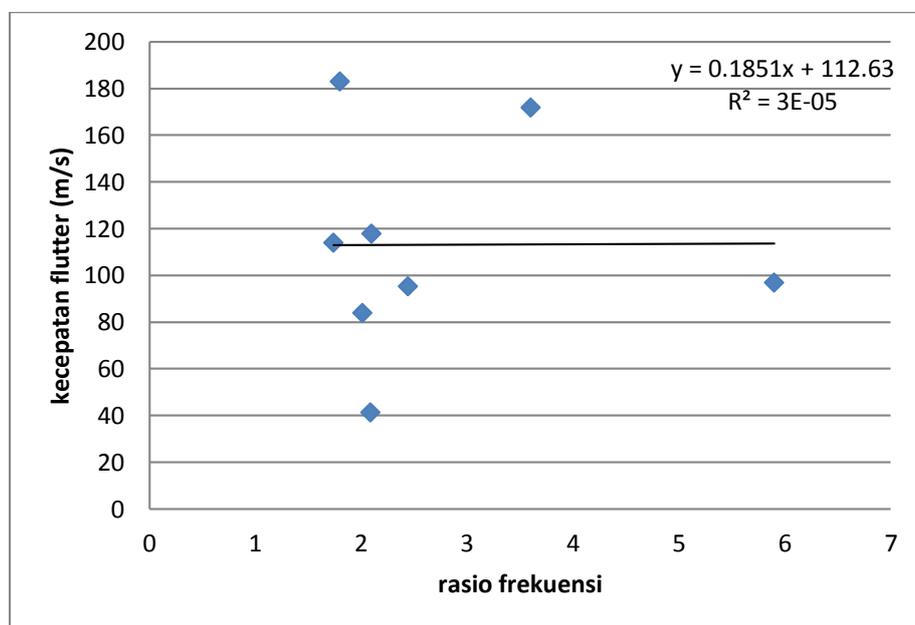
Parameter kesetaraan yang paling penting untuk dipenuhi adalah rasio frekuensi, karena frekuensi natural merupakan representasi karakteristik dinamika struktur dari model maupun jembatan sesungguhnya.

Dari beberapa model jembatan *Sectional* dan *full model* yang telah diuji di LAGG BPPT, diperoleh rangkuman hubungan rasio frekuensi terhadap kecepatan *Flutter* dan hubungan rasio frekuensi terhadap kecepatan terjadinya *Heaving* dan *Torsion* sebagai berikut.

Tabel 1.
Rasio frekuensi terhadap kecepatan *flutter* model *sectional*

Jembatan	Rasio Frekuensi (Tor/Heav)	Kecepatan Flutter (m/s)
Jembatan 1	1.74	114
Jembatan 2	1.80	183.2
Jembatan 3	2.01	84
Jembatan 4	2.09	41.52
Jembatan 5	2.10	118
Jembatan 6	2.44	95.46
Jembatan 7	3.60	172
Jembatan 8	5.90	96.9

Jika data ini ditampilkan dalam bentuk grafik akan terlihat hubungan keduanya, seperti ditunjukkan Gambar 3 berikut ini. Tidak membentuk hubungan yang jelas. Bahkan jika ditarik garis linier menghasilkan koefisien determinasi yang sangat kecil yaitu $R^2 = 3E-05$ dan gradien garis 0.185 suatu nilai yang dekat sekali dengan 0. Hal tersebut menunjukkan bahwa antara rasio frekuensi dan kecepatan flutter tidak membentuk hubungan linier. Dengan demikian kecepatan flutter suatu model jembatan tidak dapat diprediksi berdasarkan besar atau kecilnya rasio frekuensi.

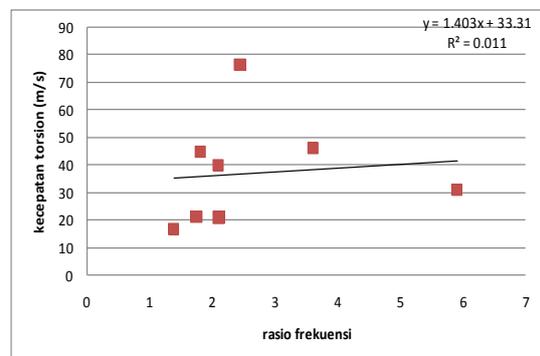
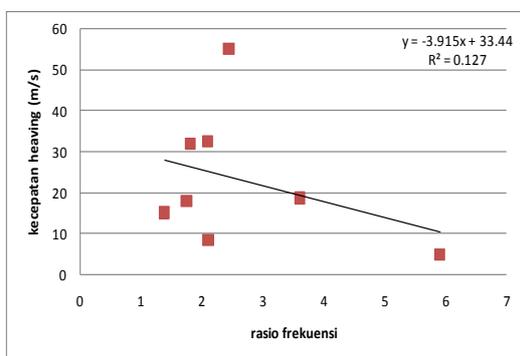


Gambar 3. Grafik rasio frekuensi terhadap kecepatan flutter model *sectional*

Sedangkan rangkuman hubungan rasio frekuensi terhadap kecepatan terjadinya *Heaving* dan *Torsion* adalah sebagai berikut.

Tabel 2.
Rasio frekuensi terhadap kecepatan terjadinya *heaving* dan *torsion* model *sectional*

Model Jembatan	Rasio Frekuensi (Tor/Heav)	Kecepatan	
		<i>Heaving</i> (m/s)	<i>Torsion</i> (m/s)
Jembatan 1	1.38	15.2	16.57
Jembatan 2	1.74	17.98	20.88
Jembatan 3	1.8	32	44.8
Jembatan 4	2.09	32.6	39.8
Jembatan 5	2.1	8.6	20.8
Jembatan 6	2.44	55	76.4
Jembatan 7	3.6	18.7	46
Jembatan 8	5.9	5.02	30.8

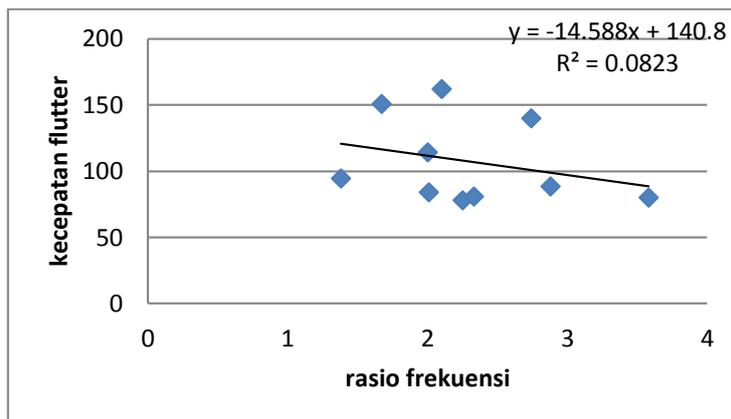


Gambar 4. Grafik rasio frekuensi terhadap kecepatan terjadinya heaving dan torsion pada model sectional

Terlihat pada gambar 4 hubungan antara kecepatan heaving dan rasio frekuensi nampak seperti linier turun, semakin naik rasio frekuensinya semakin turun kecepatan terjadi heavingnya. Akan tetapi nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.127$ dan koefisien korelasi $R = 0.356$ sangat kecil, menunjukkan tingkat ketepatan data tersebut terhadap garis regresinya sangat rendah dan memiliki hubungan yang lemah.

Tabel 3.
Rasio frekuensi terhadap kecepatan *flutter* jembatan model penuh

Jembatan	Rasio Frekuensi (Tor/Heav)	Kecepatan <i>Flutter</i> (m/s)
Jembatan 1	1.38	94.5
Jembatan 2	1.67	151
Jembatan 3	2.00	114.5
Jembatan 4	2.01	84
Jembatan 5	2.10	162
Jembatan 6	2.25	78
Jembatan 7	2.33	81
Jembatan 8	2.74	140
Jembatan 9	2.88	88.4
Jembatan 10	3.58	80

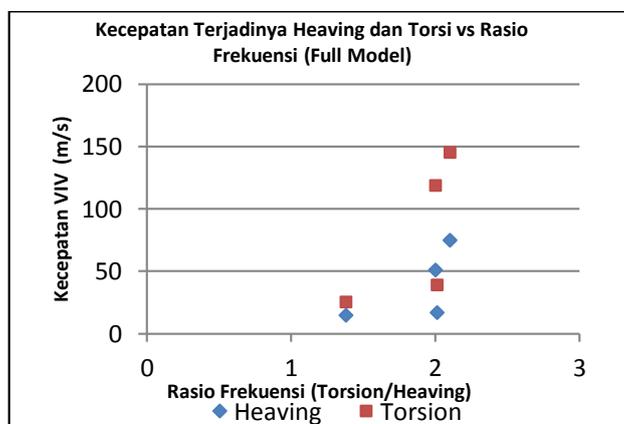


Gambar 5. Grafik rasio frekuensi terhadap kecepatan flutter jembatan model penuh

Sedangkan rangkuman hubungan rasio frekuensi terhadap kecepatan terjadinya *heaving* dan *torsion* untuk full model jembatan yang telah diuji di LAGG BPPT diperlihatkan pada tabel 4 dan gambar 5. Hanya 4 data kecepatan *heaving* dan *torsion* full model jembatan yang dimiliki penulis. Berdasarkan empat data ini terlihat kecenderungan semakin tinggi rasio frekuensinya semakin tinggi kecepatan terjadinya *heaving* dan *torsion*. Karena hanya 4 data, sehingga belum dapat digeneralisir untuk semua jenis jembatan full model tentunya.

Tabel 4.
Rasio frekuensi terhadap kecepatan terjadinya *heaving* dan *torsion* jembatan model penuh

Jembatan	Rasio Frekuensi (Tor/Heav)	Kecepatan	
		<i>Heaving</i> (m/s)	<i>Torsion</i> (m/s)
Jembatan A	1.38	14.7	25.2
Jembatan B	2.00	50.9	118.7
Jembatan C	2.01	16.8	39.2
Jembatan D	2.10	74.7	145



Gambar 6. Grafik rasio frekuensi terhadap kecepatan terjadinya *heaving* dan *torsion* pada model penuh

Dari hasil yang diperoleh dapat dilihat bahwa kecepatan *Flutter* dan kecepatan terjadinya *Heaving* dan *Torsion* tidak meningkat secara steady seiring dengan meningkatnya nilai rasio frekuensi. Sehingga dapat dikatakan bahwa Rasio antara frekuensi *Torsion* dan *Heaving* tidak dapat digunakan sebagai indikator awal dalam menentukan kestabilan jembatan bentang panjang terhadap *Flutter* dan terhadap kecepatan terjadinya *Heaving* dan *Torsion*.

5. Kesimpulan dan Saran

Setiap jembatan memiliki karakteristik aerodinamika dan aeroelastik yang unik, sehingga beberapa besaran tersebut sulit diprediksi menggunakan beberapa besaran yang lain. Besar kecilnya kecepatan angin terjadinya flutter, heaving dan torsion sulit diprediksi berdasarkan besar atau kecilnya nilai rasio frekuensi. Demikian juga peristiwa flutter, heaving dan torsion seakan-akan menjadi peristiwa yang saling independen.

Disarankan agar pengukuran besaran-besaran aerodinamika dan aeroelastika suatu model jembatan dilakukan di terowongan angin untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Karena ada beberapa hal yang sulit diperoleh hanya melalui komputasi. LAGG-BPPT memiliki sarana dan kemampuan yang memadai untuk pengujian model jembatan baik statik maupun dinamik yang disebabkan oleh beban angin.

Daftar Pustaka

- Bae J et al. (2005). *Extension of Flutter Prediction Parameter for Multimode Flutter Systems, Journal of Aircraft*, Vol.42, No.1, pp.285-288.
- Holmes, J.D. (2001), *Wind Loading of Structures*, Spon Press, London.
- Matsuzaki Y, (2011). An Overview of Flutter Prediction in Tests Based on Stability Criteria in Discrete-Time Domain, *International Journal of Aeronautical dan Space Sciences*, Vol. 12, No. 4, pp. 305–317.
- McNamara J. and Friedmann P., (2007). Flutter-Boundary Identification for Time-Domain Computational Aeroelasticity, *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 7, pp. 1546-1555.
- Ostenfeld, K.H. and Larsen, A., (1992). Bridge Engineering and Aerodynamics, *Proceedings: Aerodynamics of Large Bridges*, Balkema, Copenhagen.
- Rao, S.S., (1995). *Mechanical Vibrations*, 3rd edition, Addison-Wesley Publishing Company, New York.
- Torri H, (2012). The Extension of Discrete-Time Flutter batas, *28th International Congres of the Aeronautical Sciences*.
- Sariman, (2014). Kajian Penerapan Model ARMA untuk Prediksi Peristiwa Flutter Aerodinamika, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi, UIA*, Jakarta
- Simiu, E. and Scanlan, R.H., (1996). *Wind Effects on Structures*, 3rd edition, *John Wiley & Sons Inc.*, New York.
- Suangga Made dan Samuel M. (2012). *Flutter Analysis Software Prototype For Long Span Bridge*. *Dinamika Teknik Sipil* Volume 12, Januari 2012