

KRITERIA PENILAIAN MODEL AERODINAMIK JEMBATAN KABEL DALAM PENGUJIAN TEROWONGAN ANGIN (RATING CRITERIA OF AERODYNAMIC MODEL OF CABLE BRIDGES IN THE WIND TUNNEL TEST)

Lanneke Tristanto¹⁾, Setyo Hardono²⁾, Gatot Sukmara³⁾

^{1),2),3)} Puslitbang Jalan dan Jembatan

^{1),2),3)} Jl. A.H. Nasution 264, Bandung 40294

e-mail: ¹⁾ lanneketristanto@gmail.com, ²⁾ setyo.hardono@pusjatan.pu.go.id, ³⁾ gatot.sukmara@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 7 Oktober 2016; direvisi: 15 Oktober 2016; disetujui: 21 November 2016

ABSTRAK

Gaya angin pada lantai jembatan kabel gantung dan beruji dipengaruhi oleh kecepatan dan sudut serang angin, perbandingan dimensi, bentuk dan ukuran penampang melintang serta gerakan lantai. Pengaruh tersebut direproduksi dalam terowongan angin dengan membuat model lantai jembatan. Model untuk pengujian aerodinamik jembatan kabel dipersiapkan dengan penskalaan prototipe jembatan aktual. Kesesuaian aerodinamik antara model dan prototipe jembatan kabel harus dirancang agar model mewakili karakteristik struktural prototipe. Pengujian terowongan angin menghasilkan beberapa informasi penting seperti kecepatan dan sudut serang angin kritis yang merupakan batas keamanan untuk stabilitas aerodinamik prototipe, pengurangan atau peningkatan osilasi dan perkiraan amplitude maksimum. Makalah ini membahas perancangan model secara teoritis-eksperimental dalam menetapkan persyaratan penskalaan model, dan kriteria penilaian obyektif untuk evaluasi hasil pengujian terowongan angin dengan solusi praktis aplikatif. Jembatan beruji kabel Palibaja Sukabumi yang fleksibel dalam arah lateral dengan nilai perbandingan bentang lebar sebesar 54 ternyata tahan terhadap angin flutter berdasarkan rasio frekuensi torsi/lentur sebesar dua berdasarkan hasil uji getaran. Hasil uji aerodinamik model lantai jembatan Palibaja mengungkap kemungkinan terjadinya gaya angkat dalam arah gaya berat jembatan, dengan solusi perforasi lantai.

Kata kunci: model aerodinamik, penskalaan model, pengujian terowongan angin, kecepatan dan sudut serang angin, stabilitas aerodinamik, uji getaran jembatan, kriteria penilaian.

ABSTRACT

The wind forces on the deck of suspended and stayed cable bridges are influenced by the critical wind velocity and attack angle, ratio of dimensions, shape and size of the cross section, and deck motion. These effects are reproduced in a wind tunnel, by constructing a deck model. The model for aerodynamic testing of cable bridges is prepared by scaling of the actual bridge prototype. Aerodynamic similarity between model and prototype of a cable bridge has to be designed, thus the model represents the structural characteristics of the prototype. The wind tunnel test reveals some important information such as the critical wind speed and attack angle as safety limit for aerodynamic stability of the prototype, decrement or increment of oscillation and the estimated maximum amplitude. This paper discusses theoretical experimental design methods in establishing model scaling requirements and an objective rating criteria for evaluating wind tunnel test results with practical applicative solutions. The cable stayed bridge Palibaja Sukabumi which is flexible in lateral direction due to span width ratio of 54, is verified flutter resistant by the torsional flexural frequency ratio of two based on bridge vibration test results. The Palibaja aerodynamic deck model test reveals a possible uplift in bridge gravity direction, with deck perforation solution.

Keywords: aerodynamic model, model scaling, wind tunnel test, wind velocity and attack angle, aerodynamic stability, bridge vibration test, rating criteria

PENDAHULUAN

Cara uji dalam terowongan angin berkembang sejak terjadi keruntuhan Jembatan Tacoma dan Jembatan Dryburgh (Walther et al. 1999). Keruntuhan jembatan Tacoma lama diperkirakan karena gelagar pengaku pelat baja terlalu langsing terhadap panjang bentang utama l (tinggi gelagar = $l/350 <$ batas minimum $l/300$), juga sempit terhadap panjang bentang utama dengan nilai bentang utama/lebar = $853/12 = 77$, walaupun memenuhi persyaratan rasio frekuensi torsi terhadap frekuensi lentur ($N_v/N_v = 10/8 = 1,25 > 1$). Sedangkan jembatan gantung Dryburgh runtuh dengan rasio bentang utama teradap lebar = 66. Jembatan Tacoma baru dibangun dengan gelagar pengaku rangka baja (tinggi gelagar = $l/85$) sebagai solusi kekakuan struktural untuk stabilitas aerodinamik (WSDOT 2016).

Gaya angin pada lantai jembatan kabel dipengaruhi oleh kecepatan angin, sudut serang angin, bentuk dan ukuran penampang melintang, dan gerakan lantai. Pengaruh tersebut di atas dapat disimulasi dan direproduksi dalam terowongan angin, dengan penskalaan model lantai jembatan secara sebagian atau lengkap. Mengingat gelagar pengaku dominan dalam ketahanan angin maka uji model gelagar sebagian cukup memadai untuk memperoleh kecepatan dan sudut serang angin kritis sebagai parameter aerodinamik utama.

Selain mengungkap kecepatan angin dan sudut serang kritis, model uji dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan batas kritis angin secara ekonomis dan efisien dengan pemodelan gelagar pengaku sebagian. Di bawah kecepatan angin sudut serang kritis tidak terjadi perkembangan gerakan dan stabilitas aerodinamik prototipe struktur terjamin. Pada dan di atas kecepatan angin sudut serang kritis dapat terjadi perkembangan dan peningkatan gerakan osilasi. Gelagar dapat dimodifikasi lebih tahan angin dengan penampang *stream lined*, atau gelagar rangka diperkuat dengan ikatan lateral, atau bila perkiraan karakteristik struktural tepat diwakili oleh model, akan diperoleh hasil pengujian berupa parameter:

dibuat perforasi dalam struktur lantai. Keamanan aerodinamik prototipe dengan demikian dapat digandakan melalui uji coba modifikasi model.

Kriteria penilaian hasil pengujian terowongan angin perlu obyektif, praktis dan aplikatif agar menuju pada solusi peningkatan ketahanan aerodinamik dalam desain prototipe.

Beberapa solusi untuk peningkatan kinerja aerodinamik telah berhasil dengan baik. Beberapa cara modifikasi yang diterapkan pada jembatan gantung dirangkum sebagai berikut (O'Connor 1970; Diana and Fiammenghi 2012):

- 1) Sistem bresing lateral tambahan: Golden Gate Bridge, bentang 4.200 kaki (*ft*)
- 2) Gelagar pengaku tipe pelat diubah menjadi rangka: Bronx Whitestone Bridge, bentang 2.300 *ft*
- 3) Penambahan kabel beruji diagonal: Deer Island Bridge, bentang 1.080 *ft*
- 4) Perforasi *grating* permukaan dalam boks lantai kendaraan: Messina Bridge, bentang 4.500 m
- 5) Peningkatan kekasaran lapis cat pada permukaan boks lantai kendaraan: Messina Bridge, bentang 4.500 m

Cara modifikasi yang diterapkan pada jembatan beruji kabel dirangkum sebagai berikut (FHWA 2005):

- 1) Penambahan ikatan silang *cross ties* antara kabel beruji, agar panjang bebas kabel yang berkurang dapat meningkatkan frekuensi alami
- 2) Perkasaran permukaan selongsong kabel beruji sangat populer untuk mencegah pusaran air *rivulets* akibat angin dan hujan
- 3) Perforasi lantai kendaraan terutama bermanfaat pada jembatan pejalan kaki yang relatif sempit.

KAJIAN PUSTAKA

Penskalaan model secara umum

Aspek struktural dan aerodinamik dalam skala (Tabel 1) dan inersia model harus mewakili frekuensi alami dan redaman struktur aktual.

- 1) Kecepatan dan sudut serang angin kritis,

- 2) Redaman (*logarithmic decrement*) atau peningkatan (*logarithmic increment*) untuk berbagai kecepatan dan arah angin, dan
- 3) Estimasi amplitude maksimum.

Di bawah kecepatan sudut kritis terjadi *logarithmic decrement* sehingga tidak terjadi perkembangan gerakan. Pada dan di atas kecepatan sudut kritis terjadi *logarithmic increment* dan dapat terjadi perkembangan gerakan osilasi dengan peningkatan amplitude sampai *steady state* dengan nilai maksimum yang diskala dan dikoreksi ke prototipe. Nilai

amplitude maksimum tanpa koreksi cukup memadai sebagai estimasi pembanding. Investigasi pengujian meliputi beban angin statik dan dinamik, stabilitas aerodinamik, dan vibrasi akibat angin *vortex*: pusaran angin yang dominan pada gelagar pengaku profil pelat atau boks (Uejima and Matsuda 2006; Diana and Fiammenghi 2012), atau angin *flutter*: kibaran angin yang dominan pada gelagar *streamlined* dan gelagar pengaku rangka batang (Indonesia 2011).

Tabel 1. Skala tipikal untuk berbagai tipe uji terowongan angin (Okukawa and Suzuki 2000)

Tipe uji	Skala tipikal
Model topografik	1:2.000
Lingkungan setempat	1:600 - 1:300
Model aeroelastik	1:200 - 1:100
Model sebagian/ <i>section</i>	1:80 - 1:40
Model khusus	>1:20

Mengingat tidak semua besaran dapat diskalakan maka besaran utama yang penting diskalakan untuk model uji sebagian dan penuh adalah sebagai berikut:

- 1) Model uji sebagian (*sectional model*)
Model ini cukup dengan penskalaan panjang (β_L) dan kecepatan angin (β_V) sesuai persamaan berikut (Gimsing and Georgakis 2012). Berbagai pengujian yang diperlukan meliputi model uji sebagian dari lantai (Gambar 1 a), serta menara dan kabel.

$$\beta_L = \frac{D_m}{D_p} \text{ \& } \beta_V = \frac{U_m}{U_p} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

D_m dan D_p = dimensi karakteristik model dan prototipe

U_m dan U_p = kecepatan angin skala model dan skala penuh

Dengan demikian skala frekuensi β_f menjadi:

$$\beta_f = \frac{\beta_V}{\beta_L} \dots\dots\dots (2)$$

- 2) Model uji lengkap penuh (*full cable supported model*)

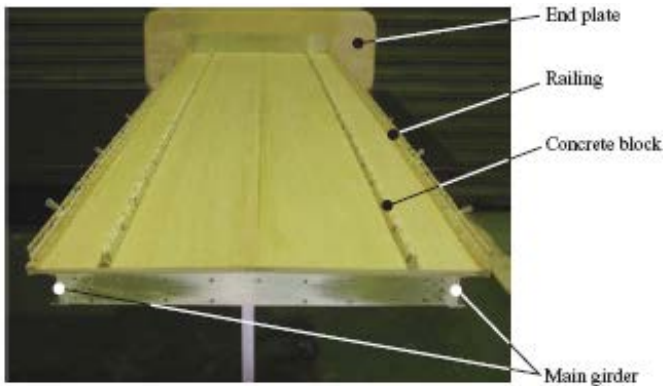
Model ini dipengaruhi oleh gravitasi, sehingga skala panjang dan kecepatan angin tidak cukup, dan diperlukan penskalaan gravitasional sesuai persamaan berikut (Gimsing and Georgakis 2012) . Model lengkap merupakan pengecekan final (Gambar 1 b).

$$\frac{\beta_V^2}{\beta_L \beta_g} = 1 \dots\dots\dots (3)$$

Mengingat penskalaan gravitasional $\beta_g = 1$, maka:

$$\beta_V = \sqrt{\beta_L} \dots\dots\dots (4)$$

Dengan Persamaan 4, skala panjang 1:250 menghasilkan skala kecepatan angin 1: $\sqrt{250}$ ~ 1:16, sebagai contoh kecepatan angin *flutter* aktual 80 m/det. dalam model menjadi 5 m/det. Perlu diingat, walaupun frekuensi diskalakan dalam model, tetapi akselerasi tidak mengalami skala dan nilai aktual dapat langsung diukur selama pengujian (Walther et al. 1999).



Sumber: Uejima dan Matsuda (2006)

Gambar 1a. Model lantai sebagian dengan skala 1:60



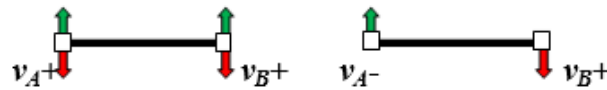
Sumber: Uejima dan Matsuda (2006)

Gambar 1b. Model penuh jembatan beruji kabel dengan skala 1:120

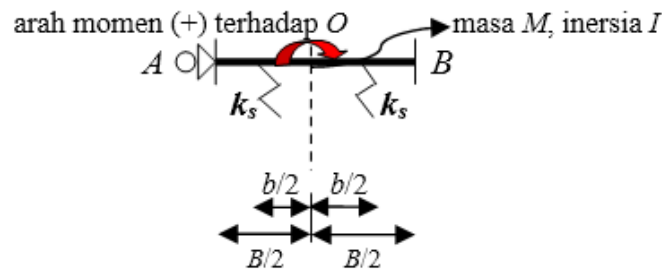
Penskalaan model lantai sebagian (*section*) secara detail

Penskalaan model lantai mewakili frekuensi dan moda alami dari perhitungan mekanika struktur dan redaman yang diestimasi eksperimental. Terdapat dua model vibrasi

mendasar yaitu perpindahan vertikal (besar dan arah v_A dan v_B sama) dan rotasi puntir (besar sama tapi arah v_A dan v_B berlawanan) pada tepi lantai berhadapan (Gambar 2a.) yang direproduksi dengan model lantai sebagian pada tumpuan pegas vertikal k_s (Gambar 2b).



a. model vibrasi vertikal & model vibrasi puntir



b. model di atas pegas k_s

Gambar 2. Model vibrasi penampang melintang gelagar pengaku

Model bergetar pada frekuensi alami N dalam gerakan harmonis sederhana, maka:

$$v_A = v_{Ao} \sin 2\pi Nt \dots\dots\dots (5)$$

$$v_B = v_{Bo} \sin 2\pi Nt \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

v_{Ao} & v_{Bo} = setengah amplitude

N = frekuensi alami (pada getaran bebas)

t = waktu

Dengan diferensiasi diperoleh:

$$\frac{d^2 v_A}{dt^2} = -v_{A0} 4\pi^2 N^2 \sin 2\pi Nt$$

$$= -4\pi^2 N^2 v_A \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{d^2 v_B}{dt^2} = -4\pi^2 N^2 v_B \dots \dots \dots (8)$$

Gaya pegas yang bekerja pada penampang untuk satuan perpindahan merupakan $-k_s v_A$ dan $-k_s v_B$

Gaya vertikal total $-k_s(v_A + v_B)$

Momen total terhadap pusat O = $k_s(b/2)(v_A - v_B)$, positif bila dalam arah jarum jam

Akselerasi rata-rata menjadi:

Translasi linier:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d^2 v_A}{dt^2} + \frac{d^2 v_B}{dt^2} \right) = -2\pi^2 N^2 (v_A + v_B),$$

kekakuan vertikal tumpuan pegas = $2 k_s$

Rotasi angular:

$$-\frac{1}{b} \left(\frac{d^2 v_A}{dt^2} - \frac{d^2 v_B}{dt^2} \right) = +4\pi^2 N^2 \frac{1}{b} (v_A - v_B),$$

rotasi θ positif bila searah perputaran jarum jam, sehingga gerakan tiap pegas $(b/2) \theta$, setiap gaya pegas = $k_s (b/2) \theta$, yang menghasilkan torsi $k_s (b^2/2) \theta$, jadi kekakuan gabungan pegas melawan torsi = $k_s (b^2/2)$.

Sehingga gaya total = massa M x akselerasi linier:

$$-k_s (v_A + v_B) = -2\pi^2 N^2 (v_A + v_B) M \dots \dots \dots (9)$$

Dan momen total = I x akselerasi angular:

$$k_s \frac{b}{2} (v_A - v_B) = 4\pi^2 N^2 \frac{1}{b} (v_A - v_B) I \dots \dots \dots (10)$$

Solusi (a) gerakan translasi: Persamaan 9 berlaku untuk semua nilai $v_A = v_B$ sehingga

$$k_s = 2 \pi^2 N^2 M \dots \dots \dots (11)$$

$$N \text{ lentur} = N_v = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2k_s}{M} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (12)$$

Solusi (b) gerakan puntir: Persamaan 10 berlaku untuk semua nilai $v_A = -v_B$ sehingga

$$k_s \frac{b}{2} = 4\pi^2 N^2 \frac{1}{b} I \dots \dots \dots (13)$$

$$N \text{ torsi} = N_\theta = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_s b^2}{2I} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (14)$$

Rasio frekuensi torsi terhadap vertikal menjadi:

$$\frac{N_\theta}{N_v} = \left(\frac{b^2 M}{4I} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (15)$$

Bila masa terpusat pada tepi lantai $(B/2)$ terhadap O akan diperoleh rasio frekuensi = 1 untuk $b = B$ dalam Persamaan 15 sehingga:

$$I = \frac{MB^2}{4} \text{ atau } \frac{M}{4I} = \frac{1}{B^2}$$

Dan Persamaan 15 menjadi:

$$\frac{N_\theta}{N_v} = \left(\frac{b^2}{B^2} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (16)$$

dengan nilai 1 bila $b = B$

Bila sebagian masa berada antara A dan B maka $\frac{M}{4I} > \frac{1}{B^2}$ dengan rasio frekuensi > 1 yang meningkatkan stabilitas :

$$\frac{N_\theta}{N_v} > \left(\frac{b^2}{B^2} \right)^{1/2} > 1 \dots \dots \dots (17)$$

Kategori kepekaan terhadap angin

Parameter P_b menentukan kategori kriteria kepekaan terhadap angin (BSI 2001) sebagai berikut:

$$P_b = \left(\frac{\rho b^2}{m} \right) \left(\frac{16 V_r^2}{b L f_B^2} \right) \dots \dots \dots (18)$$

Keterangan :

ρ = kerapatan udara (kg/m^3)

b = lebar total lantai jembatan (m)

m = masa per satuan panjang jembatan (kg/m^3)

V_r = kecepatan rata-rata angin untuk daerah relieving (m/s)

L = panjang bentang relevan maksimum jembatan (m)

f_B = frekuensi lentur alami (Hz)

Sebagai perkiraan awal dapat dianggap :

V_r antara 20 dan 40 m/s

m/b antara 600 dan 1200 kg/m^2

f_B antara $50/L^{0,87}$ dan $100/L^{0,87}$

untuk jembatan biasa, sedangkan untuk jembatan kabel gantung dan beruji diperoleh dari rumus eksperimental (Kawashima, Unjoh, and Tsunomoto 1991) atau analisis struktur.

Kategori kriteria kepekaan jembatan terhadap angin ditentukan sebagai berikut:

- a) $P_B < 0,04$: tidak peka
- b) $0,04 \leq P_B \leq 1,00$: kurang peka
- c) $P_B > 1,00$: sangat peka, sehingga uji terowongan angin diperlukan

Vibrasi kabel beruji akibat pengaruh angin

Kabel beruji fleksibel dalam arah lateral dengan frekuensi moda pertama sangat rendah. Karena panjang kabel berbeda-beda (jadi terdapat rentang frekuensi) maka susunan kabel beruji pada suatu jembatan kabel beruji mempunyai berbagai frekuensi moda pertama dan moda lebih tinggi. Sehingga tiap eksitasi dengan frekuensi sembarang dapat menemukan satu atau lebih kabel dengan frekuensi pertama atau lebih tinggi yang mendekati frekuensi eksitasi tersebut. Kabel

juga mempunyai redaman sangat kecil (redaman *inherent* 0,001-0,005) dan dengan demikian tidak dapat meredam banyak energi eksitasi, sehingga peka terhadap amplitude tinggi. Karena alasan ini maka kabel beruji secara alami 'lively' dan peka terhadap eksitasi, terutama selama pelaksanaan, angin, angin dan hujan. Usaha mitigasi mencakup ikatan silang 'cross ties' antara kabel yang secara efektif mengurangi panjang bebas kabel sehingga frekuensi meningkat (FHWA 2005).

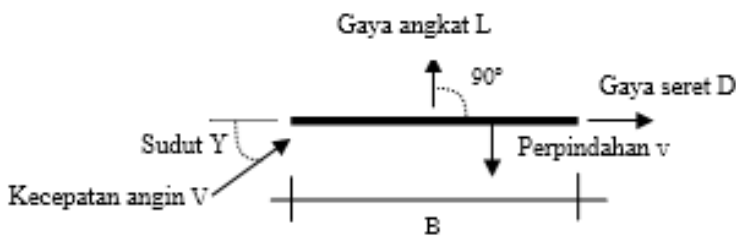
Vibrasi akibat hujan/angin

Kombinasi hujan dan kecepatan angin sedang (8-15m/s) dapat menyebabkan vibrasi kabel tinggi dengan amplitude (0,25-1) m pada frekuensi rendah (< 3 Hz), yang menyebabkan benturan antara kabel yang berdekatan. Karena

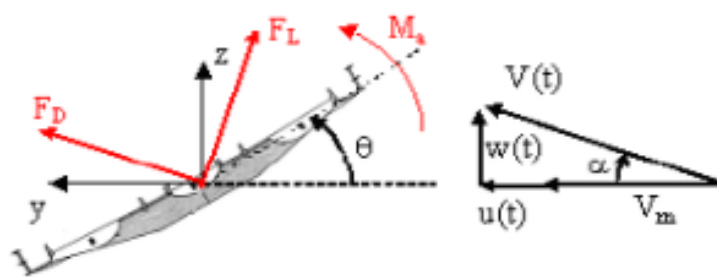
water rivulets akibat hujan mengubah bentuk efektif kabel dan bergerak bila kabel bergetar, terjadi perubahan siklus dari gaya aerodinamik sehingga terjadi pertambahan osilasi oleh energy angin. *Rivulets* telah berhasil dicegah dengan memperkasar permukaan kabel oleh *helical fillets* (1,5mm), tanpa terjadi kenaikan koefisien seret yang berarti. Cara *cable surface treatment* tersebut menjadi populer di masa sekarang. (FHWA 2005).

Aspek permasalahan gaya angin

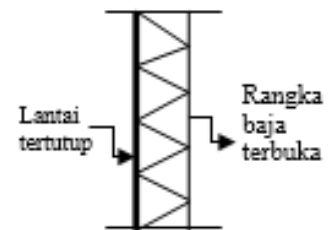
Uji model merupakan cara pendekatan sederhana untuk memperoleh desain penampang melintang gelagar pengaku yang stabil dengan mempertimbangkan tiga aspek permasalahan berikut.



(a) Model lintai horizontal, variasi sudut dan kecepatan angin (O'Connor 1970)



(b) Model lintai jembatan Messina berputar, arah angin tetap dengan variasi kecepatan (Diana and Fiammenghi 2012)



(c) Model Palibaja (Hardono 2011)

Gambar 3. Model uji statis

- Aspek 1 : teori gaya angkat negatif *L*
 Angin *steady flow* bekerja pada luas penampang *A* sesuai Gambar 3(a) dengan kecepatan angin *V* dan sudut

terpa *Y* dalam pengujian statis. Terjadi gaya angkat *L* dan seret *D* yang dianggap tegak lurus dan sejajar penampang. *F_L* dan *F_D* umumnya tegak lurus dan sejajar

pada arah kecepatan angin sesuai Gambar 3(b). Modifikasi dilakukan dengan persamaan berikut:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L A \dots\dots\dots (19)$$

Keterangan:

L = gaya angkat (positif dalam arah keatas)

ρ = kerapatan udara

V = kecepatan angin

C_L = koefisien angkat tanpa dimensi yang bervariasi dengan Y

A = luas penampang terkena angin

Anggap penampang diberi kecepatan vertikal ke arah bawah sebesar dv/dt . Sudut terpa efektif menjadi $Y+(1/V)(dv/dt)$. Penambahan gaya angkat (keatas = positif) menjadi:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \rho V^2 A \frac{dC_L}{d\theta} \frac{1}{V} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \rho V A \frac{dC_L}{d\theta} \frac{dv}{dt} \dots(20)$$

Bila $\frac{dC_L}{d\theta}$ positif, perubahan gaya angkat melawan gerakan, dapat terjadi osilasi terbatas tetapi merusak

Bila $\frac{dC_L}{d\theta}$ negatif, perubahan gaya angkat menambah gerakan, dapat terjadi osilasi sangat merusak *catastrophic*.

Bila $\frac{dC_L}{d\theta} \sim 0$, gerakan tidak terpengaruh oleh gaya angin/ keadaan ideal (misalnya gelagar rangka dengan sela/*grating* lantai di tengah bentang)

Osilasi puntir terjadi bila gaya angkat L berpindah dari sumbu rotasi yang menyebabkan gaya puntir/torsi T terhadap sumbu:

$$T = \frac{1}{2} \rho V^2 B C_T A \dots\dots\dots (21)$$

Keterangan :

T = gaya puntir

B = lebar gelagar pengaku

C_T = koefisien puntir tanpa dimensi yang bervariasi dengan Y .

Uji model yang memenuhi persyaratan $dC_L/dY \sim 0$ dan $dC_T/dY \sim 0$ merupakan jaminan bahwa stabilitas memadai tanpa ketergantungan pada kekakuan struktural. Dalam hal persyaratan ideal tersebut tidak tercapai, maka stabilitas diperoleh dengan memenuhi keperluan atau peningkatan kekakuan gelagar.

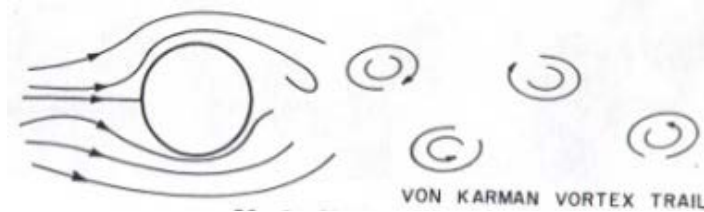
Pada model sebagian yang dapat diputar terhadap sumbu longitudinal lantai (Gambar 3b dan Gambar 4) juga tergantung tersedianya fasilitas terowongan angin, arah angin divariasikan (Gambar 3c) dan diperoleh gaya aerodinamik yaitu gaya angkat-seret dan momen sebagai fungsi arah angin.



Gambar 4. Model gelagar pengaku dalam terowongan angin (Diana and Flammenghi 2012)

- Aspek 2: Formasi *Vortex*
 Bila *steady flow* angin yang bekerja pada silinder (Gambar 5) mengalami

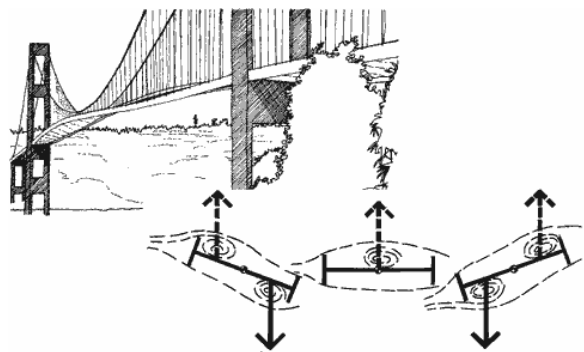
hambatan, akan terjadi turbulensi pusaran angin dinamis dan perkembangan hambatan *vortices* atau *Karman trail*. *Vortex* dominan untuk gelegar pengaku pelat.



Gambar 5. Perkembangan *vortex*

- Aspek 3: Teori *Flutter*
 Lantai jembatan dapat beresilasi dalam moda yang mencakup perpindahan melintang dan rotasi puntir, sehingga terdapat dua frekuensi alami dengan rasio N_y/N_v mendekati 1. Gerakan ini disebut *flutter* yang dominan untuk gelegar pengaku tipe rangka atau penampang *streamlined*. Untuk jembatan gantung, *flutter* merupakan gerakan paling merusak (Gambar 6) dan

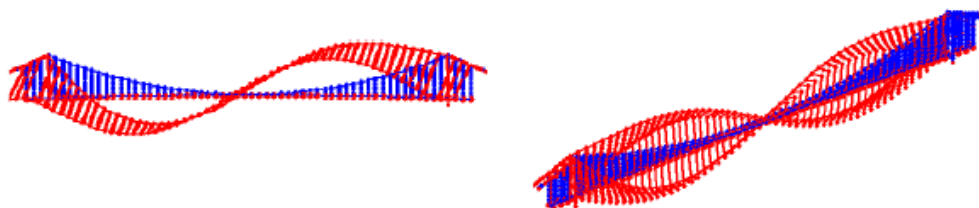
pengamanan utama dilakukan dengan memperbesar rasio $N_y/N_v > (1-2)$ yaitu rasio frekuensi alami torsi dan vertikal dalam moda sama (Gambar 7), dan atau perkakuan gelagar, serta *grating* merupakan cara efektif untuk meningkatkan ketahanan terhadap angin seperti yang direncanakan pada Jembatan Messina sesuai Gambar 8. (Diana and Fiammenghi 2012).



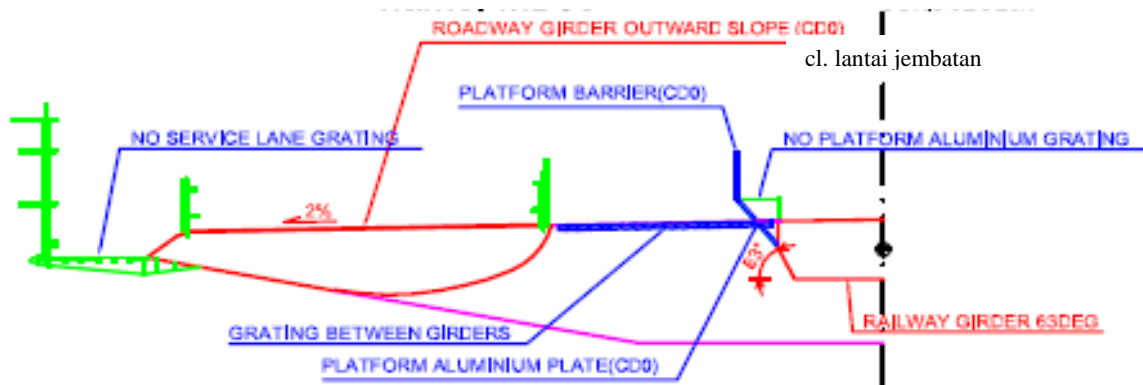
Gambar 6. Perkembangan *flutter* puntir pada keruntuhan jembatan gantung (WSDOT 2016)

I vertical mode. $f = 0.06$ Hz

I torsional mode. $f = 0.081$ Hz



Gambar 7. Perbandingan frekuensi teoritis $N_y/N_v \sim 1,36$ pada Jembatan Messina (Diana and Fiammenghi 2012)



Gambar 8. Lantai Jembatan Messina dengan permukaan grating/poreus antara gelagar boks, trotoar dan *barrier* (Diana and Fiammenghi 2012)

Gaya angin pada jembatan kabel Palibaja

Jembatan beruji kabel Palibaja Sukabumi dengan bentang utama 162 m dan lebar total 3 m ditinjau sebagai studi kasus. Dalam tahun 2011 diadakan uji model sebagian *sectional model* dalam terowongan angin terhadap kecepatan angin (15-40) m/det. pada sudut serang -10° sampai 25° (Hardono 2011). Model gelagar lantai (Gambar 3c) dibuat dari aluminium dalam skala panjang 1:10 dan skala angin $1:\sqrt{10}$. Instabilitas kibaran angin *flutter* pada model terjadi dalam koefisien gaya angkat positif (ke atas) dan negatif (ke bawah) yang didominasi oleh sudut serang angin. Fenomena sudut serang kritis yang berlainan dengan konsep kecepatan angin kritis yang umum dikenal sebagai parameter aerodinamik utama akan menjadi focus pembahasan makalah ini. Hasil pengukuran lapangan menunjukkan kecepatan angin maksimum 30 m/det. Dengan frekuensi lentur 2,24 Hz, pada kecepatan angin rata-rata 15 m/det., $\rho = 1,16 \text{ kg/m}^3$, $b = 3 \text{ m}$, $M=942,564 \text{ kg/m}$ dan $L = 162 \text{ m}$, diperoleh nilai $P_b = \left(\frac{\rho b^2}{m}\right) \left(\frac{16 V_r^2}{b L f_B^2}\right) = 0,0164 < 0,04$ berarti tidak

peka terhadap aerodinamik. Nilai batas tidak peka $P_b = 0,04$ terjadi pada kecepatan angin 23 m/det. Sedangkan pada kecepatan angin maksimum 30 m/det. diperoleh $P_b = 0,065 < 1,0$ yang masih di bawah batas sangat peka.

HIPOTESIS

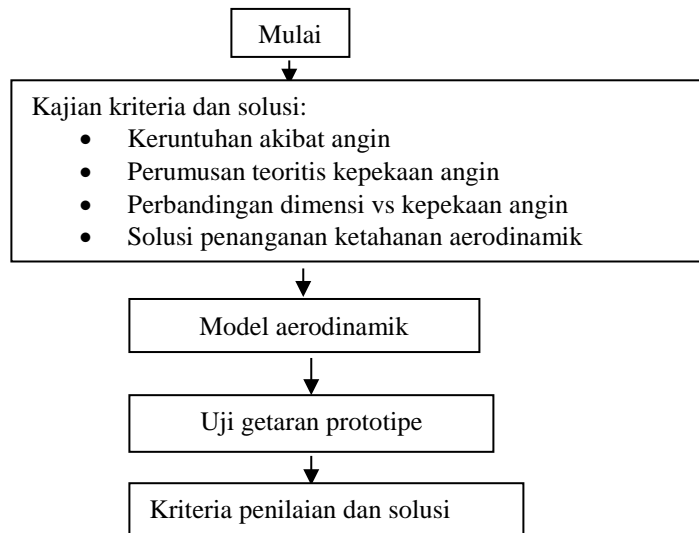
Pengujian model sebagian *section model* yang menghasilkan sudut serang dan kecepatan angin kritis merupakan parameter utama dalam kriteria penilaian dan solusi penanganan.

METODOLOGI

Hasil uji model dalam terowongan angin (Hardono 2011) dan hasil uji getar jembatan beruji kabel aktual Palibaja (Sukmara 2014) dianalisis dengan verifikasi silang untuk menjelaskan kinerja aerodinamik model terowongan angin terhadap prototipe aktual (Gambar 9). Parameter teoritis dan hasil eksperimen menjadi masukan dalam kajian kriteria penilaian stabilitas dan solusi penanganan (Bagan alir 1).



Gambar 9. Jembatan Palibaja Sukabumi, bentang total $(39 + 162 + 39) \text{ m} = 240 \text{ m}$



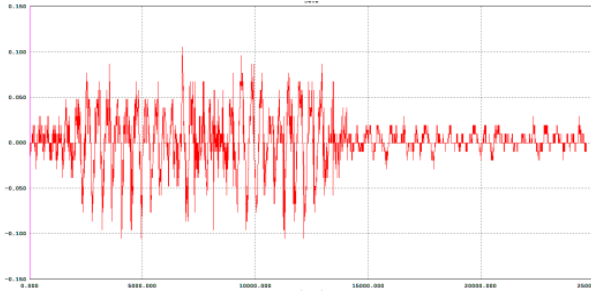
Gambar 10. Bagan alir metodologi

HASIL DAN ANALISIS

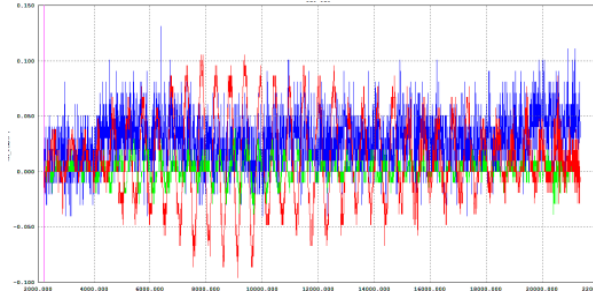
Hasil uji getar

Getaran arah vertikal (lentur) terdiri dari puncak frekuensi alami sebesar 2,24 Hz, 3,32 Hz, 4,49 Hz, 6,54 Hz sesuai rekaman getaran dalam Gambar 11(a). Pengukuran akselerasi vertikal dilakukan di lokasi tengah dan seperempat

bentang utama. Jembatan Palibaja dengan rasio frekuensi torsi/lentur $4,49/2,24 = 2$ tidak terpuntir dan tahan terhadap angin *flutter*. Getaran arah lateral terdiri dari puncak frekuensi sebesar: 0,48 Hz, 0,87 Hz, 1,51 Hz, 1,90 Hz, 2,22 Hz sesuai rekaman getaran dalam Gambar 10 b. Pengukuran akselerasi lateral dilakukan di lokasi seperempat bentang utama.



Gambar 10a. Rekaman getaran arah vertikal hasil uji getar jembatan Palibaja



Gambar 10b. Rekaman getaran arah lateral hasil uji getar jembatan Palibaja

Hasil pengukuran getaran menunjukkan bahwa jembatan mempunyai pergerakan dominan ke arah lateral dengan frekuensi natural di bawah 2,22 Hz. Gerakan lateral mudah terjadi karena rasio panjang bentang terhadap lebar jembatan sebesar $162/30=54 < 60$ yang dapat dianggap sebagai batas kritis terhadap angin *flutter* (Walther et al. 1999).

Hasil uji terowongan angin

Nilai koefisien angin C_L (angkat), C_D (seret) dan C_M (momen, stabilitas) untuk model gelagar 3D hanya dapat diperoleh melalui uji terowongan angin dengan ikhtisar hasil uji (Hardono 2011) seperti yang disajikan dalam Tabel 2. Koefisien angin didominasi oleh variasi sudut serang sedangkan kecepatan angin kurang berpengaruh. Fenomena ini dapat terjadi

karena gelagar rangka tembus dan tahan angin. Sedangkan lantai kendaraan tertutup tanpa perforasi, turun oleh koefisien angkat negatif (bila $Y < 5^\circ$) dan naik oleh koefisien angkat positif (bila $Y > 5^\circ$). Besarnya kecepatan angin (15-50) m/det. relatif tidak mengubah koefisien angin. Nilai dC_L/dY negatif sangat merugikan stabilitas karena menambah gaya berat jembatan, sedang nilai dC_L/dY positif mengurangi tegangan tarik kabel beruji yang merupakan unsur tarik struktural. Stabilitas aerodinamika ideal bila dC_L/dY dan $dC_{m/det.Y}$ sekitar nol pada sudut serang kecil ($0-5^\circ$), dengan arah angin hampir horizontal yang melalui gelagar rangka. Di samping ini jembatan pejalan kaki baja bentang panjang relatif ringan dan sempit sehingga peka terhadap beban arah lateral.

Tabel 2. Koefisien angin statis model dalam terowongan angina pada kecepatan angin $v = (15-40)\text{m/det}$.

Sudut serang Y	C_L rata-rata (gaya angkat)	C_D rata-rata (gaya hambat)	C_M rata-rata (Momen)	C_N rata-rata (beban normal)	C_T rata-rata (beban tangensial)
-10°	-0,4 negatif	0,82	0,175	-0,5	0,74
-5°	-0,45 negatif	0,7	0,17	-0,4	0,685
0°	-0,65 negatif	0,62	0,12	-0,5	0,62
5°	0,2 positif ~ 0	0,65	-0,06~ 0 stabil	0,25	0,63
10°	0,6	0,78	-0,075	0,7	0,67
15°	0,85	0,92	-0,08	1,1	0,66
20°	1,15	1,1	-0,09	1,4	0,64
25°	1,3	1,28	-0,10	1,7	0,61

PEMBAHASAN

Kriteria penilaian ketahanan aerodinamik dalam bentuk matriks sesuai Tabel 4 diarahkan untuk jembatan beruji kabel dan secara umum berlaku untuk jembatan gantung. Jembatan gantung dengan kabel parabolik bersifat fleksibel dibanding jembatan beruji kabel. Dalam hal ini, kelangsingan gelagar pengaku menentukan, mengingat kabel utama memikul beban bersama dengan gelagar. Jembatan beruji kabel bersifat kaku dengan sistem poligon gaya tertutup, dan kelangsingan gelagar tidak menentukan mengingat terjadinya kesatuan kerjasama struktural antara menara, gelagar dan kabel beruji. Dengan mengkaji berbagai nilai kepekaan angin teoritis, nilai P_b (Persamaan 18, BSI 2001) paling sesuai sebagai indikator teoritis dari kepekaan terhadap angin (kriteria 1). Perbandingan panjang bentang utama terhadap lebar jembatan $L/B < 60$ (kriteria 2) mengacu keruntuhan jembatan gantung Dryburgh (Walther et al. 1999) dengan rasio kritis runtuh $L/B = 66$. Sebagai pembanding, jembatan Pasupati sangat tahan terhadap angin dengan L/B sekitar 3. Makin lebar jembatan makin baik ketahanan aerodinamiknya (kriteria 2 dan 3). Perbandingan lebar terhadap tinggi gelagar (kriteria 3) berlaku untuk gelagar tertutup seperti boks, dengan anjuran rasio $B/h > 6$, mengingat hasil uji model dengan $B/h = 6$ memperoleh kinerja buruk sedangkan dengan $B/h = 10$ memperoleh kinerja

baik (Walther et al. 1999). Gelagar pengaku rangka baja tahan terhadap angin dan merupakan salah satu solusi perbaikan kinerja aerodinamik. Perbandingan tinggi gelagar terhadap bentang utama terutama menentukan untuk jembatan gantung (kriteria 4) mengacu keruntuhan jembatan gantung Tacoma (Walther et al. 1999) dengan $h/L = 1/350$, sehingga dianjurkan $h/L > 1/300$ (batas minimum). Persyaratan rasio frekuensi torsi terhadap frekuensi lentur (> 1 , Persamaan 17) menentukan ketahanan terhadap kibanan angin *flutter* (kriteria 5), rasio ini diperoleh dari analisis program struktur atau dari hasil uji getar pada prototipe aktual. Parameter hasil uji model dalam terowongan angina yang menentukan stabilitas aerodinamik (kriteria 6) adalah koefisien angkat C_L (Persamaan 20) dan koefisien momen/torsi C_M (Persamaan 21), yang stabil pada $dC_L/dY \sim 0$ (gaya angkat nol) dan $dC_M/det.Y \sim 0$ (momen torsi nol). Koefisien angkat dan momen harus positif dan koefisien hambat sekecil mungkin. Uji getar protipe (kriteria 7) menunjukkan kinerja kekakuan arah memanjang dan melintang dengan nilai frekuensi aktual sebagai masukan untuk terpenuhinya kriteria 5. Butir-butir kriteria penilaian untuk jembatan kabel beruji dan jembatan gantung serta jembatan Palibaja dirangkum dalam Tabel 3. Beberapa solusi peningkatan kinerja aerodinamik yang pernah dilakukan dirangkum dalam Tabel 4.

Tabel 3. Kriteria penilaian dan solusi penanganan aerodinamika jembatan kabel

Butir kriteria aerodinamika	Kriteria Jembatan beruji kabel	Kriteria Jembatan gantung	Studi kasus jembatan Palibaja	Evaluasi Palibaja
1. Indikator teoritis kepekaan angin	$P_b = \left(\frac{\rho b^2}{m}\right) \left(\frac{16 V_r^2}{b L f_B^2}\right)$ $P_B < 0,04 \quad : \text{tidak peka}$ $0,04 \leq P_B \leq 1,00 \quad : \text{kurang peka}$ $P_B > 1,00 \quad : \text{sangat peka}$		$P_b = 0,0164 < 0,04$	tidak peka
2. Perbandingan panjang L /lebar B jembatan	Dianjurkan	Rasio L/B <60	Rasio 162/3 = 54 <60	Ok (butir 5 dan 7)
3. Perbandingan lebar B / tinggi h gelagar pengaku tertutup/boks	Dianjurkan B/h > 6 , makin lebar jembatan ketahanan angin meningkat. 10 : batas tidak peka B/h = 6 : batas peka		Gelagar pengaku rangka tahan terhadap angin	ok
4. Perbandingan tinggi gelagar h terhadap bentang utama L	h/L = 1/100- 1/500 tidak menentukan kekakuan	h/L > 1/300 menentukan kekakuan	h/L = 1,5/162 = 108	ok (butir 3)
5. Rasio frekuensi torsi/ lentur	Persyaratan minimal: f torsi/f lentur > 1 f torsi/f lentur ~ 2 : tidak peka angin <i>flutter</i>		f torsi/f lentur : 4,49/2,24 = 2	ok
6. Parameter hasil uji terowongan angin	dC _L /dY ~ 0 : stabil, gerakan ~ 0dC _L /dY positif , tidak stabil, gerakan ke atas dC _L /dY negatif, berbahaya, gerakan ke bawah dC _{m/det} . Y ~ 0 : stabil, M torsi ~ 0		(Y=0-5°) : dC _L /dY ~ 0 (Y>5°) : dC _L /dY positif (Y< 5°): dC _L /dY negatif Y (0-5)° : dC _{m/det} . Y ~ 0	Perbaikan kinerja : perforasi lantai kendaraan
7. Parameter hasil uji getar	Kekakuan aktual terukur melalui rekaman frekuensi arah vertikal/lentur dan arah lateral		Frekuensi vertikal : 2,24 Hz, 3,32 Hz, 4,49 Hz, 6,54 Hz (kaku) Frekuensi lateral: 0,48 Hz, 0,87 Hz, 1,51 Hz, 1,90 Hz, 2,22 Hz (fleksibel)	ok (butir 5)

Tabel 4. Solusi peningkatan kinerja aerodinamik

Sistem struktural	Kepekaan terhadap angin	Solusi penanganan
1. Sistem kabel beruji	Osilasi berlebih akibat angin dan atau hujan	<ul style="list-style-type: none"> tambahan ikatan silang antara kabel (tahan angin) pengasaran selongsong kabel (tahan hujan)
2. Sistem kabel gantung	Osilasi berlebih	<ul style="list-style-type: none"> tambahan kabel beruji diagonal
3. Sistem gelagar pengaku	Osilasi berlebih	<ul style="list-style-type: none"> tambahan bresing lateral gelagar pelat diubah menjadi rangka baja perforasi lantai <i>grating</i> pengasaran permukaan cat

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Stabilitas aerodinamik jembatan kabel terutama didukung oleh bentuk, geometri dan dimensi gelagar pengaku. Kabel dengan redaman sangat kecil dan rentang frekuensi multimoda sangat peka terhadap angin. Model gelagar sebagian 3D dalam terowongan angin paling penting untuk memperoleh koefisien angin C_L , C_D , C_M , C_N , C_T pada berbagai sudut serangan dan kecepatan kritis angin.

Kriteria penilaian dan solusi aerodinamik jembatan kabel meliputi parameter teoritis (kriteria 1-5 dalam Tabel 3) dan parameter eksperimental (kriteria 6 dan 7 dalam Tabel 3). Parameter teoritis mengendalikan ketahanan aerodinamik dalam desain awal melalui prediksi kepekaan dan perbandingan dimensi ideal dari gelagar pengaku terhadap serangan angin. Parameter kekakuan struktural prototipe diperoleh secara teoritis dari analisis program struktur atau secara eksperimental dari hasil uji getar. Parameter eksperimental dari uji model dalam terowongan angin memverifikasi solusi peningkatan kinerja aerodinamik (Tabel 4).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat yang telah memfasilitasi pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

British Standard Institution. 2001. Design Rules for Aerodynamics Effects on Bridges. British Standard BD 49/01. London: BSI.

Cowi Expertise. 2016. Bridge Aerodynamics. http://www.cowi.com/menu/service/BridgeTunnelandMarineStructures/Bridges/bridgeDynamics/Aerodynamics/Documents/021-1700016e_09a_Aerodynamics_low.pdf. (accessed September 7, 2016).

Diana Giorgio and Fiammenghi Giuseppe. 2012. "Wind Tunnel Tests and Numerical

Jembatan Palibaja memiliki ketahanan memadai terhadap angin dengan memenuhi kriteria penilaian (Tabel 3) dalam batas aman. Fenomena sudut serangan angin yang dominan meningkatkan koefisien angin pada variasi kecepatan angin (kriteria 6), dipengaruhi oleh serangan angin pada kondisi lantai tertutup. Modifikasi perforasi *grating* lantai jembatan akan merupakan solusi efektif untuk meningkatkan kinerja aerodinamik (Tabel 4).

Saran

Stabilitas aerodinamik diperoleh pada kondisi osilasi mendekati nihil. Untuk meminimalisasi osilasi diperlukan suatu solusi modifikasi struktur. Cara-cara modifikasi sistem gelagar pengaku dan sistem kabel (Tabel 4) dapat diuji coba dalam terowongan angin secara ekonomis dalam skala kecil, agar desain prototipe optimal.

Walaupun perkiraan koefisien angin statis C_L , C_M , C_D untuk model gelagar 2D dapat diperoleh melalui analisis program aerodinamik (Cowi Expertise 2016), perlu ditekankan pentingnya model aerodinamik 3D (Larsen and Esdahl 1998).

Approach for Long Span Bridges: The Messina Bridge" 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and its Applications. Shanghai: IAWE.

Federal Highway Administration. 2005. *Wind Induced Vibration of Stay Cables*. Interim final report, No. RI 98-034, RD T05-004. Atlanta: FHWA.

Gimsing Niels J., Georgakis Christos T. 2012. *Cable-Stayed, Cable Supported Bridges*. Hoboken: John Wiley & Sons

Hardono, Setyo. 2011. "Perilaku Aerodinamik Gelagar dari Jembatan Beruji Kabel Palibaja Menggunakan Uji Statis Terowongan Angin dengan Model Section" *Jurnal Jalan-Jembatan*. 28(2):137-150.

- Indonesia. Pusjatan. 2011. Pusjatan, Naskah Ilmiah Kajian Aerodinamik Jembatan. Bandung: Pusjatan.
- Kawashima Kazuhiko, Unjoh Sigeki, and Tsunomoto Meguru. 1991. "Damping Characteristics of Cable Stayed Bridges for Seismic Design". *Earthquake Engineering: 10th world conference*. Rotterdam: Balkema.
- Larsen A. and Esdahl, S. 1998. *Computer Aided Wind Engineering of Long Span Bridges*. IABSE Reports 97(1998). Zurich: IABSE. <http://doi.org/10.5169/seals-59880>
- O'Conner, Colin. 1970. *Stiffened Suspension Bridges, Design of Bridge Superstructures*. Hoboken: Wiley Interscience
- Okukawa, A., Suzuki, S., and Harazaki, I. 2000. "Suspension Bridges." *Bridge Engineering Handbook*. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan, Boca Raton: CRC Press
- Sukmara, Gatot. 2014. *Pemeriksaan uji getar Jembatan Sukabumi*. Laporan Investigasi Pusjatan. Bandung: Pusjatan.
- Washington State Department of Transportation. [s.a.]. Tacoma Narrows Bridge: Lessons from the failure of a great machine. Washington: WSDOT. 2016, <http://www.wsdot.wa.gov/TNBhistory/Machine/machine3.htm>, Accessed May 3, 2016.
- Uejima, Hidesaku, Matsuda Kazutoshi, and Yabuno Masashi. 2006. Wind Tunnel Test for 'Binh Bridge' in Vietnam. *IHI Engineering Review*. 39(2): 24-30.
- Walther, R., et al. Houriet B., Isler, W., Moia, P., Klein, J.P., 1999. *Cable Stayed Bridges*. 2nd ed. London: Thomas Telford. 2nd Edition.