



# Simulasi Numerik Aeroelastik Model Seksional 2D Jembatan Bentang Panjang untuk Mengetahui Karakteristik Ketidakstabilan *Flutter*

\*Sulistiya<sup>1,2</sup>, Mochammad Agoes Moelyadi<sup>1</sup>, Muhammad Kusni<sup>1</sup>, Mahesa Akbar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

<sup>2</sup>Pusat Riset Teknologi Transportasi - Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan

\*) [suli014@brin.go.id](mailto:suli014@brin.go.id)

Received: 9 Februari 2023 Revised: 6 Juni 2024 Accepted: 19 Juli 2024

## Abstract

*Flutter is an aerodynamic instability on a long span bridge that can cause damage to the entire bridge deck structure. The interaction between wind and structure in long span bridges can be investigated by numerical simulation. In this study, an aeroelastic simulation was performed on a 2 DoFs sectional model of a long-span bridge deck with free vibration techniques to analyze flutter speed and determine the effect of deck shape on flutter instability characteristics using ANSYS software. The simulation result data was then extracted using the Modified Ibrahim Time-Domain Method (MITD) identification method to obtain the damping ratio and flutter derivatives coefficients. The damping ratio value is used to determine the critical flutter speed, whereas the coefficient flutter derivatives is used to determine the characteristics of flutter instability and the flutter mechanism that occurs in the bridge. The results showed that the rectangular shape (bluff body) is more susceptible to flutter instability than the streamlined shape, and has a lower flutter speed value than the other shapes. The flutter mechanism that occurs is torsional flutter, whereas in the streamline body is coupling flutter.*

**Keywords:** Aeroelastic, flutter, long span bridge, flutter derivatives, numerical simulation

## Abstrak

*Flutter merupakan peristiwa ketidakstabilan aerodinamik pada jembatan bentang panjang yang dapat mengakibatkan kerusakan secara menyeluruh struktur dek jembatan. Interaksi antara angin dan struktur pada jembatan bentang panjang dapat diinvestigasi dengan simulasi numerik. Pada penelitian ini dilakukan simulasi aeroelastik pada model seksional 2D dek jembatan bentang panjang dengan teknik getaran bebas untuk menganalisis kecepatan flutter dan mengetahui pengaruh bentuk dek terhadap karakteristik ketidakstabilan flutter menggunakan perangkat lunak ANSYS. Data hasil simulasi kemudian diekstraksi menggunakan metode identifikasi Modified Ibrahim Time-Domain Method (MITD) untuk mendapatkan nilai rasio redaman dan koefisien flutter derivatives. Nilai rasio redaman digunakan untuk menentukan kecepatan kritis flutter, sedangkan koefisien flutter derivatives digunakan untuk mengetahui karakteristik ketidakstabilan flutter dan mekanisme flutter yang terjadi pada jembatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk penampang persegi panjang (bluff body) lebih rentan terhadap ketidakstabilan flutter dibandingkan dengan bentuk streamline, serta memiliki nilai kecepatan flutter yang lebih rendah dari bentuk yang lain. Mekanisme flutter yang terjadi adalah torsional flutter, sedangkan pada bentuk streamline adalah coupling flutter.*

**Kata kunci:** Aeroelastik, flutter, jembatan panjang, flutter derivatives, simulasi numerik

## Pendahuluan

Jembatan bentang panjang adalah jembatan yang fleksibel karena bentangnya yang panjang dan lebar dek yang tipis. Rasio panjang terhadap lebar dek (*slenderness ratio*) tinggi atau strukturnya

biasanya menggunakan penyangga kabel. Jembatan bentang panjang memiliki sifat yang fleksibel dan redaman yang kecil. Karena itu struktur jembatan bentang panjang menjadi sensitif terhadap beban angin (*aerodynamic loads*) dibanding beban gempa (*seismic loads*). Pengaruh angin terhadap kestabilan

struktur disebut fenomena aeroelastik. Terdapat beberapa jenis fenomena aeroelastik yang terjadi pada jembatan, yaitu: *vortex-induced vibration*, *flutter*, *galloping*, dan *buffeting* (Simiu & Scanlan, 1996). Dari keempat fenomena tersebut, *flutter* yang memiliki dampak yang paling berbahaya karena bersifat merusak dalam waktu singkat.

Salah satu fenomena aeroelastik pada jembatan bentang panjang yang terkenal adalah runtuhnya jembatan Tacoma Narrows yang terjadi pada tahun 1940. Jembatan ini didesain mampu menahan angin 120 km/jam, namun jembatan kabel ini runtuh hanya oleh angin 64 km/jam pada usia sekitar setengah tahun (Larsen & Larose, 2015). Runtuhnya Jembatan Tacoma Narrows disebabkan oleh getaran aeroelastik yang timbul akibat interaksi gaya aerodinamik dengan gaya inersia, kekakuan dan redaman struktur (Song *et al.*, 2022). Peristiwa ini merupakan kegagalan yang paling spektakuler dalam sejarah jembatan, tetapi sekaligus telah memberikan sumbangan yang berharga bagi pemecahan persoalan getaran pada jembatan bentang panjang.

Untuk menganalisis fenomena *flutter* dapat dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental dan numerik, ataupun gabungan antara metode eksperimental dan numerik. Saat ini, pengujian terowongan angin masih dianggap metode yang paling efektif untuk memvalidasi kasus *flutter* pada dek jembatan. Meskipun pengujian terowongan angin dianggap lebih efektif, namun biaya pengujian terowongan angin ini relatif lebih tinggi daripada simulasi numerik. Selain itu tidak mungkin membuat konfigurasi geometris model uji yang benar-benar sesuai dengan skema desain. Pembuatan model uji aeroelastik juga memiliki tingkat kesusahan yang lebih tinggi dari model uji aerodinamika karena harus memperhatikan kesetaraan struktur dinamikanya. Saat ini simulasi numerik tidak dapat menggantikan pengujian terowongan angin secara penuh, tetapi simulasi numerik dapat sebagai pelengkap dan alternatif untuk memprediksi fenomena aeroelastik pada jembatan (Ying *et al.*, 2018).

Salah satu pendekatan untuk menginvestigasi fenomena *flutter* pada dek jembatan dengan menganalisis nilai koefisien *flutter derivatives* (FDs) (Nieto, *et al.*, 2015). *Flutter derivatives* merupakan pengaruh gaya eksitasi pada struktur terhadap kekakuan dan redaman struktur ketika diberi angin. *Flutter derivatives* dipengaruhi oleh perilaku *unsteady* aerodinamik dari dek jembatan. Koefisien FDs dapat diperoleh melalui pemberian getaran paksa (*forced vibration*) atau getaran bebas (*free vibration*) pada pengujian terowongan angin maupun simulasi numerik. Pada metode getaran

paksa, frekuensi dan osilasi model dapat dikontrol, respon dinamik yang didapat berupa perubahan gaya terhadap perubahan kecepatan angin atau perubahan frekuensi osilasi. Sedangkan pada metode getaran bebas, model diberi simpangan awal, kemudian model dibiarkan meluruh secara alami ataupun mencapai kondisi divergen (Scanlan & Tomko 1971). Dari kedua metode ini, metode getaran bebas lebih mirip dengan kondisi di alam.

Menurut Xu dan Zhang (2017) simulasi numerik dengan teknik getaran bebas memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan metode analisis *flutter* lainnya. Dibandingkan dengan metode getaran bebas terowongan angin, metode ini memiliki keuntungan di antaranya tidak memerlukan peralatan eksperimental khusus sehingga mengurangi biaya, lebih mudah dan efektif dalam menganalisis parameter rasio redaman, frekuensi *torsional-heaving* lebih mudah diatur, dan proses ekstraksi *flutter derivatives* lebih mudah. Dibanding dengan metode getaran paksa pengujian terowongan angin, metode ini memiliki keuntungan di antaranya: kondisi aliran dan geometri penampang dapat diatur dengan baik, gaya inersia tidak bercampur dengan gaya aerodinamika dan pola pelepasan aliran dapat dilihat dari visualisasi medan aliran. Dibandingkan dengan metode getaran paksa simulasi numerik, metode ini memiliki keuntungan dapat memperhitungkan pengaruh rasio redaman pada koefisien *flutter derivatives* pada kecepatan sub-kritis.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi *Fluid Structure Interaksi (FSI)* pada model seksional 2D dek jembatan bentang panjang dengan teknik getaran bebas untuk menganalisis kecepatan *flutter*. Simulasi numerik dilakukan dengan persamaan *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS) dan metode volume hingga serta variasi model turbulensi berbasis *RANS*. Interaksi antara aliran dan struktur diselesaikan dengan pendekatan kopling kuat. Prediksi kecepatan kritis *flutter* didapatkan dari analisis rasio redaman dan analisis respon dinamik. Koefisien *flutter derivatives* diperoleh dengan teknik identifikasi metode *Modified Ibrahim Time-Domain Method (MITD)* yang akan digunakan untuk menganalisis pengaruh bentuk penampang dek jembatan terhadap karakteristik ketidakstabilan *flutter*.

## Metode

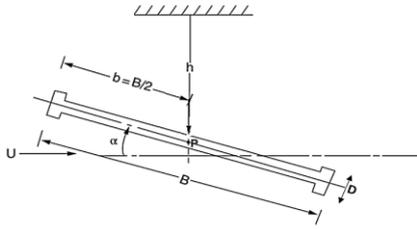
Fenomena *flutter* yang umum pada jembatan adalah *torsional flutter* (hanya melibatkan gerak torsional) dan *coupled flutter* (melibatkan interaksi gerak vertikal dan torsional) (Simiu & Scanlan, 1996). *Classical* atau *coupled flutter* biasanya terjadi pada geometri dek berbentuk *streamline* atau pada dek

yang memiliki geometri penampang seksional yang tipis (Vu *et al.*, 2016). Pada torsional *flutter* ini terjadi pada kondisi aliran separasi yang tinggi, biasanya terjadi pada geometri penampang seksional yang tebal. Gambar 1 merupakan diagram gerak bebas pada model dek jembatan dengan lebar dek  $B$  dan tebal dek  $D$  yang memiliki dua derajat kebebasan: vertikal dan torsional yang dinotasikan masing-masing dengan ( $h$ ) dan ( $\alpha$ ). Sumbu elastik berhimpit dengan pusat massa (P). Persamaan gerak dari dek jembatan dapat dinyatakan dengan persamaan 1 dan 2.

$$\bar{m}\ddot{h} + 2\bar{m}\xi_h\omega_h\dot{h} + \bar{m}\omega_h^2h = L_h \quad (1)$$

$$\bar{I}\ddot{\alpha} + 2\bar{I}\xi_\alpha\omega_\alpha\dot{\alpha} + \bar{I}\omega_\alpha^2\alpha = M_\alpha \quad (2)$$

dimana  $L_h$  dan  $M_\alpha$  adalah gaya angkat dan momen aerodinamik yang tereksitasi sendiri.  $\bar{m}$  merupakan massa per satuan panjang dan  $\bar{I}$  adalah momen inersia per satuan panjang.  $h$  dan  $\alpha$  masing-masing adalah simpangan vertikal dan torsional  $\dot{h}$  dan  $\dot{\alpha}$  adalah turunan pertama simpangan vertikal dan torsional.  $\ddot{h}$  dan  $\ddot{\alpha}$  adalah turunan kedua simpangan vertikal dan torsional.  $\xi_h$  dan  $\xi_\alpha$  adalah rasio redaman struktural modulus vertikal dan torsional, sedangkan  $\omega_h$  dan  $\omega_\alpha$  adalah frekuensi sudut gerak modulus vertikal dan torsional (Abbas *et al.*, 2017).



**Gambar 1. Diagram gerak pada dek jembatan (Simiu & Yoe, 2019)**

Persamaan gaya dan momen aerodinamika yang tereksitasi sendiri diturunkan dari teori *flutter* pada airfoil (Theodorsen, 1935). Ada beberapa ekspresi yang dimodifikasi, baik dalam notasi bilangan riil atau kompleks. Persamaan gaya dan momen pada dek jembatan yang diturunkan dari bentuk bilangan real dinyatakan dalam persamaan 3 dan 4 (Simiu & Scanlan, 1996)

$$L_h = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[ KH_1^*(K) \frac{h}{U} + KH_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^*(K) \frac{h}{B} \right] \quad (3)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[ KA_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^*(K) \frac{h}{B} \right] \quad (4)$$

dengan  $\rho$  adalah massa jenis udara,  $B$  adalah lebar dek jembatan,  $U$  adalah kecepatan aliran udara.  $K$  adalah frekuensi reduksi. Variabel  $\dot{h}$  dan  $\dot{\alpha}$  pada suku aerodinamik dihilangkan karena efek variabel

tersebut nilainya sangat kecil dan diabaikan pada bidang rekayasa angin. Koefisien  $A_i^*$  dan  $H_i^*$  ( $i=1,2,3,4$ ) merupakan fungsi non dimensional dari frekuensi reduksi  $K$  yang disebut koefisien *flutter derivatives* (FDs).

Dengan merekonstruksi matriks  $C^{eff}$  dan  $K^{eff}$ , yang masing-masing merupakan matriks redaman dan kekakuan efektif aeroelastik sistem. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari setiap simulasi dengan kecepatan angin tertentu, koefisien *flutter derivatives* dapat dihitung dari kecepatan angin dan parameter-parameter matriks kekakuan dan redaman aerodinamik,  $C^{ac}$  dan  $K^{ac}$ , yang merupakan selisih antara parameter-parameter kekakuan dan redaman mekanik ( $C^0$  dan  $K^0$ ) dengan parameter-parameter kekakuan dan redaman efektif (Wang & Dragomirescu, 2016):

$$\begin{aligned} H_1^* &= \frac{2\bar{m}C_{(1,1)}^{ae}}{\rho B^2 \omega_h} & A_1^* &= \frac{2\bar{I}C_{(2,1)}^{ae}}{\rho B^3 \omega_h} \\ H_2^* &= \frac{2\bar{m}C_{(1,2)}^{ae}}{\rho B^3 \omega_\alpha} & A_2^* &= \frac{2\bar{I}C_{(2,2)}^{ae}}{\rho B^4 \omega_\alpha} \\ H_3^* &= \frac{2\bar{m}K_{(1,2)}^{ae}}{\rho B^2 \omega_\alpha^2} & A_3^* &= \frac{2\bar{I}K_{(2,2)}^{ae}}{\rho B^4 \omega_\alpha^2} \\ H_4^* &= \frac{2\bar{m}K_{(1,1)}^{ae}}{\rho B^2 \omega_h^2} & A_4^* &= \frac{2\bar{I}K_{(2,1)}^{ae}}{\rho B^3 \omega_h^2} \end{aligned} \quad (5)$$

dengan  $A_i^*$  dan  $H_i^*$  ( $i=1,2,3,4$ ) adalah koefisien *flutter derivatives*;  $C^{ac}=C^0-C^{eff}$ , merupakan redaman aerodinamik.  $C^{ac}=C^0-C^{eff}$ , kekakuan aerodinamik.  $C^0$  dan  $K^0$  merupakan kekakuan dan redaman mekanik yang didapatkan pada saat kecepatan nol.  $C^{eff}$  dan  $K^{eff}$  didapatkan dari identifikasi respon dinamik hasil simulasi numerik.

Persamaan yang digunakan untuk memodelkan aliran adalah Persamaan Navier-stokes yang merupakan sistem persamaan diferensial non-linier yang mendeskripsikan bagaimana fluida mengalir (Anderson, 1995). Persamaan ini menjelaskan keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada fluida yaitu gaya-gaya benda dan gaya-gaya permukaan. Dalam menentukan solusi persamaan numerik, model turbulensi adalah prosedur komputasional untuk mendekati sistem persamaan aliran sehingga masalah aliran yang bervariasi dapat dihitung. Secara garis besar, model turbulensi digunakan untuk memodifikasi persamaan Navier Stokes dengan memperkenalkan kuantitas rata-rata dan besar fluktuasi untuk menghasilkan persamaan *Reynolds Averaged Navier Stokes*. Dalam Dinamika Fluida Komputasional (DFK), persamaan RANS dirumuskan sebagai (ANSYS, 2017):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (7)$$

dengan  $\rho$  adalah massa jenis udara,  $\mu$  adalah viskositas dinamik,  $u$  adalah kecepatan,  $\dot{u}$  adalah komponen fluktuasi kecepatan ( $i = 1,2,3$ ),  $\partial t$  adalah perubahan waktu dan  $\partial x$  adalah perubahan posisi.

Pada penelitian ini, terdapat empat bentuk model seksional yang akan disimulasikan. Bentuk geometri pertama (Plat A) berupa plat tipis yang memiliki perbandingan lebar dan tebal 45 sehingga diharapkan model memiliki karakteristik plat tipis. Untuk mencegah terjadinya separasi aliran pada *leading edge*, maka pada kedua sisi model uji dibuat *smooth* yang berupa setengah lingkaran. Hasil simulasi dari Plat A akan divalidasi dengan perhitungan analitik dan hasil eksperimen.

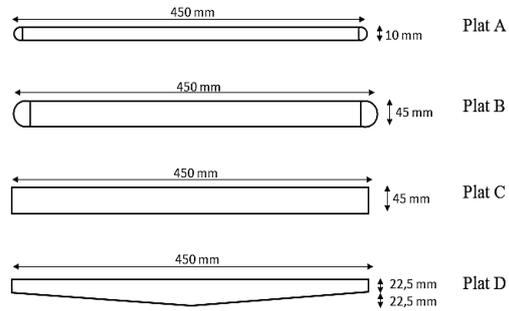
Bentuk geometri kedua (Plat B) merupakan modifikasi dari plat A yang dipertebal dengan perbandingan B/D = 10. Bentuk geometri ketiga (Plat C) berbentuk persegi panjang dengan perbandingan B/D = 10. Bentuk Plat C diharapkan dapat mewakili karakteristik bentuk *bluff body* dek jembatan. Bentuk geometri keempat merupakan modifikasi dari Plat C dengan setengah bagian bawahnya berupa segitiga. Diharapkan bentuk geometri Plat D ini dapat mewakili bentuk dek jembatan yang tidak simetri pada bagian atas dan bawahnya. Parameter struktural pada Plat A, Plat B, Plat C dan Plat D dibuat sama untuk memudahkan analisis karakteristik ketidakstabilan *flutter*-nya. Data parameter struktural untuk keempat dek ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Parameter struktural Plat A, Plat B, Plat C dan Plat D**

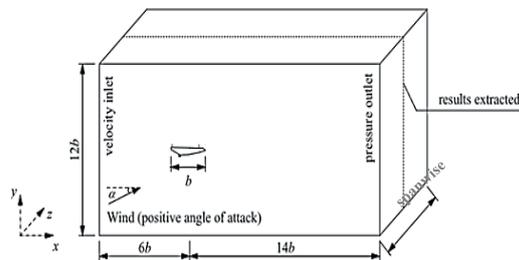
Parameter	Nilai	Satuan
Lebar dek (B)	450	mm
Tebal dek (D)	10 dan 45	mm
Panjang dek ( <i>span</i> )	1000	mm
Massa per satuan panjang	9,46	kg/m
Inersia per satuan panjang	0,185	kgm <sup>2</sup> /m
Frekuensi natural gerak vertikal ( $f_{h0}$ )	1,626	Hz
Frekuensi natural gerak torsional ( $f_{\alpha 0}$ )	2,975	Hz
Rasio redaman struktural gerak vertikal ( $\xi_{h0}$ )	0	-
Rasio redaman struktural gerak torsional ( $\xi_{\alpha 0}$ )	0	-

Simulasi numerik dek jembatan dilakukan dengan pendekatan 2D seksional dengan domain aliran dan kondisi batas ditunjukkan pada Gambar 3. Domain komputasi mengambil jarak 6 kali panjang bentangan ( $B$ ) ke arah hulu, 14 kali panjang

bentangan ke arah hilir, 12 kali  $B$  pada tinggi domain dan lebar domain menyesuaikan panjang span dek jembatan. Sedangkan kondisi batas yang digunakan pada simulasi adalah *velocity inlet*, *pressure outlet*, *symmetry* dan *wall*.



**Gambar 2. Geometri seksional dek jembatan**



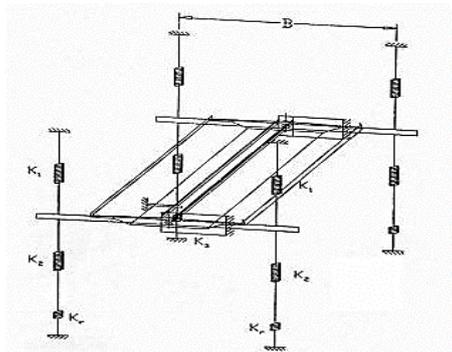
**Gambar 3. Domain dan kondisi batas aliran simulasi**

Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk bagian hulu. Kondisi batas *symmetry* digunakan pada bagian atas, bawah, samping kanan dan kiri domain. Kondisi batas *pressure outlet* digunakan untuk bagian hilir/outlet domain. Sedangkan kondisi batas *wall* digunakan untuk memodelkan bagian permukaan dek jembatan. Domain dan kondisi batas ini diadopsi dari penelitian yang dilakukan Tang *et al.*, (2019).

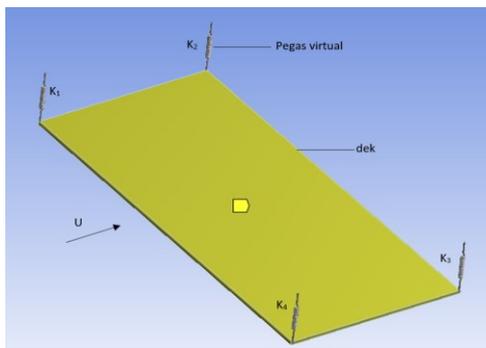
Pada domain struktur, simulasi dilakukan dengan mengadopsi pada pengujian dek jembatan di terowongan angin dengan teknik getaran bebas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(a). Dalam simulasi, pegas dimodelkan sebagai pegas virtual yang dapat bergerak ke atas dan ke bawah, sehingga pegas virtual ini tidak mengganggu aliran di sekitar penampang dek jembatan (Gambar 4(b)).

Gerakan dari sistem pegas ini dibatasi pada dua modus gerak, yaitu gerak vertikal dan gerak torsional. Konstanta pegas diberikan untuk mendapatkan nilai frekuensi natural mudus gerak vertikal, sedangkan frekuensi natural modus torsional diperoleh dengan mengatur jarak pegas

dengan pusat rotasi. Dek dimodelkan dengan material aluminium homogen dan *rigid body* yang memiliki sifat sama di setiap titik. Nilai kekakuan sistem hanya diperoleh dari sistem pegas.



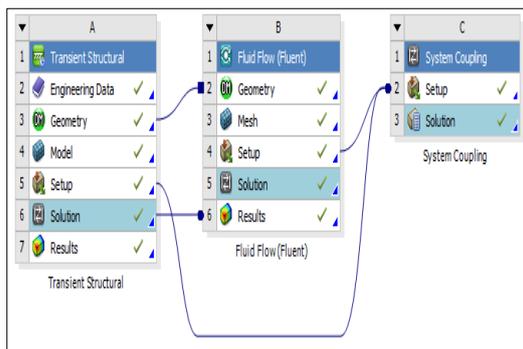
(a)



(b)

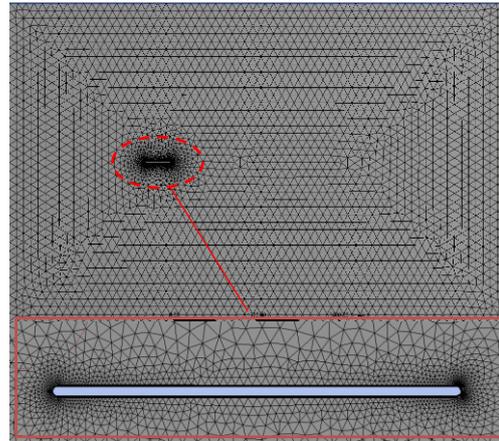
**Gambar 4. (a) Setup eksperimen  
 (b) Domain struktural**

Antara domain aliran dan struktural dihubungkan oleh sistem kopling yang ada di dalam modul *ANSYS Workbench* sebagai ditunjukkan oleh Gambar 5. Sistem kopling ini akan menghitung interaksi fluida dan struktural dengan pendekatan kopling kuat. Metode kopling kuat ini menghitung semua variabel matematik dalam domain fluida dan struktur secara bersamaan, sehingga diharapkan dapat memberikan hasil simulasi yang lebih akurat (Lee *et al.*, 2016).



**Gambar 5. Sistem kopling pada simulasi FSI**

Mesh dibentuk dengan perangkat lunak ANSYS *Meshing*. Bentuk mesh pada simulasi ini adalah tetrahedral tidak terstruktur dengan jumlah elemen 416.871 sel. Bentuk mesh ditunjukkan pada Gambar 6.



**Gambar 6. Mesh di sekitar permukaan dek jembatan**

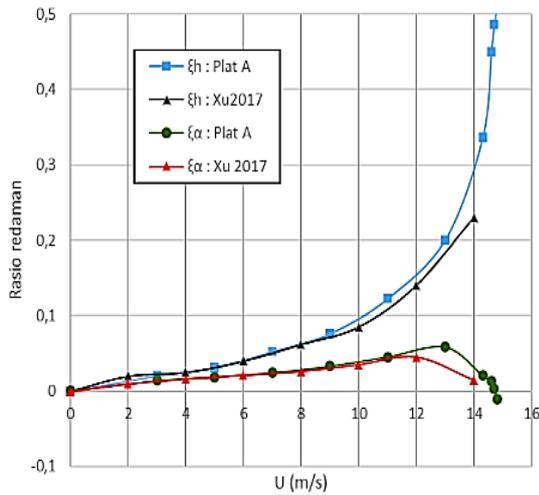
Prosedur simulasi numerik teknik getaran bebas terdiri dari dua langkah, yaitu eksitasi awal dan peluruhan osilasi. Pada langkah pertama, dek diberi simpangan awal berupa gaya ke atas pada ujung bagian depan dek untuk membentuk sudut kurang dari 3° dan ditahan selama 0,5 detik. Pada langkah kedua, model dibiarkan beresilasi secara alami hingga mencapai kondisi tunak atau kondisi osilasi divergen.

Data hasil simulasi kemudian akan diekstraksi menggunakan metode identifikasi *Modified Ibrahim Time-Domain Method (MITD)* untuk mendapatkan nilai rasio redaman dan koefisien *flutter derivatives*. Metode MITD merupakan pengembangan dari metode *Ibrahim Time-Domain (ITD)* yang pertama kali dikembangkan oleh Sarkar *et al.* (1994). Kemudian metode ini dikembangkan lagi oleh Hafizh (2010) dan Saputra (2021). Selanjutnya rasio redaman digunakan untuk menganalisis kecepatan kritis *flutter* dan koefisien *flutter derivatives* digunakan untuk menganalisis karakteristik aerodinamika bentuk dek jembatan dan pengaruhnya terhadap struktur dek.

## Hasil dan Pembahasan

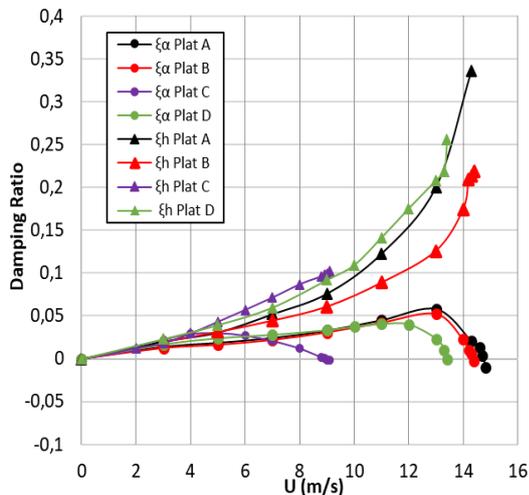
Analisis kecepatan kritis *flutter* dilakukan dengan pendekatan rasio redaman. Kecepatan kritis *flutter* terjadi ketika redaman torsional bernilai nol. Perubahan rasio redaman terhadap kenaikan kecepatan angin Plat A ditunjukkan pada Gambar 7. Terlihat bahwa rasio redaman kedua modus gerak cenderung naik seiring bertambahnya kecepatan angin. Akan tetapi pada kecepatan tertentu rasio

redaman modulus gerak torsional akan semakin turun seiring bertambahnya kecepatan sampai bernilai negatif yang menandakan bahwa pada dek tersebut sudah terjadi ketidakstabilan. Kecepatan dan frekuensi kritis hasil simulasi pada Plat A adalah 14,7 m/s dan 2,21 Hz. Sedangkan pada penelitian Xu dan Zhang (2017) adalah 14,3 m/s dan 2,17 Hz. Terdapat perbedaan sebesar 2,8% pada kecepatan kritis dan 1,8% pada frekuensi kritis.



Gambar 7. Perubahan rasio redaman terhadap kecepatan angin pada Plat A

Gambar 8 menunjukkan perubahan rasio redaman terhadap kecepatan angin pada keempat bentuk dek. Pada modulus gerak vertikal, terlihat bahwa pada Plat C memiliki gradien paling besar, hal ini menunjukkan bahwa pada Plat C osilasi arah vertikal lebih cepat teredam seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Sebaliknya pada Plat B memiliki nilai gradien paling kecil yang menunjukkan peluruhan osilasi gerak vertikal lebih lambat seiring bertambahnya kecepatan angin.



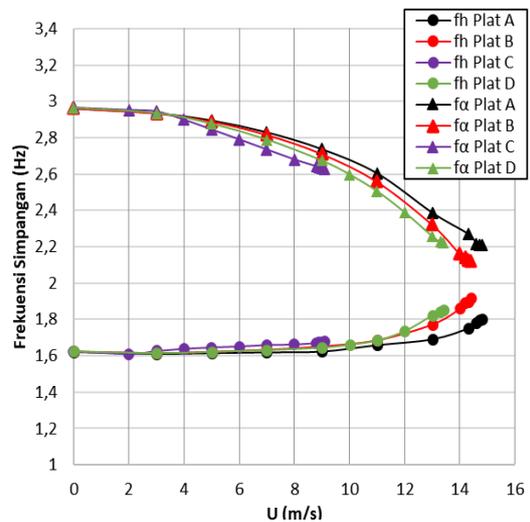
Gambar 8. Perubahan rasio redaman terhadap kecepatan angin

Untuk mengetahui nilai kecepatan kritis *flutter*, dapat dilihat dari nilai redaman torsionalnya. Kecepatan kritis *flutter* terjadi ketika redaman torsional bernilai nol. Pada plat C memiliki nilai (a) kecepatan kritis paling kecil dilihat dari redaman torsionalnya paling cepat menuju nilai nol, hal ini menunjukkan bahwa pada plat C memiliki tingkat ketidakstabilan paling besar. Nilai kecepatan dan frekuensi kritis *flutter* untuk masing-masing dek jembatan dapat dilihat pada Tabel 2 di mana nilai kecepatan kritis paling besar ditunjukkan pada Plat A dan paling kecil ditunjukkan pada Plat C.

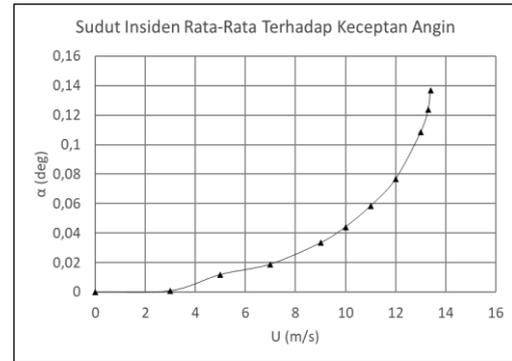
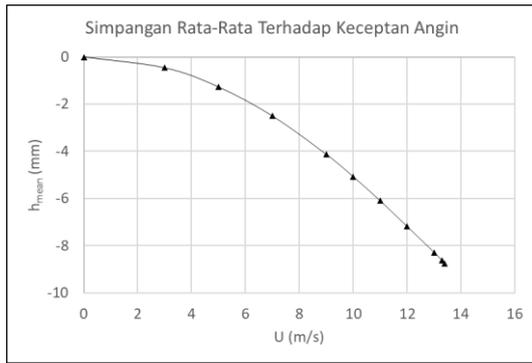
Tabel 2. Kecepatan dan frekuensi kritis flutter pada Plat A, Plat B, Plat C dan Plat D

Model	$U_{cr}$ (m/s)	$f_{cr}$ (Hz)
Plat A	14,7	2,21
Plat B	14,3	2,13
Plat C	8,9	2,64
Plat D	13,3	2,23

Perubahan frekuensi osilasi terhadap kenaikan kecepatan angin ditunjukkan pada Gambar 9. Terlihat bahwa frekuensi modulus gerak vertikal akan cenderung naik seiring bertambahnya kecepatan angin. Sebaliknya pada frekuensi modulus gerak torsional, nilainya semakin turun seiring bertambahnya kecepatan angina. Pada Plat C memiliki nilai gradien paling besar untuk frekuensi gerak vertikal yang berarti bahwa kekakuan akibat pengaruh angin pada Plat C lebih besar dari plat yang lain. Sebaliknya frekuensi modulus torsionalnya lebih negatif, yang berarti bahwa kekakuan torsionalnya lebih cepat turun dengan bertambahnya kecepatan angin. Akibatnya frekuensi modulus vertikal dan torsional pada Plat C lebih cepat mendekat yang dapat mengakibatkan lebih cepat terjadinya ketidakstabilan.



Gambar 9. Perubahan frekuensi osilasi terhadap kecepatan



Gambar 10. Perubahan simpangan terhadap kecepatan pada Plat D

Gambar 10 menunjukkan pengaruh bentuk tidak simetris Plat D terhadap simpangan rata-rata. Terlihat bahwa simpangan rata-rata gerak vertikal semakin turun atau semakin negatif terhadap bertambahnya kecepatan yang mengakibatkan nilai rata-rata gaya angkat juga negatif.

Sedangkan pada simpangan torsional, nilainya semakin positif terhadap kenaikan kecepatan angin. Bentuk geometri pertama (Plat A) berupa plat tipis yang memiliki rasio ketebalan B/D sebesar 45. Pada kasus plat tipis, koefisien *flutter derivatives* dapat didekati secara analitik dengan pendekatan plat tipis Theodorsen.

Oleh karena itu, koefisien *flutter derivatives* yang didapatkan dari hasil simulasi dapat divalidasi atau dibandingkan dengan koefisien *flutter derivatives* yang dihitung dengan pendekatan plat tipis Theodorsen. Selain divalidasi dengan pendekatan Theodorsen, hasil simulasi plat tipis ini akan dibandingkan dengan hasil simulasi 2D pada penelitian Xu dan Zhang (2017) serta hasil eksperimen Chen (2005).

Gambar 11 Menunjukkan koefisien *flutter derivatives* pada Plat A.  $H_1^*$ ,  $H_2^*$ ,  $H_3^*$ , dan  $H_4^*$  merupakan koefisien *flutter derivatives* yang berhubungan dengan gaya angkat, sedangkan  $A_1^*$ ,  $A_2^*$ ,  $A_3^*$ , dan  $A_4^*$  merupakan koefisien *flutter derivatives* yang berhubungan dengan momen aerodinamika. Nilai  $H_1^*$ ,  $H_3^*$ ,  $H_4^*$ ,  $A_1^*$ , dan  $A_2^*$  dari hasil simulasi memiliki nilai yang mendekati dengan hasil perhitungan analitik plat tipis Theodorsen. Sedangkan koefisien  $H_2^*$ ,  $A_3^*$ , dan  $A_4^*$  memiliki nilai yang berbeda dengan hasil pendekatan plat tipis, terutama pada kecepatan yang tinggi. Akurasi identifikasi koefisien  $H_2^*$ ,  $A_3^*$ , dan  $A_4^*$  pada kecepatan rendah relatif lebih tinggi dari akurasi identifikasi pada kecepatan tinggi karena pada kecepatan tinggi fluktuasi gerakan vertikal dan torsional semakin besar, serta nilai redaman modulus gerak vertikal sangat tinggi yang menyebabkan hasil identifikasi kurang akurat. Secara umum hasil simulasi sudah mendekati hasil perhitungan analitik

Theodorsen dan hasil simulasi 2D teknik getaran bebas yang dilakukan oleh Xu dan Zhang (2017), serta dengan hasil pengujian terowongan angin yang dilakukan oleh Chen (2005).

Gambar 12 menunjukkan koefisien *flutter derivatives* terhadap kecepatan reduksi pada berbagai bentuk geometri dek. Koefisien  $H_1^*$ ,  $H_4^*$ ,  $A_2^*$ , dan  $A_3^*$  merupakan koefisien *direct flutter derivatives* dan  $H_2^*$ ,  $H_3^*$ ,  $A_1^*$ , dan  $A_4^*$  merupakan *cross flutter derivatives* (Andersen *et al.*, 2018).

Koefisien  $H_1^*$  menyatakan pengaruh kecepatan gerak osilasi vertikal terhadap gaya angkat, dari interaksi tersebut akan menginduksi nilai redaman efektif modulus vertikal terhadap gaya angkat. Koefisien  $H_1^*$  memiliki gradien negatif terhadap bertambahnya kecepatan reduksi yang secara fisis menyatakan bahwa semakin tinggi kecepatan reduksi, redaman modulus vertikal cenderung meningkat terhadap kenaikan kecepatan angin.

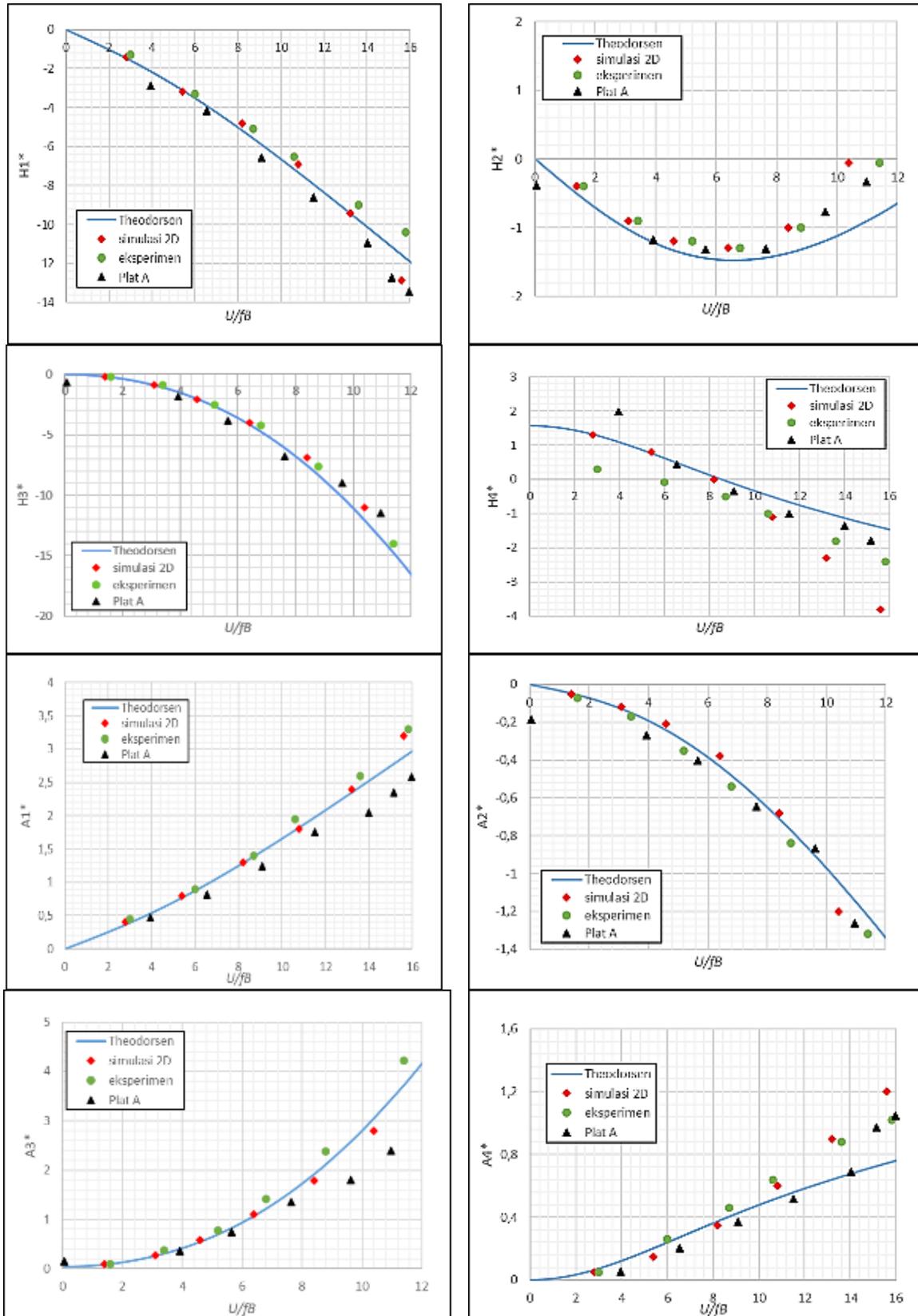
Koefisien  $H_2^*$  menyatakan pengaruh kecepatan gerak osilasi torsional terhadap gaya angkat. Koefisien  $H_2^*$  pada Plat C memiliki gradien paling tinggi yang menyatakan pengaruh redaman torsional terhadap gaya angkat juga paling tinggi.

Koefisien  $H_3^*$  menyatakan pengaruh simpangan torsional terhadap gaya angkat. Nilai  $H_3^*$  pada keempat plat nilainya hampir sama, secara fisis perbedaan geometri penampang dek tidak berpengaruh besar terhadap perubahan nilai gaya angkat akibat kekakuan torsional.

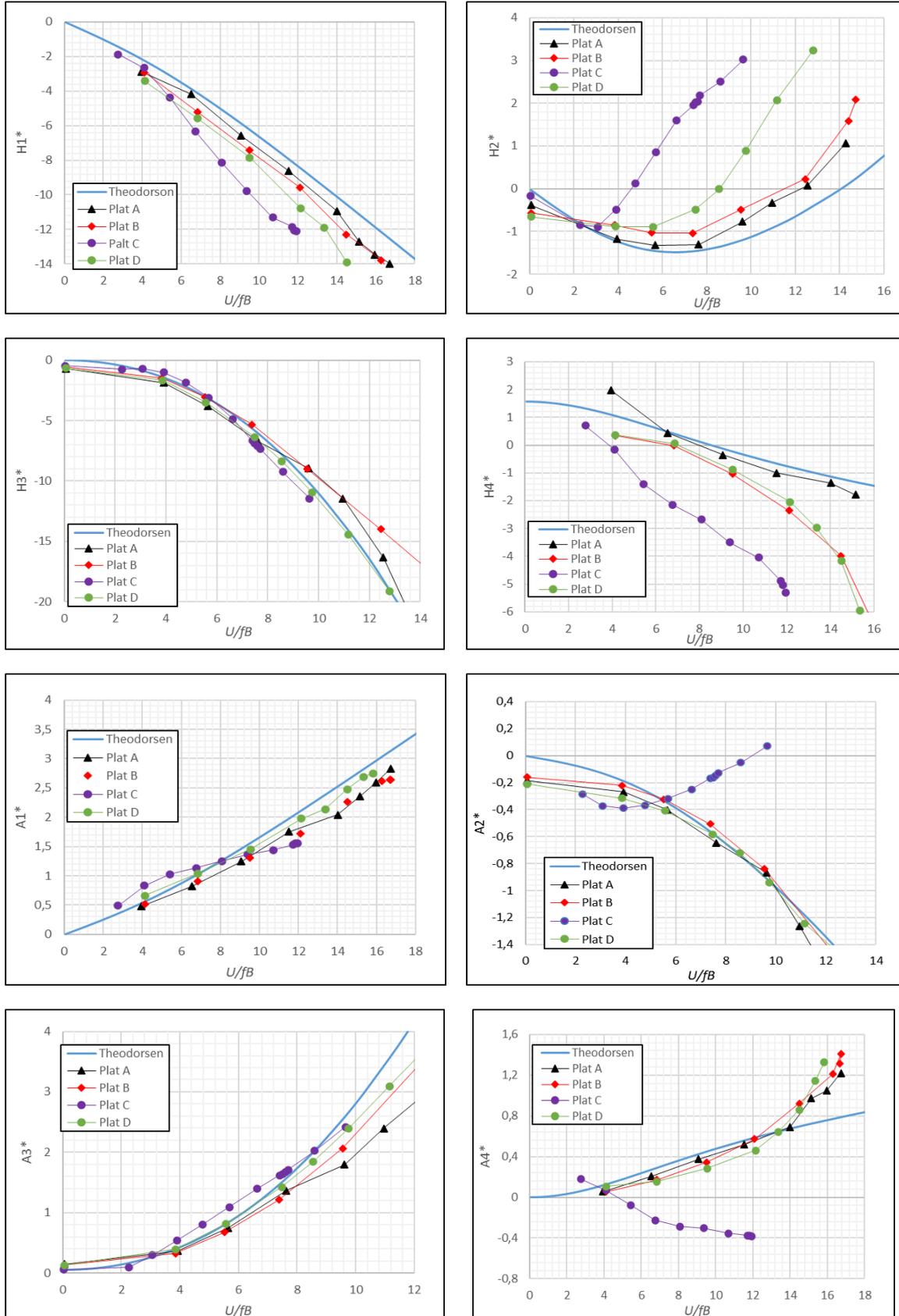
Koefisien  $H_4^*$  menyatakan pengaruh simpangan modulus vertikal terhadap gaya angkat, dari interaksi tersebut akan mempengaruhi nilai kekakuan efektif modulus vertikal terhadap gaya angkat. Koefisien  $H_4^*$  memiliki gradien negatif terhadap bertambahnya kecepatan reduksi yang secara fisis menyatakan bahwa semakin tinggi kecepatan reduksi, kekakuan modulus vertikal cenderung meningkat terhadap kenaikan kecepatan angin, sehingga frekuensi osilasi juga semakin meningkat.

Koefisien  $A_1^*$  menyatakan pengaruh kecepatan gerak osilasi vertikal terhadap momen angguk. Koefisien  $A_1^*$  memiliki gradien positif yang

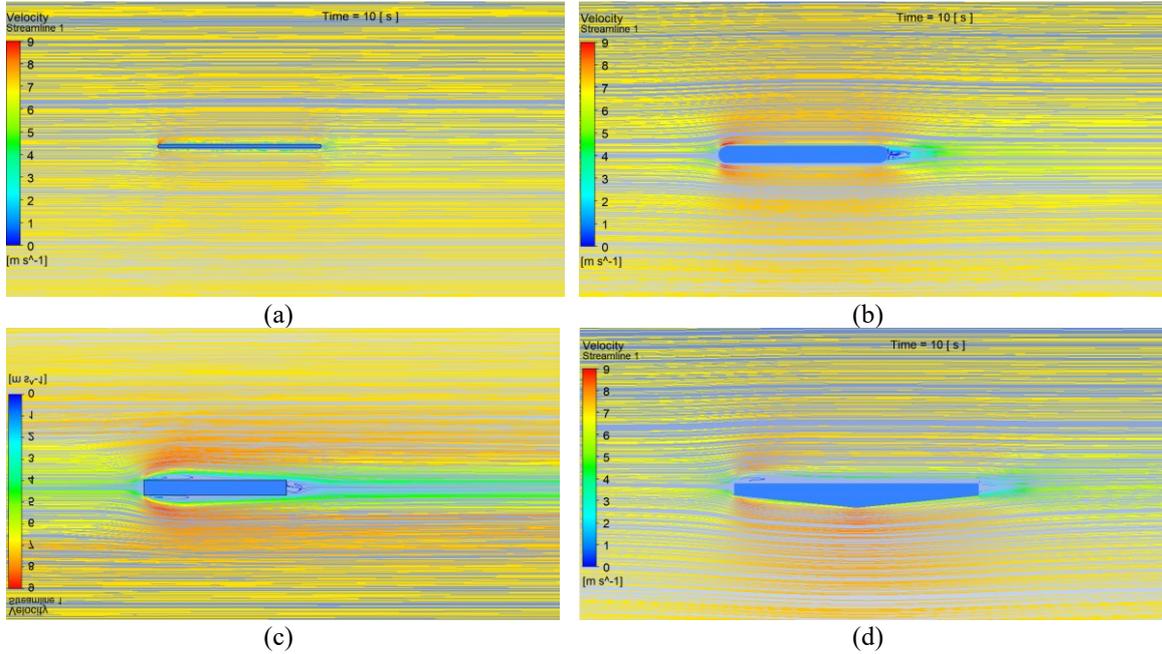
menyatakan pengaruh redaman vertikal terhadap momen torsional akan semakin berkurang terhadap kenaikan kecepatan.



Gambar 11. Koefisien flutter derivatives Plat A



Gambar 12. Koefisien flutter derivatives Plat A, Plat B, Plat C dan Plat D



Gambar 13. Kontur *streamline* kecepatan pada kecepatan *free stream* 7 m/s  
 (a) Plat A; (b) Plat B; (c) Plat C; (d) Plat D

Koefisien  $A_2^*$  menyatakan pengaruh kecepatan gerak osilasi torsional terhadap momen anguk.  $A_2^*$  merupakan koefisien *flutter derivatives* yang terkait dengan redaman pada modus torsional. Gradien koefisien  $A_2^*$  pada Plat C bernilai positif yang menunjukkan bahwa penampang ini cenderung untuk mengalami *torsional flutter*. Sedangkan pada Plat A, Plat B dan Plat C memiliki nilai dan gradien  $A_2^*$  negatif yang menunjukkan bahwa penampang ini cenderung untuk mengalami *coupling flutter* (Matsumoto *et al.*, 2005).

Koefisien  $A_3^*$  menyatakan pengaruh simpangan modus torsional terhadap momen anguk, dari interaksi ini akan mempengaruhi nilai kekakuan efektif modus torsional terhadap momen anguk. Koefisien  $A_3^*$  memiliki gradien positif terhadap bertambahnya kecepatan reduksi yang secara fisis menyatakan bahwa semakin tinggi kecepatan reduksi, kekakuan modus torsional cenderung menurun terhadap kenaikan kecepatan angin, sehingga frekuensi osilasi juga akan semakin menurun.

Koefisien  $A_4^*$  menyatakan pengaruh simpangan modus vertikal terhadap momen anguk. Gradien  $A_4^*$  pada Plat C bernilai negatif yang menyatakan bahwa pengaruh kekakuan vertikal terhadap momen anguk semakin besar dengan bertambahnya kecepatan reduksi. Sedangkan gradien  $A_4^*$  pada Plat A, Plat B dan Plat C bernilai positif yang menyatakan bahwa pengaruh kekakuan vertikal terhadap momen anguk semakin berkurang dengan bertambahnya kecepatan reduksi.

## Kesimpulan

Hasil simulasi numerik jembatan bentang panjang ini adalah karakteristik ketidakstabilan *flutter* dipengaruhi bentuk penampang seksional dek jembatan. Dari keempat bentuk dek yang disimulasikan, bentuk penampang persegi panjang (Plat C) dengan rasio  $B/D = 10$  memiliki tingkat ketidakstabilan yang paling tinggi dari bentuk geometri yang lain. Pada plat tipis (Plat A) memiliki kestabilan yang paling tinggi dibandingkan Plat B, Plat C dan Plat D. Hal ini dapat dilihat dari gradien kurva rasio redaman pada Plat B yang lebih tinggi dari plat lain, serta nilai kecepatan kritis *flutter* Plat B yang lebih rendah dari plat lainnya. Mekanisme *flutter* yang terjadi pada Plat C adalah *torsional flutter* yang ditunjukkan dari gradien koefisien  $A_2^*$  bernilai positif. Sedangkan pada Plat A, Plat B dan Plat D memiliki nilai dan gradien  $A_2^*$  yang negatif yang menunjukkan bahwa penampang ini cenderung untuk mengalami *coupling flutter*. Penelitian selanjutnya bisa dikembangkan dengan geometri penampang dek jembatan yang lebih kompleks dengan menambahkan pagar (*railing*) pada dek jembatan agar sesuai dengan bentuk dek jembatan yang sesungguhnya. Perlu disimulasikan pengaruh perubahan sudut serang terhadap karakteristik ketidakstabilan *flutter*.

## Ucapan Terima Kasih

Sebagai wujud penghargaan terhadap pihak-pihak yang terlibat dalam penyusunan tulisan ini, ucapan rasa terima kasih disampaikan kepada Teknik

Dirgantara FTMD ITB, dan Laboratorium Aerodinamika, Aeroelastika dan Aeroakustika (LA3) – Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

## Daftar Pustaka

- Abbas, T., Kavrakov, I., & Morgenthal, G. (2017). Methods for flutter stability analysis of long-span bridges: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Bridge Engineering* 170: 271-310.
- Anderson, J. D. (1995): *Computation Fluid Dynamic Basic With Application*. USA: John Wiley & Sons Inc.
- Andersen, M.S., Oisethb, O., Johanssonc, J., & Brandt. A. (2018). Flutter derivatives from free decay tests of a rectangular B/D=10 section estimated by optimized system identification methods, *Journal of Engineering Structures* 156: 284-293.
- Chen, Z., Q., Yu, X., D., Yang, G., dan Spencer Jr, B., F. (2005): Wind-induced self excited load on bridges, *Journal of Structural Engineering*, 131(12), 1783-1793.
- ANSYS, Inc. (2017). *ANSYS Fluent Theory Guide*.
- Hafizh, H. (2010). *Identification of flutter derivatives of bridge deck from wind tunnel test data*, Master Thesis, Institut Teknologi Bandung
- Larsen, A., & Larose, G., L. (2015): Dynamic wind effects on suspension and cable-stayed bridges, *Journal of Sound and Vibration*, 334, 2-28.
- Lee, N., Lee, H., Baek, C., & Lee S. (2016). Aeroelastic Analysis of Bridge Deck Flutter with Modified Implicit Coupling Method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 155, 11 – 22.
- Matsumoto, M., Mizuno, K., Okubo, K., & Ito, Y. (2005). Torsional flutter and branch characteristics for 2-D rectangular cylinders, *Journal of Fluids and Structures* 21: 597 - 608.
- Nieto, F., Owen, J. S., Hargreaves, D. M., Hernández, S. (2015). Bridge deck flutter derivatives: Efficient numerical evaluation exploiting their interdependence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 136, 138-150
- Saputra, A. D. (2021). *Identifikasi Flutter Derivatives untuk Prediksi Kecepatan Flutter pada Model Seksional 2D Jembatan Bentang Panjang*. Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.
- Sarkar, P., P., Jones, N., P., & Scanlan, R., H. (1994). Identification of Aeroelastic Parameters of Flexible bridges, *J. Eng. Mech.* 120: 1718-1742
- Scanlan, R., H., & Tomko, J., J. (1971). Airfoil and bridge deck flutter derivatives, *Journal Eng. Mech. Div ASCE* 97: 1717-1737.
- Simiu, E., & Scanlan, R., H. (1996). *Wind effects on structures: Fundamental and applications to design*. New York: John Wiley & Son, Inc.,
- Simiu, E., & Yoe D. (2019). *Wind effects on structures: Modern Structural Design for Wind*, 4th Edition. New York: John Wiley & Son, Inc.
- Song, D., Kim, W., Kwon, O., & Choi, H. (2022). Vertical and torsional vibrations before the collapse of the Tacoma Narrows Bridge in 1940. *Journal of Fluid Mechanics*, 949, A11.
- Tang, H., Shum, K. M., & Li, Y. (2019). Investigation of flutter performance of a twin-box bridge girder at large angles of attack. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 186: 192–203.
- Theodorsen, T. (1935). General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter, *NACA Technical Rep. No. 496, Annual Rep. No. 20*, NACA, Langley Research Center, Hampton, Va.
- Vu, T. V., Kim, Y. M., & Lee, H. E. (2016). Coupled flutter analysis of long-span bridges using full set of flutter derivatives. *KSCE J Civ Eng* 20, 1501–1513.
- Wang, Z. dan Dragomirescu, E. (2016). Flutter Derivatives Identification and Aerodynamic Performance of an Optimized Multibox Bridge Deck. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2016, Article ID 8530154, 13 pages.
- Xu, F., & Zhang, Z. (2017). Free vibration numerical simulation technique for extracting flutter derivatives of bridge decks. *Journal of Bridge Engineering* 170: 226–237.
- Ying, X., Xu, F., Zhang, M., & Zhang, Z. (2018) Numerical Simulation of Aerostatic Force Coefficients of Bridge Decks Using Continuous Torsional Motion Technique. *Journal of Aerospace Engineering* 31(5): 04018065.