

# FLUTTER ANALYSIS SOFTWARE PROTOTYPE FOR LONG SPAN-BRIDGE

## PROTOTYPE PERANGKAT LUNAK ANALISIS FLUTTER PADA JEMBATAN BENTANG PANJANG

Made Suangga dan Samuel Mahatmaputra  
Dosen Jurusan Teknis Sipil dan Jurusan Sistim Informasi Universitas Bina Nusantara, Jakarta  
Email : suangga@binus.edu dan [samuelt@binus.edu](mailto:samuelt@binus.edu)

### ABSTRACT

In long span bridge projects, wind can give significant influence on the bridge structure. Previous experience and research shows that wind effect could lead to the problem of safety and serviceability. It can even cause instability of the whole bridge structure due to its extremely flexible structural characteristics. Flutter is one of the most important phenomena to be considered during the design of long span bridge. There are many methods available for flutter prediction of long span bridge including numerical analytical method. Flutter software usually developed in the laboratory environment with significant limitation in the input and output process of the analysis. This research is intended to develop a software for flutter analysis for both suspension bridge and cable stayed bridge which is easy to use. The software is designed to be installed in PC under windows platform. Input and output module is included in the software to have a user friendly software. For case study, Akashi Kaikyo bridge is analyzed and presented in this paper

**Keywords:** flutter software, cable stayed bridge, suspension bridge.

### ABSTRAK

Pada struktur jembatan bentang panjang, angin dapat memberikan pengaruh yang signifikan pada struktur jembatan tersebut. Pengalaman dan penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengaruh angin dapat menyebabkan masalah keamanan dan pelayanan. Hal tersebut bahkan dapat menyebabkan ketidakstabilan pada seluruh struktur jembatan karena sifat fleksibel dari strukturnya. *Flutter* salah satu dari beberapa gejala penting untuk dipertimbangkan selama perencanaan jembatan bentang panjang. Banyak metode-metode untuk prakiraan *flutter* pada jembatan bentang panjang termasuk metode numerik. Perangkat lunak *flutter* selalu dikembangkan dalam lingkungan laboratorium dengan sangat terbatas dalam proses analisis input dan output-nya. Penelitian ini ditujukan pengembangan suatu perangkat lunak untuk analisis flutter pada jembatan gantung dan jembatan stayed cable yang mudah digunakan. Perangkat lunak tersebut direncanakan dipasang pada PC dengan windowsebagai *operating system*-nya. Modul output dan input telah disertakan di dalam perangkat lunak tersebut bagi pengguna perangkat lunak. Pada studi kasus ini, jembatan Akashi Kaikyo dianalisis dan diperlihatkan dalam makalah ini.

**Kata-kata kunci:** perangkat lunak flutter, jembatan kabel, jembatan gantung.

### PENDAHULUAN

Getaran pada jembatan akibat beban angin sebenarnya telah terjadi sejak lama dan keruntuhan pada beberapa jembatan suspensi juga telah terjadi, namun jawaban atas penyebab kejadian tersebut baru mulai terjawab setelah Keruntuhan Jembatan Tacoma Narrow. Keruntuhan tersebut telah menginspirasi penelitian yang sangat mendalam tentang stabilitas aerodinamik dari Jembatan.

Saat ini, perencanaan dan konstruksi jembatan panjang sangat dipengaruhi oleh kegagalan dari Jembatan Tacoma Narrow pada Tanggal 7 November 1944. Jembatan tersebut runtuh akibat angin dengan kecepatan 42 mph (18.8 m/s). Akibat beban angin tersebut, struktur jembatan bergetar sampai akhirnya jembatan tersebut runtuh. Meskipun penyebab keruntuhannya tidak diketahui dengan seketika, 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. Perencanaan Jembatan Panjang mensyaratkan Ketahanan terhadap *Flutter* sebagai salah satu aspek penting dalam perencanaan.

### FENOMENA AERODINAMIK PADA JEMBATAN BENTANG PANJANG

Untuk tujuan praktis, besarnya beban angin yang bekerja pada struktur adalah proporsional terhadap kuadrat dari kecepatan angin. Dalam kenyataannya kecepatan angin tidak konstan,

tetapi berubah-ubah sebagai fungsi dari waktu. Karena itu dalam menganalisis kecepatan angin, komponen beban angin di bagi menjadi 2 yaitu

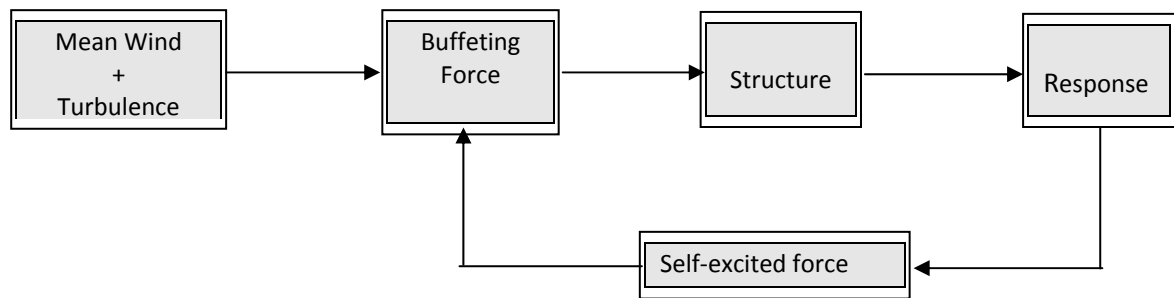
- Kecepatan angin rata-rata
- Komponen turbulen dari angin yang menunjukkan fluktuasi/perubahan kecepatan angin dalam arah yang ditinjau.

Pengaruh dari angin terhadap struktur digolongkan menjadi dua sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Pengaruh pertama adalah pengaruh statik dari angin sebagaimana biasa digunakan dalam perencanaan bangunan maupun jembatan. Pengaruh yang kedua adalah pengaruh dinamik dari angin terhadap struktur yang fleksibel yang disebut juga pengaruh aerodinamik dari angin.

Fenomena aerodinamik dapat diilustrasikan seperti bagan pada Gambar 1. Angin yang datang menuju struktur yang fleksibel terdiri atas dua komponen yaitu komponen kecepatan rata-rata dan komponen turbulen. Komponen turbulen dari angin akan membuat struktur beresonansi berupa getaran. Gaya yang disebabkan oleh komponen turbulen dari angin disebut Gaya *Buffeting* atau *Buffeting Force*.

Getaran dari struktur fleksibel yang terletak di dalam aliran angin akan mempengaruhi dan memodifikasi Gaya *Buffeting* yang disebabkan oleh komponen turbulen dari angin. Gaya yang berasal dari pengaruh getaran atau respons struktur yang memodifikasi Gaya *Buffeting* tersebut disebut *Self-excited Forces* atau *Unsteady Aerodynamic Forces* atau Gaya Aerodinamik.

Gaya yang terakhir inilah yang berperan penting dalam terjadinya fenomena ketidakstabilan *Flutter* atau *Flutter Instability* pada jembatan. Gaya tersebut akan selalu muncul selama.



Gambar 1 Fenomena Aerodinamik pada Jembatan Panjang

struktur bergetar dalam aliran turbulen. *Self-excited forces* atau Gaya Aerodinamik adalah motion dependent yang artinya dipengaruhi oleh gerakan dari struktur yang fleksibel tersebut.

Tabel 1. Klasifikasi Pengaruh Angin terhadap Struktur (Ito et al. 1982)

Effect of time-average wind pressure, wind force				
	<i>Static</i>	<i>Divergence</i>		
<i>STATIC</i>	<i>instability</i>	<i>Lateral buckling</i>		
		<i>Galloping</i>	<i>Single degree of freedom</i>	<i>Divergent amplitude</i>
	<i>Dynamic</i>	<i>Torsional flutter</i>		
<i>DYNAMIC</i>	<i>instability</i>	<i>Coupled flutter</i>		<i>response</i>
		<i>Vortex excitation, low speed flutter</i>		<i>Limited amplitude</i>
		<i>Turbulence response (gust, buffeting)</i>		<i>response</i>

Interaksi antara aliran angin dan getaran dek jembatan dapat diinterpretasikan sebagai pertukaran energi antara keduanya yang akan memberikan pengaruh terhadap getaran jembatan. Interaksi tersebut dapat menyebabkan getaran pada dek jembatan berkurang atau juga sebaliknya dimana getaran pada dek jembatan menjadi semakin besar. Pengaruh dari interaksi ini dinyatakan dalam bentuk aerodinamik damping. Jika interaksi tersebut menyebabkan getaran berkurang, maka nilai aerodynamic damping akan positif, sedangkan jika interaksi tersebut menyebabkan getaran bertambah maka aerodynamic damping akan bernilai negatif.

Pada kecepatan angin yang rendah, aliran udara dan juga gaya aerodinamik akan cenderung berperilaku sebagai damper atau peredam atau memberikan nilai redaman positif. Tetapi pada kecepatan angin tertentu yang tergantung dari bentuk dan kekakuan jembatan, pengaruh interaksi tersebut akan menyebabkan getaran yang makin hebat, atau redaman akan menjadi nol dan negatif. Sehingga struktur akan bergetar secara divergen. Kecepatan angin ini tersebut adalah titik kritis dari ketidakstabilan dek jembatan yang dapat menyebabkan keruntuhan jembatan. Kecepatan angin dimana damping menjadi nol disebut kecepatan angin kritis terhadap flutter atau Flutter Speed. Pada saat kecepatan angin ini tercapai, simpangan getaran pada dek jembatan akan meningkat secara eksponensial. Karena fenomena flutter dapat menyebabkan kehancuran dari jembatan, maka *Flutter Speed* tadi berkaitan dengan aspek keamanan. Disain jembatan panjang harus menjamin bahwa kecepatan angin kritis tersebut tidak akan pernah terjadi selama umur jembatan.

Fenomena aerodinamik kedua adalah *Buffeting* yang didefinisikan sebagai *time-variable response* dari dek jembatan akibat aliran angin dengan kecepatan yang berfluktuasi. *Buffeting* berkaitan dengan aspek serviceability dari dek jembatan serta berkaitan juga dengan masalah kelelahan bahan atau *fatigue*.

## METODE ANALISA PENGARUH ANGIN DINAMIK PADA JEMBATAN

Untuk memastikan bahwa jembatan bentang panjang yang akan dibangun mampu menahan beban angin yang bekerja, terdapat 5(lima) metode yang umum digunakan dalam melakukan analisis aerodinamik pada jembatan bentang panjang yaitu

- Metode Pendekatan
- Full Model Test*
- Section Model Test*
- Metode Analitis
- 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, di masa 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 Model Test* dalam bentuk *Aerodynamic Derivatives* dapat digunakan lebih jauh untuk melakukan studi konfigurasi jembatan dengan bantuan program *Finite Element* yang sesuai.

## PERMODELAN GAYA AERODINAMIK

Fenomena *Flutter* disebabkan oleh adanya Gaya Aerodinamik yang terjadi akibat interaksi antara turbulensi angin dan getaran dari struktur. Karena itu pendefinisian besarnya gaya Aerodinamik merupakan langkah penting untuk mengevaluasi kestabilan aerodinamik dari Jembatan.

Bleich (1948) mengusulkan penggunaan koefisien *flutter* dari sayap pesawat untuk digunakan pada deck jembatan berbentuk rangka dengan menggunakan *Complex Theodorsen Function*. Pendekatan untuk menentukan Gaya Aerodinamik pada Jembatan diajukan oleh Pugsly.

Gaya Angkat/Lift dan Momen didapat dengan persamaan berikut

$$L = -\frac{1}{2}\rho U^2 b(2\pi) \left\{ \frac{b}{U} \alpha + \frac{b}{U^2} h - \frac{b^2 a}{U^2} \alpha + 2C_{(k)} \left[ \alpha + \frac{h}{U} + \left( \frac{1}{2} - a \right) \frac{b}{U} \alpha \right] \right\} \quad (1)$$

$$M = -\frac{1}{2}\rho U^2 b^2(2\pi) \left\{ \frac{b}{U} \left( \frac{1}{2} - a \right) \alpha + \frac{b^2}{U^2} \left( \frac{1}{8} + a^2 \right) \alpha - \frac{b^2 a}{U^2} h + 2 \left( \frac{1}{2} + a \right) C_{(k)} \left[ \alpha + \frac{h}{U} + \left( \frac{1}{2} - a \right) \frac{b}{U} \alpha \right] \right\} \quad (2)$$

dimana  $b$  setengah lebar dek jembatan,  $a$  adalah jarak antara tengah-tengah dek ke pusat geser,  $h$  dan  $\alpha$  adalah perpindahan arah vertikal dan torsi, dan  $U$  adalah kecepatan angin. *The complex Theodorsen Function*  $C(k)$  ditentukan dengan persamaan berikut

$$C(k) = F(k) + iG(k) \quad (3)$$

Besarnya  $F(k)$  dan  $G(k)$  dapat ditentukan dengan menggunakan Gambar 2, atau dapat juga menggunakan persamaan pendekatan di bawah.

$$C_{(k)} \approx 1 - \frac{0.165}{1 - \frac{0.0455}{k}i} - \frac{0.335}{1 - \frac{0.3}{k}i} \quad (4)$$

$$C_{(k)} \approx 1 - \frac{0.165}{1 - \frac{0.041}{k}i} - \frac{0.335}{1 - \frac{0.32}{k}i} \quad (5)$$

Pendekatan dengan *Complex Theodorsen Function*  $C(k)$  hanya valid pada kondisi aliran tanpa turbulensi dan tanpa pemisahan aliran, suatu kondisi yang sangat jarang ditemukan pada dek jembatan.

Penentuan gaya aerodinamik secara experimental dilakukan oleh Ukeguchi, et al. 1966; Sabzevari and Scanlan, 1968. Dan pada tahun 1971 Scanlan dan Tomoko mengusulkan suatu persamaan gaya aerodinamik dengan menggunakan parameter yang disebut *flutter derivatives*. Model yang diusulkan tersebut terbatas untuk 2 derajat kebebasan, torsional dan vertikal. Sejak saat itu permodelan gaya aerodinamik dengan *Aerodynamic Derivatives* ini umum digunakan dan semakin dikembangkan untuk didesain jembatan panjang.

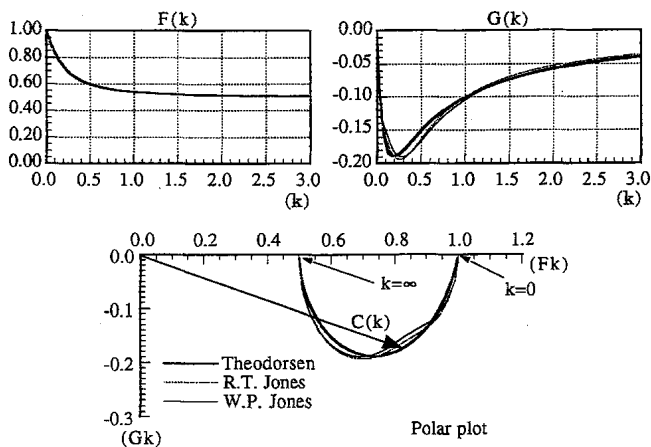


Figure 2. Complex Theodorsen Function  $C(k)$

Perencanaan Jembatan Akashi Kaikyo yang merupakan Jembatan pertama dengan bentang tengah mencapai 2000 meter, mengindikasikan bahwa permodelan dengan 2 derajat kebebasan

tidak memadai untuk Jembatan yang sangat panjang. Komponen horizontal dari *flutter derivatives* diketahui memiliki peran yang sangat penting terhadap response jembatan dan ketidakstabilan dek jembatan. Karena itu saat ini permodelan gaya aerodinamik dinyatakan dengan 3 komponen.

Gaya aerodinamik per unit panjang dek jembatan dinyatakan sebagai

$$F_{ae} = \begin{bmatrix} L_{ae} \\ D_{ae} \\ M_{ae}/B \end{bmatrix} = \frac{\rho B^2 \omega}{2} \begin{bmatrix} H_1^* & H_5^* & H_2^* \\ P_5^* & P_1^* & P_2^* \\ A_1^* & A_5^* & A_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \\ \alpha B \end{bmatrix} + \frac{\rho B^2 \omega^2}{2} \begin{bmatrix} H_4^* & H_6^* & H_3^* \\ P_6^* & P_4^* & P_2^* \\ A_4^* & A_6^* & A_3^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \\ \alpha B \end{bmatrix} \quad (6)$$

dimana  $H_i^*$ ,  $P_i^*$ ,  $A_i^*$  adalah berturut-turut *Aerodynamic Derivatives* untuk gerakan arah vertikal, horizontal, dan momen.  $y$  perpindahan vertikal,  $z$  perpindahan horisontal/lateral dan  $\alpha$  adalah sudut puntiran dari dek jembatan.  $B$  adalah lebar dek jembatan,  $\rho = 0.125$  [ $\text{Kg sec}^2/\text{m}^4$ ] adalah kerapatan udara dan  $\omega$  adalah frekuensi getaran. Flutter Derivatives merupakan fungsi dari *Reduced Frequency*,  $k$ .

$$k = \frac{B\omega}{U} \quad (7)$$

dimana  $U$  adalah kecepatan angin.

## METODE PENDEKATAN UNTUK MEMPREDIKSI FLUTTER

### Metode dari Bleich

Bleich menggunakan teori *flutter* dari Theodorsen untuk pelat tipis untuk diaplikasikan pada dek jembatan. Gaya aerodinamik dinyatakan dalam *Complex Theodorsen Function*  $C(k)$ . Pendekatan ini mengasumsikan deck jembatan berperilaku sebagai pelat tipis.

### Formula Selberg

Selberg mengembangkan metode sederhana untuk memprediksi kecepatan angin *flutter* berdasarkan pendekatan yang dibuat oleh Bleich. Selberg memprediksi kecepatan angin flutter pada jembatan  $V_{cr}$  sebagai fungsi dari kecepatan angin *flutter* dengan pendekatan yang dibuat oleh Bleich,  $V_f$ , dengan persamaan berikut.

$$v_{cr} = kv_f \quad (8)$$

Dimana nilai  $k$  adalah suatu konstanta yang ditentukan oleh geometri dari penampang dan sudut angin  $\alpha$ . Selberg memberikan nilai  $k$  yang didapat secara experimental untuk berbagai bentuk penampang Jembatan dan menentukan secara empiris nilai  $V_f$  sebagai berikut

$$v_f = 0.44B\omega_\alpha \left[ \left( 1 - \frac{\omega_h}{\omega_\alpha} \right)^2 \frac{v^{0.5}}{\mu} \right]^{-0.5} \quad (9)$$

dengan

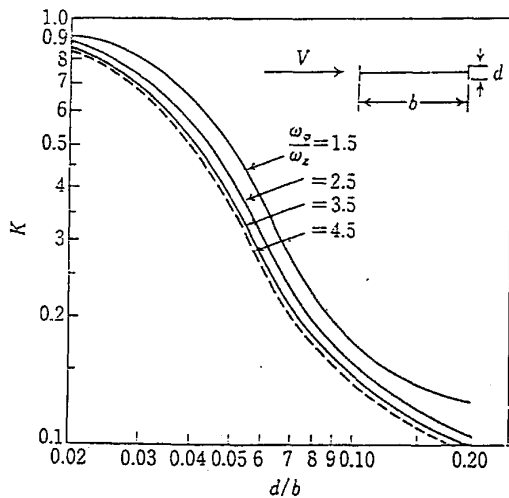
$$v = 8 \left( \frac{r}{B} \right)^2$$

$$\mu = \frac{\pi \rho B^2}{2w}$$

$$\Theta_r = \sqrt{\frac{\Theta}{m}}$$

- $\rho$  = kerapatan udara
- $w$  = bridge deck equivalent mass
- $w_h$  = bending natural frequency
- $w_\alpha$  = torsional natural frequency
- $B$  = lebar deck jembatan

Persamaan diatas mengilustrasikan peran penting dari rasio frekuensi  $w_h/w_\alpha$ . Jika nilai dari rasio kedua frekuensi tersebut = 1, maka nilai  $V_f$  dan  $V_{cr}$  menjadi = 0.



Gambar 3. Nilai k untuk persamaan Selberg

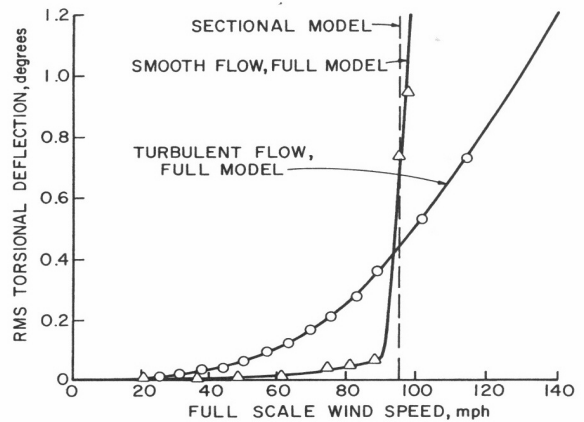
### SINGLE DEGREE OF FREEDOM FLUTTER DAN COUPLED FLUTTER

Pada Jembatan yang masih relatif pendek, pola getar yang terjadi pada saat flutter umumnya hanya terdiri dari 1 jenis pola getar misalnya hanya dalam arah vertikal atau dalam arah torsional. *Flutter* yang terjadi hanya pada 1 pola getar tersebut disebut *single degree flutter*. Dengan bertambahnya panjang jembatan, pola getar pada saat *flutter* dapat berupa kombinasi dari pola getar vertikal dan torsional. *Flutter* yang terjadi pada kondisi tersebut disebut *Coupled Flutter*.

### ANALISA FLUTTER DENGAN FULL MODEL TEST

Model jembatan yang telah dibuat dengan mempertimbangkan persyaratan kesamaan diletakkan didalam laboratorium uji terowongan angin. Selanjutnya angin dihembuskan dengan kecepatan tertentu secara berkala dinaikkan. Simpangan yang ter-

jadi pada dek jembatan di catat dan diplot. Dari kurva simpangan dan kecepatan angin, akan dapat diketahui kecepatan angin dimana simpangan akan menjadi divergen. Kecepatan a-ngin tersebut merupakan kecepatan angin kritis *flutter*. Gambar 4 adalah tipikal hasil uji terowongan angin dengan menggunakan *Full Model*.



THE LIONS' GATE BRIDGE TORSIONAL RESPONSE AT THE 1/10TH SPAN POSITION IN SMOOTH AND TURBULENT FLOW (by Irwin & Wardlaw)

Gambar 4. Hasil Pengujian *Full Model*

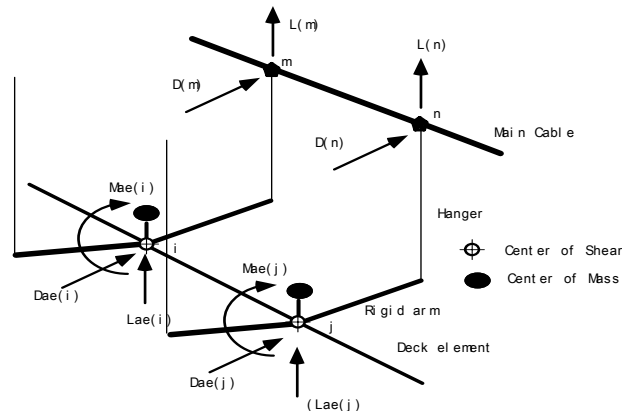
### ANALISA FLUTTER DENGAN SECTION MODEL TEST

Section model terdiri dari sebuah segment dari dek jembatan, biasanya dengan skala 1 : 25 s/d 1 : 100. Dengan skala dan lingkup dari model yang digunakan, kebutuhan akan tingkat keakuratan yang tinggi dapat dikurangi. Keunggulan lain dari *Section Model* adalah bahwa section model test lebih mudah di modifikasi untuk mempelajari bentuk konfigurasi jembatan. Karena itu *Section Model Test* umum digunakan pada tahapan investigasi awal.

Potongan Deck jembatan digantung dengan sejumlah pegas. Kekakuan dari potongan jembatan tersebut yang memiliki kekakuan yang ekivalen dengan kekakuan jembatan sebenarnya. Pengujian flutter pada *Section Model Test* dilakukan dengan memberikan angin dengan kecepatan tertentu pada model yang digantung tersebut, dan selanjutnya memberikan gangguan awal dalam arah torsional maupun arah vertikal. Jika setelah diberi gangguan, simpangan dek jembatan berkurang, maka kecepatan angin tersebut bukan merupakan kecepatan angin *flutter*. Selanjutnya kecepatan angin ditambahkan dan model jembatan diberi gangguan kembali. Jika setelah diberi gangguan, ternyata simpangan jembatan tidak berkurang atau cenderung bertambah, maka kecepatan angin tersebut disebut kecepatan angin kritis *flutter*.



Gambar 5. *Section Model Test* dari Jembatan Hamdi-Holtekang, Jayapura



Gambar 6. Permodelan jembatan dan gaya-gaya aerodinamik

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

$$[M]\ddot{u} + [K]u = F_{ae} \quad (10)$$

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

Dengan mengasumsikan response getaran bebas dengan beban harmonik adalah  $w$  dengan frekuensi kompleks  $\omega$ .

$$w = Ae^{i\omega t} \quad (11)$$

Akan didapat

$$\omega^2 w = -\ddot{w} \quad (12)$$

$$\omega w = -i\dot{w} \quad (13)$$

Dengan memasukkan persamaan diatas ke persamaan (1) akan didapat

$$F_{ae} = \begin{bmatrix} L_{ae} \\ D_{ae} \\ M_{ae}/B \end{bmatrix} = \rho\pi B^2 \begin{bmatrix} L_Y & L_Z & L_\alpha \\ D_Y & D_Z & D_\alpha \\ M_Y & M_Z & M_\alpha \end{bmatrix} \ddot{w} = F_w \ddot{w} \quad (14)$$

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

$$[M - F_w]\ddot{u} + [K]u = 0 \quad (15)$$

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

$$|K - M_f(k)\lambda^2| = 0 \quad (16)$$

$$k = \frac{\omega B}{U} \quad (17)$$

Persamaan (16) adalah *eigen problem* dengan *complex matrix*  $M_f$  yang merupakan fungsi dari  $k$ . Frekuensi *real* dari  $\omega$  adalah  $\sqrt{\lambda}$ . Dengan mengasumsikan nilai  $k$  tertentu analisa terhadap persamaan (16) 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

$$\omega_m = \sqrt{\lambda_{Rm}^2 + \lambda_{Im}^2} \quad (18)$$

Jika harga frekuensi telah diketahui, maka dapat ditentukan kecepatan angin  $U$  untuk nilai  $k$  tersebut. Dengan melakukan analisis untuk berbagai nilai  $k$  akan didapat hubungan 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 aerodinamik. Besarnya redaman struktur biasanya diambil 0.02 untuk torsi dan 0.03 untuk lentur.

## HAL-HAL YANG MEMPENGARUHI KESTABILAN JEMBATAN

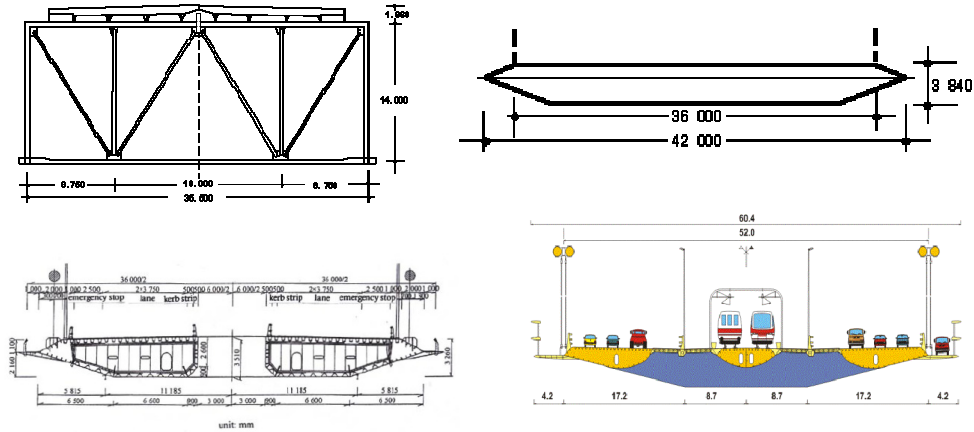
Dari banyak kasus yang telah di studi dan dikaji, aspek-aspek yang mempengaruhi kestabilan jembatan terhadap angin dinamik diantaranya

### a. Bentuk Penampang Dek Jembatan

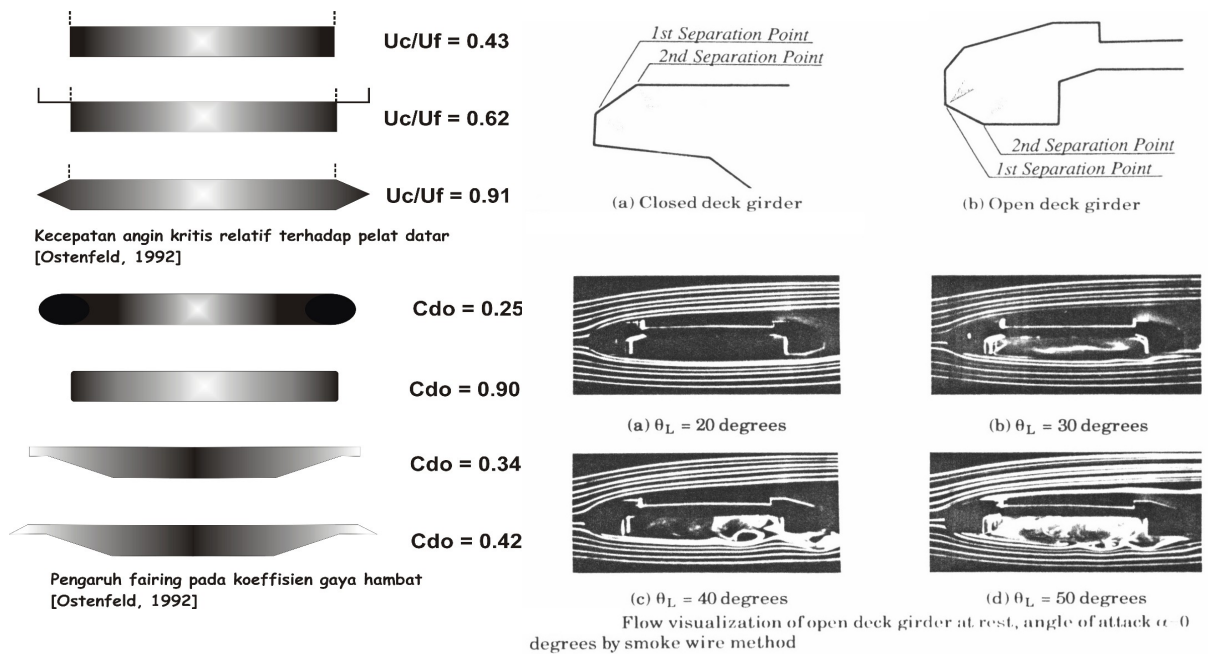
Semakin *stream line* atau aerodinamis penampang deck jembatan, maka ia akan lebih stabil. Untuk itu pemilihan bentuk dek jembatan bentang panjang memerlukan studi yang sistematis untuk menghasilkan bentuk penampang dengan kestabilan yang tinggi. Saat ini penampang box girder diyakini memiliki berat yang lebih kecil dibandingkan penampang berbentuk rangka dengan performance terhadap angin yang lebih baik. Untuk mengantisipasi bentang yang lebih panjang, penampang berbentuk streamline box dikembangkan menjadi twin box atau tripple box yang diyakini memiliki kinerja yang lebih baik dalam menghadapi angin dinamik.

- b. Kekakuan Deck Jembatan  
Semakin kaku deck jembatan, maka jembatan tersebut akan lebih mampu menahan angin dengan kecepatan yang lebih tinggi. Akan tetapi menambah kekakuan dek memiliki konsekuensi terhadap biaya dan berat dari dek jembatan.
- c. Massa Deck Jembatan  
Semakin berat deck jembatan, maka jembatan tersebut akan semakin stabil. Sama halnya dengan menambah kekakuan, masa dek jembatan yang berat akan menyebabkan kenaikan

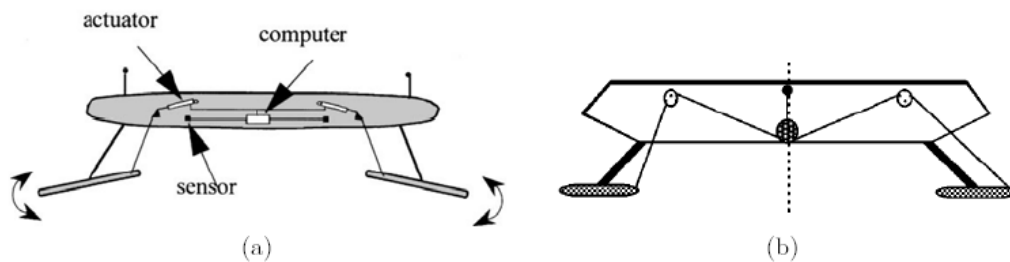
- d. Keberadaan alat Kontrol  
Alternatif lain yang sering diusulkan untuk meningkatkan kestabilan terhadap flutter adalah dengan menggunakan alat kontrol baik itu pasif maupun aktif. Alat tersebut diharapkan berfungsi sebagai stabiliser yang akan meminimalkan pergerakan deck jembatan



Gambar 7. Perkembangan Penggunaan Penampang Jembatan



Gambar 8. Pengaruh Bentuk Penampang Terhadap Aliran Udara



Gambar 9. Alat Kontrol Aktif dan Pasif pada Jembatan (Fujino at all, 1999)

## KECEPATAN ANGIN RENCANA FLUTTER

Penentuan besarnya beban angin rencana untuk *flutter* didasarkan atas data statistik kecepatan angin dasar di lokasi Jembatan. Kecepatan angin dasar adalah kecepatan angin pada elevasi 10 m dari muka laut rata-rata. Dengan mempertimbangkan umur rencana jembatan akan dapat dihitung kecepatan angin dasar di lokasi Jembatan. Selanjutnya kecepatan angin pada elevasi Deck Jembatan dapat dihitung dengan menggunakan *Logarithmic Law* atau dengan *Power Law*.

Persamaan *Logarithmic Law* adalah sebagai berikut

$$U(z) = \frac{1}{k} u_* \ln \frac{z}{z_0} \quad (20)$$

Sedangkan Persamaan *Power Law* adalah sebagai berikut

$$U(z_{g1}) = U(z_{g2}) \left( \frac{z_{g1}}{z_{g2}} \right)^\alpha \quad (21)$$

Dengan menggunakan salah satu dari persamaan diatas, kecepatan angin rencana di elevasi deck jembatan akan dapat dihitung. Adapun kecepatan angin rencana flutter, dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$V_{cr} = v_3 v_z \quad (22)$$

Dimana  $v_3$  adalah faktor keamanan untuk flutter yang biasanya diambil 1.3.

Tabel 2 di bawah menyajikan kecepatan angin rencana flutter untuk beberapa jembatan panjang di dunia.

Tabel 2 Kecepatan Angin Flutter Pada Beberapa Jembatan Bentang Panjang

No	Nama Jembatan	Tipe Struktur	Bentang (m)	Design flutter speed (m/s)
1	Akashi Kaikyo	Suspensi	1991	78
2	Xihoumen	Suspensi	1650	78.4
3	Great Belt East	Suspensi	1624	65
4	Runyang	Suspensi	1490	52
5	Sutong	Cable-Stayed	1088	72
6	Stonecutters	Cable-Stayed	1018	79
7	Suramadu	Cable-Stayed	434	56.2

Tabel 3 Langkah-Langkah Dalam *Software* serta *File* yang digunakan

No	Langkah	Kebutuhan Data	Filing	File Keluaran
1	<i>Input</i> 01	Parameter Jembatan		DATAB
2	<i>Run</i> 01	MESH.EXE		BR1, BR2, BR3 IN
3	<i>Screen</i> 01	Menampilkan Geometrik Jembatan		
4	<i>Input</i> 02	Data Coefisien Angin Static Data Kecepatan Angin	COEF.DAT WIND.DAT	
5	<i>Run</i> 02	NAT.EXE	BR1, BR2, BR3, COEF.DAT, WIND.DAT	SYSOUT.OUT FREQ.OUT
6	<i>Screen</i> 02	Menampilkan Nilai Natural Freq		
7	<i>Input</i> 03	Aerodynamic Derivatives	Q.DAT, Y.DAT, Z.DAT	
8	<i>Run</i> 03	FLUT.EXE	Output dari NAT, COEF.DAT, WIND.DAT, Q.DAT, Y.DAT, Z.DAT	Res* EIV.*
9	<i>Run</i> 04	MTMPLOT.EXE	JUMLAH MODE Res*, INMTM	history
10	<i>Screen</i> 03	Menampilkan kurva <i>log decrement dumping</i> dan Kecepatan Angin Flutter	history	
11	<i>Run</i> 05	MREVO.EXE	WIND.DAT, EIV.*	DATA.*
12	<i>Screen</i> 04	Menampilkan Mode Shape	DATA.*	

## PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK ANALISIS FLUTTER

Secara umum program analisa *flutter* yang dikembangkan terdiri dari 2 tahapan analisis yaitu

- Tahap 1: untuk menganalisis perilaku dinamik dari jembatan
- Tahap 2: untuk menganalisis kecepatan angin *flutter* jembatan

Selain 2 tahapan tersebut, program dilengkapi dengan modul input dan output.

Analisis dinamik dilakukan dengan menggunakan program *finite element* yang dikembangkan berdasarkan *source code* SAP4B yang telah disesuaikan sesuai kebutuhan analisis. Adapun metode penentuan kecepatan angin flutter didasarkan atas metode *Direct Flutter Analysis* dan *Mode Tracing Method* yang dikembangkan di Yokohama National University Jepang. Prinsip dari *Direct Flutter Analysis* adalah sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya yaitu metode analisis flutter secara analitis.

Untuk membantu membuat model jembatan baik jembatan cable-stayed maupun jembatan suspensi, program ini dilengkapi dengan *Preprocessor*. Program *Preprocessor* digunakan untuk mengenerate model jembatan. Untuk dapat menghasilkan nilai *Flutter speed* dari model jembatan yang ditinjau, program yang dibuat dilengkapi dengan 2 buah *Postprocessor*.

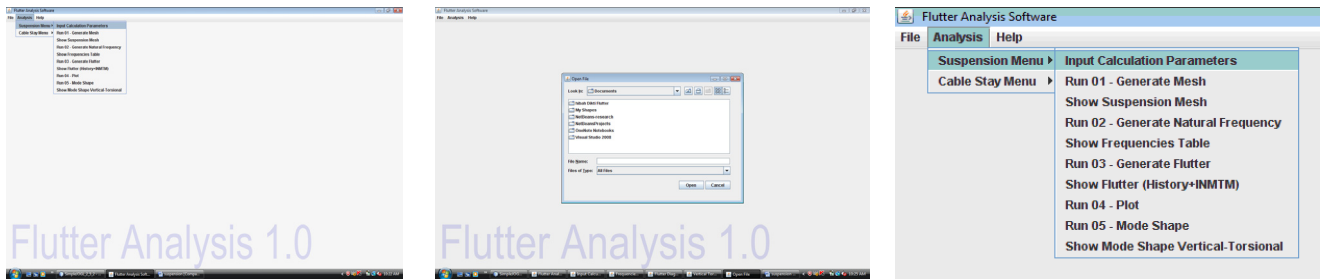
- Post Processor* 1 : bertujuan untuk menghitung kecepatan angin flutter dan memudahkan plotting kurva penurunan redaman logaritmik terhadap kecepatan angin
- Post Porcessor* 2 : bertujuan untuk memudahkan penyajian evolusi dari pola getar terhadap kecepatan angin

Langkah-Langkah, kebutuhan data, *fling* serta Keluaran dari *software* analisis *flutter* yang dikembangkan disajikan pada Tabel 3.

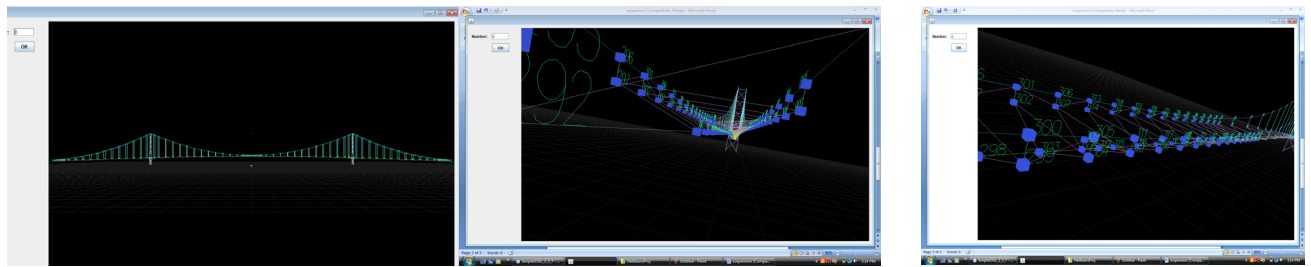
Output fungsi *Generate Mesh* akan ditampilkan sebagai 3D *Computer Graphic* yang dilengkapi dengan fungsi *zoom* dan rotasi 360 derajat melalui fungsi *Show Mesh*.

## STUDI KASUS JEMBATAN AKASHI KAIKYO

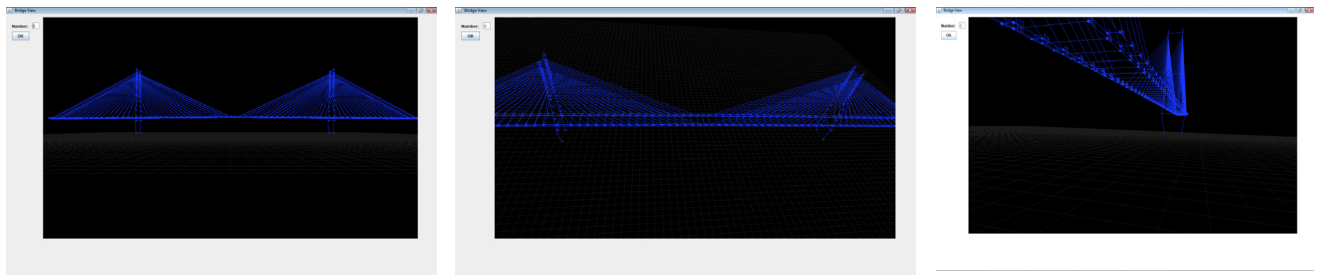
Jembatan Akashi Kaikyo di Kobe Jepang, merupakan jembatan suspensi terpanjang di dunia dengan bentang tengah 1991 m dan panjang total 3991 m. Jembatan tersebut dibuka untuk lalu lintas tanggal 5 April 1998 setelah masa konstruksi yang dimulai dari bulan Mei 1988. Laut dibawah jembatan dilalui oleh 1400 kapal per hari.



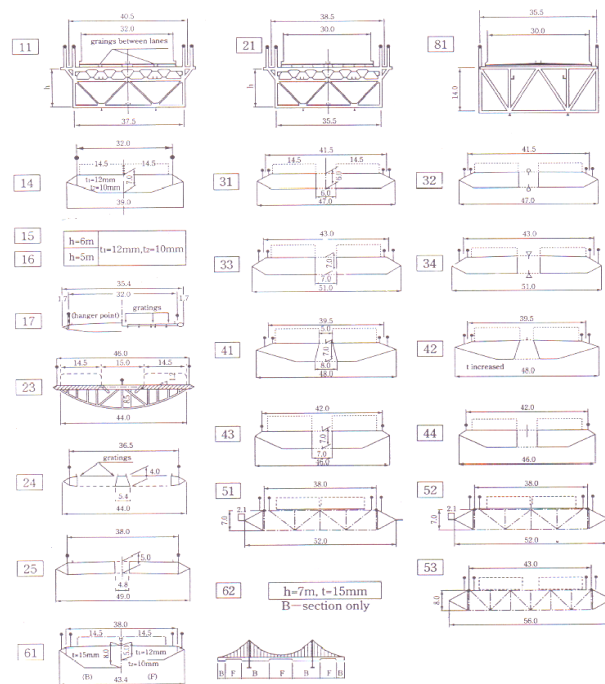
Gambar 10. Tampilan Layar *Open files* (Menu File – Open)



Gambar 11. *Zoom and Rotated* – Jembatan Suspensi



Gambar 12. *View Zoom Birds Eye View* – Jembatan Cable Stayed



Gambar 13. Beberapa Alternatif Penampang Jembatan Akashi Kaikyo



Pemilihan penampang jembatan merupakan salah satu hal yang sangat penting pada perencanaan Jembatan bentang panjang. Dengan mempertimbangkan kestabilan aerodinamik, berbagai bentuk penampang jembatan telah dipertimbangkan sebagaimana disajikan pada Gambar 13. Dari hasil analisis disimpulkan bahwa *streamline box girder* sebagaimana digunakan pada Jembatan Humber dan Severn di Inggris tidak dapat menahan kecepatan angin flutter rencana sebesar 78 m/s, kecuali jika pada penampang tersebut diberikan perkuatan tambahan dalam arah torsi yang membutuhkan volume baja yang cukup banyak.

Untuk optimasi, dipertimbangkan juga untuk menggunakan penampang yang lebih tebal di sekitar pilar dan angkur, sedangkan di tengah bentang digunakan penampang yang *streamline*. Deck jembatan dengan penampang berbeda ini memberikan kinerja yang sama baiknya dengan penggunaan penampang berupa rangka. Akan tetapi keberadaan lalu lintas laut yang ramai di bawah jembatan menjadi kendala utama penggunaan box girder pada Jembatan tersebut.

Konstruksi dek jembatan berbentuk box girder umumnya dimulai dari tengah bentang, selanjutnya berjalan menuju ke arah pylon, dimana segmen-segmen diangkat dari laut untuk selanjutnya di rakit diatas. Padatnya lalu lintas kapal dibawah jembatan, tidak memungkinkan untuk melakukan lifting dari tengah bentang. Dengan pertimbangan tersebut, maka konstruksi dimulai dari pylon sehingga Jembatan Akashi Kaikyo menggunakan penampang berupa rangka.

Stabilitas aerodinamik Jembatan dipastikan melalui uji *Section Model* maupun uji model Skala Penuh dengan skala 1 : 100. Dengan skala tersebut, maka terowongan angin yang ada di Jepang tidak memadai untuk menampung panjang model. Untuk itu sebuah laboratorium terowongan angin khusus dibangun

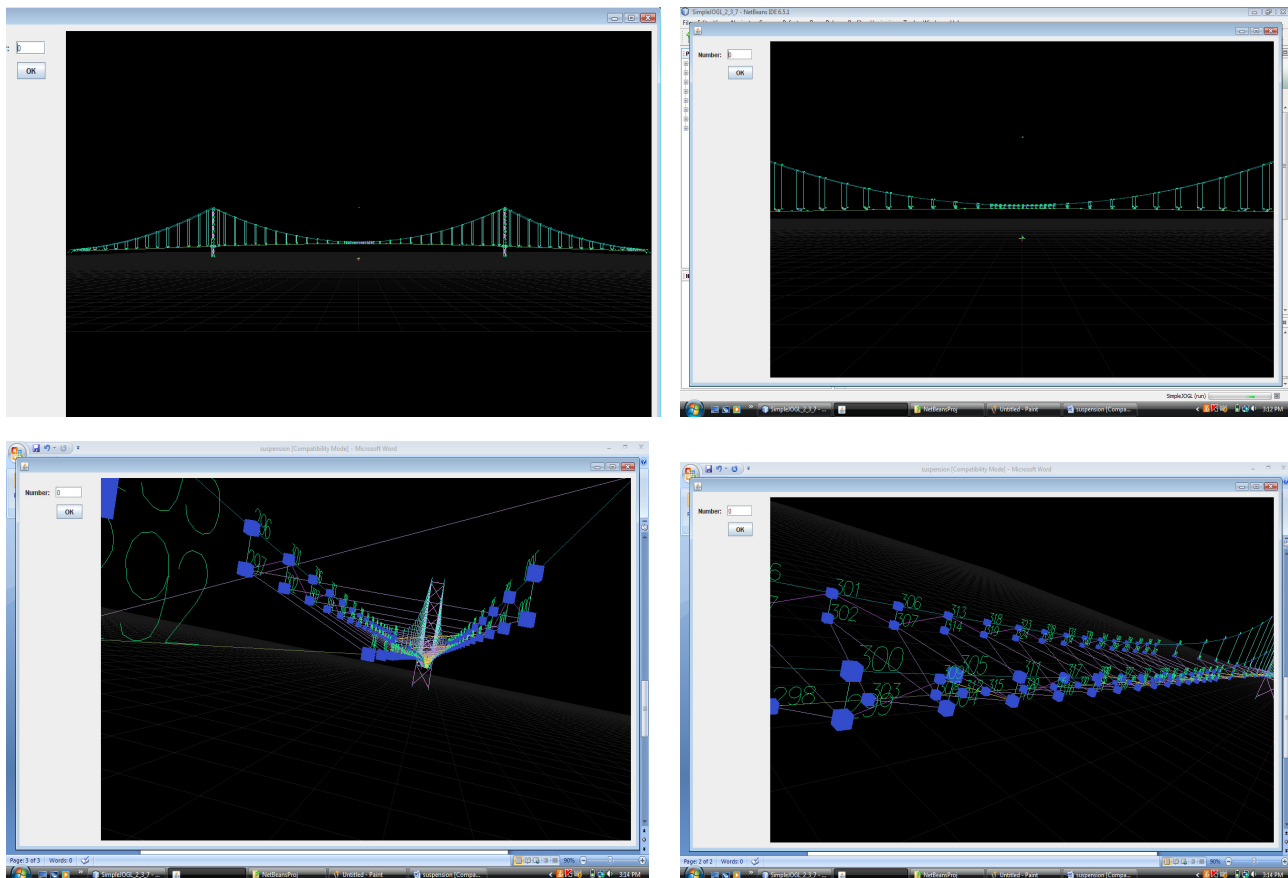
untuk pengujian full model Jembatan Akashi Kaikyo. Berdasarkan studi aerodinamik jembatan Akashi kaikyo diketahui bahwa

- Lendutan statik pada girder akibat angin sangat berpengaruh terhadap kecepatan angin kritis.
- Gaya dorong/*drag forces* tidak boleh diabaikan untuk flutter
- Metode analitis yang digunakan dapat digunakan untuk mengevaluasi karakteristik *multi mode flutter/coupled flutter* sebagaimana di temukan pada pengujian *full model*.



Gambar 14. Jembatan Akashi Kaikyo

Model 3 dimensi Jembatan Akashi Kaikyo adalah sebagaimana disajikan pada Gambar-Gambar 15.



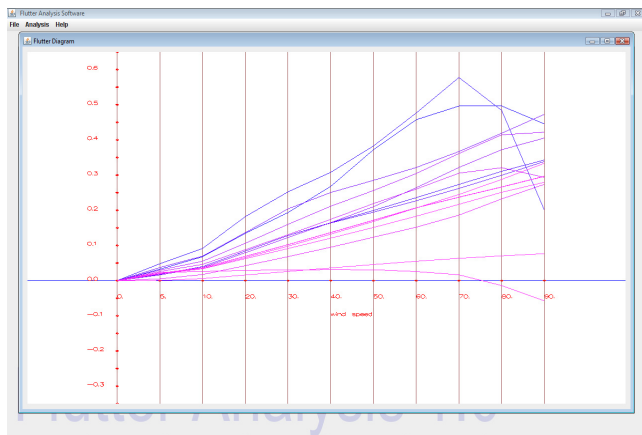
Gambar 15. Model 3 D Jembatan Akashi Kaikyo

Parameter dinamik Jembatan hasil analisis dinamik adalah sebagaimana disajikan pada Gambar 16 dibawah :

MODE	CIRCULAR FREQUENCY (RAD/SEC)	FREQUENCY (SEC)	PERIOD	TOLERANCE
0.0	0.2402	0.20812	28.16	0.0
0.1	0.3089	0.25913	17.53	0.192E-16
0.2	0.4465	0.22395	14.07	0.114E-16
0.3	0.4489	0.22112	14.06	0.178E-16
0.4	0.4736	0.21122	13.29	0.270E-16
0.5	0.4884	0.20709	12.84	0.454E-16
0.6	0.501	0.20000	10.00	0.345E-16
0.7	0.7486	0.13359	8.484	0.2024E-16
0.8	0.8427	0.11866	7.43	0.552E-16
0.9	0.8472	0.11806	6.833	0.495E-16
10.0	0.8482	0.11811	6.819	0.444E-16
11.0	0.8502	0.11812	6.812	0.396E-16
12.0	1.001	0.15983	6.276	0.446E-16
13.0	1.006	0.1588	6.363	0.512E-16
14.0	1.123	0.17787	5.635	0.556E-16

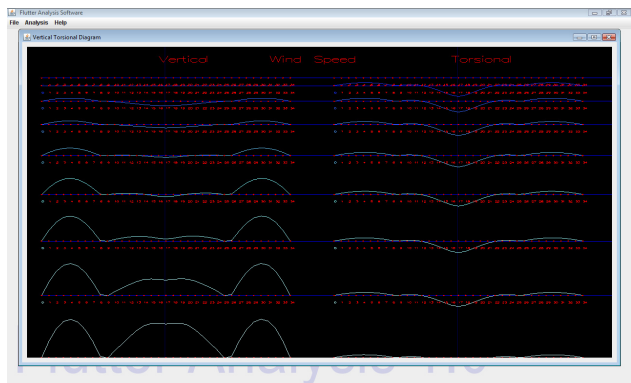
Gambar 16. Frequencies Alamiah Jembatan Akashi Kaikyo

Kecepatan angin kritis flutter ditentukan berdasarkan kurva *logarithmic decreament dumping vs wind speed*. Untuk Jembatan Akashi Kaikyo, kurva tersebut adalah sebagaimana disajikan pada Gambar 17 dibawah. Dengan mengasumsikan redaman struktur adalah 0.025, maka didapat kecepatan angin flutter Jembatan Akashi kaikyo adalah 82.521 m/s. Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan angin flutter Jembatan Akashi Kaikyo berada di atas kecepatan angin rencana flutter yaitu 78 m/s sebagaimana disajikan pada Tabel 2.



Gambar 17. Kurva Logarithmic Decrement Dumping vs Wind Speed

Evolusi dari mode shape jembatan yang berubah sesuai dengan meningkatnya kecepatan angin disajikan pada Gambar 18.



Gambar 18. Evolusi Mode Shape Jembatan

## KESIMPULAN

- Fenomena *Flutter* merupakan salah satu aspek penting dalam perencanaan jembatan bentang panjang.
- Rasio antara frekuensi alamiah torsi dan frekuensi alamiah vertical dapat digunakan sebagai indikator awal dalam menentukan kestabilan jembatan terhadap *flutter*. Semakin besar nilai rasio tersebut, maka jembatan akan semakin stabil.
- Pemilihan penampang jembatan merupakan salah satu proses yang sangat penting pada perencanaan Jembatan bentang panjang karena akan mempengaruhi kestabilan jembatan terhadap *flutter*.
- Section Model test* dapat digunakan dalam proses pemilihan bentuk penampang jembatan untuk menghasilkan bentuk penampang yang optimum.
- Kestabilan *flutter* dapat juga dievaluasi secara analitis dengan menggunakan *flutter derivatives* sebagaimana disajikan pada kasus Jembatan Akashi Kaikyo.
- Nilai *flutter derivatives* diperoleh dari pengujian dinamik *section model Test* dan akan memiliki nilai yang sama selama bentuk penampang jembatan sama
- Keberadaan Perangkat Lunak sebagaimana dikembangkan dalam penelitian ini akan banyak membantu proses perencanaan jembatan panjang, karena dapat digunakan untuk melakukan kajian *flutter* untuk berbagai konfigurasi jembatan yang berbeda.

## PUSTAKA

Chen, W.F., Duan, L. (2002). *Bridge Engineering Hand Book*, CRC Press.

Gimsing, N. J. (1997). *Cable Supported Bridges: Concept and Design*, 2nd Edition, John Wiley and Sons

Miyata, T., Yamada, H., Kazama, K. (1995) "On Application of The Direct Flutter FEM Analysis for Long Span Bridges." *Proc., 9<sup>th</sup> International Conference, New Delhi, India, 1995*, pp. 793-802.

Miyata, T., Sato, H., Toriumi, R., Kitagawa, M., Katsuchi, H. (1995) "Full Model wind Tunnel Study on The Akashi Kaikyo Bridge", *Proc., 9<sup>th</sup> International Conference, New Delhi, India, 1995*, 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*. 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley and Sons, 1996

Suangga, M. (2002). "Beban Dinamik Angin pada Jembatan Bentang Panjang". *Conference on Long Span Bridge, Tarumanagara University*.

The State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering (SLDRCE) of Tongji University, (2005). "Wind Tunnel Study on Wind Resistant Performance Of Suramadu Bridge In Indonesia."

The Akashi-Kaikyo Bridge (1998). *Design and Construction of the World's Longest Bridge*, Honshu-Shikoku Bridge Authority, October 1998, Japan.

Yao-Jun GE and Hai-Fan XIANG. (2007). "China Major Bridges for Improving Traffic Infrastructure Nationwide." *Keynote Lecture IABSE Conference, Wilmar 2007*.