

# **AEROCO : SOFTWARE TOOL UNTUK MENENTUKAN KOEFISIEN AERODINAMIKA MODEL JEMBATAN BENTANG PANJANG**

**Fariduzzaman\***

## **ABSTRAK**

**AEROCO : SOFTWARE TOOL UNTUK MENENTUKAN KOEFISIEN AERODINAMIKA MODEL JEMBATAN BENTANG PANJANG.** Prediksi keadaan tak-stabil struktur jembatan bentang panjang, biasa dilakukan dengan uji terowongan angin, di mana aspek aerodinamika dan aeroelastik struktur dapat diuji menggunakan model 2 dimensi atau 3 dimensi. Dalam eksperimen model jembatan 2 dimensi, selain model fisik di terowongan angin, model matematika sistem pengujian juga harus dirumuskan. Model matematika ini memiliki sejumlah koefisien aerodinamika yang pada awalnya belum diketahui, yakni baru dapat ditentukan setelah diperoleh data eksperimen. Dengan kata lain, proses penentuan koefisien aerodinamika adalah bagian dari sistem identifikasi parameter persamaan aeroelastik untuk prediksi keadaan kritis struktur jembatan. Makalah ini akan menguraikan proses pengembangan software tools untuk ekstraksi koefisien aerodinamika dari data eksperimen model seksional (2 dimensi) jembatan di terowongan angin ILST (Indonesian Low Speed Tunnel).

**Katakunci:** jembatan bentang panjang, uji terowongan angin

## **ABSTRACT**

**AEROCO: SOFTWARE TOOL FOR DETERMINING AERODYNAMIC COEFFICIENTS OF A LONG-SPAN BRIDGE MODEL.** Prediction of structural instability of a long-span bridge is usually conducted in a wind tunnel test, where the aerodynamic as well as aeroelastic aspect of the structure can be tested by means of 2 or 3 dimensional model. In a 2 dimensional model, inspite of testing the physical model, a mathematical model should also be constructed. Initially, this mathematical model has unknown parameters that must be determined from experimental data. In other words, the determination of aerodynamic coefficients is part of system identification of aeroelastic equations for predicting the critical margin of the bridge structure. The following paper will describe the development of a software tool for extracting the aerodynamic coefficients of a sectional model test (2 dimensional) in the ILST (Indonesian Low Speed Tunnel).

**Keywords:** long span bridge, wind tunnel test

---

\* UPT-LAGG BPPT, PUSPIPTEK, Tangerang-15314, INDONESIA farid@lagg.or.id

## PENDAHULUAN

Jembatan bentang panjang dalam beberapa hal memiliki karakteristik yang sama dengan sayap pesawat terbang. Struktur jembatan mirip batang bertumpu sederhana (*simply supported beam*), sedangkan sayap pesawat mirip *cantilever beam*.

Pada keadaan tertentu yang disebut kecepatan angin kritis, struktur jembatan bentang panjang dapat mengalami keadaan tak-stabil, baik yang temporer mengganggu, seperti resonansi oleh induksi aliran ulakan (*vortex*) yang berfluktuasi, maupun yang fatal menghancurkan seperti flutter. Kondisi tak-stabil yang terjadi akibat interaksi aerodinamika dengan inersia struktur tersebut, disebut aeroelastik.

Dengan demikian pada pembangunan jembatan bentang panjang, dalam proses perancangannya memerlukan tahapan uji terowongan angin. Di mana dalam pengujian tersebut akan dilakukan eksperimen untuk identifikasi aspek-aspek ketakstabilan struktur akibat angin.

Uji terowongan angin dapat dilakukan dengan model 2 dimensi (disebut pula model seksional) maupun pada model penuh (disebut pula *full model*), di mana masing-masing metode pengujian memiliki keunggulan dan kelemahannya.

Model 2 dimensi pembuatannya lebih sederhana dan murah, namun memerlukan proses pengolahan data yang intensif, karena memerlukan dukungan model matematika, yang disebut persamaan aeroelastik. Model matematika ini memiliki sejumlah koefisien aerodinamika yang harus diidentifikasi berdasarkan data pengujian, agar batas kritis ketak-stabilan dapat ditentukan.

Model 3 dimensi pembuatannya lebih sulit, lama dan mahal, namun tidak memerlukan proses pengolahan data yang banyak. Hasil data terukur dapat langsung ditransformasikan ke data teknik yang diinginkan, begitupula keadaan tak-stabil struktur dapat diketahui langsung, dengan mengalirkan angin sampai struktur model tersebut menunjukkan keadaan tak-stabil.

Dengan demikian model 2 dimensi sering digunakan untuk prediksi awal karakteristik aeroelastik rancangan jembatan bentang panjang. Sedangkan model 3 dimensi digunakan untuk analisis akhir karakteristik aeroelastik strukturnya.

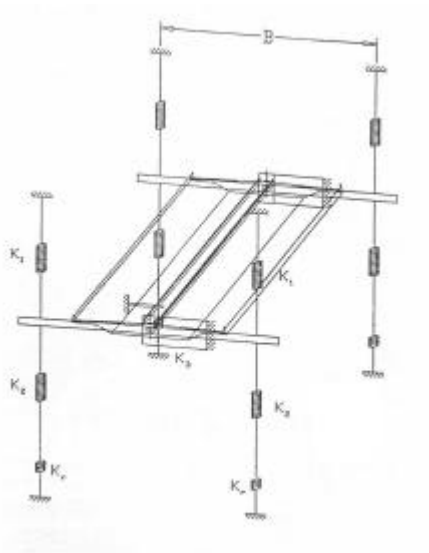
Untuk mempercepat proses pengolahan data uji 2 dimensi di ILST (*Indonesian Low Speed Tunnel*), maka telah dikembangkan *software tool* khusus. Software ini membaca input dari data osilasi model yang diukur akselerometer dan mengeluarkan data koefisien-koefisien aerodinamika yang diperlukan.

## LATAR BELAKANG TEORI

Secara skema struktur model 2 dimensi jembatan di terowongan angin ditunjukkan di Gambar 1 dan gambaran pengujiannya ditunjukkan di Gambar 2. Model disangga oleh 8 pegas yang konstanta kekakuannya sama, sehingga ketika diganggu atau mendapat aliran angin, model akan bergerak dalam 2 derajat kebebasan: gerak *heaving* (osilasi vertikal) dan gerak torsi (osilasi rotasional). Transducer yang digunakan adalah 2 akselerometer, dipasang di depan dan belakang tepi model dek, sejajar arah angin, dengan demikian dapat diukur sekaligus data percepatan gerak *heaving* ( $\ddot{h}$ ) dan torsi ( $\ddot{\alpha}$ ).

Untuk mendapatkan data pengukuran getaran bebas, model sesaat diganggu (diberi defleksi dan dilepas) sehingga terjadi osilasi getaran bebas yang teredam. Jika gangguan diberikan pada saat tidak ada angin ( $U = 0$  m/sec) maka data frekuensi maupun redaman yang diperoleh adalah data dinamika dari struktur saja (*mechanical natural properties*). Namun jika gangguan diberikan pada saat ada aliran angin ( $U \neq 0$  m/sec) maka data frekuensi maupun redaman yang diperoleh merupakan gabungan antara data dinamika struktur dan aerodinamika.

Data frekuensi osilasi ( $\dot{u}$ ) dapat diekstraksi dari hasil FFT (*Fast Fourier Transform*) sinyal akselerometer, sedangkan data redaman ( $\ddot{\alpha}$ ) dapat diperoleh dari data *logarithmic decreement*,  $\ddot{\alpha}$  (kemiringan kurva logaritmis dari amplitudo sinyal).



Gambar 1. Skema Sistem Model Sekasional (2D)



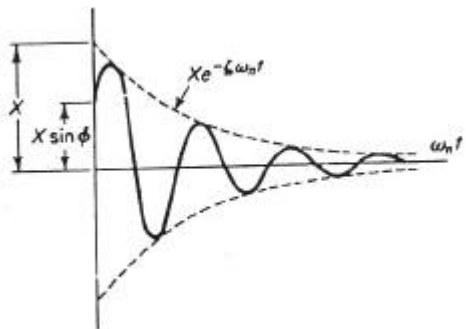
Gambar 2. Contoh Model Uji Seksional di ILST

Jika  $z_1$  adalah amplitudo sinyal di posisi awal dan  $z_2$  adalah amplitudo sinyal diposisi  $n$  perioda dari  $x_1$ , maka besarnya *logarithmic decreement* [1],

$$d = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{z_2}{z_1} \right) \quad (1)$$

dan hubungannya dengan rasio redaman  $\alpha$ , adalah,

$$z = \frac{d}{\sqrt{4p^2 + d^2}} \quad (2)$$



Gambar 3. Data Osilasi dari Akselerometer

Persamaan *curve-fit* dari sinyal di atas dapat ditulis sebagai berikut,

$$y = y_0 e^{-g\omega_n t} \sin(\omega_d t + \mathbf{j}) \quad (3)$$

di mana,  
 $y_0$  : percepatan awal  
 $\omega_n$  : siklus frekuensi natural  
 $\omega_d$  : siklus frekuensi teredam  
 $t$  : waktu  
 $\ddot{\phantom{y}}$  : perbedaan fasa

Dengan integrasi tahap pertama pada persamaan (3) maka diperoleh kecepatan (*velocity*) dan integrasi tahap kedua diperoleh perpindahan (*displacement*) osilasi model.

Jika masa total dari model adalah  $m_T$ , momen inersia masa total adalah  $I_T$  dan kerapatan material udara adalah  $\tilde{n}$ , maka dapat dituliskan persamaan model matematikanya dari sistem dinamik model seksional [2] :

$$m_T \ddot{h} + c_h \dot{h} + k_h h = \frac{1}{2} \mathbf{r} U^2 (2b) \left[ kH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + kH_2^* \frac{b\dot{\mathbf{q}}}{U} + k^2 H_3^* \mathbf{q} + k^2 H_4^* \frac{h}{b} \right] \quad (4)$$

$$I_T \ddot{\mathbf{q}} + c_q \dot{\mathbf{q}} + k_q \mathbf{q} = \frac{1}{2} \mathbf{r} U^2 (2b^2) \left[ kA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + kA_2^* \frac{b\dot{\mathbf{q}}}{U} + k^2 A_3^* \mathbf{q} + k^2 A_4^* \frac{h}{b} \right] \quad (5)$$

di mana,  
 $c_h, c_\theta$  : masing-masing konstanta redaman untuk gerak *heaving* dan torsional  
 $k_h, k_\theta$  : masing-masing konstanta kekakuan untuk gerak *heaving* dan torsional  
 $U$  : kecepatan aliran udara di terowongan angin  
 $k$  : frekuensi reduksi =  $\frac{\mathbf{w}b}{U}$   
 $b$  : lebar dek (*chord*)  
 $H_i^*, A_i^*$  ( $i=1,..4$ ) : adalah koefisien aerodinamika yang akan ditentukan

Jadi *software tool* AEROCO berfungsi menyelesaikan persamaan (4) dan (5) untuk memperoleh koefisien aerodinamika  $H_i^*, A_i^*$  ( $i=1,..4$ ), di mana data inputnya adalah percepatan gerak osilasi *heaving* ( $\ddot{h}$ ) dan torsi ( $\ddot{\mathbf{a}}$ ) yang diukur oleh akselerometer.

## ALGORITMA

Algoritma dimulai dengan mendefinisikan input dari seluruh proses, yakni data akselerometer, kemudian *curve fitting* harus dilakukan sebelum data diproses lebih lanjut. Demikian pula untuk mendapatkan kecepatan dan perpindahan di persamaan (4) dan (5), proses integrasi terhadap waktu harus dilakukan.

Koefisien aerodinamika sistem model  $(\ddot{h}, \ddot{\mathbf{a}})$  diperoleh dengan merubah persamaan (4) dan (5) menjadi persamaan ruang-keadaan (*state-space equation*) dan menjadi persamaan simultan, sehingga dapat diselesaikan dengan metoda Cramer atau eliminasi Gauss.

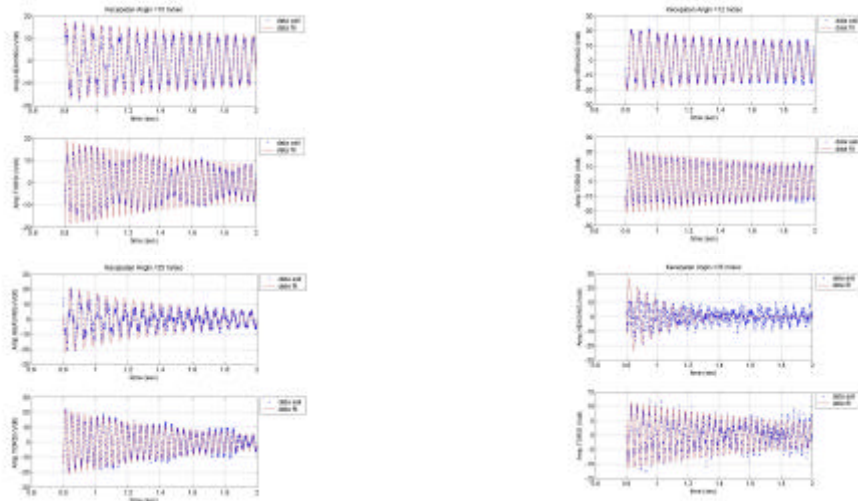
Seluruh proses tersebut di-iterasi dua tahap untuk mendapatkan hasil koefisien aerodinamika gerak *heaving* dan torsional.

MULAI
Baca data terukur dari akselerometer
$i=1,2$ ( <i>heaving</i> , 1 dan torsi, 2)
Tentukan frekuensi dan redaman sinyal input
Curve fit sinyal input dengan $\ddot{y} = y_0 e^{-\xi \omega_d t} \sin \omega_d t$
Integrasikan $\ddot{y}$ menjadi kecepatan $\dot{y}$ dan perpindahan $y$
Substitusikan $\ddot{y}$ , $\dot{y}$ dan $y$ ke persamaan aeroelastik, persamaan (4) dan (5)
Transformasikan persamaan (4) dan (5) ke persamaan <i>state-space</i>
Selesaikan persamaan state space sehingga $H_i^*$ atau $A_i^*$ ( $i=1,..4$ ) dapat diperoleh
Plot hasil-hasilnya : kurva $H_i^*$ dan $A_i^*$ ( $i=1,..4$ ) terhadap kecepatan $U$ atau kecepatan reduksi, $1/k = \frac{U}{\omega b}$
SELESAI

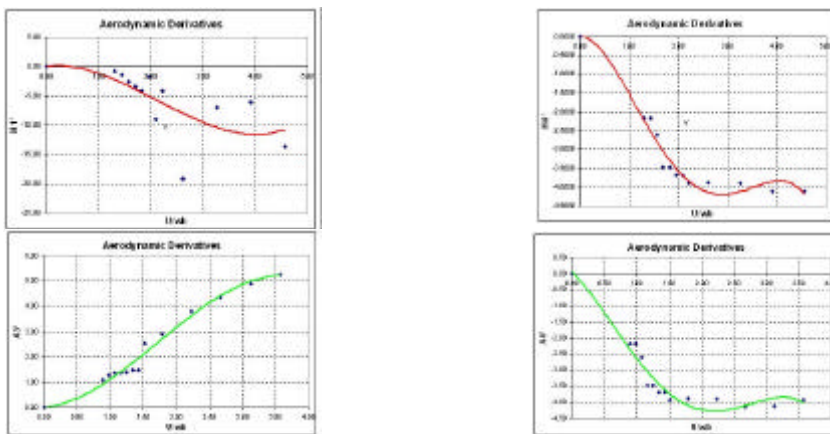
Gambar 4. Peta Alir (algoritma) Software

## PENERAPAN, HASIL DAN DISKUSI

Penerapan sistem software dilakukan terhadap model uji seperti ditunjukkan di Gambar 2, di mana model tersebut merupakan penggalan 2 dimensi dari bentangan tengah dek jembatan bentang panjang, jenis jembatan cancang atau jembatan gantung.



Gambar 5. Hasil Pengukuran Data Percepatan oleh Akselerometer



Gambar 6. Tipikal Hasil Pengolahan Data AEROCO

Perbandingan data percepatan yang terukur dengan hasil *curve fit* persamaan (3) ditunjukkan di Gambar 5, sedangkan tipikal hasil pengolahan data dengan *software tool* ini ditunjukkan di Gambar 6.

## KESIMPULAN

Metoda pembuatan *software tool* yang diuraikan dalam makalah ini telah dikembangkan dan diterapkan untuk pengujian model jembatan bentang panjang di ILST. Hasilnya cukup memuaskan, namun *software tool* ini perlu dikembangkan menjadi lebih berkemampuan (*powerfull*). Antara lain akan dikembangkan untuk mampu mengolah data pengujian model seksional yang memiliki 3 derajat kebebasan, gerak vertikal (*heaving*), gerak rotational (torsion) dan gerak lateral (*swaying*).

Keberhasilan penggunaan *software tool* ini juga dipengaruhi oleh data input. Untuk mendapatkan koefisien-koefisien aerodinamika langsung (*direct coefficients*) yakni  $H_1^*$ ,  $H_4^*$ ,  $A_2^*$  dan  $A_3^*$  relatif mudah, karena data inputnya tidak ada kopling antara *heaving* dan torsi, namun untuk koefisien-koefisien aerodinamika silang (*cross coefficients*) yang menyatakan terjadinya kopling, perlu dilakukan kecermatan khusus, bahkan proses pengukuran yang *iterative*. Dengan demikian *software tool* ini akan sangat penting apabila dapat dikembangkan menjadi *software on-line* (mengolah data selama pengukuran), sehingga pengambilan data yang salah dapat dihindari.

## DAFTAR PUSTAKA

1. RAO, S.S., *Mechanical Vibration*, 3<sup>rd</sup> edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc., New York, 1995.
2. SIMIU, E. and SCANLAN, R.H., *Wind Effects on Structures 3<sup>rd</sup> Edition*, John Wiley and Sons Inc, New York, 1996.

## DISKUSI

ONDANG SUPRIYONO

Apakah *software tool* ini telah dipasang di jembatan Suramadu karena kemarin jembatan ini mengalami kecelakaan (roboh)?

FARIDUZZAMAN

Software AEROCO telah digunakan untuk uji model jembatan Suramadu. Kasus robohnya dek jembatan Suramadu yang sedang dibangun bukan disebabkan angin. Bagian yang mengalami kecelakaan adalah di *approaching* dek, kecelakaan mungkin disebabkan material.

RULIYANTI PARDEWI

Cara memperoleh data eksperimen untuk menentukan koefisien aerodinamika apakah dengan alat ukur atau juga menggunakan *software* AEROCO.

FARIDUZZAMAN

*Software* AEROCO menghitung koefisien aerodinamika jembatan dengan *input data* dari pengukuran/eksperimen yang menggunakan alat ukur/*transducer accelerometer*.

## **DAFTAR RIWAYAT HIDUP**

1. Nama : Fariduzzaman
2. Tempat/Tanggal Lahir : Cianjur, 17 Mei 1961
3. Instansi : UPT-LAGG, BPPT
4. Pekerjaan / Jabatan : Peneliti
5. Riwayat Pendidikan :
  - 1986, S1 Fisika-ITB
  - 1990, S2 Software Technology-THAMES POLY, UK
  - S2 Teknik Penerbangan-ITB
6. Pengalaman Kerja :
  - 1986-1999, Data Processing Engineer –ILST-BPPT
  - 1999, Ka. Sub Bid Informatika-Elektronika, LAGG
  - 2004-Sekarang, Industrial Aerodynamic Specialist