

**PERILAKU AERODINAMIKA GELEGAR DARI JEMBATAN BERUJI
KABEL “PALIBAJA” MENGGUNAKAN UJI STATIS TEROWONGAN
ANGIN DENGAN MODEL SECTION
(AERODYNAMICS BEHAVIOUR OF “ PALIBAJA” CABLE STAYED
BRIDGE GIRDER BY SECTION MODEL IN WIND TUNNEL STATIC
MODEL TEST)**

Setyo Hardono

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

Jl. A. H. Nasution 264 Bandung

Email : setyo_hardono@yahoo.com

Diterima : 12 Mei 2011; Disetujui : 04 Agustus 2011

ABSTRAK

Jembatan beruji kabel Palibaja berlokasi di Sukabumi Jawa Barat dan selesai dibangun oleh Puslitbang Jalan dan Jembatan tahun 2009. Tipe jembatan Palibaja adalah cable stayed dengan dua pylon. Panjang jembatan adalah 39 m + 162 m + 39 m sehingga total panjang 240 m dan lebar jembatan dari as ke as rangka adalah 3 m. Sistem lantai jembatan merupakan sistem rangka baja dan pelat lantai menggunakan orthotropik. Mengingat kekakuan sistem lantai yang kecil dan nilai parameter aerodinamika P_b adalah 1.38, maka menurut ketentuan British Standard BD 49/01 perlu dikaji mengenai perilaku aerodinamika jembatan. Pada tahap awal, kajian aerodinamika ditekankan pada pengujian terowongan angin secara statis 2 dimensi. Pengujian dilakukan dengan berbagai kecepatan angin (15, 25, 40, 50 m/detik) dan sudut serang (α) diambil (-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25 derajat). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi angin dengan sudut serang 0 derajat maka model jembatan mengalami negative lift. Permasalahan lain adalah lokasi negative stall terjadi pada sudut serang (α) sekitar 0 derajat, yang berarti problem ketidak linearan secara aerodinamika terjadi pada arah angin horisontal. Dengan kecepatan udara 15 m/detik hingga 50 m/detik, relatif tidak merubah besaran lift koefisien. Namun demikian karena pengujian masih bersifat statis maka diperlukan uji lanjutan berupa pengujian dua dimensi unsteady sehingga permasalahan aerodinamika dinamis dapat terjawab.

Kata Kunci : jembatan beruji kabel, aerodinamika, uji terowongan angin, negative lift, negative stall

ABSTRACT

The Palibaja Cable Stayed Bridge located in Sukabumi, West Java has finished built in 2009. The type of the bridge is cable stayed bridge with two pylons. The length of the bridge is 39 m + 162 m + 39 m (total length is 240 m) and 3 m center to center width of truss deck. The superstructure of bridge system is steel truss with orthotropic deck system. Due to the low stiffness of the deck system and aerodynamics parameter value (P_b) which is 1.38, thus according to British Standard BD 49/01 it is necessary to review the aerodynamics behaviour of the bridge. In early stage, the aerodynamics study is emphasized on the two dimensional wind tunnel static testing. The testing was conducted with several wind speeds (15, 25, 40, 50 m/second) and angle of attack, at, (-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20 25 degrees) values. The testing result shows that wind with angle of attack at 0 degree, causing negative

lift on the model. The other problem is the location of negative stall at angle of attack at approximately 0 degree, which means that problem of aerodynamics nonlinearity occurs in horizontal wind direction. The 15m/sec wind speed up to 50 m/sec, relatively not changing the lift coefficient value. However, because of the test is static, thus it is necessary to conduct further study such as unsteady two dimensional testing, so that the problem of dynamic aerodynamics could be solved.

Keywords : cable stayed bridge, aerodynamics, wind tunnel test, negative lift, negative stall

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Salah satu permasalahan utama dalam jembatan bentang panjang (contoh : *Jembatan Gantung Tacoma*) adalah gagalnya jembatan yang diakibatkan oleh beban kecepatan angin yang tidak terlalu tinggi (Gambar 1). Permasalahan ini dikenal sebagai *wind induced vibration* yang akhirnya menuju *flutter* fenomena. Fenomena ini merupakan kombinasi akibat resonansi gaya aerodinamika tak lunak (*unsteady aerodynamics*) dan kelenturan struktur. Resonansi ini menjadikan struktur tidak stabil dan berakibat pada kegagalan struktur (Larose, 2002). Hingga saat ini, fenomena ini belum bisa diprediksi dengan baik, sehingga diperlukan pengujian *terowongan angin* dan juga kombinasi dengan perhitungan-perhitungan numerik yang kompleks. Rancangan yang kurang layak, gaya hisap yang besar telah menyebabkan banyak kegagalan sepanjang abad ke-19 (Fok Chin Hong, 2006).

Data Teknis Jembatan Palibaja

Data teknis jembatan beruji kabel Palibaja yang dibangun oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (Pusjatan) menjadi obyek penulisan diuraikan sebagai berikut :

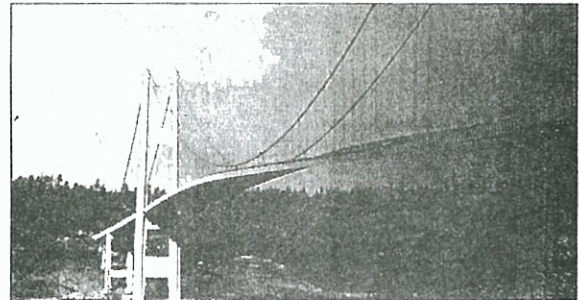
Nama : Jembatan Beruji Kabel
(*Cable-Stayed*) Palibaja
Tahun : 2009
Lokasi : Ruas jalan desa Parakan Lima
– Bantar Jati , Kabupaten
Sukabumi
Tipe : *Cable-stayed*
Struktur Atas : Rangka batang (*truss*) baja
Pelat Lantai : Ortotropik pelat baja

Pier Head : Beton bertulang
Perletakan : Perletakan sendi baja
Bentang : Tiga bentang menerus
Panjang : 39 m+162 m+39 m = 240 m
Lebar : 0,15 m + 2,50 m + 0,15 m

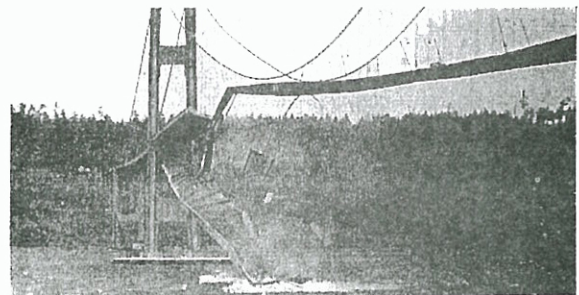
Gambar Jembatan Beruji Kabel Palibaja dapat dilihat dalam Gambar 2 dan Gambar 3.

Uji Terowongan Angin

Dalam *British Standard* BD 49/01 menyebutkan bahwa apabila parameter kerentanan aerodinamika jembatan, P_b , lebih besar dari 1 maka jembatan tersebut harus diperhitungkan terhadap perilaku aerodinamika, seperti pada rumus 1 (BD 49/01, 2001).

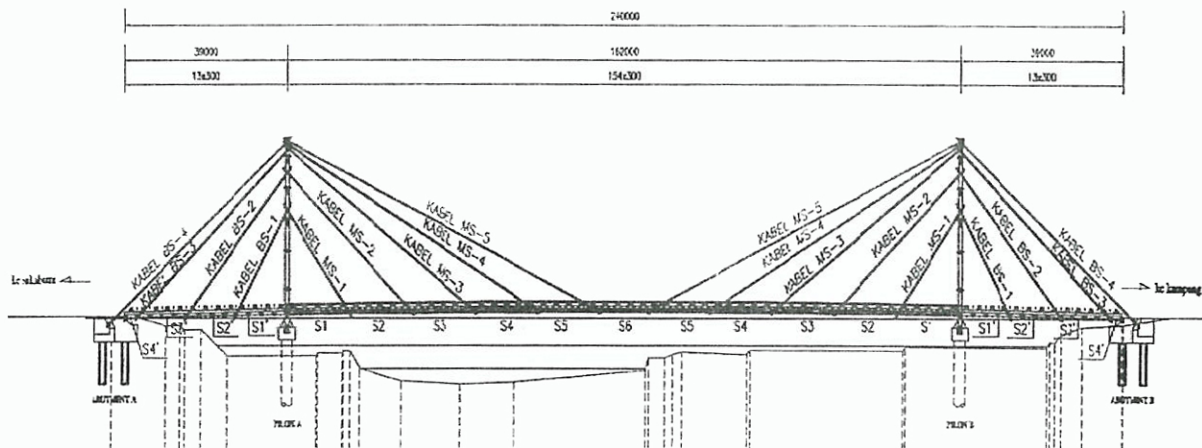


a. Sebelum runtuh

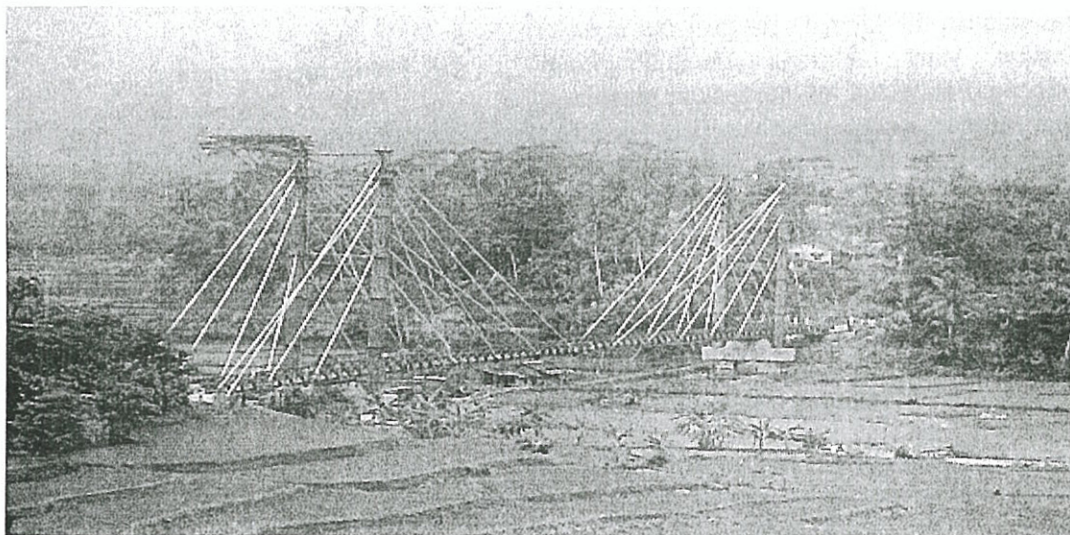


b. Saat runtuh

Gambar 1. Jembatan Gantung Tacoma runtuh karena beban angin



Gambar 2. Tampak samping jembatan Palibaja



Gambar 3. Foto Jembatan Palibaja

$$P_b = \left(\frac{\rho b^2}{m} \right) \left(\frac{16V_r^2}{bL f_B^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

- P_b : parameter kerentanan terhadap angin
- ρ : densitas udara
- b : lebar keseluruhan lantai jembatan
- m : massa per satuan panjang jembatan
- V_r : kecepatan angin rata-rata
- L : panjang maksimum jembatan yang relevan
- f_B : frekuensi alami jembatan dalam ragam lentur

Berdasarkan hasil pengujian di lapangan yang disajikan dalam Laporan Penelitian Kajian dan Pengawasan Uji Coba Skala Penuh Jembatan *Cable Stayed* Untuk Pejalan Kaki Tahap III, (Hardono, 2009), diperoleh data $\rho = 1.1644 \text{ kg/m}^3$, $b = 3.0 \text{ m}$, $V_r = 15 \text{ m/detik}$, $m = 942.5639 \text{ kg/m}$, $L = 162 \text{ m}$, $f_B = 0.244 \text{ siklus/detik}$ maka dengan menggunakan rumus (1) diperoleh nilai $P_b = 1.38$. Sehingga menurut ketentuan BD 49/01 jembatan Pusjatan Palibaja perlu ditinjau terhadap perilaku aerodinamika.

Beberapa literatur menyebutkan bahwa jembatan beruji kabel lebih kaku dibandingkan dengan jembatan gantung. Hal ini disebabkan oleh sistem kabel yang bekerja pada lantai

jembatan, dimana kabel pada jembatan gantung bersifat lebih non linear secara geometrik. Namun demikian, kekakuan lantai jembatan dibandingkan dengan panjang jembatan mengakibatkan kerentanan terhadap aerodinamika harus tetap ditinjau.

Salah satu kajian yang dapat memberikan informasi perilaku aerodinamika adalah melalui uji terowongan angin.

HIPOTESIS

Pengujian terowongan angin secara statis dapat memberikan gambaran mengenai perilaku aerodinamika jembatan beruji kabel Palibaja.

KAJIAN PUSTAKA

Aksi aerodinamika jembatan beruji kabel tidak seburuk pada jembatan gantung kabel, karena adanya peningkatan kekakuan oleh adanya kabel tegang. Meski demikian, karena konfigurasi struktur bangunan atas menggunakan sistem truss baja, maka terdapat banyak kemungkinan timbulnya fenomena *flutter* pada rangka karena bentuk bangunan atas tidak menguntungkan secara aerodinamika.

Beberapa teori telah dikembangkan sebagai model analisis matematis untuk memahami proses eksitasi angin, antara lain (Podolny, 1999) :

- **Teori kemiringan negatif (*Negative-slope theory*)**

Bila jembatan bergerak ke bawah sementara berhembus angin horizontal (Gambar 4a), angin resultan membentuk sudut ke atas (sudut terpa positif) relatif terhadap jembatan.

Jika koefisien angkat C_L , seperti diukur dalam uji statis, menunjukkan variasi terhadap sudut angin α seperti digambarkan kurva A dalam Gambar 4b, sehingga, untuk amplitudo sedang, terdapat gaya angin yang bekerja ke bawah pada jembatan sementara jembatan bergerak ke bawah. Jembatan kemudian akan bergerak dengan amplitudo yang lebih besar dari yang semula tanpa adanya gaya angin ini.

jembatan runtuh. Situasi yang serupa, meski lebih kompleks, akan terjadi untuk gerakan torsional atau puntir jembatan. Selanjutnya, komponen vertikal angin juga berbalik.

Sudut terpa angin menjadi negatif, dan gaya angkat menjadi positif, cenderung untuk menambah amplitudo pantulan. Dengan meningkatnya kecepatan, amplitudo akan meningkat secara tak hingga atau hingga jembatan runtuh. Situasi yang serupa, meski lebih kompleks, akan terjadi untuk gerakan torsional atau puntir jembatan.

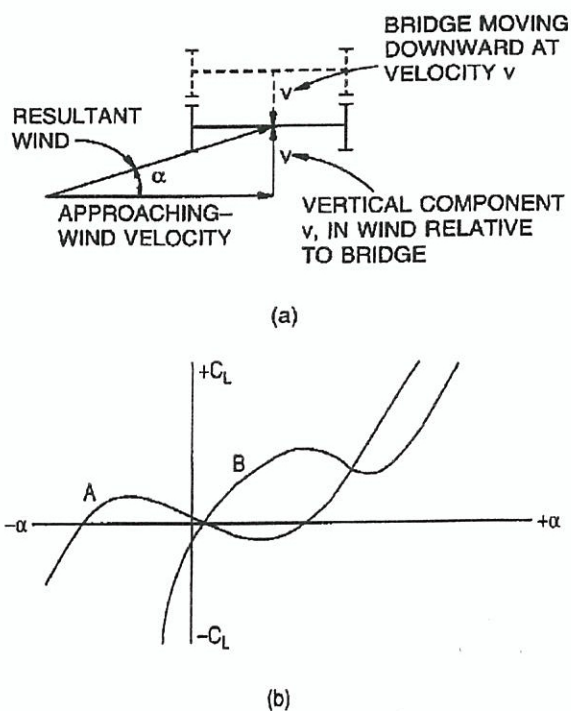
- **Teori pusaran angin (*Vortex theory*)**

Teori ini mengatribusikan eksitasi aerodinamika dengan aksi gaya periodik yang memiliki tingkat resonansi tertentu dengan mode vibrasi natural jembatan. Pusaran-pusaran angin (*vortex*) yang terbentuk di sekeliling tepi foil udara (dek jembatan), berkembang pada kedua sisi secara bergantian, menyebabkan kenaikan gaya periodik dan osilasi tegak lurus terhadap dek.

- **Teori Kibaran (*Flutter theory*)**

Fenomena kibaran, seperti yang terbentuk pada foil udara pesawat terbang dan berlaku pada jembatan panjang, disebabkan foil udara (dek jembatan) ditumpu sehingga ia dapat bergerak secara elastis dalam arah vertikal dan puntir, terhadap sumbu longitudinal. Angin menyebabkan gaya angkat yang bekerja eksentris. Ini menyebabkan momen puntir, yang akhirnya mengubah sudut terpa angin dan menambah gaya angkat. Reaksi ini berantai dan menjadi katastropis jika gerak vertikal dan torsional dapat timbul pada frekuensi kopel yang sama dan dalam fase hubungan yang sesuai.

Bleich menyajikan tabel untuk menghitung kecepatan kibaran v_F untuk suatu jembatan, berdasarkan teori kibaran foil udara pelat datar. Tabel-tabel ini dapat diterapkan terutama untuk rangka-batang. Namun tabel ini sulit digunakan, dan terdapat ketidak-yakinan karena rentang validitasnya.



Gambar 4. Aksi Angin pada Jembatan Beruji Kabel: (a) Gerakan jembatan ke bawah menimbulkan komponen angin ke atas; (b) Koefisien angkat C_L bergantung pada sudut arah angin α

Selberg memberikan rumus berikut untuk kecepatan kibar:

$$v_F = 0,88 \omega_2 b \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2\right] \frac{\sqrt{v}}{\mu}} \quad \dots (2)$$

Keterangan:

- v = faktor distribusi massa untuk penampang spesifik = $\frac{2r^2}{b^2}$ (bervariasi antara 0,6 dan 1,5, rata-rata 1,0)
- $\mu = \frac{2\pi \rho b^2}{m}$ (rentang antara 0,01 dan 0,12)
- m = massa per satuan panjang
- b = setengah lebar jembatan
- ω_1 = frekuensi sirkular vertikal
- ω_2 = frekuensi sirkular torsional
- r = radius girasi massa

Selberg juga telah mempublikasi grafik, berdasarkan hasil uji, yang memungkinkan untuk menaksir kecepatan angin kritis untuk setiap tipe penampang lintang dalam bentuk kecepatan kibar. Teori pusaran angin dan kibar diterapkan pada perilaku jembatan gantung dalam aksi angin. Kibar cenderung dominan untuk jembatan-jembatan diperkaku rangka batang, sedangkan pusaran angin sering terjadi untuk jembatan-jembatan diperkaku gelagar.

Validasi stabilitas struktur jembatan Palibaja untuk kecepatan angin yang diharapkan terjadi pada lokasi jembatan wajib dilakukan. Uji terowongan angin harus digunakan karena belum tersedianya prosedur analitis yang eksak. (Podolny, 1999)

Uji model jembatan dilakukan untuk memeriksa apakah jembatan dapat menjaga stabilitas pada kecepatan angin yang diperkirakan terjadi di lapangan. Hasil lain yang diharapkan yaitu perkiraan kecepatan angin maksimum yang membahayakan struktur.

Model yang akan dibangun adalah skala 1:10 dari ukuran jembatan sebenarnya. Bangunan jembatan model akan dipilih sedemikian sehingga untuk semua kondisi beban model akan mengalami tegangan yang sama dengan jembatan yang sebenarnya, dan perpindahan yang akan terjadi sesuai dengan skala model 1:10. Untuk mencapai kondisi ini, kriteria ukuran model harus mengikuti hukum perbandingan terhadap prototipe sesuai dengan Tabel 1 (Walther, et. al., 1999).

Pengujian pengukuran gaya dan momen memberikan penjelasan mengenai gaya yang bekerja pada jembatan. Pengujian dilakukan dengan variasi arah dan kecepatan udara yang disimulasikan sebagai fungsi *angle of attack* (sudut serang), kecepatan udara dan similaritas bilangan Reynolds. Pada analisis ini akan ditunjukkan daerah yang mengalami aliran yang menempel (*attached flow*) dan separasi (*separated flow*), serta sifat kestabilan beban aerodinamika pada jembatan. Hasil-hasil yang diperoleh bisa digunakan untuk dasar pemahaman dan perhitungan beban aerodinamika pada uji statis dari potongan model.

**Tabel 1. Hukum Perbandingan (*Laws of similitude*)
Prototipe P , terhadap Model m**

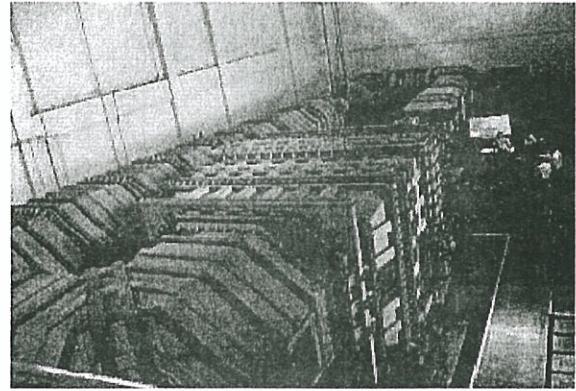
Parameter	Simbol	Skala	Nilai Numerik
Panjang	L	$\frac{L_p}{L_m}$	50
Modulus Elastisitas	E	$\frac{E_p}{E_m}$	1
Massa Jenis	ρ	$\frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{1}{L}$	0,02
Regangan	ε	$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m} = 1$	1
Luas	A	$\frac{A_p}{A_m} = L^2$	2500
Volume	Vol	$\frac{Vol_p}{Vol_m} = L^3$	125000
Massa	m	$\frac{m_p}{m_m} = L^3$	2500
Perpindahan	v	$\frac{v_p}{v_m} = L$	50
Kecepatan	\dot{v}	$\frac{\dot{v}_p}{\dot{v}_m} = \sqrt{L}$	$\sqrt{50}$
Percepatan	\ddot{v}	$\frac{\ddot{v}_p}{\ddot{v}_m} = 1$	1
Gaya	F	$\frac{F_p}{F_m} = L^2$	2500
Tegangan	σ	$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = 1$	1
Waktu	t	$\frac{t_p}{t_m} = \sqrt{L}$	$\sqrt{50}$
Frekuensi	f	$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{\sqrt{L}}$	$\frac{1}{\sqrt{50}}$

Sumber [René Walther, *Cable-Stayed Bridges*]

Laboratorium Terowongan Angin

Uji terowongan angin dilakukan di fasilitas uji yang dimiliki oleh PT. Dirgantara Indonesia, yaitu di Nusantara *Low Speed Tunnel* (NSLT). Tipe terowongan angin berupa *closed circuit low turbulence wind tunnel* yang biasa digunakan untuk uji aerodinamika pesawat terbang.

Ukuran *camber* seksi uji *wind tunnel* adalah 1,47 m (lebar) x 1,1 m (tinggi) x 4,0 m (panjang) dan kecepatan angin pada seksi uji kosong bisa mencapai 60 m/detik. Kecepatan angin kondisi operasional 50 m/detik yang dihasilkan dari *electric motor* 230 kW.



Gambar 5. Terowongan angin di NLST PT. Dirgantara Indonesia.

Kualitas udara di seksi uji mempunyai karakter sebagai berikut :

- Kecepatan maksimum : 86 m/detik
- Kecepatan maksimum operasi : 50 m/detik
- Bilangan *Reynold* (*chord ref* 300 mm) : $1,0 \times 10^6$
- Bilangan *Mach* (max) : 0,15
- *Flow angularity* : 0,2°
- *Turbulensi level* : 0,002

Secara teknis, kecepatan angin yang dihasilkan oleh terowongan angin NSLT (50 m/detik atau 180 km/jam) masih mencukupi untuk keperluan uji aerodinamika jembatan secara *section model* dan statis (Pope, 1984). Dimana dari hasil uji lapangan 2009 (lihat Laporan Kajian dan Pengawasan Uji Coba Skala Penuh Jembatan Cable Stayed Untuk Pejalan Kaki Tahap III) didapat kecepatan angin maksimum 30 m/detik. Mengingat ukuran *camber* yang relatif kecil maka model uji harus diskalakan terhadap ukuran sebenarnya.

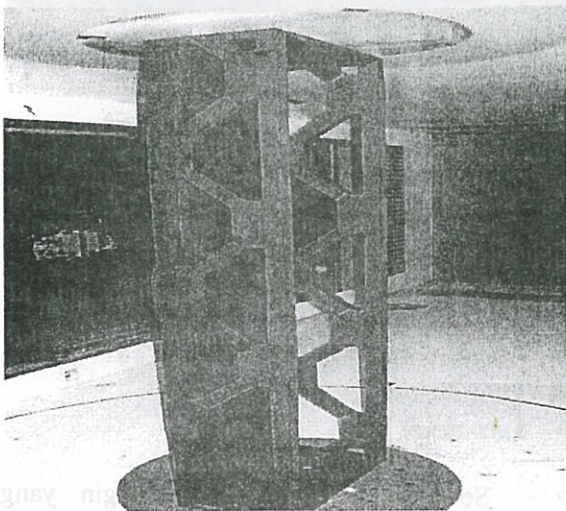
Spesifikasi Model Uji

Model 2 dimensi Jembatan Palibaja terbuat dari aluminium dan mempunyai skala 1: 10. Model jembatan ini bersifat kaku karena sifat pengujian masih dalam uji statis dan *section model*.

Dalam uji *section model* ditekankan pada karakteristik penampang jembatan akibat terpaan angin, sehingga *stayed cable* tidak dimodelkan dalam benda uji. Untuk pengujian

dinamis dengan model penuh, maka kekakuan sistem struktur termasuk kabel harus dimodelkan dan diperhitungkan.

Model dilengkapi dengan 90 titik lubang tekanan berdiameter 0,3 mm yang terletak pada 3 potongan melintang jembatan. Model terbuat dari aluminium dan dicat berwarna "Black Glossy appearance surface" untuk keperluan *oil flow visualisation*. Model dirancang dapat menerima pembebanan angin hingga kecepatan 50 m/detik.



Gambar 6. Model Jembatan pada uji statis terowongan angin

Dalam pengujian statis ini model dipasang secara vertikal (Gambar 6) karena pemegang benda uji berada di bagian atas dan bawah dari *camber* terowongan angin (Gambar 5). Disamping itu, bagian bawah *camber* terpasang *external balance* untuk mengetahui gaya total yang bekerja pada model akibat terpaan angin. Sedangkan bagian samping dari *camber* terowongan digunakan untuk melihat secara visual pada saat pengujian.

Instrumentasi dan Alat Ukur

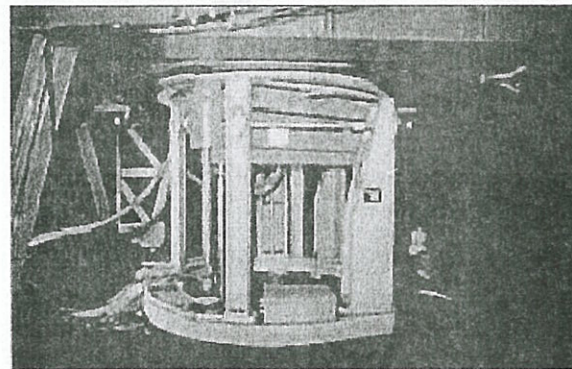
Alat ukur tekanan pada model dan seksi uji digunakan *Scani-valves* dan *electronically pressure transducers* yang mempunyai akurasi tinggi, linearity dalam orde 0,1% FS dan kapasitas sesuai dengan pengukuran di NLST, hingga 10 psi. Dimana untuk keperluan pengujian diperlukan 90 *pressure taps* dan

alokasi untuk pengukuran tekanan *tunnel parameters*, sehingga setiap kali mengukur diperlukan 96 tekanan dibantu pengukur barometris dan sensor temperatur. Alat ukur gaya dan momen pada model digunakan *External Balance* yang berfungsi juga sebagai pemutar model.

Kemampuan *External Balance* sebagai alat ukur mempunyai kemampuan sebagai berikut:

- Angkat (*Lift*) : 1500 N
- Hambatan (*Drag*) : 400 N
- *Side Force* : 600 N
- *Pitching Moment* : 100 Nm
- *Rolling Moment* : 100 Nm
- *Yawing Moment* : 125 Nm

Dengan akurasi di bawah orde 0,02% *Full Scale* (FS).



Gambar 7 *External Balance*

Karakter aerodinamika pada benda uji juga bisa dilakukan analisis kuantitatif secara *realtime* menggunakan :

- *Flow visualization* dengan *oil flouresence film* dan lampu sinar ultra violet.
- Analisa hasil pengukuran *online*, baik melalui *external balance* ataupun dari multi manometer.

Teknik Pengujian dan Referensi Sistem

Pengujian 2 (dua) dimensi model jembatan disimulasi mendapatkan aliran udara laminar dengan besaran kecepatan yang seragam. Arah aliran ditentukan dengan memutar model jembatan dengan simulasi sudut serang (*angle of attack*). Model berdiri

dan diputar di atas *external balance* dengan besaran sudut serang (*angle of attack*) yang terkalibrasi. Dalam perhitungan pengujian *wind tunnel* saat ini digunakan kecepatan angin berdasarkan *free stream model* dari hasil kalibrasi.

Nilai gaya dan momen yang merupakan hasil integrasi tekanan statis pada model mewakili gaya 2 dimensi, dimana lokasi titik ukur tekanan berada jauh dari dinding seksi uji. Sehingga pengaruh dinding dan ke 3 dimensional model diminimalkan. Pada analisis ini, pengukuran tekanan digunakan sebagai pendetilan gaya aerodinamika yang bekerja pada model. Besaran tekanan dinondimensionalkan sebagai berikut:

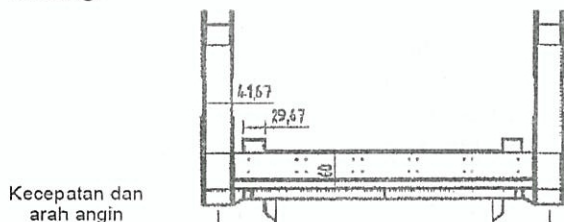
$$C_p = \frac{P_s - P_{ref}}{0.5 \rho V_0^2} \dots\dots\dots(3)$$

keterangan :

- C_p : koefisien tekanan
- P_s : tekanan statis pada model (N/m²)
- P_{ref} : tekanan statis referensi pada seksi uji (N/m²)
- ρ : densitas udara pada seksi uji (kg/m³)
- V_0 : kecepatan udara bebas (*free stream*) yang tidak terganggu oleh model dan dinding seksi uji (m/s²)

Lokasi titik tekanan pada model di non dimensionalkan dengan jarak dari depan dibagi lebar jembatan (300 mm).

Gaya dan momen yang terukur oleh *external balance* mengidentifikasi gaya aerodinamika 3D potongan jembatan dengan pengaruh dinding. Tendensi dan data kualitatif karakteristik aerodinamika bisa mewakili, namun besaran gaya dan momen merupakan paduan gaya pada jembatan dan pengaruh dinding.



Gambar 8. Gaya-gaya aerodinamika yang bekerja pada penampang jembatan

Besaran gaya dan momen di nondimensionalkan berikut (Diana, et. al., 2003):

- C_L = koefisien gaya angkat (*lift*) = $lift / (0,5 \times \rho \times V_0^2 \times S)$
- C_D = koefisien gaya hambat (*drag*) = $drag / (0,5 \times \rho \times V_0^2 \times S)$
- C_N = koefisien gaya normal = normal force / $(0,5 \times \rho \times V_0^2 \times S)$
- C_T = koefisien gaya tangensial = tangensial force / $(0,5 \times \rho \times V_0^2 \times S)$
- C_Y = koefisien gaya samping = side force / $(0,5 \times \rho \times V_0^2 \times S)$
- C_m = koefisien momen puntir = momen puntir / $(0,5 \times \rho \times V_0^2 \times S \times c)$
- S = referensi luasan model uji
- c = referensi panjang yaitu lebar lantai jembatan

C_L , C_D dan $C_{m0.25}$ adalah penting untuk mengetahui karakter aerodinamika dan kestabilan aliran pada benda uji. Arah gaya mempunyai referensi terhadap arah datang aliran udara (angin). C_N , C_T dan $C_{m0.5}$ mempunyai arti penting bagi struktur jembatan, dimana gaya-gaya mempunyai referensi terhadap axis jembatan (diasumsikan di tengah potongan jembatan).

Test Plan

Untuk memenuhi *objective* pengujian, maka dilakukan skema pengujian sebagai berikut :

- Pengujian sedapat mungkin memenuhi kriteria similaritas pengujian 2Dimensi dimana memenuhi perubahan bilangan Reynolds dan mencakup daerah yang kemungkinan terkena angin dalam fungsi sudut serang daerah linear hingga stall
- Jumlah titik tekanan setiap polar = 50 – 90 point, yang harus diintegrasikan untuk memperoleh gaya-gaya aerodinamika. Namun karena keterbatasan titik uji, maka benchmarking dari hasil pengujian force diperlukan.
- Kecepatan angin yang digunakan adalah [15, 25, 40, 50] m/s, untuk pengujian tekanan digunakan kecepatan angin 40 m/s. Alpha

swept [-10,-8, -6,-4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26] untuk force measurements. Untuk pengujian tekanan jumlah dibatasi dan berfungsi untuk analisa gaya yang lebih detil pada model uji.

Flow Visualisasi dilakukan untuk melihat perubahan dan perbedaan 3 kondisi yang berbeda, yaitu -10, 0 dan 10.

DATA HASIL PENGUJIAN

Visualisasi Aliran Udara

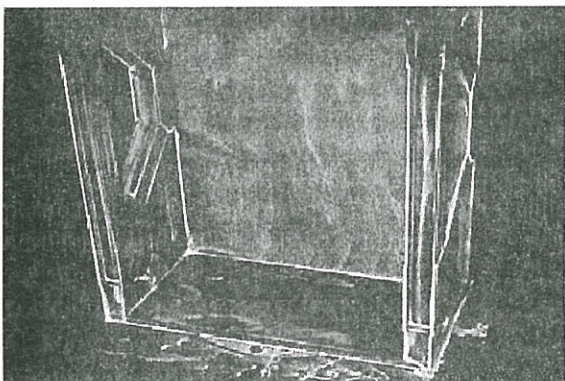
Visualisasi aliran pada permukaan model uji dilakukan dengan 2 metoda, yaitu (Ristic, 2007; Mahmood, 2011) :

- *Oil Flouresence Film*
Memvisualisasikan aliran di *inner layer boundary layer*, dimana garis- garis transisi dan indikasi kestabilan/ ketidak stabilan aliran akan terlihat dengan baik
- *Tufts* (benang)
Memvisualisasikan aliran di *outer layer boundary layer*, dimana karena wahana cukup berat, maka terjadinya *massive separation* akan tervisualisasikan.

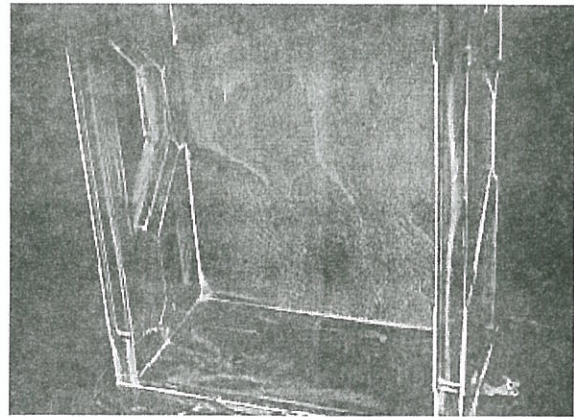
Parameter yang menjadi variabel utama adalah : kecepatan udara dan arah angin (*angle of attack/ sudut serang*). Secara umum terdapat 3 area sudut serang, yaitu:

- Sudut serang (α) < -1 derajat
- Sudut serang $-1 < \alpha < 8$ derajat
- Sudut serang $\alpha > 8$ derajat

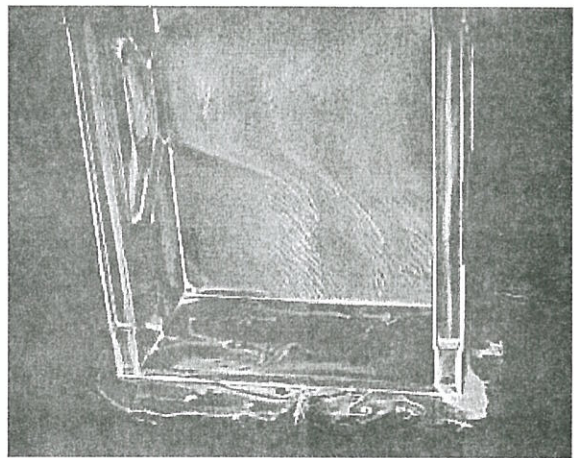
Dalam pengujian kondisi di atas diwakili dengan sudut serang -10, 0, dan 10 derajat seperti ditunjukkan pada Gambar 9,10 dan 11.



Gambar 9. Sudut serang -10°, V = 40 m/s



Gambar 10. Sudut serang 0°, V = 40 m/s

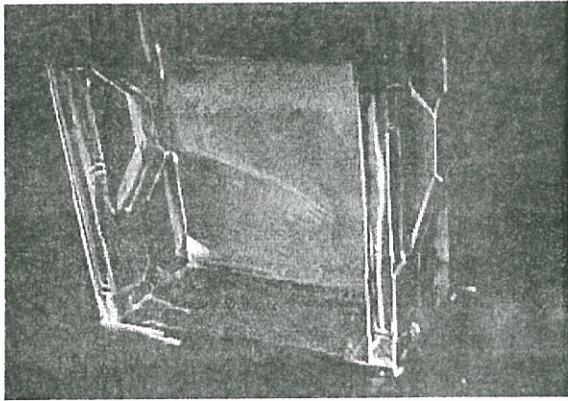


Gambar 11. Sudut serang 10°, V = 40 m/s

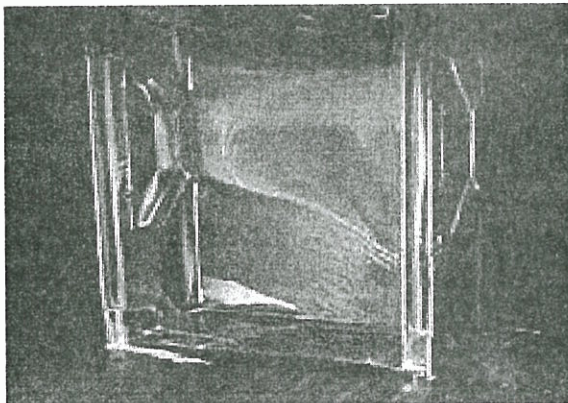
Pada gambar tersebut memperlihatkan bagian atas jembatan dan menunjukkan sebagai berikut:

- Arah aliran dari kiri ke kanan
- Pada daerah yang berlubang aliran udara masih menempel (*attached flow region*) dan pada bagian yang terhalang oleh pelat buhul maka daerah tersebut diikuti oleh daerah separasi.
- Daerah bagian kanan, merupakan daerah *masive turbulence separation*.
- Semua sudut serang menunjukkan pola aliran sama, namun berbeda intensitasnya. Makin tinggi sudut serang lokasi *separation line* semakin kebelakang.

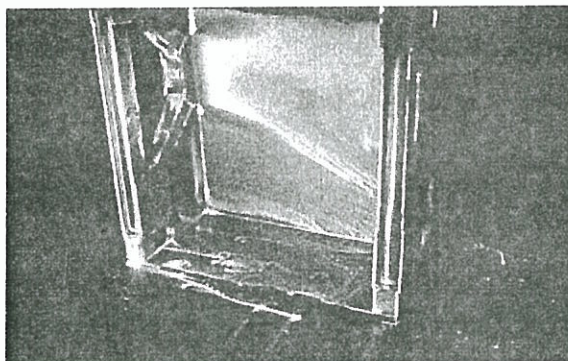
Pengaruh kecepatan dengan sudut serang tetap pada pengujian jembatan ditunjukkan pada Gambar 12, 13, dan 14 berikut.



Gambar 12. Kecepatan angin, $V = 15 \text{ m/s}$



Gambar 13. Kecepatan angin, $V = 25 \text{ m/s}$



Gambar 14. Kecepatan angin, $V = 40 \text{ m/s}$

Gambar – gambar diatas menunjukkan bahwa makin kencang terpaan angin maka daerah sisi kanan (*massive turbulence separation*) makin panjang.

Daerah *attached* dan *separated flow* ditunjukkan juga dengan jelas pada gambar berikut:

Benang berkibar berlawanan arah dgn arah aliran udara

Benang berkibar searah dgn arah aliran udara



Gambar 15. Gambar perubahan arah kibaran benang (*tufts*) di bagian atas jembatan.



Gambar 16. Pola kibaran benang (*tufts*) di bagian bawah jembatan dengan sudut serang -10°

Total Load

Total load yang diamati dalam pengujian ini diuraikan sebagai berikut :

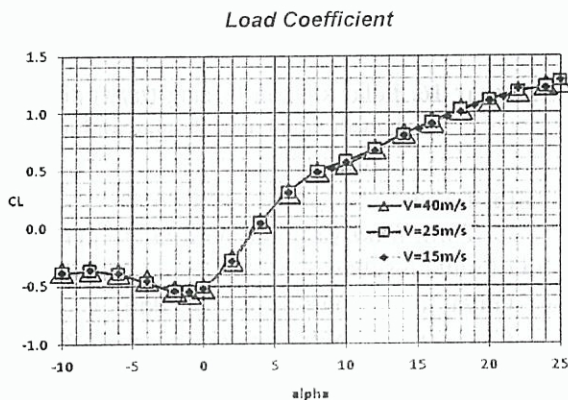
- Gaya aerodinamika C_L dan C_D serta $C_{m0.25}$ (momen di *aerodynamics center*).
- Gaya aerodinamika C_N dan C_T yang diperlukan untuk penghitungan beban struktur.
- $X-C_p$ (*center pressure location*)



Gambar 17. Pola kibaran benang (*tufts*) di bagian bawah jembatan dengan sudut serang 0°

Koefisien gaya angkat (C_L)

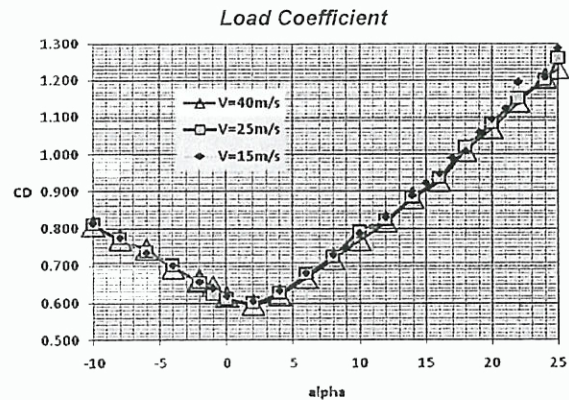
Pada Gambar 18 diperlihatkan besarnya koefisien angkat/*lift coefficient* (C_L) dan perubahannya terhadap sudut serang (*angle of attack*). Sumbu X menggambarkan sudut serang sedangkan sumbu Y menggambarkan koefisien angkat yang terjadi. Kecepatan angin diberikan mulai 15 m/s, 25 m/s dan 40 m/s.



Gambar 18. Koefisien gaya angkat (C_L)

Koefisien gaya hambat (C_D)

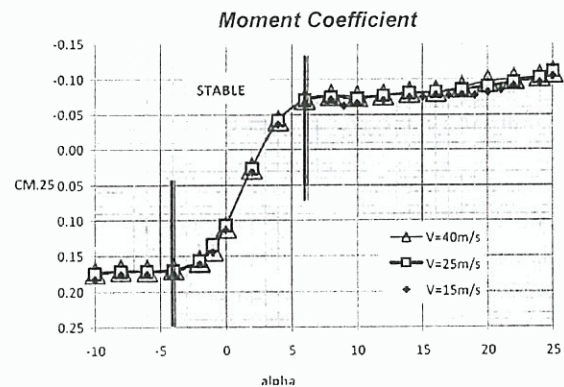
Pada Gambar 19 ditunjukkan besaran gaya hambat (seret) aerodinamika/*drag coefficient* (C_D), dan perubahannya terhadap sudut serang (*angle of attack*). Sumbu X menggambarkan sudut serang sedangkan sumbu Y menggambarkan koefisien seret yang terjadi. Kecepatan angin diberikan mulai 15 m/s, 25 m/s dan 40 m/s.



Gambar 19. Koefisien gaya hambat (C_D)

Koefisien Momen (C_m)

Kestabilan aerodinamika bisa dilihat dari grafik $dC_m/d\alpha$. Gambar 20 menunjukkan besaran kestabilan aerodinamika/*moment coefficient* (C_m), dan perubahannya terhadap sudut serang (*angle of attack*). Sumbu X menggambarkan sudut serang sedangkan sumbu Y menggambarkan koefisien kestabilan momen yang terjadi. Kecepatan angin diberikan mulai 15 m/s, 25 m/s dan 40 m/s.

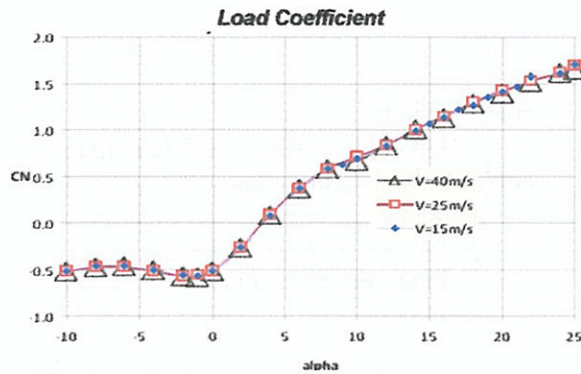


Gambar 20. Koefisien momen (C_m)

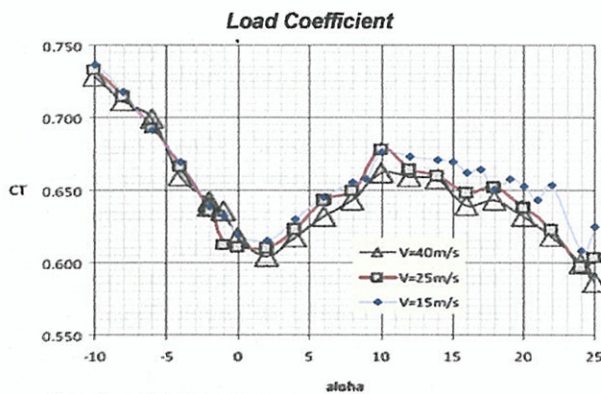
Koefisien Beban (C_N , C_T)

Pada Gambar 21 dan Gambar 22, ditunjukkan. Besaran beban (*load*) karena angin per satuan panjang jembatan.

Sumbu X menggambarkan sudut serang sedangkan sumbu Y menggambarkan koefisien beban normal (C_N) dan koefisien beban tangensial (C_T) yang terjadi. Kecepatan angin diberikan mulai 15 m/s, 25 m/s dan 40 m/s.



Gambar 21. Koefisien beban (C_N)



Gambar 22. Koefisien beban (C_T)

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pembahasan terhadap hasil pengujian terowongan angin dengan berbagai sudut serang dan kecepatan angin disajikan dalam paragraf berikut.

Visualisasi Aliran Udara

Oil Fluorescence Film

Pada Gambar 9 sampai Gambar 14 di atas menunjukkan bahwa kecepatan makin tinggi menunjukkan batas *separation line*

terlihat makin jelas, dan terbentuknya pola aliran lebih cepat terbentuk. Selain itu terlihat adanya perubahan kekuatan *vortex* pada batas model dan dinding.

Tufts

Kibaran benang (*tufts*) pada sisi bagian bawah jembatan bisa dilihat pada Gambar 14 sampai Gambar 16 di atas, dimana pada sudut serang yang lebih tinggi, maka *separation area* di bagian bawah jembatan makin ke depan (bekerja terbalik di bandingkan bagian atas jembatan).

Meskipun dari pengukuran *external balance* tidak terlihat perbedaan gaya yang signifikan, hasil visualisasi dengan *tuft* menunjukkan kejelasan daerah *separation area* yang tidak hanya sebatas pada aliran permukaan, namun juga di atas permukaan yang ditunjukkan dengan kibaran benang (terlihat dari video).

Koefisien gaya angkat (C_L)

Gambar 18 memperlihatkan bahwa kondisi angin dengan sudut serang < 5 derajat, mengalami *negative lift*, yang ditunjukkan oleh koefisien C_L bernilai negatif, artinya angin menambah beban ke bawah (searah dengan beban berat) dan berangsur menjadi *positive lift* (terangkat) pada sudut serang > 5 derajat.

Permasalahan lain adalah, bahwa lokasi *negative stall* terjadi pada sudut serang (α) sekitar 0 derajat, artinya problem ketidak linearan secara aerodinamika terjadi pada arah angin horizontal. Dengan kecepatan udara 15 m/s hingga 50 m/s, relatif tidak merubah besaran koefisien *lift*.

Koefisien gaya hambat (C_D)

Gambar 18 menunjukkan besaran aerodinamika *drag*, dimana minimum *drag* terjadi pada sudut 2 derajat. Besaran *induced drag*, atau *drag akibat* penambahan lift relatif kecil. Selain itu, pada kecepatan lebih rendah data lebih berfluktuasi. Hal tersebut bisa dipahami karena dominasi *massive separation*.

Koefisien Momen (C_m)

Kestabilan aerodinamika bisa dilihat dari grafik $dC_m/d\alpha$. Gambar 19 memperlihatkan bahwa dengan sudut serang besar maka bersifat inherent, dimana daerah stabil adalah pada sudut serang $-4 < \alpha < 6$ derajat.

Koefisien Beban (C_N, C_T)

Untuk mengetahui beban yang terjadi pada jembatan, maka perlu dikaji besaran C_N dan C_T , yang menggunakan *body-axis*, sesuai dengan koordinat umum desain struktur sipil, seperti pada Gambar 20 dan Gambar 21. Sebagai contoh, besaran beban normal (*Normal load*) karena angin per satuan panjang jembatan dengan bentuk jembatan sebagaimana model dapat dihitung sebagai berikut :

$$L_N = 0,6V_0^2 C_N \quad \text{N/m} \quad (4)$$

keterangan :

L_N : besaran beban akibat terpaan angin (N/m)

C_N : koefisien aerodinamika arah normal

V_0 : kecepatan udara bebas (*free stream*) yang tidak terganggu oleh model dan dinding seksi uji (m/s^2)

Jika lebar jembatan Pusjatan Palibaja adalah 3.0 m dan terkena angin 35 m/detik dari samping dengan arah ($\alpha = 0$) dan panjang jembatan 120 m maka beban akibat angin dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 2 Gaya pada jembatan akibat terpaan angin

Arah Gaya	Gaya/panjang (N/m)	Gaya (L = 120 m) (kN)
F Normal	2250	270.0
F Tangensial	2325	279.0

KESIMPULAN DAN SARAN

Secara umum tujuan pengujian telah terpenuhi. Pengujian pengukuran gaya dan momen memberikan penjelasan mengenai gaya yang bekerja pada jembatan. Pengujian

dilakukan dengan variasi arah dan kecepatan udara yang disimulasikan sebagai fungsi *angle of attack* (sudut serang), kecepatan udara dan similaritas bilangan Reynolds. Pada analisis ini telah ditunjukkan daerah yang mengalami aliran yang menempel (*attached flow*) dan separasi (*separated flow*), serta sifat kestabilan beban aerodinamika pada jembatan. Hasil-hasil yang diperoleh bisa digunakan untuk dasar pemahaman dan perhitungan beban aerodinamika pada uji statis dari potongan model.

Kesimpulan

Beberapa sifat aerodinamika pada jembatan bisa disimpulkan sebagai berikut :

1. Pemahaman fisis seperti pola aliran udara, parameter aerodinamika (C_L, C_D, C_N, C_T) terlihat dengan jelas berdasarkan hasil pengujian.
2. Pada kondisi angin dengan sudut serang $\leq 5^\circ$, mengalami *negative lift*, artinya angin menambah beban ke bawah (searah dengan beban berat) dan berangsur menjadi *positive lift* (terangkat) pada sudut serang $> 5^\circ$.
3. *Massive separated flow* mendominasi karakteristik aliran udara pada jembatan, namun demikian scale turbulensi masih dalam orde kesimilarityan pada skala turbulensi, sehingga kecepatan udara yang mewakili rentang bilangan *Reynolds* (Re) = 2.5 s/d 7.10×10^5 tidak menunjukkan perubahan yang signifikan secara kuantitatif.
4. Pada sudut serang ($\alpha = -1$) derajat merupakan α *negative stall*, terdapat indikasi *stall* di $\alpha = 8$ derajat, namun pada α hingga di atas 26 derajat tidak menunjukkan penurunan *lift*.
5. Secara aerodinamika, antara sudut serang $-1 < \alpha < 8$ derajat merupakan daerah linear α *slope* dan ditunjukkan sebagai daerah stabil. Di luar daerah tersebut bersifat *indeferent*.

Saran

Berdasarkan hasil pengujian di atas terdapat saran berupa usulan studi lanjutan yang meliputi :

1. Mengingat pada kondisi angin dengan sudut serang $\leq 5^\circ$ mengalami *negative lift* maka diperlukan adanya analisis tambahan terhadap beban angin pada jembatan.
2. Diperlukan pengujian *wind tunnel* 2 dimensi *unsteady* diperlukan untuk menjawab permasalahan dinamis jembatan akibat terpaan angin.
3. Untuk keperluan evaluasi lebih mendalam terhadap perilaku aerodinamika diperlukan adanya :
 - Perlunya penandaan *gridding separation line* pada model
 - Analisis perhitungan dengan CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk membantu perhitungan interpolasi data pengukuran tekanan yang jumlahnya sangat terbatas serta meningkatkan pemahaman aliran aerodinamika. Analisis kemudian dibandingkan dengan perhitungan besarnya gaya berdasarkan pengukuran tekanan.
4. Untuk pengujian dinamis dengan model penuh, maka kekakuan sistem struktur termasuk kabel harus dimodelkan dan diperhitungkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alan Pope, William H Rae, 1984, *Low Speed Wind Tunnel Testing*, Second Edition, New York.
- Badan Penelitian dan Pengembangan, 2005. *RSNI Standar Pembebanan Jembatan*. Jakarta, Departemen Pekerjaan Umum.
- British Standard BD 49/01, 2001, *Design Rules for Aerodynamic Effects on Bridges*.
- Diana, G., Falco, M., Chels, F. and Cigada, A., 2003, *The Aeroelastic Study of the Messina Straits Bridge*, Natural Hazards 30, Kluwe Academic Publisher, Netherland, pp. 79 – 106.

- Fok Chin Hong, 2006, *Aerodynamics Characteristics of Long-span Twin-deck Bridges*, M.Phil Theses, The Hong Kong University of Science and Technology, diakses di <http://lbr.xml.ust.hk/th/th_search.pl?smode=VIEWBYCALLNUM&keywords=CIVL%202006%20FOK> (diakses pada tanggal 11 Februari 2010).
- Hardono, S., 2009. *Kajian dan Pengawasan Uji Coba Skala Penuh Jembatan Cable Stayed Untuk Pejalan Kaki Tahap III*, Laporan Penelitian. Bandung : Pusjatan.
- Larose, Guy L., 2002, *The Dynamic Action of Gusty Winds on Long Span Bridges*, Ph.D Thesis, Danmarks Tekniske Universitet.
- Mahmood, Muzafferuddin, 2011, *Flow Visualization in Wind Tunnel*, J. C. Lemer and U. Boldes (Eds.), *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*, pp. 99 – 114, Rijeka, Croatia, Intech.
- Podolny, W.Jr., 1999, *Cable-Suspended Bridges dalam Structural Steel Designer's Handbook*. Brockenbrough, R.L., editor, Merritt, F.S., editor, New York, McGraw-Hill, Inc., 3rd Edition
- Ristic, Slavica, 2007, *Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnel Part I – Non Optical Methods*, Scientific Technical Review, Vol. LVII, No. 1, Military Technical Institute, Belgrade, Serbia, pp. 39 – 50.
- Walther, R., Houriet, B., Isler, P., Moïa, P., dan Klein, J.P., 1999, *Cable-Stayed Bridges*. London, Thomas Telford, 2nd Edition