

Analisis Flutter Jembatan Tacoma Narrows Lama

Made Suangga & Andi Wiryana

1 PENDAHULUAN

Jembatan Tacoma Narrows lama dibuka untuk lalu lintas pada tanggal 1 Juli 1940. Jembatan tersebut terletak di negara bagian Washington. Saat diresmikan, jembatan tersebut merupakan jembatan terpanjang ke 3 di Amerika Serikat. Jarak antar pylon adalah 2800ft (853.44 m) dengan tinggi 425ft (129.54m).

Jembatan Tacoma Narrows menggunakan plate girder baja, dan bukan rangka baja sebagaimana digunakan oleh jembatan suspensi lainnya seperti Golden Gate. Selain Jembatan Tacoma Narrow terdapat beberapa Jembatan yang dibangun dengan menggunakan plate girder diantaranya Thusand Islands, tahun 1938 dengan bentang tengah 600ft (182.88m), Deer Isles tahun 1939 dengan bentang tengah 1080ft (329.184m) dan Bronx-Whitestone tahun 1939 dengan bentang tengah 2300ft (701.04m).

Permasalahan utama dari jembatan dengan plate girder tersebut adalah fleksibilitas dari jembatan yang menjadi sangat tinggi baik dalam arah vertical maupun dalam arah torsional. Hal ini disebabkan karena ketebalan dari girder yang tinggi serta lebar dari jembatan dibandingkan dengan bentang dari jembatan. Akibatnya jembatan mengalami gerak berombak sampai akhirnya jembatan tersebut runtuh pada tanggal 7 November 1940 akibat angin dengan kecepatan 42 mph (18.8 m/s)..

Meskipun, osilasi pada jembatan akibat beban angin telah terjadi sejak awal dari sejarah pembangunan jembatan supensi dan beberapa kejadian kegagalan jembatan akibat beban angin telah dialami, jawaban atas kejadian kegagalan jembatan akibat beban angin baru diketahui secara jelas setelah keruntuhan jembatan Tacoma Narrow Lama yang disebabkan oleh angin dengan kecepatan sedang. Keruntuhan jembatan tersebut menyebabkan dimulainya studi yang terkait dengan stabilitas aerodinamik dari Jembatan.

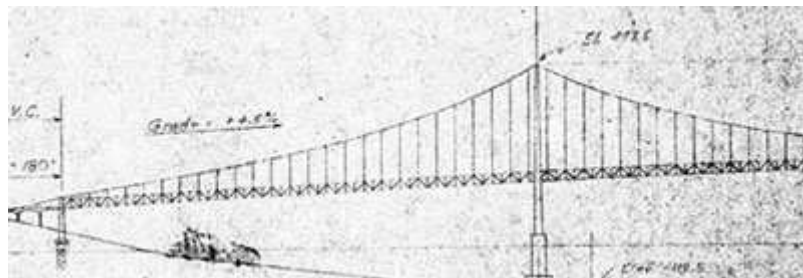
Penyebab keruntuhannya tidak diketahui dengan seketika dan saat ini disimpulkan bahwa kejadian tersebut disebabkan oleh single degree of freedom torsional flutter yang disebabkan oleh self-excited wind load. Fenomena ini diklasifikasikan sebagai fenomena aerodinamik pada jembatan bentang panjang.

2 PERENCANAAN DAN KONSTRUKSI JEMBATAN TACOMA NARROWS LAMA

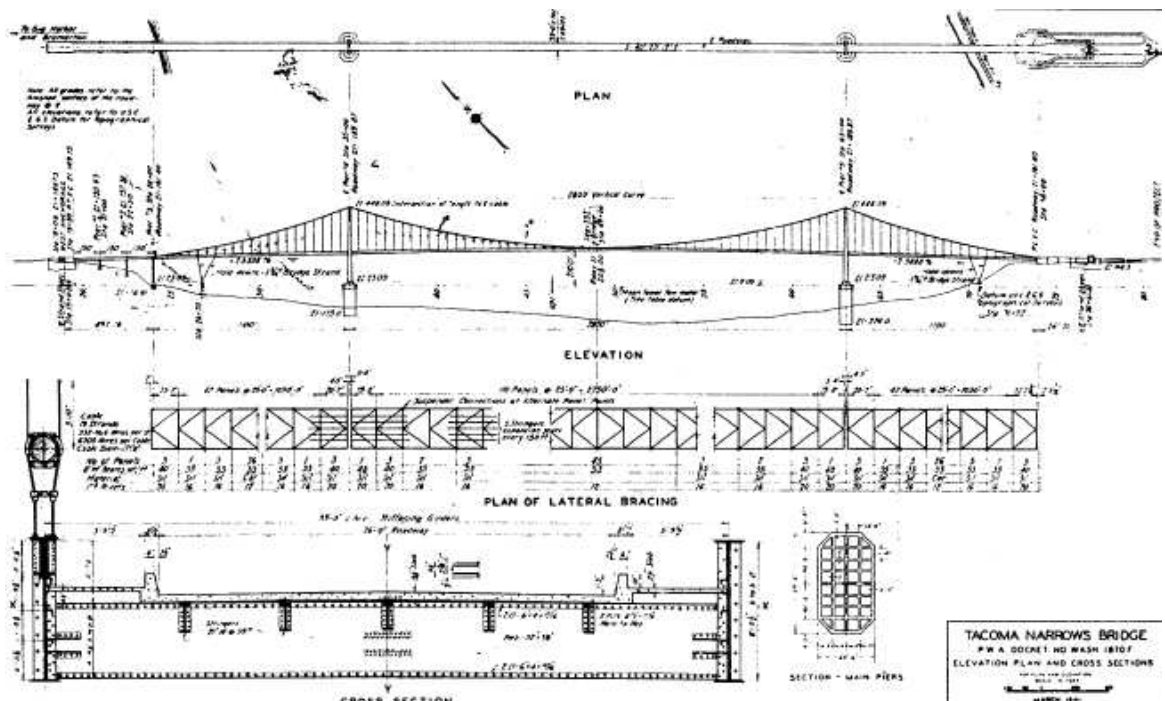
Pada tahun 1933 berbagai alternatif jembatan dikaji diantaranya jembatan tipe kantilever, multi span suspension bridge dan beberapa versi dari single span suspension bridge. Mr. Leon S, Moisseiff ditunjuk sebagai konsultan struktur atas. Bentang utama jembatan diubah dari 2600ft (792.48m) menjadi 2800ft (853.44m) dan perubahan juga dilakukan pada dek jembatan dari rangka baja menjadi plate girder.



Gambar 1 Lokasi Jembatan Tacoma Narrow



Gambar 1 : Desain awal Jembatan Tacoma Narrows Lama dengan rangka baja



Gambar 2 : Jembatan Tacoma Narrows Lama dengan stiffening girder

Jembatan Tacoma adalah Jembatan gantung dengan bentang tengah 2800ft (853.44m) dan bentang tepi masing-masing 1100ft (325.28m). Deck jembatan terdiri dari 26ft (7.93m) jalur kendaraan dan 5ft 6in (1.68m) sidewalk. Jarak antar kabel utama adalah 39 ft (11.89m) as ke as. Kabel utama terbuat dari cold drawn galvanized wire yang terdiri atas 19 strands. Diameter dari kabel utama tersebut adalah 17-1/8in (0.439m) dengan luasan 190.3in² (0.122m²) Kabel utama tersebut memiliki sag/kelengkungan sebesar 232 ft (70.71m) atau sag rasio 1/12. Total berat kabel adalah 3817 ton. Suspender atau hanger terbuat dari 4 kabel dengan diameter 1-1/4in (0.0008m). Jarak antar suspender atau hanger adalah 50ft (15.24m).

Pilon utama terbuat dari baja dengan bentuk selular. Tinggi pilon utama adalah 425ft (129.94m) tanpa pengaku diagonal. Jarak antara kolom pada pilon adalah 39 ft (11.89m) pada bagian atas dan 50 ft (15.24) pada bagian bawah. Berat masing masing pilon adalah 1926 ton. Angker yang terletak di timur terbuat dari blok beton padat dengan dimensi 70ft x 170ft (21.3m x 51.8m) dan tinggi rata-rata 50ft 15.24m). Sedangkan angker yang terletak di barat mempunyai dimensi 70ft x 160ft (21.3m x 48.8m) dan tinggi rata-rata 55ft (18.8m).

Dek jembatan terbuat dari dua stiffening girder dengan jarak 30ft (9.14m) dari as ke as. Balok lantai jembatan arah transversal dipasang pada jarak 25ft (7.26m). Lima baris longitudinal stinger dipasang pada jarak 5 ft 9 in (1.54m). Stiffening girder terbuat dari pelat baja dengan dimensi 96 in x 1/2 in (2.45m x 0.0127m). Stiffening girder tersebut diberi bracing pengaku dalam arah horizontal dan vertikal. Delapan buah siku 8in x 6 in x 1/2 in (0.2m x 0.15m x 0.0127m) dan 2 pelat penutup 20 in x 1/2 in (0.52m x 0.0127m) digunakan pada girder. Balok lantai memiliki tinggi 52 in (4.35m) dan balok stringer 21in (0.533m). Pelat lantai memiliki tebal 5-1/4in (0.133m) dan sidewalk 2-1/2in (0.063m).

Mengacu kepada pengalaman pada jembatan dengan shallow stiffening girder seperti Bronx-Whitetone, dilakukan usaha untuk mengantisipasi osilasi yang mungkin muncul. Tindakan perbaikan yang dilakukan adalah dengan memasang center tied (pengikat antara kabel dan deck di tengah bentang) dan hydraulic buffer pada pilon. Kedua metode ini dipasang sebelum jembatan dibuka. *Hold down cable* juga dipasang pada kedua bentang tepi.

Tabel 1 Sejarah Pelaksanaan Jembatan Tacoma Narrow Lama

No	Aktivitas	Tanggal Selesai
1	Penandatanganan Kontrak	23 November 193
2	Awal pekerjaan	23 November 1938
3	Pilon	6 Januari 1940
4	Kabel Utama	9 Maret 1940
5	Stiffening Girder	31 Mei 1940
6	Lantai beton	28 Juni 1940
7	Dibuka bagi lalu Lintas	1 Juli 1940
8	Keruntuhan	7 November 1940

3 PERILAKU JEMBATAN SELAMA MASA LAYAN YANG SINGKAT

Metode Pengamatan

Jembatan Tacoma Narrow lama yang dibuka untuk lalu lintas tanggal 1 Juli 1940 sempat beroperasi selama 4 bulan sebelum mengalami keruntuhan pada tanggal 7 November 1940. Selama masa layan yang singkat, jembatan tersebut berada dibawah pengamatan yang menerus baik dengan teodolit maupun dengan kamera. Target pengamatan diletakkan pada tiang lampu sepanjang jembatan. Karena itu catatan yang menjelaskan berbagai pola getaran tersedia lengkap termasuk kejadian keruntuhan jembatan. Akan tetapi tidak ada data yang akurat tentang kecepatan angin yang berkaitan dengan frekuensi dan pola getaran. Data angin yang ada didapat dari anemometer yang digunakan untuk tujuan penelitian yang berbeda dengan kondisi yang tidak baik tanpa kalibrasi. Diyakini bahwa pembacaan untuk kecepatan angin di atas 25 mph (11.176 m/s) masih cukup akurat.

Pengamatan Pola Getar

Selama 4 bulan masa layan jembatan Tacoma Narrow berbagai pola getar dapat diamati di lapangan. Gambar dibawah menyajikan pola getar yang mungkin terjadi, akan tetapi tidak semua pola getar dapat diamati dilapangan. Tipe 0 paling sering ditemukan dengan amplitude 24in (.61m). Tipe 2 juga sering terjadi dengan amplitude 32in (0.81). Kedua tipe tersebut terjadi pada kecepatan angin yang sedang.

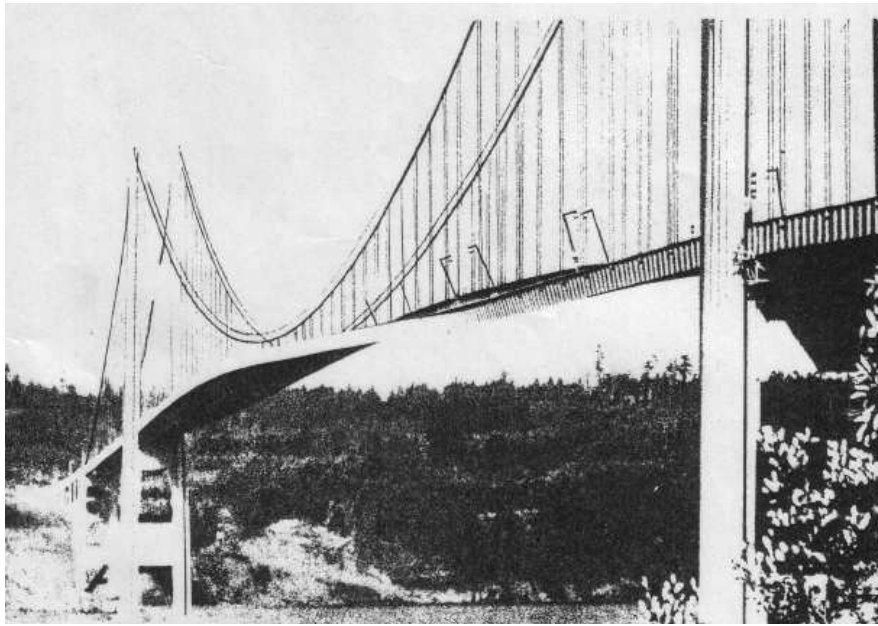
Pada hari keruntuhan, jembatan dilaprakan berosilasi selama beberapa jam dengan pol agetar Tipe 8 atau tipe 9 pada kecepatan angin 40 mph (17.88) . Lima menit sebelum keruntuhan pola getar torsi mulai terlihat dengan frekuensi 36 cpm. Akan tetapi pada nilai frekuensi tersebut sangat sulit mengindentifikasikan jumlah node secara akurat. Kemungkinan adalah tipe 8 dengan amplitude ganda maksimum lebih dari 3 ft (0.91).

Singel node torsion tidak pernah terjadi sebelum hari keruntuhan, akan tetapi pada 7 November 1940 pola getar ini terjadi selama 70 menit. Diperkirakan amplitude gerakan torsi ini adalah sekitar 35 derajat.

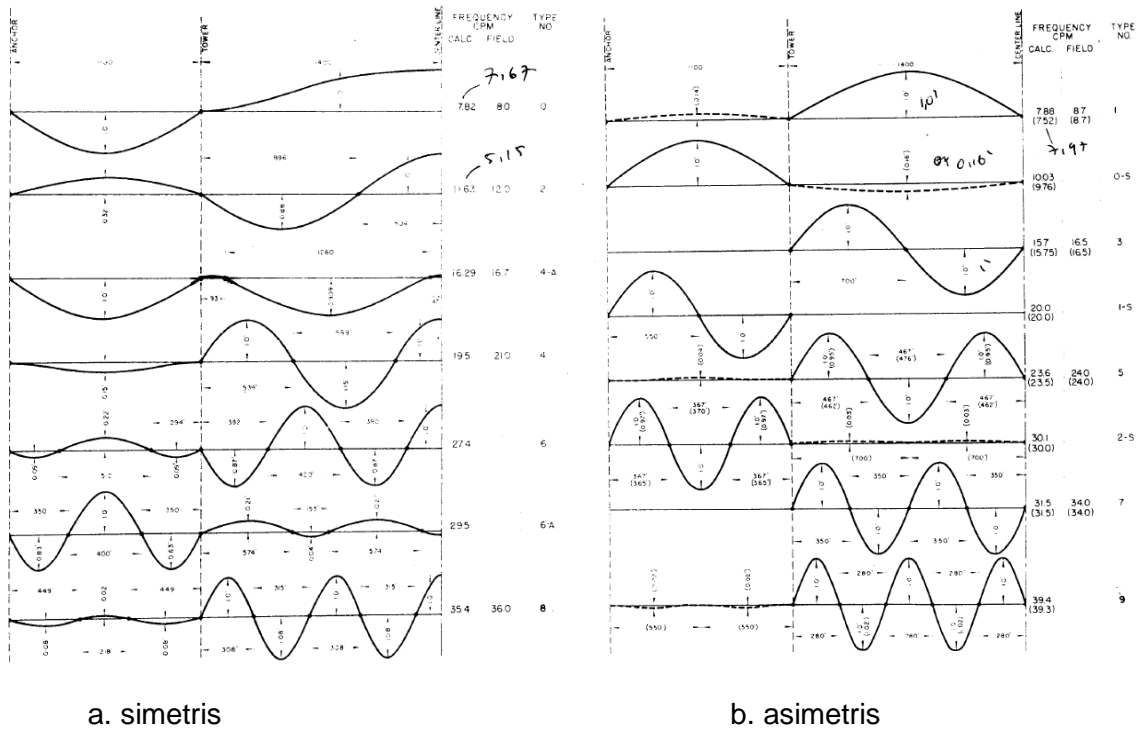
Kejadian Pada saat Keruntuhan

Pada tgl. 7 November 1940, kira – kira pkl. 07.00 pagi, gelegar utamanya mengalami osilasi vertikal selama 3 jam dengan kecepatan angin 35 mph (15.65 m/s) sampai 42 mph (18.8 m/s). Untuk mengatisipasi kejadian tersebut, maka jembatan ditutup bagi lalu lintas.

Pada sekitar pukul 10.00 pola gerakan jembatan berubah, osilasi arah vertikal berubah menjadi osilasi torisonal dengan 1 node. Setelah berosilasi selama beberapa lama, sebagian jembatan mulai jatuh ke laut dan pada pukul 11.00 bagian utama jembatan runtuh dan selanjutnya disusul dengan jatuhnya bagian lain dari deck jembatan.



Gambar 3 Torsi murni sebelum keruntuhan jembatan



Gambar 4 Pola getar jembatan Tacoma Narrows Lama

3 DUGAAN PENYEBAB KERUNTUHAN

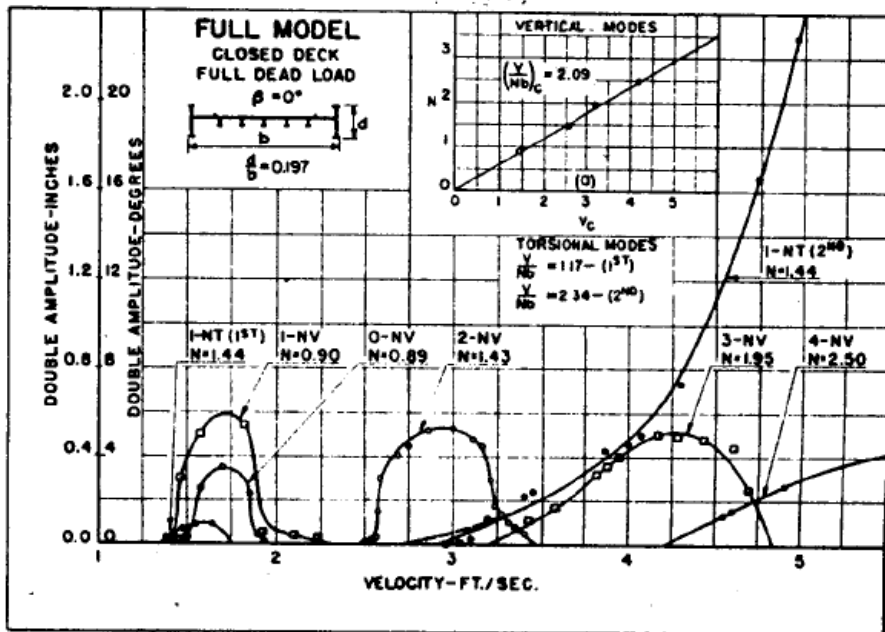
Setelah Jembatan Tacoma Narrows runtuh, terdapat perdebatan tentang penyebab sebenarnya keruntuhan tersebut. Ada beberapa teori penyebab keruntuhan jembatan yang berkembang, diantaranya adalah sebagai berikut :

- a. Turbulensi acak
Hembusan angin membangkitkan getaran pada jembatan akibat frekuensi yang sama yang disebut resonansi. Kelemahan dari teori ini adalah bahwa kejadian resonansi merupakan suatu fenomena yang presisi, sehingga frekuensi dari angin yang dapat membangkitkan getaran harus sama atau dekat dengan salah satu frekuensi alamiah dari jembatan untuk mampu menyebabkan simpangan yang besar. Sementara itu tekanan angin turbulen bervariasi secara acak sebagai fungsi dari waktu. Sehingga turbulensi tidak akan menyebabkan getaran sebagaimana diamati pada jembatan.
- b. Vortex shedding
Benda tumpul seperti dek jembatan akan membangkitkan pusaran udara di belakang benda tersebut. Teori ini menyatakan bahwa osilasi jembatan disebabkan karena terjadinya vortex shedding di belakang dek jembatan. Kelemahan dari teori ini adalah bahwa frekuensi alamiah dari vortex shedding hampir 5 kali frekuensi alamiah dari jembatan dalam arah torsional, sehingga vortex shedding diragukan sebagai penyebab keruntuhan jembatan Tacoma Narrow.
- c. Ketidak stabilan aerodinamik (damping negatif)
Aerodynamic instability atau ketidakstabilan aerodinamik adalah self-excited vibration. Pada kasus ini gaya yang menyebabkan getaran pada jembatan disebabkan atau dipengaruhi oleh pergerakan dari jembatan itu sendiri. Fenomena ini dimodelkan sebagai getaran bebas dengan damping negatif.

4 WIND TUNNEL TEST JEMBATAN TACOMA NARROWS LAMA

Untuk mengetahui penyebab keruntuhan dari Jembatan Tacoma Narrow lama tersebut, terowongan angin khusus dibangun di University of Washington, dengan model jembatan pertama di dunia yang dibangun untuk diteliti. Full model dengan skala 1 : 50 dan section model dibangun dalam rangka penelitian tersebut. Pengujian diharapkan dapat membuktikan bahwa kecepatan angin yang bekerja pada model dengan skala yang disesuaikan dengan skala model jembatan akan menunjukkan pola gerakan yang sama dengan gerakan jembatan Tacoma Narrow Lama yang diamati di lapangan. Serangkaian studi dilakukan dengan berbagai variasi bentuk penampang deck jembatan untuk mengetahui pengaruh bentuk penampang terhadap pengaruh angin.

Hasil pengujian untuk full model jembatan Tacoma Narrows Lama adalah sebagaimana disajikan pada gambar dibawah.



Gambar 5 Hasil pengujian full model jembatan Tacoma Narrows Lama

Dari gambar diatas terlihat bahwa pada kecepatan angin sekitar 1.4 ft/s (0.43 m/s), dalam skala pegujian, muncul pola getar asimetrik torsi pertama. Akan tetapi dengan bertambahnya kecepatan angin getaran tersebut teredam. Pada kecepatan angin sekitar 2.75 ft/s (0.83 m/s) timbul kembali pola getar yang sama, akan tetapi getaran kali ini menyebabkan semakin membesar sehingga menyebabkan keruntuhan pada jembatan. Hal yang sama untuk pola getar vertikal akan tetapi tidak sampai menyebabkankeruntuhan pada jembatan.

5 ANALISA PENGARUH ANGIN DINAMIK PADA JEMBATAN

Untuk memastikan bahwa jembatan bentang panjang yang akan dibangun mampu menahan beban angin yang bekerja, terdapat 4 metode yang umum digunakan dalam melakukan analisis aerodinamik pada jembatan bentang panjang yaitu

- Full Model Test
- Section Model Test
- Metode Analistis
- Computational Fluid Dynamic (CFD)

Sampai saat ini, prosedur terbaik dalam memprediksi respon jembatan panjang terhadap pengaruh dinamik angin adalah melalui percobaan skala penuh / full model test di laboratorium uji terowongan angin / wind tunnel dimana kondisi sebenarnya dari jembatan dan angin yang bekerja disimulasikan semirip mungkin. Aplikasi dari percobaan skala penuh di laboratorium relatif rumit dan memerlukan ketelitian yang tinggi. Alternatif lain yang berkembang saat ini adalah dengan menggunakan hanya potongan dari deck jembatan / Section Model Test.

Dengan perkembangan yang sangat cepat dalam ilmu komputer dalam menganalisis perilaku interaksi struktur di dalam fluida, dimasa depan, pelaksanaan uji terowongan angin mungkin bisa digantikan dengan simulasi program komputer. Tetapi sampai saat ini hasil dari aplikasi Computational Fluid Dynamic (CFD) dalam jembatan bentang panjang belum memberikan hasil yang mendekati hasil yang didapat dengan uji terowongan angin.

Hasil Section MODOEL Test dalam bentuk Aerodynamic Derivatives dapat digunakan lebih jauh untuk melakukan studi konfigurasi jembatan dengan bantuan program Finite Elemen yang sesuai sebagaimana disajikan pada analisis ini.

Analisa Flutter dengan Metode Analitis

Berbeda dengan percobaan di laboratorium, dimana pengaruh dinamik angin dapat dilihat atau dibaca secara langsung dari respon model penuh jembatan di laboratorium terowongan angin, Metode Analitis memerlukan kombinasi antara hasil pengamatan di laboratorium dengan analitis secara matematis menggunakan bantuan program komputer. Hasil percobaan Section Model berupa koefisien-koefisien aerodynamic, yang kemudian diaplikasikan ke dalam Finite Element Model jembatan untuk mengetahui respon dari struktur jembatan. Nilai dari koefisien aerodynamic tersebut hanya bergantung dari bentuk penampang jembatan.

Secara umum tahapan studi untuk mempelajari pengaruh beban angin pada struktur jembatan dengan menggunakan Metode Analitis dapat dibagi menjadi 3 tahap, yaitu:

- a. Percobaan Section Model
- b. Penentuan Aerodynamic Derivatives
- c. Analisis Flutter atau Analisis Buffeting

Dari percobaan Section Model di laboratorium akan dapat diperoleh perilaku redaman dari penampang jembatan untuk berbagai kecepatan angin. Data tersebut diolah untuk mendapatkan Aerodynamic Derivatives yang merupakan tahap kedua dari analisis. Parameter tersebut disebut juga *Flutter Derivatives* atau *Unsteady Aerodynamic Coefficients*. Langkah pertama dan kedua merupakan bagian dari uji coba Section Model di laboratorium terowongan angin.

Analisis Flutter bertujuan untuk mengetahui Flutter Speed, sedangkan Analisis Buffeting bertujuan untuk mengetahui respon struktur jembatan akibat aliran angin yang dapat menyebabkan bahaya kelelahan bahan/*fatigue* dan ketidaknyamanan pengguna jembatan.

Gaya aerodinamik mempunyai peranan yang sangat penting untuk mengevaluasi kestabilan aerodinamik dan juga respon Buffeting dari jembatan. Metode yang digunakan dalam penentuan gaya aerodinamik pada jembatan didasarkan pada prinsip yang telah terlebih dahulu digunakan dalam disain sayap pesawat. Tujuannya adalah bagaimana menentukan besarnya gaya aerodinamik yang direpresentasikan oleh besaran L_{ae} (Lift), D_{ae} (Drag), dan M_{ae} (Momen).

Pendekatan pertama yang dilakukan adalah dengan mengasumsikan bahwa dek jembatan berperilaku seperti pelat tipis, sehingga gaya-gaya aerodinamik ini bisa didekati dengan persamaan matematis. Metode ini dikenal sebagai *Flat Plate Theory*. Formula yang digunakan untuk menentukan L_{ae} , D_{ae} , dan M_{ae} adalah didasarkan kepada *Complex Theodorsen Function*. Pendekatan ini hanya bisa diterapkan untuk kasus dimana aliran udaranya *smooth*, tanpa ada turbulensi, dan tidak ada pemecahan aliran udara. Hal ini hanya berlaku untuk tipe dek jembatan tertentu saja.

Untuk bentuk penampang jembatan yang lebih kompleks, tahun 1977, Tomko dan Scanlan menggunakan parameter yang disebut dengan *Aerodynamic Derivatives*. Sejak saat itu permodelan gaya aerodinamik dengan *Aerodynamic Derivatives* ini umum digunakan dan semakin dikembangkan untuk disain jembatan panjang. Berdasarkan metode ini, gaya aerodinamik per unit panjang dek jembatan dinyatakan sebagai:

$$F_{ae} = \begin{bmatrix} L_{ae} \\ D_{ae} \\ M_{ae}/B \end{bmatrix} = \frac{\rho B^2 \omega}{2} \begin{bmatrix} H_1^* & H_5^* & H_2^* \\ P_5^* & P_1^* & P_2^* \\ A_1^* & A_5^* & A_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} B \end{bmatrix} + \frac{\rho B^2 \omega^2}{2} \begin{bmatrix} H_4^* & H_6^* & H_3^* \\ P_6^* & P_4^* & P_3^* \\ A_4^* & A_6^* & A_3^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \\ \alpha B \end{bmatrix} \quad (1)$$

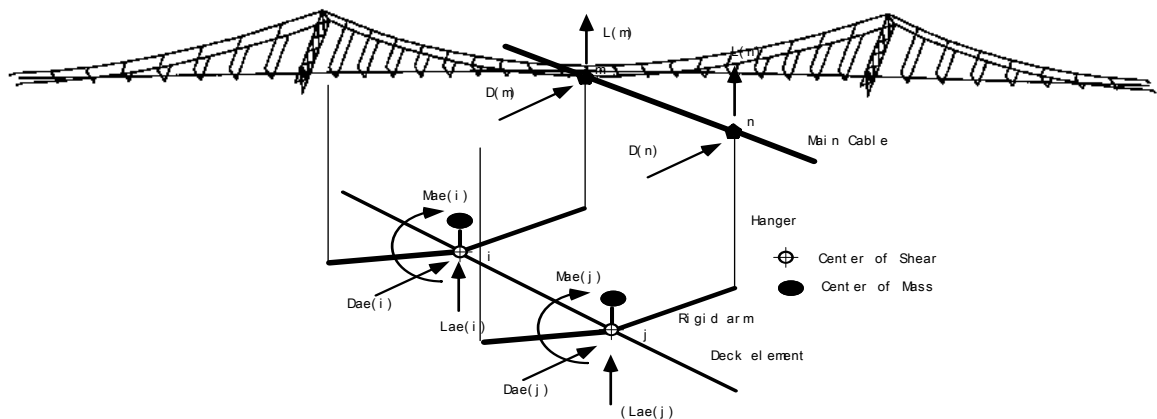
dimana H_i^* , P_i^* , A_i^* adalah berturut-turut *Aerodynamic Derivatives* untuk gerakan arah vertikal, horizontal, dan momen. y perpindahan vertikal, z perpindahan horizontal/lateral dan α adalah sudut puntiran dari dek jembatan. B adalah lebar dek jembatan, $\rho = 0.125$ [Kg sec²/m⁴] adalah kerapatan udara dan ω adalah frekuensi getaran.

Flutter Derivatives merupakan fungsi dari *Reduced Frequency*, k .

$$k = \frac{B\omega}{U} \quad (2)$$

dimana U adalah kecepatan angin.

Gaya Aerodinamik tersebut kemudian diasumsikan bekerja pada elemen jembatan seperti diilustrasikan pada Gambar dibawah



Gambar 6 Permodelan jembatan dan gaya-gaya aerodinamik

Persamaan gerak dari model 3 dimensi jembatan dengan adanya gaya aerodynamic adalah sebagai berikut

$$[M]\ddot{u} + [K]u = F_{ae} \quad (3)$$

dimana M dan K adalah matrik masa dan matrik kekakuan dari permodelan finite element, u adalah vector perpindahan dan F_{ae} adalah gaya aerodynamic.

Dengan mengasumsikan response getaran bebas dengan beban harmonik adalah w dengan frekuensi kompleks ω .

$$w = Ae^{i\omega t} \quad (4)$$

Akan didapat

$$\omega^2 w = -\ddot{w} \quad (5)$$

$$\omega w = -i\ddot{w} \quad (6)$$

Dengan memasukkan persamaan diatas ke persamaan (1) akan didapat

$$F_{ae} = \begin{bmatrix} L_{ae} \\ D_{ae} \\ M_{ae}/B \end{bmatrix} = \rho\pi B^2 \begin{bmatrix} L_Y & L_Z & L_\alpha \\ D_Y & D_Z & D_\alpha \\ M_Y & M_Z & M_\alpha \end{bmatrix} \ddot{w} = F_w \ddot{w} \quad (7)$$

Pada persamaan diatas terlihat bahwa vector pada bagian kanan merupakan percepatan, sehingga gaya F_{ae} , dapat digabungkan dengan matrik masa membentuk complex aerodynamic mass. Persamaan 3 akan menjadi

$$[M - F_w] \ddot{u} + [K]u = 0 \quad (8)$$

Persamaan diatas yang terlihat sebagai persamaan dinamik klasik sebenarnya merupakan suatu persamaan yang merupakan fungsi dari reduced frequency k . Solusi dari persamaan tersebut adalah

$$|K - M_F(k)\lambda^2| = 0 \quad (9)$$

$$k = \frac{\omega B}{U} \quad (10)$$

Persamaan (9) adalah eigen problem dengan complex matrix M_F yang merupakan fungsi dari k . Frekuensi real dari ω adalah $\sqrt{\lambda}$. Dengan mengasumsikan nilai k tertentu analisa terhadap persamaan (9) dapat dilakukan. Hasil analisis adalah berupa n set complex eigen value dan complex eigen vectors. Frekuensi angular dan aerodynamic logarithmic decrement damping dihitung dengan persamaan berikut

$$\omega_m = \sqrt{\lambda_{Rm}^2 + \lambda_{Im}^2} \quad (11)$$

$$\delta_m = 2\pi \frac{\lambda_{Im}}{\sqrt{\lambda_{Rm}^2 + \lambda_{Im}^2}} \quad (12)$$

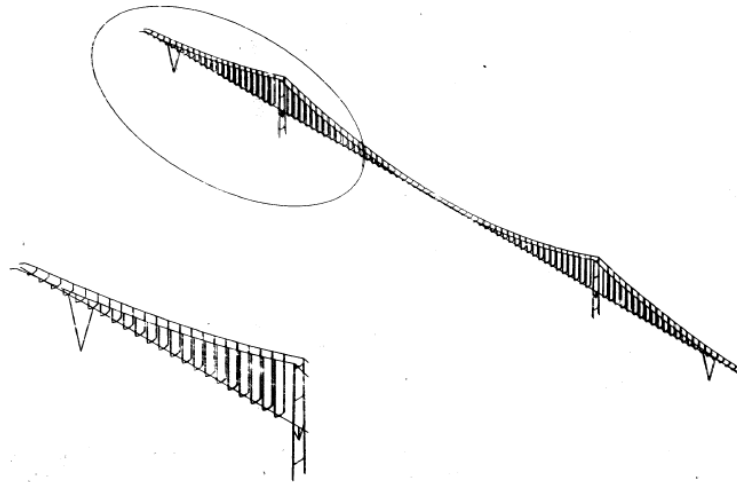
Jika harga frekuensi telah diketahui, maka dapat ditentukan kecepatan angin U untuk nilai k tersebut. Dengan melakukan analisis untuk berbagai nilai k akan didapat hubunga antara redaman aerodynamic dengan kecepatan angin. *Critical flutter speed* adalah kecepatan angin dimana nilai redaman menjadi nol.

Selain redaman aerodynamic, struktur sendiri telah memiliki redaman. Sehingga dalam menentukan kecepatan angin kritis flutter, redaman total adalah redaman struktur ditambah redaman aerodynamic. Besarnya redaman struktur biasanya diambil 0.02 untuk torsi dan 0.03 untuk lentur.

6 ANALISA FLUTTER JEMBATAN TACOMA NARROWS LAMA

6.1 Model jembatan

Permodelan 3 dimensi jembatan adalah sebagai berikut



Gambar 7 Model 3 dimensi jembatan Tacoma Narrow Lama

6.2 Karakteristik dinamik jembatan

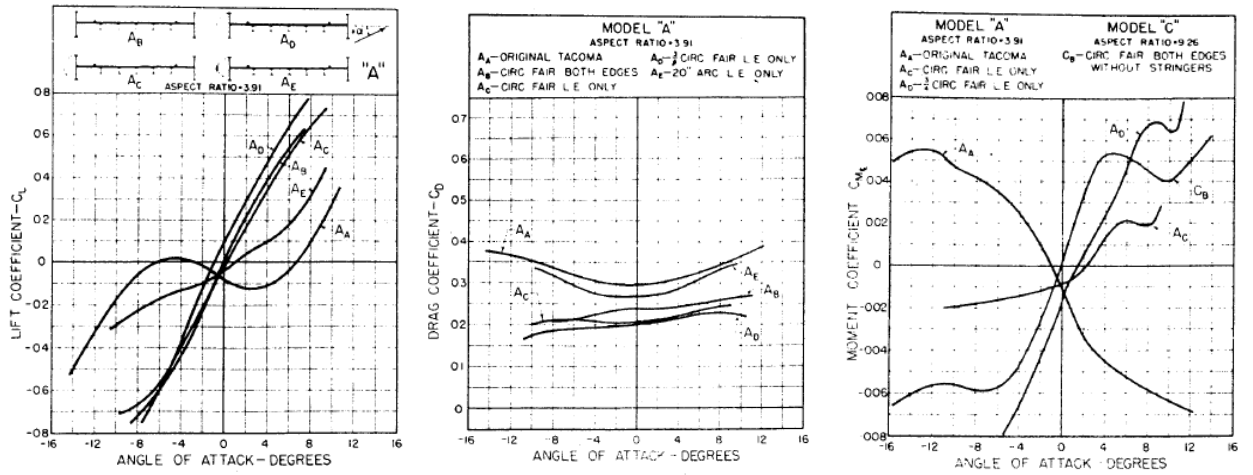
Perbandingan nilai frekuensi model 3 dimensi jembatan dengan hasil analisis sebagaimana ditercantum pada Laporan Investigasi dari University of Washington tahun 1941 adalah sebagai berikut.

Tabel 2 Perbandingan nilai frekuensi

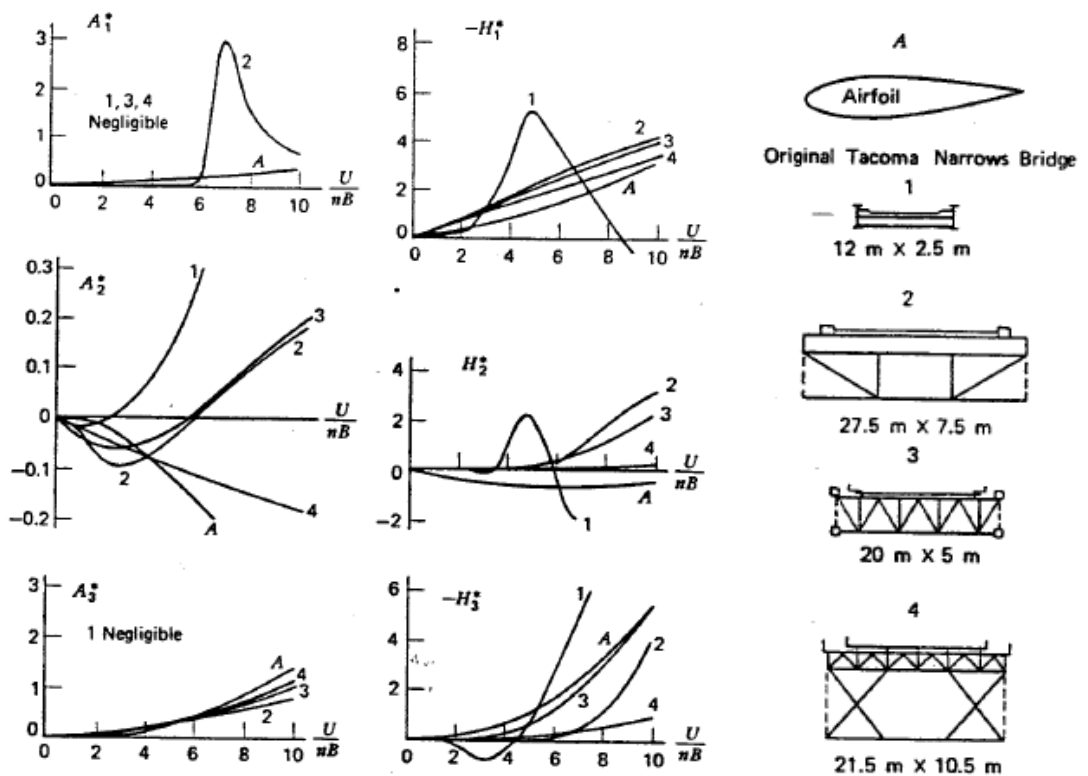
No	Identifikasi	Model 3 Dimensi	Laporan investigasi University of Washington
1	vertikal – simetri -1	0.1344	0.1313
2	horisontal – simetri - 1	0.0821	0.1300
3	torsional – asimetri - 1	0.2049	0.1950

6.3 Data beban angin dinamik

Koefisien angin statik yang digunakan dalam analisis ini berasal dari pengujian statik yang dilakukan oleh University of Washington tahun 1941. Sedangkan Aerodynamic Coeficient yang digunakan dalam analisis ini diambil dari Referensi (8)



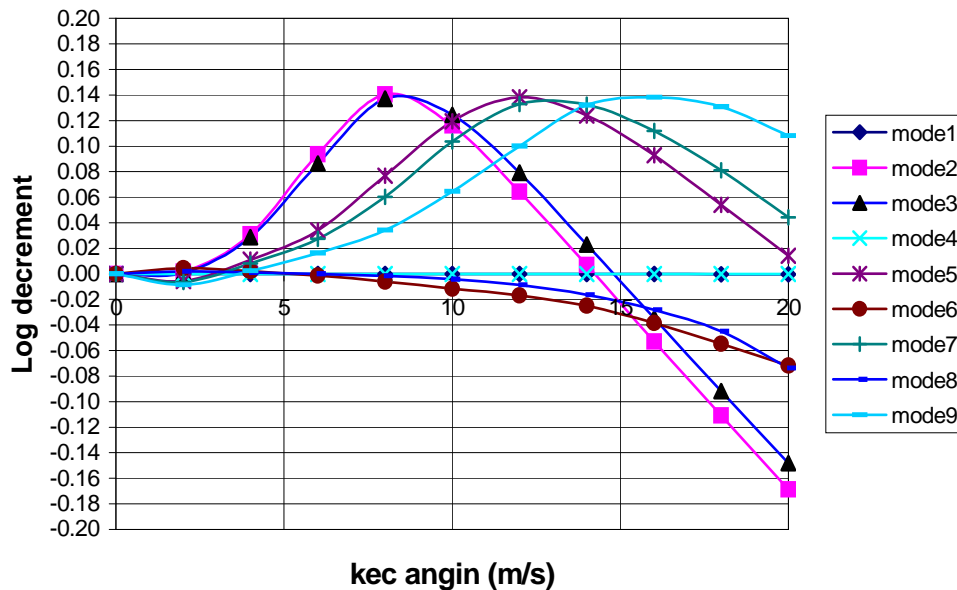
Gambar 8 Koefisien angin statik Jembatan Tacoma Narrows Lama



Gambar 9 Aerodynamic Coefficient Jembatan Tacoma Narrows Lama

6.4 Hasil analisa flutter

Dari permodelan finite elemen 3 dimensi yang dilakukan dengan menggunakan koefisien beban statik dan aerodynamic coefisien dengan bantuan program analisis flutter didapat kurva *logaritmik decreament dumping* terhadap kecepatan angin untuk 9 pola getar yang dianalisis.



Catatan

Mode 1 : 1st symetric lateral
 Mode 3 : 1st symetric vertical

Mode 2 : 1st asymeric vertical
 Mode 6 : 1st asymeric torsional

Gambar 10 Hasil analisis flutter jembatan Taccoam Narrow Lama

Dari kurva terlihat bahwa pada kecepatan angin di kisaran 15 m/s terdapat 4 mode yang berpotensi menyebabkan terjadinya flutter. Dengan mengasumsikan redaman struktur sebesar 0.02 untuk mode torsi dan 0.03 untuk bending, maka kecepatan angin kritis adalah 14 m/s pada pola getar torsi.

7 KESIMPULAN

Dari analisis flutter jembatan Taccoma Narrow Lama secara 3 dimensi diketahui bahwa fenomena keruntuhan flutter terjadi pada kecepatan angin 14 m/s. Sehingga dari analisis ini disimpulkan bahwa penyebab keruntuhan jembatan tersebut adalah akibat pengaruh angin dinamik. Sedangkan berdasarkan informasi dilapangan diketahui bahwa akecepatan angin ketika terjadi keruntuhan jembatan adalah 42 mph atau sekitar 18.8 m/s.

8 DAFTAR PUSTAKA

- Chen, W.F., Duan, L. (2002). "Bridge Engineering Hand Book, CRC Press.
- F.B. Farquharson, F.B. (1952). "Investigation Prior to October 1941", University of Washington Experiment Station Bulletin No. 116, Part I.
- F.B. Farquharson, F.B. (1950). "The Investigation of Models of The Original Tacoma Narrows Bridge under The Action of Wind", University of Washington Experiment Station Bulletin No. 116, Part I.
- Gimsing, N. J. (1997). "Cable Supported Bridges: Concept and Design", 2nd Edition, John Wiley and Sons
- Ito, M. (1993). "Wind Design of Cable Supported Bridges in Japan", International Seminar on Utilization of Large Boundary Layer Wind Tunnel, Japan.

- Miyata, T., Yamada, H., Kazama, K. (1995). "On Application of The Direct Flutter FEM Analysis for Long Span Bridges", Proc., 9th International Conference, New Delhi, India, pp. 793-802.
- Sachs, P. (1978). 'Wind Forces in Engineering', edisi ke 2, Pergamon Press.
- Simiu, E., Scanlan, R.H. (1996) "*Wind Effect on Structures*", 3rd Edition, John Wiley and Sons.
- Selberg, A. (1961). "Oscillation and Aerodynamic Stability of Suspension Bridges", Civil Engineering and Building Construction Series no 13, Oslo, Norwegian.
- Suangga, M., Hayakawa, Y., Miyata, T., Yamada, H., (1999). "Flutter Response of Shallow H-Girder Bridge Deck", Proc. First International Summer Symposium, Tokyo, Japan.
- Suangga, M. (2002). "*Beban Dinamik Angin pada Jembatan Bentang Panjang*", Conference on Long Span Bridge", Tarumanagara University.