

# KAJIAN INTERAKSI TURBULENSI ANGIN DENGAN GETARAN INDUKSI VORTEX DEK JEMBATAN BENTANG PANJANG

## INTERACTION STUDY BETWEEN WIND TURBULENCE AND VORTEX INDUCED VIBRATION OF A LONG SPAN BRIDGE DECK

Fariduzzaman<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Balai Besar Teknologi Aerodinamika, Aeroelastika dan Aeroakustika (BBTA3)  
(National Laboratory for Aerodynamics, Aeroelastics and Aeroacoustics Technology)  
Kawasan PUSPIPTEK Ged 240, Setu, Tangerang Selatan-15314, INDONESIA

---

### Abstract

Wind over earth's surface is naturally turbulent, where the contour of it has direct influence to this flow structure of earth surface. During their life, long span bridges structure will experience various *turbulence level* of wind flow. It depends on location, whether in urban, suburban, seashore or bypass a strait.

An experiment of a bridge model in LMWT (LAGG Mini Wind Tunnel) has been carried out, to study the effect of wind turbulence on a shape of deck that frequently used in Indonesia. The turbulence intensity ( $I_u$ ) applied was coming from a turbulence generator.

The experimental results has shown that the wind turbulence will cause an irregular (random) oscillation on the deck. At low turbulence, that is  $I_u$  less than 13%, Vortex Induced Vibration (VIV) clearly observed. However as Turbulence Intensity was increased the VIV occurrence is also gradually disappear, covered by those random oscillation of the deck.

Keywords: long span bridge, vortex induced vibration, wind turbulence, wind tunnel, deck oscillation

### Abstrak

Aliran angin di atas permukaan bumi adalah aliran yang selalu turbulen, dimana kontur permukaan bumi sangat berpengaruh langsung pada aliran permukaan bumi ini. Suatu struktur jembatan bentang panjang akan dilalui angin dengan tingkat turbulensi yang bervariasi, tergantung pada lokasi jembatan apakah di perkotaan, pedesaan, tepi pantai atau melintasi selat.

Suatu eksperimen menggunakan terowongan angin LMWT (LAGG Mini Wind Tunnel), telah dilakukan untuk mengkaji efek turbulensi angin pada bentuk dek yang paling sering digunakan di Indonesia. Tingkat turbulensi ( $I_u$ ) aliran pada dasarnya dipengaruhi oleh generator turbulen.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa turbulensi angin mengakibatkan osilasi dek yang tak teratur (*random*). Pada  $I_u$  rendah, Getaran Induksi Vortex (GIV) jelas terlihat, namun semakin tinggi  $I_u$  semakin hilang tanda adanya GIV, tertutupi oleh osilasi dek yang *random*.

Katakunci: jembatan bentang panjang, getaran induksi vortex, turbulen angin, terowongan angin, osilasi dek

---

## I. PENDAHULUAN

GIV adalah salah satu masalah struktur yang mungkin terjadi pada jembatan bentang panjang. Struktur beresiliasi dengan amplitudo tinggi pada kecepatan angin dan jangka waktu tertentu, dan kembali tenang pada kecepatan angin lebih rendah atau lebih tinggi.

Pada kecepatan angin dimana terjadi osilasi amplitudo tinggi ( $U_{GIV}$ ), fenomena resonansi terjadi, dimana frekuensi eksitasi (vortex) mendekati atau sama dengan frekuensi natural dari struktur, dalam hal ini adalah fluktuasi vortex di belakang struktur (*primary vortex*). Sumber getaran luar selain osilasi vortex yang juga dapat menyebabkan resonansi pada struktur, antara lain: gempa, kendaraan dan sebagainya. *Secondary vortex* yang terjadi akibat separasi aliran di *railing*, *separator* atau tepi dek yang tajam, juga bisa menimbulkan resonansi, hanya resonansi ini terjadi di modus *heaving* dan kecepatan angin rendah, disebut dengan LSHR (*Low wind Speed Heaving Resonance*).

Jembatan bentang panjang biasa dibangun di berbagai keadaan lokasi permukaan bumi, seperti di pusat perkotaan, di pedesaan, di tepi pantai, atau

---

\* Corresponding Author. Tel: +62-021-7560902  
E-mail: fariduzzaman@bppt.go.id

bahkan diatas lautan yang berupa selat. Di perkotaan adalah yang paling tinggi intensitas turbulensi-nya ( $I_u$ ), sedangkan di permukaan luas yang jauh dari pepohonan atau gedung yang mengganggu aliran permukaan, maka  $I_u$  akan rendah.

Di alam, *terrain* permukaan bumi, adalah generator aliran turbulence yang sebenarnya. Karena itu hampir tidak mungkin ada aliran permukaan bumi yang bebas turbulensi, atau  $I_u = 0$ . Sejumlah kecil intensitas turbulen pasti ada pada aliran angin permukaan bumi [1], [5].

## II. METODA DAN EKSPERIMEN

Dalam kajian ini, metoda yang digunakan adalah metodaeksperimendimana ada 4 komponen utama yang harus dipersiapkan. Untuk mendapatkan hasil pengukuran dan hasil kajian yang diharapkan, yakni:

- Terowongan Angin
- Generator Turbulen
- Model dan perangkat penyangganya (rig)
- Sistem Instrumentasi, Akuisisi dan Pengolahan Data

### A. Terowongan Angin

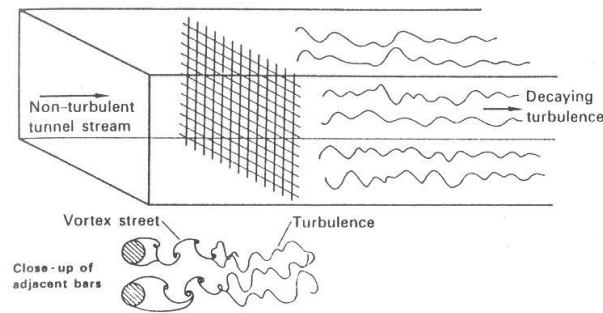
Eksperimen dilakukan dalam Terowongan Angin LMWT, yang memiliki seksi uji 0.3m x 0.3m dan dilengkapi dengan *rig* untuk uji model seksional dek jembatan. Rig-model dirancang sedemikian rupa sehingga posisinya dapat bervariasi (digeser) sesuai dengan yang dikehendaki. Dimana posisi ini akan terkait langsung dengan nilai intensitas turbulen tertentu.



Gambar 1. LAGG Mini Wind Tunnel (LMWT)

### B. Generator Turbulen

Di lingkungan alam sebenarnya, karakteristik turbulensi angin ditulis sebagai *Power Spectrum*, yang di-identifikasi melalui parameter Intensitas Turbulen ( $I_u$ ,  $I_v$ ,  $I_w$ ) dan Skala Turbulensi ( $L_{x,u}$ ,  $L_{x,v}$ ,  $L_{x,w}$ ). Untuk mendapatkan Intensitas Turbulensi  $I_u$ ,  $I_v$  dan  $I_w$  di terowongan angin, dapat digunakan *Static Grid Turbulence Generator*, yakni suatu konfigurasi batang-batang diameter  $d$  dan berjarak  $m$  yang membentuk grid. Proses terbentuknya aliran turbulen oleh generator adalah proses alami pencampuran vortex-vortex yang ukurannya menyusut terhadap jarak, sesuai dengan pergerakan aliran secara longitudinal, penyusutan ini akan sebanding dengan Intensitas Turbulenarahlongitudinal ( $I_u$ ) yang dihasilkan [2]. Kemudian *rig* model seksional dek ditempatkan pada ruangdimana terjadi penyusutan ukuran vortex tersebut, sehingga menerima aliran angindengan tingkat  $I_u$  yang dapat diatur.



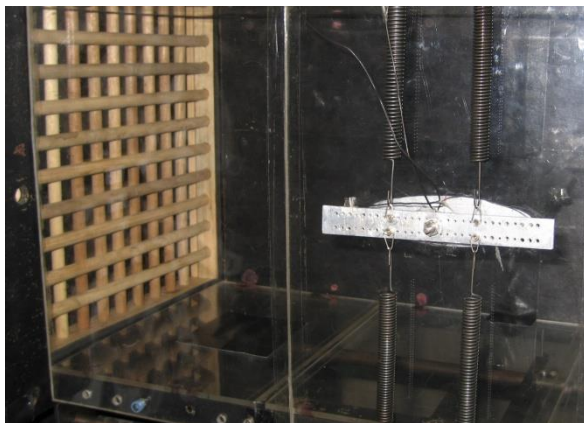
Gambar 2. Konsep Dasar bekerjanya Generator Turbulen [2]

Jika struktur grid di Generator Turbulen adalah simetris dan homogen, maka fluktuasi di arah  $y$  dan  $z$  pada dasarnya akan isotropis, jadi  $I_y = I_z$ . Namun untuk mengendalikan skala turbulensi dalam eksperimen terowongan angin, akan sulit jika dibangkitkan oleh batang-batang statik, atau disebut pula Generator Turbulen Statik (GTS). Pengaturan skala turbulensi hanya akan diperoleh dengan baik apabila digunakan Generator Turbulen Aktif (GTA).

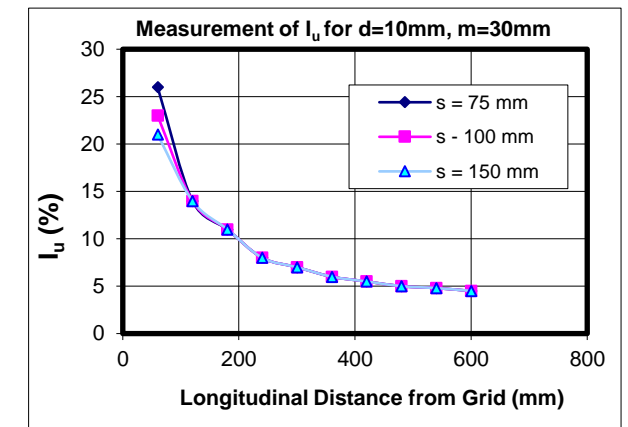
Mengingat ukuran seksi uji yang kecil, juga skala turbulensi tidak terlalu diperlukan maka kajian pada eksperimen ini hanya akan menggunakan Generator Turbulen Statik (GTS), dengan asumsi bahwa skala turbulensinya akan sedikit lebih kecil dari diameter batang yang digunakan. Untuk persiapan kajian, maka telah dilakukan survey 2 konfigurasi GTS:

- 1) GTS dengan diameter batang  $d=2\text{mm}$ , dan jarak antara  $m=10\text{mm}$ , diperoleh maksimum Intensitas Turbulen 4.8%.
- 2) GTS dengan diameter batang  $d=10\text{mm}$ , dan jarak antara  $m=30\text{mm}$ , diperoleh maksimum Intensitas Turbulen 14%.

Dari hasil observasi 2 konfigurasi GTS tersebut, maka pada eksperimen ini telah diputuskan untuk menggunakan GTS kedua, yakni dengan  $d=10\text{mm}$ ,  $m=30\text{mm}$ . Kemudian ditetapkan pula parameter  $s$  yakni jarak lateral pengukuran dari dinding seksi uji, dimana  $s=75$  adalah posisi yang terdekat ke dinding dan  $s=150\text{mm}$  adalah posisi ditengah-tengah seksi uji.



Gambar 3. Instalasi Generator Turbulen Statik Kedua ( $d=10\text{mm}$ ,  $m=30\text{mm}$ )



Gambar 4. Karakteristik Longitudinal  $I_u$  pada tiga posisi jarak lateral dari dinding

Tabel 1.  
Intensitas Turbulen ( $I_u$ ) dari GTS ( $d=10\text{mm}$ ,  $m=30\text{mm}$ )

X [mm]	$s=75\text{mm}$	$s=100\text{mm}$	$s=150\text{mm}$
	$I_u$ [%]	$I_u$ [%]	$I_u$ [%]
60	26	23	21
120	14	14	14
180	11	11	11
240	8	8	8

300	7	7	7
360	6	6	6
420	5.5	5.5	5.5
480	5	5	5
540	4.8	4.8	4.8
600	4.5	4.5	4.5

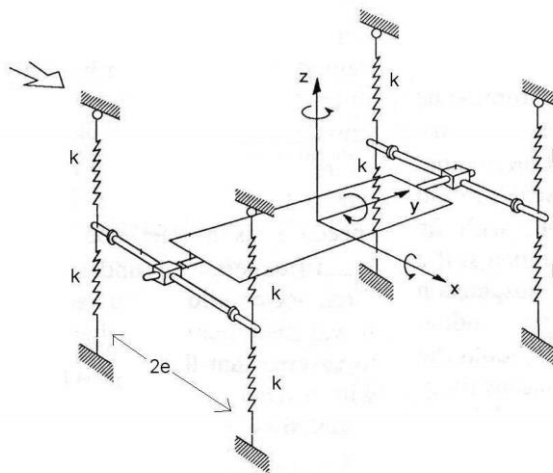
Dari Tabel 1, tampak bahwa pada jarak longitudinal  $x=60\text{mm}$ (dibelakang GTS) karakteristik turbulensi belum uniform. Sehingga posisi model baru dapat dipasang setelah fluktuasinya uniform, yakni pada jarak longitudinal  $x > 120\text{mm}$ .

### C. Model dan Penyangga (*Rig Model*)

Model seksional yang digunakan adalah replika potongan tertentu dari bagian tengah bentangan dek jembatan sebenarnya (aktual atau prototype). Tipikal dek jembatan sebenarnya yang dipilih adalah penampang dek dari jembatan bentang panjang yang banyak digunakan Indonesia. Maka sebagai rujukan pada studi ini, digunakan satu tipikal penampang dek Jembatan Suramadu. Rasio Frekuensi dek aktual Jembatan Suramadu adalah,

$$\frac{f_{hM}}{f_{\theta M}} = \frac{0.54}{0.39} = 1.4 \quad (1)$$

Subscript huruf kecil m menyatakan parameter model dan subscript huruf kapital M menyatakan parameter jembatan aktual. Dengan demikian kombinasi model dek jembatan dan suspensinya pada rig, harus pula memiliki rasio frekuensi yang setara dengan jembatan sebenarnya.



Gambar5. Rig Penyangga Model Dek [3]

Rig model terdiri atas 8 pegas dengan ukuran geometri dan koefisien kekakuan ( $k$ ) yang sama. Dengan rig seperti ini, dapat disimulasikan osilasi dek secara 2 dimensi: Gerak Vertikal *Bending* (*heaving*) dan gerak rotasional (*torsion*). Konfigurasi rig model memiliki parameter sebagai tertera di tabel berikut:

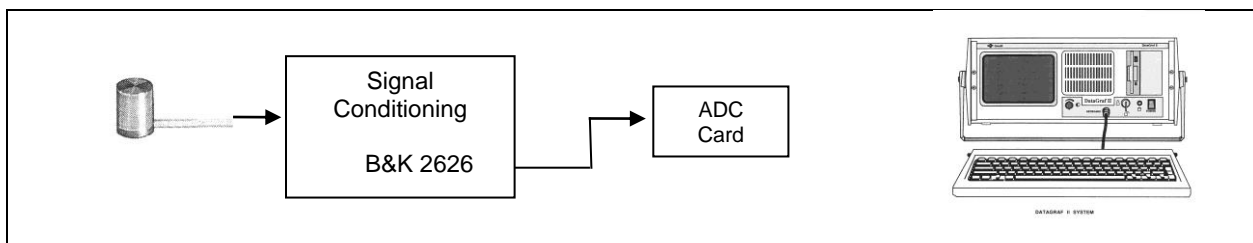
Tabel2.  
Parameter Tipikal Dek

Mass density:	$m=$	0.282	kg/m
Mass moment of inertia:	$I_{\theta}=$	$6.59 \times 10^{-4}$	kg.m
Gravity constant:	$G=$	9.8	m/s <sup>2</sup>
Spring constant:	$k=$	392	N/m
Spring spacing:	$s=$	0.06	m
Model width (chord):	$b=$	0.12	m
Moment arm:	$a=$	0.03	m

Data tersebut memberikan:  
 $\omega_h = 105 \text{ rad/s}$ , atau  $f_h = 16.78 \text{ Hz}$  dan  $\omega_{\theta} = 130.93 \text{ rad/s}$ , atau  $f_{\theta} = 20.84 \text{ Hz}$

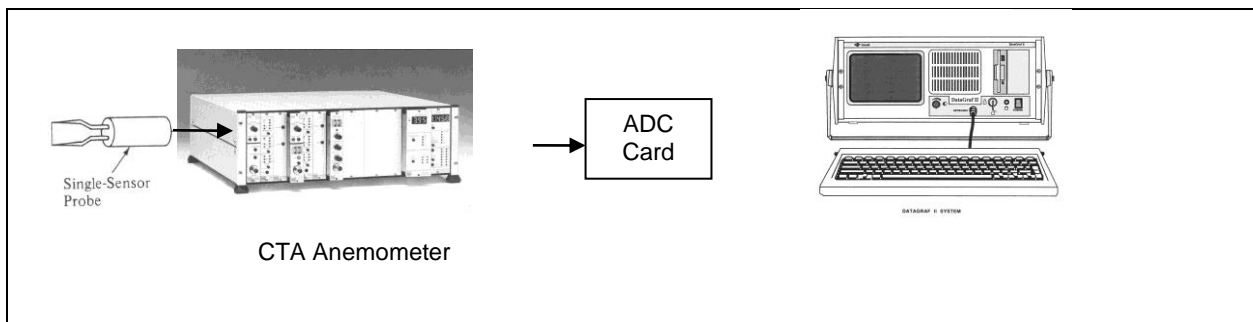
#### D. Sistem Instrumentasi, Akuisisi dan Pengolahan Data

Respon dinamik dari model diukur dengan miniature accelerometers [4], dalam hal ini telah digunakan B&K model AC4374 yang terhubung dengan *Signal Conditioning Unit* B&K model 2626. Kemudian data yang diperoleh diolah oleh software Gould Datagraph II. Gambar 6.berikut menunjukkan diagram Sistem Instrumentasi Data Dinamik yang digunakan.



Gambar 6. Sistem Akuisisi Respon Dinamik

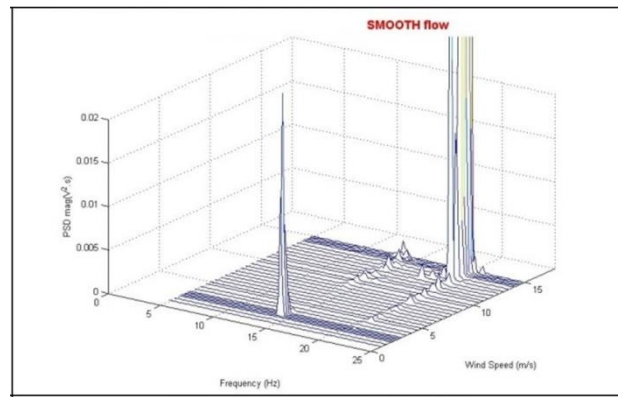
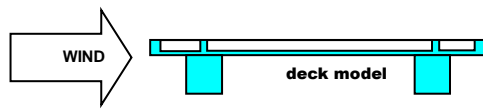
Untuk mendapatkan hasil pengukuran akselerasi yang akurat, accelerometer dikalibrasi terlebih dahulu dengan B&K *Calibration Exciter Type* 4294. Sedangkan Intensitas Turbulensi aliran dan Frekuensi Strouhal, diukur dengan sistem hotwire DANTEC DISA 5600 yang terhubung pula dengan GOULD Datagraf-II. Metoda *Impact Hammer* selanjutnya digunakan untuk pengukuran modal-nya.



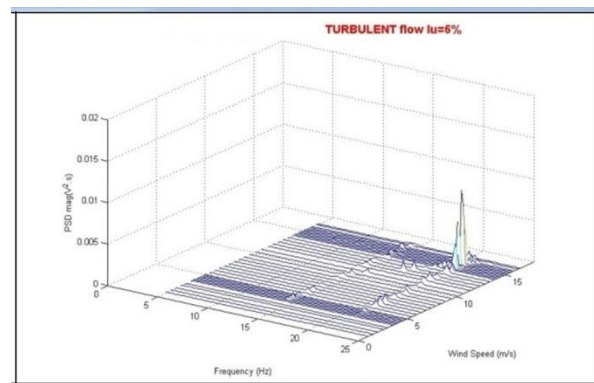
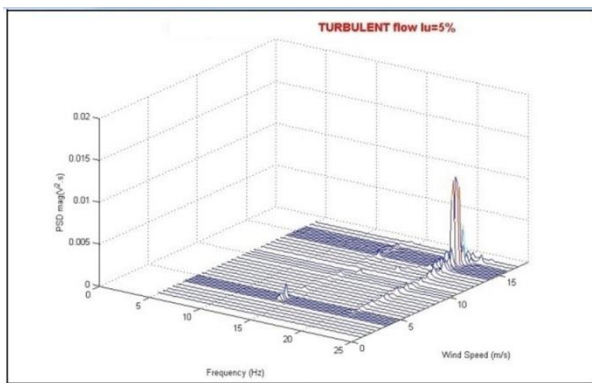
Gambar 7. Sistem Pengukuran Hotwire, DANTEC CTA 56C01

### III. HASIL DAN DISKUSI

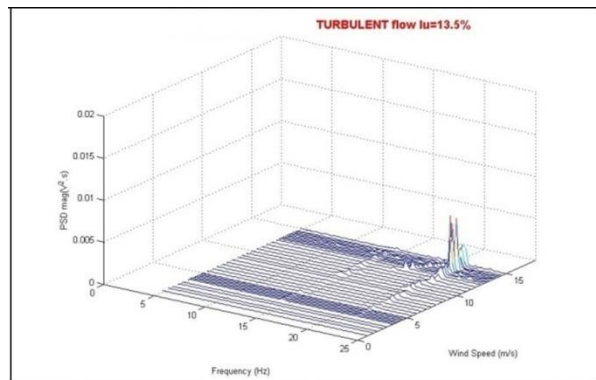
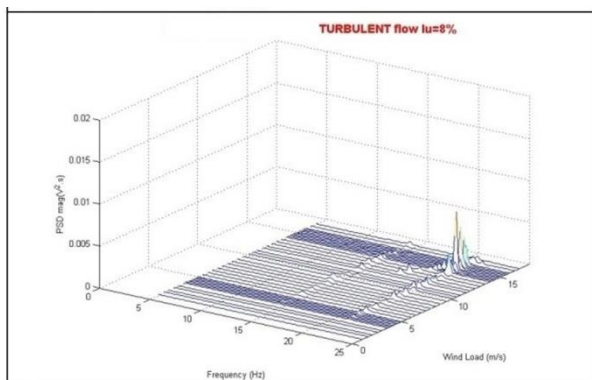
Hasil eksperimen ditampilkan dalam beberapa *plot waterfall* seperti ditunjukkan di gambar berikut. Sesuai dengan pengukuran modal, tampak bahwa struktur model dek memiliki 2 natural frekuensi yang dominan : Frekuensi natural gerak *vertical bending*,  $f_h = 16.78 \text{ Hz}$  dan Frekuensi natural gerak torsional,  $f_{\theta} = 16.78 \text{ Hz}$ .



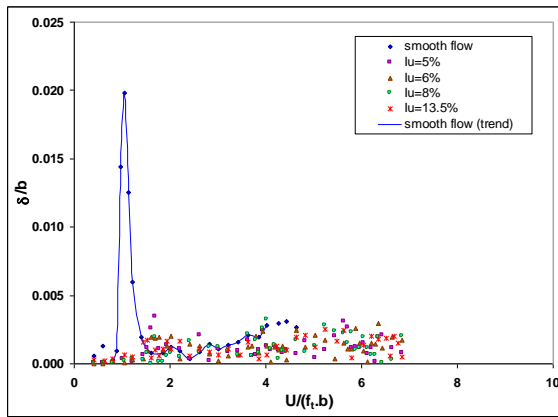
Gambar8. Penampang Model Dek Jembatan dan Respon Dinamik di Aliran Angin *Smooth*



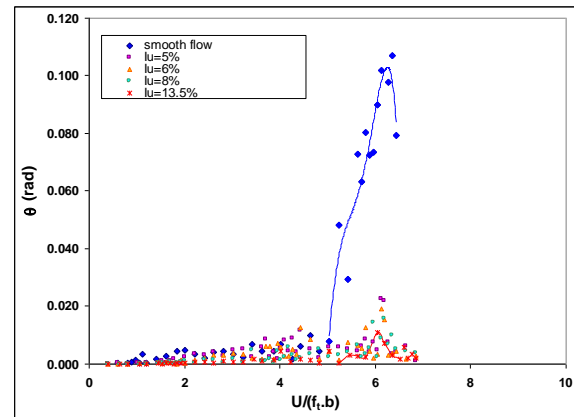
Gambar9. Penampang Dek Jembatan dan Karakteristik di aliran  $I_u = 5\%$  dan  $I_u = 6\%$



Gambar10. Penampang Dek Jembatan dan Karakteristik di aliran  $I_u = 8\%$  dan  $I_u = 13.5\%$



Gambar 11. Displacement Deck - modulus heaving



Gambar 12. Displacement Deck - modulus torsion

Gambar 8 sampai dengan Gambar 12 menunjukkan hasil eksperimen untuk tipikal dekyang dikaji. Pada aliran *smooth* (Gambar 8) dua fenomena resonansi ditemukan:

- Resonansi modulus *heaving* pada kecepatan angin rendah, *Low wind Speed Heaving Resonance (LSHR)*
- Resonansi modulus *heaving* dan *torsion* pada kecepatan angin lebih tinggi, yakni Getaran Induksi Vortex (GIV).

Perbedaan utama antara LSHR dan GIV dapat dilihat di Gambar 8 dan 9. Pada LSHR, amplitudo naik secara tiba-tiba di modulus *heaving* (lihat Gambar 8). Sedangkan GIV terjadi oleh adanya resonansi antara Frekuensi Natural Struktur dengan Frekuensi Strouhal (akibat fluktuasi vortex) yang bergeser dengan perubahan kecepatan angin, mulai dari resonansi *heaving* di frekuensi rendah menuju resonansi *torsion* di frekuensi tinggi (lihat Gambar 9).

Pengaruh aliran turbulen juga jelas tampak terlihat, bahwa pada aliran dengan tingkat turbulensi tinggi amplitudo osilasi LSHR tak terlihat. Sedangkan amplitudo GIV tidak menghilang namun ukurannya menurun dengan meningkatnya intensitas turbulen. Dapat dikatakan bahwa pada intensitas turbulen  $I_u = 13.5\%$ , amplitudo osilasi LSHR maupun GIV turun sampai 91% and 90%.

#### IV. KESIMPULAN

Hasil kajian eksperimen menunjukkan bahwa aliran turbulen sangat berpengaruh pada karakteristik osilasi Getaran Induksi Vortex (GIV), dimana aliran angin turbulensi dapat menekan terjadinya amplitudo osilasi yang besar. Pada aliran *smooth* ( $I_u < 3\%$ ), GIV muncul secara jelas, begitupula LSHR (*Low wind Speed Heaving Resonance*). Pada aliran turbulen sekalipun  $I_u = 5\%$  semua amplitudonya menurun, bahkan amplitudo LSHR tidak terlihat. Penurunan yang sangat berarti terjadi ketika  $I_u > 13\%$ .

Dengan demikian, aliran turbulen dapat digunakan untuk mengendalikan munculnya GIV di dek jembatan, termasuk lokasi pembangunannya. Untuk menghindari terjadinya GIV di dek jembatan bentang panjang, sebaiknya jembatan bentang panjang berada di lokasi yang aliran anginnya didominasi aliran turbulen. Dengan kata lain, ketika jembatan bentang panjang akan dibangun di daerah turbulensi tinggi, seperti di tengah kota, maka perencana tidak usah terlalu khawatir dengan timbulnya GIV. Namun yang perlu diwaspadai adalah pada saat aliran angin turbulensi rendah dan kecepatan angin rata-ratanya juga rendah, fenomena LSHR mungkin timbul secara tiba-tiba.

Disamping itu, dapat disimpulkan pula bahwa dalam eksperimen laboratorium, deteksi timbulnya induksi resonansi akan lebih akurat apabila digunakan aliran angin *smooth*, ketika terjadi osilasi LSHR maupun GIV amplitudonya akan tampak dengan tegas.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada jajaran pegawai UPT-LAGG BPPT yang mempermudah dan memberikan kesempatan atas terlaksananya kajian ini. Terutama pada Pa Subekti yang membuat rig-model dan Dr. –Ing. Surjatin Wiriadidjaja yang memberi izin penggunaan fasilitas.

**RUJUKAN**

- [1] Garde, R.J., *Turbulent Flow, 2<sup>nd</sup> edition*, New Age International (P) Limited, New Delhi, 2000
- [2] Derbunovich, G.I., Zenskaya, A.S., Repik, YE.U. and Sosedko, YU.P., *Optimum wire screens for control of turbulence in wind tunnels*
- [3] Fariduzzaman, L. Gunawan, L.R. Zuhail, A, Nasution (2004), Experimental Methods on Aeroelastic Bridge Analysis, *Proceedings International Seminar on Aerospace Technology 2003 ISBN: 979-97986-1-2*, Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta
- [4] Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1996), *Wind Effects on Structures*, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley and Sons Inc, New York, 448
- [5] Miyata, T., Historical View of Long-span Bridge Aerodynamics, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91 (2003) 1393-1410, Elsevier