

KAJIAN EKSPERIMENTAL SOFT FLUTTER PADA MODEL SEKSIONAL JEMBATAN

EXPERIMENTAL STUDY OF SOFT FLUTTER ON BRIDGE SECTIONAL MODEL

Angga Dwi Saputra^{1*} dan Syarifatunnisa²

^{1,2} BBT A3-BPPT

Komplek Puspiptek, Tangsel, Indonesia

Abstrak

Pengujian aeroelastika di terowongan angin pada model seksional jembatan dengan skala 1:20 dilakukan untuk mengetahui karakteristik aeroelastika dinamik, yaitu *Vortex Induced Vibration (VIV)* dan *flutter*. Berdasarkan hasil pengujian terlihat fenomena *flutter* yang terjadi adalah *soft flutter*. Fenomena *soft flutter* berbeda dengan *classical flutter* atau *hard flutter*, dimana pada *hard flutter* terdapat titik divergen yang jelas. Pada *hard flutter* titik divergen ditandai dengan naiknya amplitudo menjadi sangat besar secara tiba-tiba dan dapat mengakibatkan kerusakan yang fatal. Pada *soft flutter* amplitudo getaran akan meningkat secara bertahap dengan bertambahnya kecepatan angin. Makalah membahas karakteristik *soft flutter* yang terjadi dan metode untuk menentukan kecepatan kritis *flutter*.

Kata kunci : Aeroelastika, *flutter*, divergen, kecepatan kritis *flutter*

Abstract

Aeroelastic testing of a sectional bridge model in a wind tunnel with scale 1:20 had been conducted. The model was tested to study the characteristics of aeroelastics dynamic, such as Vortex Induced Vibration (VIV) and flutter. Based on the testing, phenomenon soft flutter was found in the test. Soft flutter has different characteristics as classical or hard flutter. In hard flutter, there are obvious divergence point, which is the point of wind speed when the amplitude increases suddenly and might be catastrophic. In soft flutter phenomenon, the vibration amplitude increases gradually as increasing of wind speed. In this paper, the characteristics of soft flutter on a model will be described and the method to determine its critical flutter speed.

Keywords: Aeroelastic, *flutter*, divergence, critical flutter speed

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang sebagian besar wilayahnya terdiri dari laut dan sungai. Sarana dan prasarana transportasi antar pulau memegang peranan yang sangat penting dalam hal pemerataan pembangunan. Jembatan menjadi salah satu alternatif media transportasi yang ekonomis. Di Indonesia jumlah jembatan bentang panjang penghubung antar pulau yang dibangun semakin banyak seiring dengan meningkatnya kebutuhan masyarakat, dan teknologi pembangunan jembatan pun semakin canggih dan beragam seperti jembatan *cable stayed*, *suspension*, dan gabungan dari keduanya.

Aspek teknis yang perlu diperhitungkan dalam proses perencanaan jembatan bentang panjang adalah ketahanan terhadap beban angin. Bagian dari jembatan yang terkena beban angin dapat menimbulkan masalah yang mengarah pada katastrofik. Contoh yang nyata kegagalan struktur jembatan akibat beban angin yaitu hancurnya jembatan Tacoma di Amerika pada tahun 1944. Hancurnya struktur jembatan Tacoma akibat angin disebabkan adanya fenomena *flutter*. Belajar dari kejadian tersebut, maka pemahaman interaksi antara angin dan struktur jembatan sangatlah penting.

Beban angin pada jembatan dapat disimulasikan secara eksperimen di dalam terowongan angin .

Terdapat beberapa jenis pengujian terowongan angin pada jembatan, yaitu pengujian seksional dan pengujian *full model*. Pengujian seksional hanya

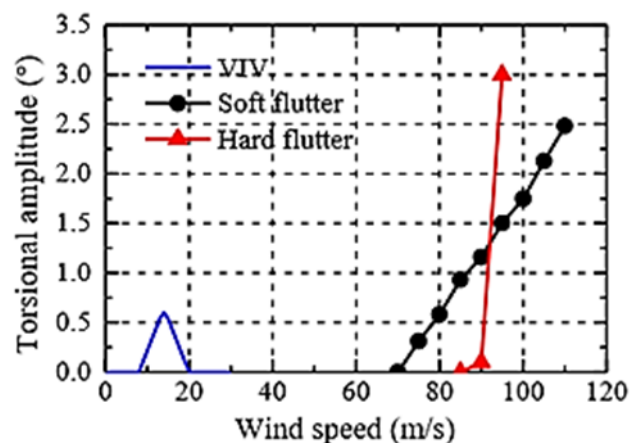
* Corresponding Author. Tel: +62-82155874112

E-mail: angga.dwi@bppt.go.id

memodelkan potongan bentang tengah dari dek jembatan. Dalam makalah ini, akan dibahas pengujian terowongan angin pada model seksional jembatan untuk menentukan kecepatan angin terjadinya fenomena *flutter* serta karakteristik yang menyertai fenomena *flutter* tersebut.

II. DASAR TEORI

Ada 2 fenomena aeroelastika dominan di struktur jembatan bentang panjang fleksibel, yakni *flutter* dan *Vortex Induced Vibration* (VIV). *Flutter* adalah fenomena ketidakstabilan struktur yang terjadi akibat damping total (aerodinamika dan struktur) menjadi nol [1]. Akibatnya struktur tidak mampu men-disipasi energi yang diserapnya dari angin. *Flutter* akan berakhir dengan kehancuran struktur secara fatal. VIV terjadi apabila ada sumber getaran luar yang menginduksi getaran pada struktur. Jika sumber getaran luar tersebut adalah aliran vortex maka disebut dengan getaran induksi vortex (GIV) atau *Vortex Induced Vibration* (VIV). Ketidakstabilan *flutter* merupakan salah satu hal terpenting yang menjadi perhatian pada desain jembatan bentang panjang fleksibel. Berdasarkan model linear, *flutter* adalah sebuah tipe osilasi divergen dan terjadi secara tiba-tiba pada kecepatan angin kritis. Akan tetapi beberapa peneliti telah menemukan bahwa *flutter* pada dek jembatan berupa *Limited Cycle Oscillation* (LCOs), terutama pada dek jembatan yang tebal (*bluff deck*) atau yang tipis (*streamlined decks*) pada sudut serang yang besar. Oleh karena itu, *Flutter* dapat dibedakan menjadi 2 tipe: *hard flutter*, merupakan *flutter* yang amplitudo osilasi dek jembatan akan meningkat signifikan secara tiba-tiba dalam pola ekponensial dan *soft flutter*, osilasi dek jembatan dalam bentuk LCOs. Pada umumnya, osilasi pada *soft flutter* adalah murni torsi atau gabungan antara modulus torsi dan vertikal dengan modulus torsional yang dominan. Berbeda dengan LCOs pada fenomena VIV yang terjadi pada kecepatan angin yang rendah dan hilang ketika kecepatan angin telah melewati daerah *Lock-In*, amplitudo LCOs pada *soft flutter* secara bertahap akan meningkat dengan bertambahnya kecepatan angin [2]. Pada Gambar 1 menunjukkan perbedaan antara VIV, *Hard Flutter*, dan *soft flutter* pada dek jembatan.



Gambar 1. Deskripsi VIV, *Soft Flutter* dan *Hard Flutter*

A. Model Matematik pada *Soft Flutter* Dek Jembatan

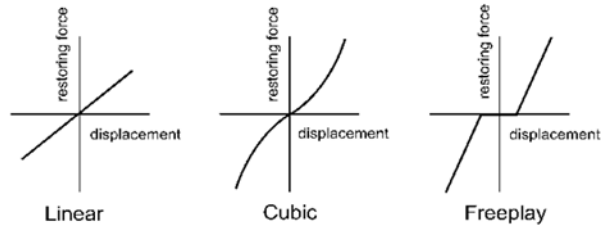
Pada *soft flutter* dek jembatan modulus torsi lebih dominan dibanding dengan vertikal. Selain itu, aliran yang turbulen dan *noise* menyebabkan sinyal modulus vertikal sulit diidentifikasi, sehingga gerak vertikal diabaikan dan hanya gerak torsional yang diperhitungkan. Sehingga persamaan matematika untuk sebagai berikut:

$$I(\ddot{\alpha} + 2\varepsilon_o\omega_o\dot{\alpha} + \omega_o^2\alpha) = M_{se}(\alpha, \dot{\alpha}) \quad (1)$$

Dimana I adalah momen inersia; α , $\dot{\alpha}$, dan $\ddot{\alpha}$ masing-masing adalah perpindahan, kecepatan, dan akselerasi torsional; $\omega_o = 2\pi f_\alpha$ adalah kecepatan sudut dari gerak torsi; $\varepsilon_o = \varepsilon_\alpha$ adalah rasio redaman; $M_{se}(\alpha, \dot{\alpha})$ adalah momen *self excited* pada gerak torsional [3].

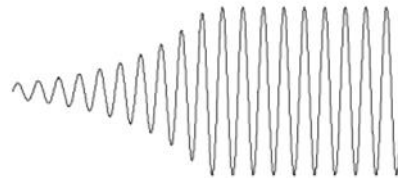
B. Efek Non-linearitas

Non-linearitas struktur biasanya terjadi akibat dari efek kekakuan yang tidak seragam, antara lain kekakuan *cubic*, *bilinear*, dan *freeplay*. Pada Gambar 2, menunjukkan beberapa jenis grafik hubungan antara gaya pemulih (*restoring force*) dan perpindahan (*displacement*) untuk tipe kekakuan non-linear yang berbeda



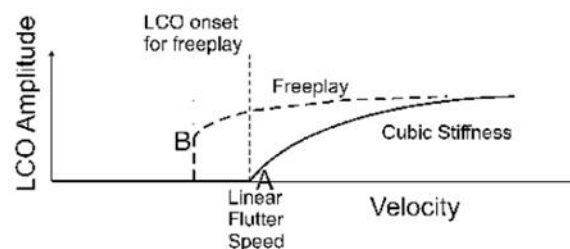
Gambar 2. Tipe Kekakuan Non-linear

Limited Cycle Oscillation (LCOs) merupakan fenomena aeroelastik non-linear yang utama atau sering terjadi, dan diasumsikan sebagai *flutter* terbatas. Pada Gambar 3, menunjukkan respon pada fenomena LCOs atau disebut *flutter* non-linear.



Gambar 3. Respon pada LCOs

Jika suatu sistem aeroelastik diasumsikan memiliki kekakuan *cubic* dan diuji pada beberapa kecepatan angin. Pada kondisi *flutter*, respon menjadi tidak stabil tetapi ketika defleksi semakin besar, kekakuan menjadi semakin besar pula. Hal ini, mengakibatkan respon yang terjadi menjadi terbatas. Pada beberapa kasus, LCOs terdiri dari beberapa gelombang sinusoidal. Pada Gambar 4, menunjukkan grafik amplitudo LCOs terhadap kecepatan angin. Pada grafik tersebut, terlihat bahwa dibawah kecepatan *flutter* linear, respon non-linear *cubic* cenderung akan kembali ke kondisi awal. Diatas kecepatan *flutter* linear (pada titik A), fenomena LCOs muncul dan amplitudo membesar dengan bertambahnya kecepatan angin sampai akhirnya *flutter* terjadi. Pada kasus non-linearitas *freeplay*, kecepatan kritis terjadi dibawah kecepatan *flutter* linear, LCOs muncul secara tiba-tiba pada titik B [4].



Gambar 4. Amplitudo LCOs terhadap Kecepatan Angin

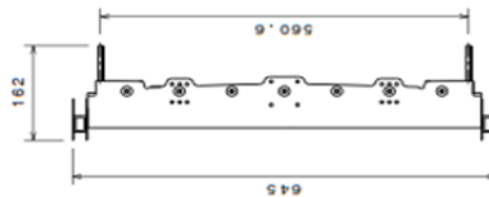
III. METODE PENGUJIAN

Pada pengujian ini, model uji kita merupakan seksional dinamik model jembatan mereplika penggalan struktur dek jembatan bentang tengah (*main-span*) dan dirancang untuk me-replika gerak dinamikanya secara 2 derajat kebebasan atau modus getar. Pada Gambar 5, menunjukkan bentuk modus getar yang dimiliki model uji.



Gambar 5. (a) Modus Getar Torsi dan (b) Modus Getar Vertikal

Skala perkecilan untuk model seksional jembatan yang diuji adalah 1 : 20. Pengujian dilakukan di terowongan angin LIWET (LAGG *Industrial and Wind Engineering Tunnel*), yakni salah satu terowongan angin yang dioperasikan oleh BBTA3 - BPPT, dimana seksi uji terowongan angin adalah 2m x 1.5m. Geometri model seksional jembatan memiliki tebal 162 mm termasuk pagar (*railing*) dan tebal efektif dek sebesar 120 mm dan lebar model 645 mm.



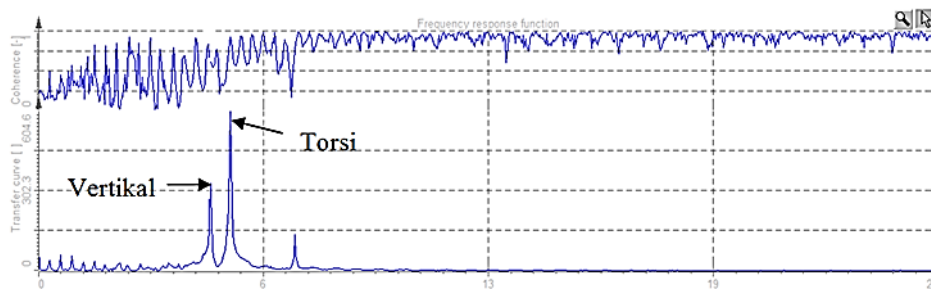
Gambar 6. Penampang Model Seksional Jembatan

A. Modal Testing

Modal testing dilakukan untuk mendapatkan nilai frekuensi natural dari modus getar model dek jembatan, yaitu modus vertikal dan torsi. Berikut adalah hasil dari *modal testing* :

Tabel 1. Perbandingan Frekuensi Natural Prototipe dengan Model

| No. | Uraian | Simbol | Prototype | Model |
|-----|-------------------------|--------|-----------|-------|
| 1 | Frekuensi Vertikal (Hz) | Fv | 0.75 | 4.8 |
| 2 | Frekuensi Torsi (Hz) | Ft | 0.86 | 5.3 |
| 3 | Rasio | Ft/Fv | 1.1 | 1.1 |

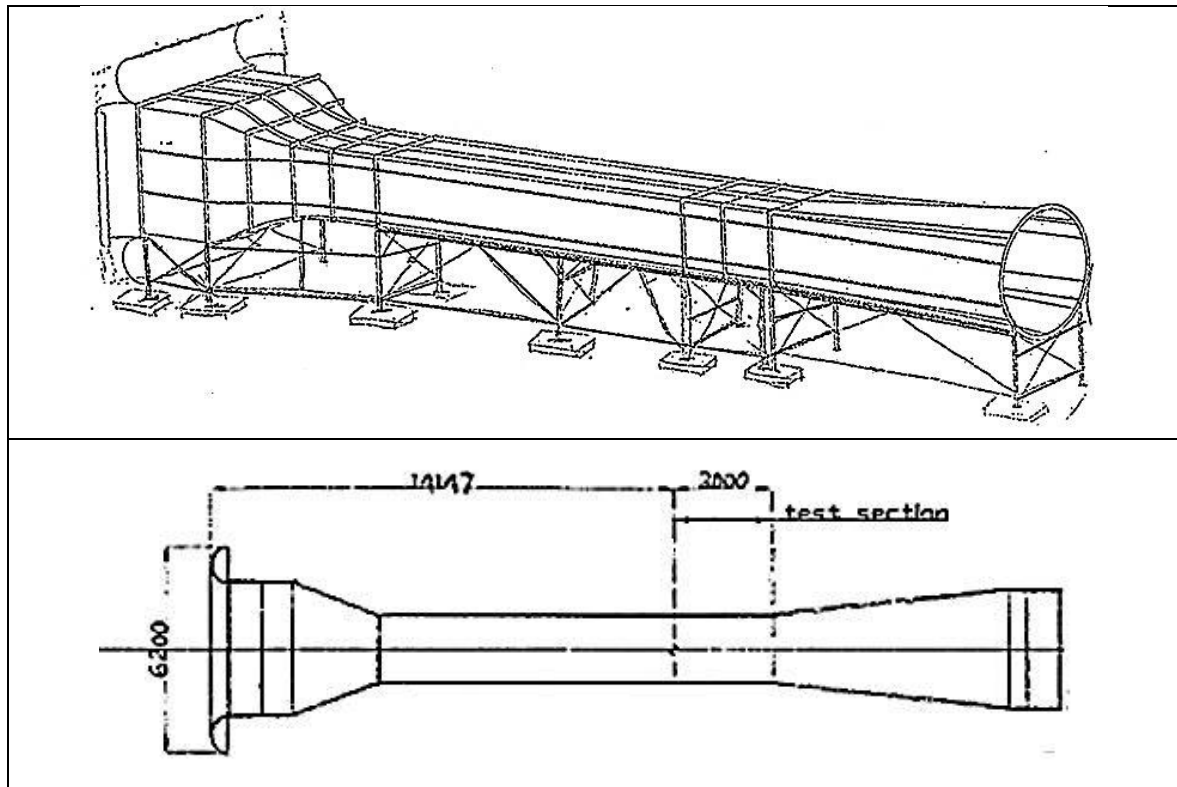


Gambar 7. Kurva Hasil Modal Testing

Dari data frekuensi natural yang telah didapatkan, model memiliki rasio frekuensi torsi dan vertikal yang sama dengan prototipe maka parameter kesetaraan rasio frekuensi dapat terpenuhi. Model dek yang kita uji memiliki rasio redaman struktur modus vertikal dan torsional masing-masing sebesar 0.18% dan 0.26%.

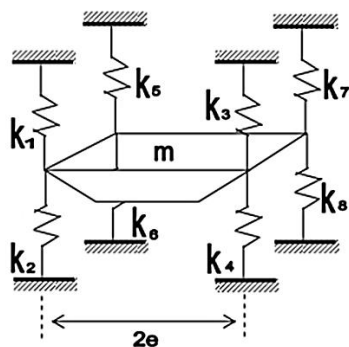
B. Metode Pengukuran

Pengujian untuk menentukan kecepatan kritis terjadinya flutter dilakukan di dalam terowongan angin LIWET. LIWET merupakan terowongan angin jenis sirkuit terbuka dengan geometri seperti yang ditampilkan dalam gambar 8.



Gambar 8. Terowongan angin LIWET

Pada bagian seksi uji, dipasang *dummy wall* untuk menjaga aliran menjadi 2 dimensi dan juga sebagai dukungan untuk *support* model jembatan. Agar dapat mensimulasikan modulus getar vertikal dan torsi, model jembatan dipasang 8 buah pegas dengan nilai kekakuan (k) yang identik. Instalasi model jembatan di seksi uji terowongan angin LIWET ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Instalasi model di dalam terowongan angin

Model jembatan dipasang sensor akselerometer pada kedua tepinya untuk mengetahui respon dinamik jembatan akibat angin. Sensor tersebut dihubungkan dengan *dynamic signal analyzer* (DSA). Sinyal dari akselerometer akan diolah oleh DSA kemudian diteruskan ke komputer dan data akan ditampilkan dalam bentuk grafik menggunakan *software* dalam domain frekuensi dan domain waktu.

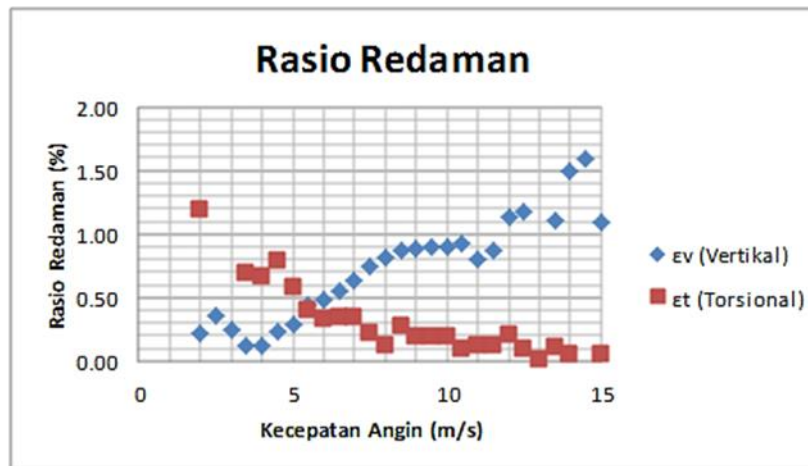


Gambar 10. Penempatan Akselerometer

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

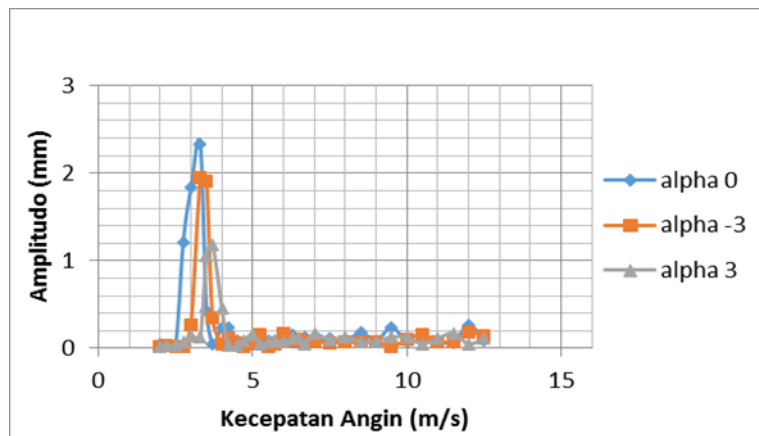
A. Hasil Pengujian

Pada pengujian di terowongan angin dilakukan pada 3 sudut serang yaitu sudut -3° , 0° , dan 3° derajat. Pada Gambar 11 terlihat bahwa rasio redaman modulus vertikal dan torsi pada sudut 3° . Rasio modulus vertikal cenderung membesar dengan bertambahnya kecepatan angin. Hal itu itu menyebabkan gerak vertikal akan semakin teredam dan menghasilkan amplitudo yang mengecil. Pada rasio redaman modulus torsi nilainya mengecil dengan bertambahnya kecepatan angin. Membesarnya rasio redaman modulus vertikal dan mengecilnya rasio redaman modulus torsi menyebabkan pada modulus torsi menjadi dominan [2]



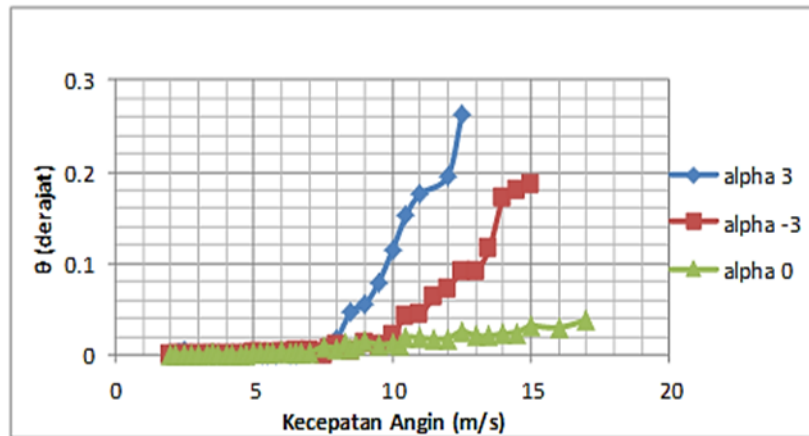
Gambar 11. Rasio Redaman Modus Vertikal dan Torsi Pada Sudut

Pada hasil pengujian terowongan angin, respon pada modulus vertikal terlihat pada Gambar 12 memiliki nilai maksimal pada kecepatan angin sekitar 3-3.5 m/s, kemudian amplitudo akan turun kembali setelah melewati daerah *lock-in*. Fenomena tersebut merupakan *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang diakibatkan oleh resonansi dari vortex.



Gambar 12. Amplitudo Modus Vertikal

Pada respon modulus torsi terlihat bahwa nilai displacement pada sudut serang 3° nilai amplitudo mulai naik pada kecepatan angin 8 m/s. Pada sudut serang -3° amplitudo mulai meningkat pada kecepatan angin 9 m/s. Sedangkan pada sudut serang 0° amplitudo mulai naik pada kecepatan angin 8.3 m/s. Pada ketiga sudut serang tersebut terlihat pada Gambar 13 nilai amplitudo terus meningkat dengan bertambahnya kecepatan angin. Fenomena ini berbeda dengan VIV dimana pada VIV nilai amplitudonya akan turun setelah melewati daerah *lock-in* Pada sudut 3° dan -3° peningkatan amplitudo lebih signifikan dibanding dengan sudut 0° .



Gambar 13. Amplitudo Modus Torsi

Fenomena yang terjadi pada model seksional jembatan yang kita uji merupakan *Soft flutter*. Fenomena *soft flutter* berbeda dengan *classical flutter* atau *hard flutter*, dimana pada *hard flutter* terdapat titik divergen yang jelas. Pada *hard flutter* titik divergen ditandai dengan naiknya amplitudo menjadi sangat besar secara tiba-tiba dan dapat mengakibatkan kerusakan yang fatal. Pada *soft flutter* amplitudo getaran akan meningkat secara bertahap dengan bertambahnya kecepatan angin [2]. Pada sudut 3 dan -3 derajat fenomena *soft flutter* terlihat terjadi pada kecepatan angin yang lebih rendah dari sudut 0 derajat. Hal ini, menunjukkan bahwa *soft flutter* terjadi lebih cepat ketika pada sudut serang tinggi [3].

B. Kecepatan Kritis Flutter

Berdasarkan Chinese Code, pada kasus *soft flutter* tidak terdapat titik divergen yang jelas, sehingga kecepatan kritis flutter ditentukan ketika amplitudo torsional (RMS) mencapai 0.5° [2]. Pada pengujian yang telah kita lakukan, tidak mencapai nilai amplitudo torsional 0.5° , Sehingga kita melakukan ekstrapolasi untuk menentukan kecepatan kritis flutter. Pada sudut serang 0° , kita tidak melakukan ekstrapolasi karena grafik amplitudonya masih cenderung datar. Berdasarkan hasil ekstrapolasi, berikut adalah kecepatan kritis *flutter* yang memiliki amplitudo torsional 0.5° .

Tabel 1. Kecepatan Kritis Flutter Model Uji

| No | Sudut Serang | Kecepatan Kritis (m/s) |
|----|--------------|------------------------|
| 1 | 3 | 15.4 |
| 2 | -3 | 19.2 |

Kecepatan kritis flutter dari model seksional jembatan yang diuji pada sudut 3° dan -3° masing-masing sebesar 15.4 m/s dan 19.2 m/s. Walaupun amplitudo yang terjadi pada *soft flutter* tidak membesar secara tiba-tiba, tetapi perlu diperhatikan bahwa kecepatan kritis flutter terjadi pada kecepatan relatif rendah sehingga perlu dilakukan modifikasi pada desain jembatan untuk meningkatkan kestabilan.

V. KESIMPULAN

Pada pengujian model seksional di terowongan angin, ditemukan fenomena *soft flutter*. Fenomena *Soft flutter* terjadi lebih cepat ketika pada sudut serang tinggi. *Soft flutter* terjadi pada kecepatan yang lebih rendah pada model yang memiliki sudut serang besar. Pada *soft flutter* modus torsi dominan, sehingga kecepatan kritis flutter ditentukan ketika amplitudo torsi (RMS) mencapai 0.5° . Kecepatan kritis flutter dari model seksional jembatan yang diuji pada sudut 3° dan -3° masing-masing sebesar 15.4 m/s dan 19.2 m/s.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fariduzzaman dan Leonardo Gunawan. Flutter Margin Determination of A Long span Bridge. *Journal of 4th Pacific International Conference on Aerospace Science and Technology*. 2001
- [2] Sun Yanguo, Haili Lia,dan Mingshui L. Experimental Study on Flutter Performance of a 1700m Long Truss Girder Suspension Bridge. *Journal of Advance in Civil, Enviromental, and Materials Research (ACEM16)*. 2016
- [3] ZhangMing-Jie , Fu-You Xu,dan Xu-Yong Ying. 2016. Experimental Investigations on the Soft Flutter of a Bridge Deck. *Journal of Advance in Civil, Enviromental, and Materials Research(ACEM16)*. 2016
- [4] Wright, Jan R dan Jonathan E. Copper. *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*. John Wiley & Son, Ltd. 2007
- [5] E. Simiu, R H. Scanlan. *Wind Effects on Structures*. 2nd Ed, New York. John Wiley & Sons.1986