

Studi Kelakuan Dinamis Struktur Jembatan Penyeberangan Orang (JPO) Akibat Beban Individual Manusia Bergerak

Endah Wahyuni

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, E-mail: endah@ce.its.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh beban manusia bergerak pada struktur JPO beton dan baja. Manusia sebagai beban dinamis sangat mempengaruhi dalam merencanakan jenis struktur tertentu, seperti stadion, lantai gedung olahraga, atau JPO. Apabila beban manusia tersebut tidak dipertimbangkan sebagai beban dinamis maka dapat menjadi penyebab kegagalan struktur. Dalam studi ini dilakukan pemilihan model beban akibat manusia bergerak dari literature yang ada. Dalam penelitian ini dibatasi hanya pada model beban manusia individu. Dengan menggunakan software SAP2000, pembebanan ini akan dihitung secara dinamis, sehingga akibat orang yang bergerak akan menghasilkan reaksi vertikal dan horisontal serta berubah terhadap waktu. Selanjutnya dilakukan pengujian nilai frekuensi alami dari jembatan yaitu pada uji kasus dilakukan JPO beton dan JPO baja di Surabaya. Untuk mode pertama, bentuk getaran dari struktur JPO beton didominasi oleh arah horizontal dengan frekuensi alami 2.75 Hz. Sedangkan untuk struktur JPO baja didominasi oleh arah vertikal dengan frekuensi alami 7.675 Hz. Kedua struktur memiliki nilai frekuensi alami yang memenuhi ketentuan British Standard dan diketahui pula bahwa tidak terjadi resonansi pada struktur JPO akibat beban manusia berjalan. Dengan adanya penelitian ini diharapkan kelakuan dinamis struktur jembatan penyeberangan orang akibat beban manusia yang bergerak bisa lebih dipahami.

Kata-kata Kunci: Beban hidup, manusia bergerak, dinamis, jembatan penyeberangan orang.

Abstract

This study aimed to investigate the effect of human-induced dynamic loads on steel and concrete footbridges. The dynamic loads would greatly affect to design of certain types of structures such as stadium, floor for dance or sport, or footbridge. If the kind of loads was not considered in the design as dynamic loads that could be the cause of structural failure. The model of the dynamic loads was found from the existing literature. The human loads were limited to individual model in this study. The dynamic responses of footbridge structures were investigated using SAP2000 and showed that the concrete bridge is less stiff than the steel bridge based on the natural frequencies. The results also showed that the first mode of the concrete footbridge was dominated by horizontal direction with the natural frequency of 2.75 Hz. While the first mode of the steel footbridge was dominated by the vertical direction with natural frequency of 7.675 Hz. Both structures had the natural frequencies which complied with the British Standard and also found that there was no resonance on both footbridges due to human-induced dynamic loads. From the acquisition of some of the above conclusions, it was expected that the dynamic behavior of the footbridge due to the human dynamic loads could be better understood.

Keywords: Live loads, walking loads, dynamics, footbridge.

1. Pendahuluan

Manusia sebagai beban hidup adalah sebagai makhluk yang bergerak, sehingga pada kondisi tertentu ketika sekumpulan manusia yang melakukan aktifitas seperti bersorak dengan irama tertentu, melakukan olah raga seperti senam, berjalan bersamaan dan berlari dengan kecepatan tertentu akan mengakibatkan terjadinya vibrasi pada struktur (Ellis, 2004; Brownjohn, 2007; Dallard et al, 2001).

Tata cara desain jembatan sudah diatur dalam Standar Nasional Indonesia (SNI-T-02-2005, BMS 1992), tetapi belum menyangkut pengaruh beban manusia berjalan pada jembatan penyeberangan orang. Dalam SNI dan BMS tersebut hanya diperhitungkan beban hidup sebagai beban statis, bukan merupakan beban dinamis. Padahal pengaruh terbesar pada jembatan penyeberangan tersebut adalah akibat manusia bergerak yang menghasilkan reaksi vertikal dan horizontal yang bisa menimbulkan vibrasi pada jembatan. Vibrasi tersebut dapat mengakibatkan kegagalan struktur. Melihat kondisi-kondisi yang pernah terjadi yaitu kegagalan

struktur akibat tidak memperhitungkan vibrasi tersebut, maka diperlukan adanya studi lebih lanjut tentang adanya beban dinamis dari manusia pada perencanaan Jembatan Penyeberangan Orang (JPO) di Indonesia. Makalah ini akan menyajikan pengaruh beban hidup manusia bergerak pada perencanaan jembatan penyeberangan orang, yaitu dengan mengkaji perilaku dinamis jembatan penyeberangan orang, mengetahui nilai frekuensi alami dan respon struktur dengan mengacu standar yang ada dan mengkaji perilaku jembatan penyeberangan orang yang mengalami vibrasi yang disebabkan oleh beban dinamis manusia tersebut.

2. Analisa Dinamis JPO

2.1 Beban dinamis

Vibrasi adalah getaran yang terjadi pada suatu struktur yang bergerak mengacu pada titik keseimbangan. Manusia akan menerima level tertentu dari vibrasi tergantung pada lingkungan dan aktifitas yang mereka lakukan. Umumnya, beberapa kriteria digunakan dalam mendesain berdasarkan tingkatan dari: a) frekuensi alami; b) karakteristik damping dan c) maksimum lendutan dan kecepatan yang terjadi. Manusia adalah sensor yang sensitif terhadap vibrasi. Setengah amplitudo dari 1.00 mm atau kecepatan 0.5% g akan mengganggu manusia di tempat yang sepi seperti di rumah atau kantor. Jika lingkungan menjadi ramai seperti di *shopping mall* atau di jembatan penyeberangan, maka toleransi menjadi naik. Ketika manusia melakukan aktifitas seperti dalam konser musik, berdansa atau aerobik, level toleransi akan naik lebih lanjut. Kesensitifan juga akan bervariasi tergantung waktu vibrasi dan jarak dari sumber vibrasi (Wyatt, 1989).

British Standard BS 5400 (BSI, 1978) adalah standard yang pertama kali memperhatikan kemungkinan masalah vibrasi pada jembatan. Ide ini kemudian banyak diadopsi di beberapa kode, dan tahun 1989, International Standardization Organization mengeluarkan standard ISO 2631-2 (1989) yang meliputi beberapa lingkup vibrasi pada bangunan termasuk untuk jembatan penyeberangan orang. Standard tersebut membatasi kecepatan untuk vibrasi-vibrasi sebagai fungsi waktu, dan frekuensi baik arah longitudinal maupun transversal dari manusia berdiri, duduk dan posisi tidur.

Ellis (2004) meneliti tentang beban kelompok meloncat dengan menggunakan analisis numerikal. Analisa ini didasarkan atas hasil eksperimen dari 64 orang yang meloncat secara kelompok dan individu. Model dasar dari beban berkelompok yang bergerak ini didasarkan atas asumsi bahwa beban tersebut merupakan beban harmonis yang merupakan perkalian dari beban individu dan tambahan dari faktor pembebanan dinamik yang diselesaikan dengan menggunakan analisa Fourier, yang

merupakan sebuah subjek yang mempelajari fungsi trigonometri yang lebih sederhana. Berdasarkan beban load individual dan eksperimen pada kelompok orang yang melakukan *jumping* diperoleh kesimpulan bahwa beban berkelompok bisa diaplikasikan sebagai model beban dinamis struktur.

Wahyuni (2009a) telah membahas tentang respon dinamik pada lantai komposit akibat beban manusia berjalan yang berupa kecepatan dan perpindahan. Respon dinamik lantai komposit tersebut dibandingkan antara hasil penggetesan dan teoritis. Respon dinamik pada balok beton bertulang di atas dua perletakan yang diakibatkan oleh beban manusia *jumping* (meloncat-loncat) dengan frekuensi lompatan tertentu juga dikaji pada Wahyuni (2007). Diketahui bahwa jenis loncatan dari orang yang diuji akan sangat mempengaruhi respon yang terjadi pada balok. Apakah seseorang meloncat dan kembali ke balok dengan tumitnya, ataukah dengan ujung jari, ataukah dengan telapak kaki, yang pertama kali menyentuh balok, akan memberikan perbedaan hasil. Setelah diteliti lebih lanjut diperoleh hasil yang memuaskan untuk mengetahui respon balok beton bertulang akibat manusia meloncat dan kemudian membandingkan dengan teori yang sudah ada.

Penelitian tentang response dinamis balok beton bertulang akibat beban manusia ini (Wahyuni, 2009b) menyimpulkan bahwa prediksi respon struktur dapat terjadi kesalahan yang fatal akibat kesalahan dalam mengartikan model struktur ataupun akibat input data yang tidak tertentu, bahkan hanya untuk balok di atas dua perletakan. Kesimpulan lain adalah dengan menggunakan bantuan hubungan antara kekakuan statis dan kekakuan modal, dan frekuensi alami terukur, maka respon struktur akibat beban manusia bergerak dapat diprediksi dengan akurat.

2.2 Getaran bebas

Sistem struktur akan mengalami getaran bebas jika sistem struktur tersebut mengalami gangguan dari posisi keseimbangan statiknya dan bergetar bebas tanpa adanya beban dinamik luar. Gangguan tersebut berupa peralihan lateral awal dan kecepatan awal.

Persamaan dinamik getaran bebas tanpa redaman adalah :

$$m \ddot{u} + k u = 0 \tag{1}$$

dimana: m adalah massa struktur; k adalah kekakuan lateral dan u adalah peralihan lateral. Karena struktur bergetar bebas, maka dalam persamaan di atas, pada suku sebelah kanan tidak ada gaya luar yang tergantung waktu yaitu $p(t)$. Solusi umum persamaan getaran bebas adalah :

$$\dot{u}(t) = -A \omega \sin \omega t + B \omega \cos \omega t \tag{2}$$

$$u(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t \tag{3}$$

Perpindahan awal berupa $u(0)$ pada saat $t=0$ dan kecepatan $\dot{u}(0)$ pada saat $t=0$. Dari persamaan di atas jika dimasukkan syarat awal, maka didapat koefisien A dan B yaitu

$$A = u(0), \quad B = \frac{\dot{u}(0)}{\omega} \quad (4)$$

sehingga respon getaran bebas adalah :

$$u(t) = u(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega} \sin \omega_n t \quad (5)$$

dimana
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \left[\frac{rad}{sec} \right] \quad (6)$$

Waktu yang diperlukan oleh sistem untuk melakukan satu kali getaran disebut periode getar alami, T_n dan berhubungan dengan frekuensi getar alami ω_n . Periode getar alami dinyatakan sebagai berikut :

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (7)$$

Jumlah getaran yang dilakukan setiap detiknya disebut frekuensi f_n (*natural cyclic frequency*), dinyatakan sebagai berikut :

$$f_n = \frac{1}{T_n} \left[\frac{Hz}{\frac{cyc}{sec}} \right] \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (8)$$

Properti getaran alami hanya tergantung dari massa dan kekakuan struktur. Untuk 2 buah sistem dengan massa yang sama tetapi berbeda kekakuannya, sistem dengan kekakuan yang lebih besar mempunyai frekuensi alami yang lebih besar dan periode getar lebih pendek. Jika 2 buah struktur dengan kekakuan yang sama tetapi berbeda massanya, sistem dengan massa lebih besar mempunyai frekuensi alami lebih kecil dan periode getar lebih panjang (Chopra, 2007).

2.3 Jembatan penyeberangan orang

Figueiredo et.al. (2008) mengembangkan model pembebanan yang akan mempengaruhi beban di JPO. Pengaruh dari tumit manusia ketika berjalan juga dimasukkan dalam model beban. Dilakukan studi dari beberapa jembatan penyeberangan orang dengan tipe komposit dengan panjang jembatan antara 10-35 meter.

Pembebanan pada jembatan penyeberangan orang akibat beban manusia merupakan beban harmonik. Beban harmonik ini didasarkan atas interaksi antara beban satu kaki ketika berjalan dan simultan dengan satu kaki lagi yang tidak membebani. Model beban dalam studi ini dinyatakan dalam bentuk matematis dimana amplitude terbesar adalah di tengah, dan frekuensi dimisalkan sama dengan frekuensi fundamental jembatan. Model pembebanan dinamis yang biasanya dimodelkan secara matematis dengan

Series Fourier (Ellis, 2004) kemungkinan tidak sesimple series tersebut, karena adanya pengaruh tumit manusia ketika berjalan sehingga ada waktu *transient* dari model pembebanannya. Pengaruh tumit manusia dalam model beban ini (Ellis, 2004) dibuat faktor 1.12, namun demikian perlu ditekankan bahwa nilai ini sangat terpengaruh atau berbeda antara satu orang dengan yang lainnya.

Model jembatan secara numerik dilakukan pada jembatan penyeberangan orang baja komposit dengan menggunakan program ANSYS (Figueiredo et.al., 2008). Pada model ini, girder baja dimodelkan sebagai balok tiga dimensi sedangkan slab beton dimodelkan sebagai elemen shell, dan dilakukan pula pemodelan sebagai struktur komposite antara beton dan baja tersebut. Pemodelan jembatan ini juga memperhatikan perbedaan eksentrisitas dari slab dan girder. Tiap node pada pemodelan ini mempunyai enam derajat kebebasan (DOF) dalam ruang. Analisa dinamis dilakukan pada pemodelan numerik jembatan yang mempunyai panjang berbeda. Untuk maksud perhitungan secara praktis, analisa linear time-domain dilakukan dalam studi ini. Respon dinamik dari jembatan penyeberangan orang tersebut ditentukan dari frekuensi alami, penurunan, kecepatan dan percepatan yang terjadi akibat beban manusia berjalan.

Figueiredo et.al. (2008) menyimpulkan bahwa standard (ISO, 1989) untuk mendesain jembatan penyeberangan orang menghasilkan nilai yang tidak aman karena mereka didasarkan atas penyederhanaan model beban. Dideteksi dari tipe jembatan ini dapat mencapai tingkat vibrasi yang tinggi yang berarti ketidak nyamanan dari pengguna jembatan dan terutama keselamatannya.

2.4 Beban individu manusia berjalan

Kelakuan dinamis struktur jembatan dapat dianalisa secara teoritis maupun numerik yaitu dengan melihat bagaimana struktur bergetar bebas yang disebut dengan *free vibration*. Dari perilaku struktur ini dapat diperkirakan kondisi yang terburuk yang mungkin dapat terjadi pada struktur jembatan akibat beban dinamis.

Model beban dinamis akibat manusia berjalan didapatkan dengan melakukan beberapa pengamatan dari hubungan manusia berjalan dengan struktur. Model beban manusia tersebut dibuat secara matematis sehingga bisa diterapkan dalam perhitungan analisa struktur jembatan. Pembebanan tersebut merupakan pembebanan secara dinamis, sehingga akibat orang yang berjalan akan menghasilkan reaksi vertikal dan horisontal dan yang berubah terhadap waktu.

Model beban manusia berjalan sebagai beban dinamis pada struktur yang didapatkan dari studi literatur dan penelitian terdahulu (Wahyuni, 2009b). Model beban dinamis manusia dapat berupa model individu dan kelompok. Pada Makalah ini hanya dibatasi akibat beban individu. Ellis (2004) telah memodelkan beban individu dengan persamaan

$$F(t) = G \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} r_n \sin(n\omega_p t + \phi_n) \right] \quad (9)$$

$$r_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \quad (10)$$

$$\omega_p = 2\pi f_p \quad (11)$$

Dimana :

F (t) = waktu variasi beban

G = berat individu

n = jumlah masa Fourier

m = koefisien Fourier (dinamis load factor)

Tp = periode beban siklik

φn = fase lag masa n

Beban tersebut dapat divariasikan dengan waktu, berat individu dan periode yang berbeda-beda. Program SAP2000 versi 14 akan digunakan sebagai alat bantu untuk menganalisa pembebanan manusia bergerak tersebut dengan metode *Time History*. Beberapa uji numerik dengan variasi tersebut yang akan dilakukan sehingga beban tersebut dapat digunakan dalam melakukan analisa perilaku dinamis struktur jembatan.

3. Data JPO

Konstruksi jembatan yang akan dievaluasi adalah konstruksi jembatan beton dan baja, dengan data sebagai berikut:

3.1 JPO beton

Panjang total : 22 m, terdiri dari 1 bentang.

Lebar total : 1.7 m

Mutu beton dan baja yang digunakan

- a. Kuat tekan beton (f_c') = 29 Mpa
- b. Kuat tekan beton untuk konstruksi sekunder (f_c') = 20 Mpa
- c. Mutu baja untuk tulangan digunakan baja mutu $f_y = 314$.



Gambar 1. JPO beton depan Citi Bank Basuki Rahmad

2.2 JPO baja

Panjang total : 26 m, terdiri dari 1 bentang.

Lebar total : 2.7 m

Mutu baja yang digunakan adalah baja mutu $f_y = 320$



Gambar 2. JPO baja depan Mac Donald's Basuki Rahmad

3. Pemodelan

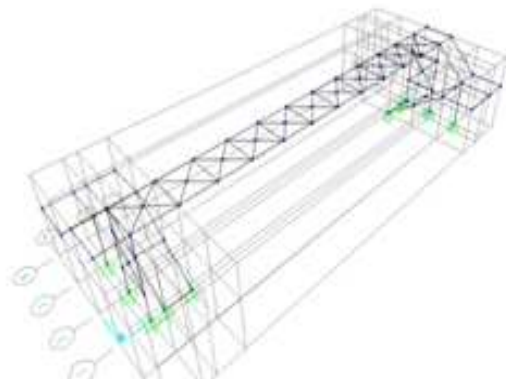
Jembatan penyeberangan orang (JPO) terbentuk dari beberapa komponen struktur yang memiliki fungsi yang berbeda. Elemen balok kolom menjadi struktur primer yang berfungsi menahan beban strukturnya sendiri dan beban luar, sedangkan struktur lain seperti pelat lantai dan brasing disebut struktur sekunder.

Program bantu SAP2000 memiliki beberapa tahapan kerja sama seperti program metode elemen hingga yang lain, yaitu pembuatan model geometri struktur yang pada kasus ini dibuat 3D (tiga dimensi), pemberian beban, pemberian asumsi perletakan, pemilihan tipe elemen (yaitu rangka untuk batang pengaku, kolom dan balok untuk elemen portal) dan melakukan 'running' analisa struktur. Elemen

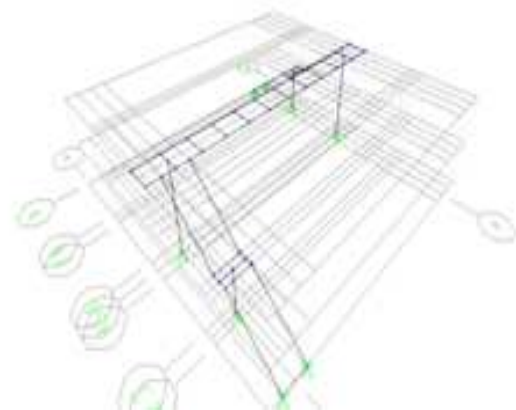
struktur dibentuk dari gabungan nodal-nodal, dimana pada penelitian ini penentuan elemen didasarkan dari kondisi nyata di lapangan. Dalam penelitian ini, analisa yang digunakan adalah *modal analysis* dan analisa linear. Analisa modal ini digunakan untuk mengetahui kondisi struktur tanpa pengaruh beban luar. Sedangkan analisa linear digunakan untuk melihat nilai gaya dalam dan reaksi yang timbul akibat beban yang dilakukan. Sedangkan gambar pemodelan kedua jembatan dapat dilihat pada **Gambar 3** dan **4**.

Setelah melakukan analisa struktur diperoleh gaya dalam (bidang M, N, D), reaksi perletakan dan analisa kekuatan struktur. Selain itu dari analisa struktur menggunakan program bantu SAP2000 dapat dilakukan cek kemampuan elemen-elemen struktur. Cek desain struktur ini memiliki 3 fungsi, yaitu:

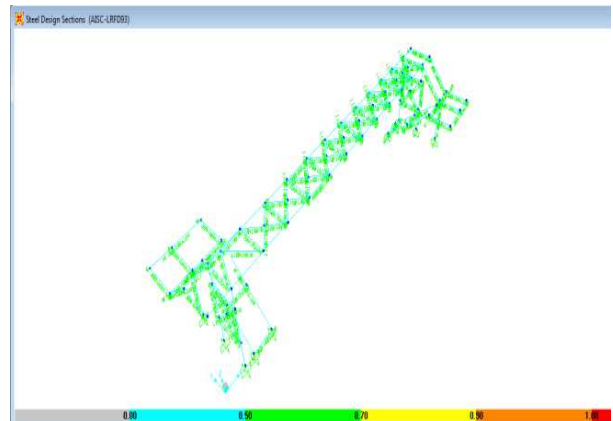
1. Mengetahui kekuatan profil baja dalam memikul beban luar dan tingkat keekonomisan penggunaan profil baja pada JPO baja. Bila elemen struktur tidak mampu menahan beban yang ada, maka akan diketahui.
2. Memperkirakan jumlah tulangan yang dibutuhkan untuk balok dan kolom pada JPO beton. Apabila dimensi elemen struktur rencana kurang besar, maka diketahui pula dari analisa ini



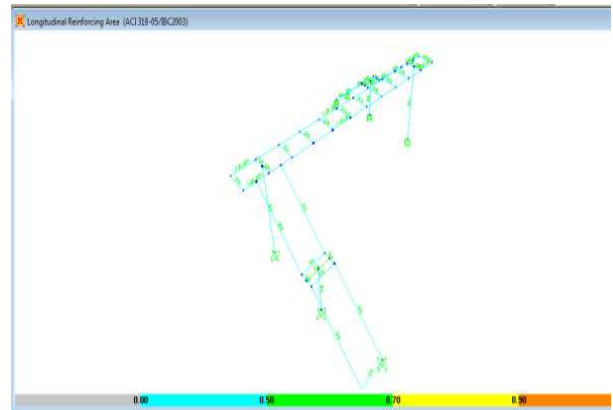
Gambar 3. Model gridline untuk JPO baja



Gambar 4. Model gridline untuk JPO beton



Gambar 5. Cek desain JPO baja



Gambar 6. Cek desain JPO beton

Gambar 5 menunjukkan hasil cek desain struktur baja dimana kekuatan profil baja ditunjukkan dengan warna yang mewakili interval nilai tertentu dari 0 s.d. 1. Nilai ini merupakan nilai perbandingan antara beban ultimate dari beban yang terjadi, dengan beban nominal yang mampu dipikul oleh profil baja. Dari analisa tersebut dapat disimpulkan bahwa profil baja setelah dicoba dengan ukuran elemen-elemen yang berbeda, diketahui bahwa profil yang direncanakan kuat memikul beban luar yang terjadi dengan nilai kurang dari 0.8.

Untuk JPO beton, SAP2000 tidak hanya berfungsi untuk merencanakan tulangan yang diperlukan oleh struktur tersebut. Namun dapat juga digunakan untuk mengecek kekuatan balok dan kolom beserta tulangannya seperti ditunjukkan pada **Gambar 6**. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dimensi elemen-elemen struktur pada JPO beton sudah memenuhi syarat, dimana tidak ada elemen yang mengalami *over stress*.

5. Analisa Dinamis Struktur

5.1 Natural frequency

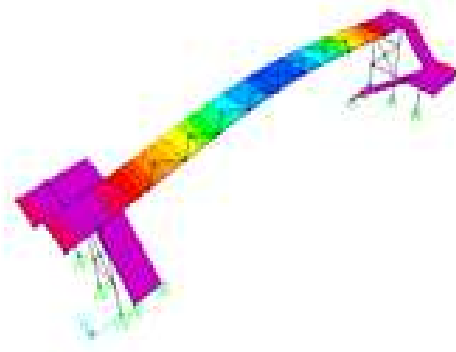
Modal analysis dapat digunakan untuk menentukan frekuensi alami (*natural frequency*) dan bentuk getaran (*mode shape*) dari suatu struktur. Frekuensi

alami struktur adalah frekuensi dari struktur yang secara alami cenderung untuk bergetar jika struktur ini terkena gangguan. Bentuk getaran dari sebuah struktur adalah bentuk lendutan struktur pada frekuensi yang spesifik, hal ini dapat didapatkan dengan melakukan *modal analysis* tersebut. Nilai frekuensi alami JPO bersama bentuk getarannya dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Nilai frekuensi alami ini dapat digunakan sebagai pedoman apakah suatu struktur akan mengalami resonansi atau tidak. Suatu struktur akan mengalami resonansi apabila nilai frekuensi beban yang diterima struktur mendekati atau sama dengan frekuensi alaminya. Biasanya, pada 3 atau 4 mode pertama yang dipertimbangkan berpotensi terjadi resonansi. Frekuensi alami pertama berkisar antara 3-4 Hz untuk getaran horizontal. Bila frekuensi alami pada jembatan dibawah 5 Hz maka struktur harus dicek pada kemampuan menerima getaran, seperti disebutkan pada British Standar (BSI, 2005).

5.2 Mode shape

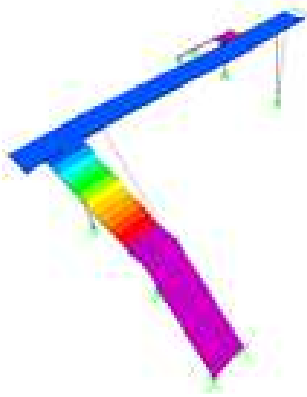
Pada umumnya sebuah struktur bisa memiliki 3 macam model getaran inti yaitu horizontal, torsi, dan vertikal. Dari modal analysis diperoleh fungsi bentuk pada tiap-tiap mode dari struktur yang dianalisis. Gambar mode 1 dari JPO beton dan baja dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **8** berurutan.



Gambar 8. Mode 1 JPO baja

Untuk mode satu pada struktur JPO beton didominasi oleh arah getaran horizontal, sedangkan untuk struktur JPO baja didominasi oleh arah getaran vertikal. Ini menunjukkan bahwa pada JPO beton apabila dikenai beban horizontal akan lebih terpengaruh dibanding dengan beban vertikal. Untuk itu perlu dicek apakah beban manusia bergerak akan menimbulkan beban horizontal yang cukup mempengaruhi kekuatan struktur. Sedangkan pada JPO baja, beban vertikal akan lebih berpengaruh dibanding beban horizontal, sehingga pengaruh berat sendiri dan beban gravitasi lainnya perlu diteliti lebih lanjut untuk mengetahui kemampuan strukturnya.

Gambar mode 2 dari JPO beton dan baja dapat dilihat pada **Gambar 9** dan **10** berurutan.



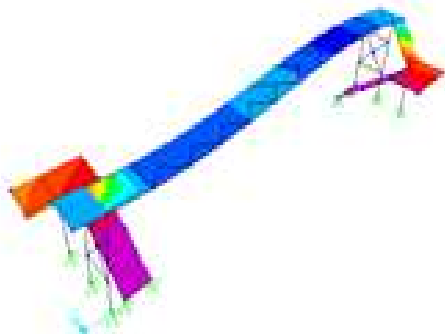
Gambar 7. Mode 1 JPO beton



Gambar 9. Mode 2 JPO beton

Tabel 1. Frekuensi alami JPO

Modes	JPO Beton		JPO Baja	
	Frekuensi Alami (Hz)	Bentuk Getaran	Frekuensi Alami (Hz)	Bentuk Getaran
1	2.75	Horisontal	7.675	Vertikal
2	5.18	Horisontal	10.31	Horisontal
3	10.62	Horisontal pd tangga	14.48	Horisontal pd tangga
4	12.19	Vertikal	16.91	Horisontal pd tangga
5	13.21	Torsi	18.27	Horisontal pd tangga
6	16.65	Vertikal	19.73	Horisontal pd tangga
7	24.30	Torsi pd tangga	22.36	Vertikal
8	27.84	Vertikal di ujung	36.65	Horisontal pd tangga
9	38.97	Torsi	55.71	Vertikal
10	60.93	Torsi	131.9	Torsi



Gambar 10. Mode 2 JPO baja

Untuk mode dua pada struktur JPO beton dan struktur JPO baja didominasi oleh arah getaran horizontal. Seperti yang disampaikan pada mode 1 di atas, maka dapat dikatakan bahwa beban horizontal akan lebih mempengaruhi struktur. Dari kedua mode tersebut dapat dikatakan bahwa perlu mempertimbangkan pengaruh beban manusia berjalan yang bisa menimbulkan getaran arah horizontal pada struktur JPO selain getaran vertikal

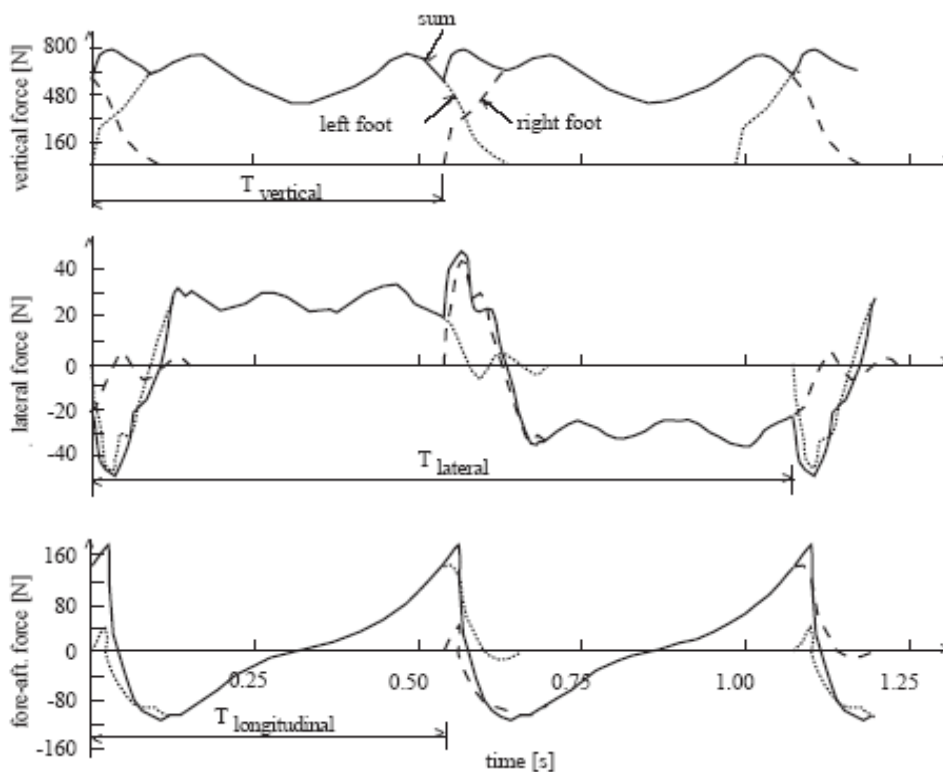
5.3 Beban manusia berjalan

5.3.1 Manusia sebagai sumber beban JPO

Untuk struktur jembatan penyeberangan orang (JPO), berjalan dan berlari adalah kegiatan yang paling berpengaruh terhadap JPO dibandingkan dengan kegiatan yang lain. Berjalan adalah kegiatan yang paling umum dipertimbangkan saat merencanakan

struktur JPO yang dipertimbangkan sebagai persyaratan gerakan tingkat menengah. Untuk menjelaskan macam dari gerakan manusia (Ellis, 2003) menjelaskan bahwa ada dua dasar yang diperlukan untuk menentukan karakteristik tindakan berjalan dan kekuatan dinamis yang dipengaruhi akibat berjalan: reaksi dari kekuatan yang berulang untuk mendukung badan seseorang dan perpindahan periodik masing-masing kaki dari satu titik hingga titik yang dituju. Hal ini melibatkan sebuah periode yang pendek ketika kedua kaki berada pada alas dan selama periode ini terjadi perpindahan dari tubuh seseorang kepada salah satu kakinya dan kaki yang lainnya.

Pengukuran pengaruh beban dinamis manusia telah dilaksanakan untuk mengetahui efek getaran pada struktur. Selama berjalan, manusia menghasilkan beban yang mengacu terhadap waktu yang dinamis menjadi 3 arah: vertikal, horizontal-lateral, dan horizontal-longitudinal (Brownjohn, 2007). Pengukuran langkah dari individu mempertimbangkan bahwa frekuensi dasar dari kekuatan pejalan kaki lateral dua kali lebih rendah dari arah vertikal dan longitudinal (Brownjohn, 2007), dengan bentuk umum dari kekuatan yang berkesinambungan dapat digambarkan apabila periode atau waktu tertentu dapat diasumsikan secara sempurna (Gambar 11).



Gambar 11. Periode berjalan time history arah vertical, lateral dan longitudinal

Frekuensi lompatan yang khas untuk berjalan adalah sekitar 2 langkah perdetik, yang mana memberikan frekuensi kekuatan vertikal sebesar 2Hz. Hal ini telah ditetapkan dengan berbagai percobaan, sebagai contoh oleh (Ellis, 2003) yang menyelidiki 505 orang. Ellis (2003) menyimpulkan bahwa frekuensi lompatan mengikuti suatu aliran normal sebesar 2 Hz dengan standar deviasi sebesar 0.173 Hz. Berjalan dengan lambat berada pada kisaran 1,4-1,7 Hz dan berjalan cepat berada pada kisaran 2,2-2,4 Hz. Ini berarti total dari cakupan frekuensi tekanan vertical adalah 1,4-3 Hz dengan diambil rata-rata sebesar 2 Hz. Sejak komponen dari tekanan vertikal diaplikasikan pada separuh frekuensi langkah, frekuensi tekanan lateral antara 0.71-1,2 Hz.

Wyatt (1989) melakukan penelitian dimana ketika manusia berjalan kaki pada suatu struktur tertentu, pejalan kaki menghasilkan beban dinamis lateral pada permukaan struktur. Walaupun diketahui secara luas bahwa manusia berjalan dengan frekuensi rata-rata sebesar 2 Hz, diketahui pula sekitar 10% dari beban vertikal bekerja lateral ketika seseorang berjalan. Tekanan ini merupakan suatu konsekuensi goyangan lateral dari pusat gravitasi tubuh manusia dan goyangan lateral merupakan konsekuensi dari perpindahan tubuh ketika seseorang melangkah menggunakan kaki kanan atau kaki kirinya. Amplitudo dari goyangan lateral secara umum antara 1-2 cm. Harus menjadi catatan bahwa parameter dari beban lateral belum terhitung dengan baik. Hanya sedikit pengukuran mengenai pentingnya beban lateral kaitannya dengan berjalan.

5.3.2 Pejalan kaki – pengaruh tindakan dan pemodelan relevan

Pejalan kaki mempengaruhi beban yang terjadi akibat adanya aktifitas pada struktur JPO, khususnya berjalan. Beban dalam kaitannya dengan berjalan dapat diwakili dengan suatu deret fourier. Fungsi tekanan dalam kaitannya dengan ritme tubuh seseorang dapat dijelaskan menggunakan suatu deret fourier sebagai berikut:

$$F(t) = G \left(1 + \sum_{n=1}^I r_n \sin(2nf_n \pi t) + \phi_n \right) \quad (12)$$

Dimana G = Beban mati dari pejalan kaki (800N), r_n = koefisien Fourier dari i-th yang harmoni, f_p = tingkat aktivitas 1/Tp (Hz), t = waktu (s), ϕ_n = sudut fase i-th, I = nomor dari i-th yang harmoni dan n = total nomor harmoni.

Pada **Tabel 2** nilai-nilai yang bersangkutan mengenai koefisien fourier dan sudut fase dijelaskan oleh El-Dardiry (2003) untuk menggambarkan aktifitas manusia berjalan normal.

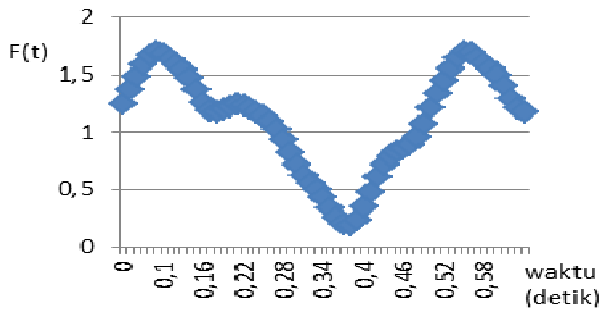
Tabel 2. Sepuluh koefisien fourier dan sudut fase pertama, beban berjalan normal (Tp = 0.465 s), El-Dardiry (2003)

N	r_n	$\phi_n =$
1	0.585731	19.91
2	0.168027	-17.53
3	0.097902	-45.06
4	0.0594	-76.72
5	0.034773	-87.68
6	0.021061	-93.15
7	0.013486	-96.26
8	0.009109	-98
9	0.006444	-98.85
10	0.00474	-99.06

Dengan memasukkan koefisien yang telah diketahui kedalam persamaan fourier, maka didapatkan nilai gaya, F(t) yang dihitung dengan menggunakan **Persamaan 12** untuk 0.6 detik pertama adalah ditunjukkan pada **Gambar 12**. Yang secara nilainya, dapat ditunjukkan pada **Tabel 3**. Grafik yang menunjukkan F(t) didasarkan pada fungsi waktu selama 0.6 detik tersebut yang dimasukkan dalam Sap2000 sebagai beban dinamis manusia berjalan.

Tabel 3. F(t) berdasarkan fungsi waktu

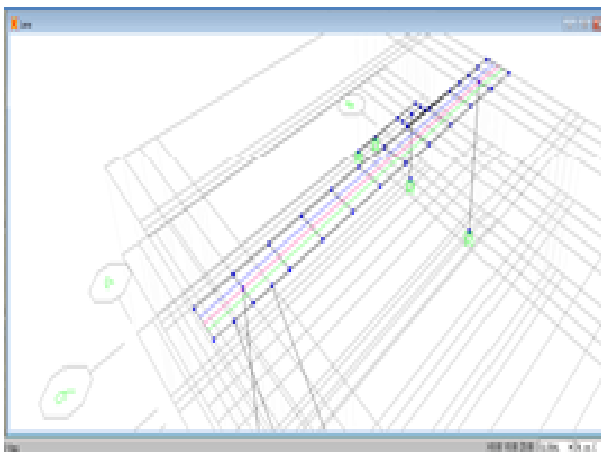
Time (s)	force	Time	force
0	1,251094	0.31	0,346618
0.01	1,37296	0.32	0,264861
0.02	1,484365	0.33	0,202043
0.03	1,589709	0.34	0,186862
0.04	1,67186	0.35	0,238327
0.05	1,703333	0.36	0,347978
0.06	1,68048	0.37	0,483858
0.07	1,632238	0.38	0,613166
0.08	1,58758	0.39	0,718102
0.09	1,54295	0.40	0,792485
0.10	1,472709	0.41	0,835468
0.11	1,369194	0.42	0,858017
0.12	1,261394	0.43	0,888955
0.13	1,190593	0.44	0,959178
0.14	1,173998	0.45	1,074011
0.15	1,195506	0.46	1,208503
0.16	1,225188	0.47	1,335135
0.17	1,24089	0.48	1,448892
0.18	1,23523	0.49	1,556849
0.19	1,212291	0.50	1,649673
0.20	1,181066	0.51	1,6997
0.21	1,146234	0.52	1,692475
0.22	1,100795	0.53	1,648365
0.23	1,030848	0.54	1,601094
0.24	0,931837	0.55	1,558925
0.25	0,818361	0.56	1,49946
0.26	0,713851	0.57	1,405174
0.27	0,630829	0.58	1,294005
0.28	0,563746	0.59	1,207649
0.29	0,499031	0.60	1,173889
0.30	0,427193		



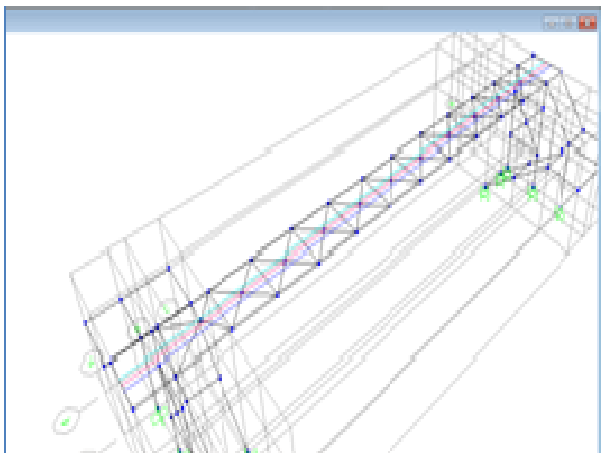
Gambar 12. $F(t)$ berdasarkan fungsi waktu 0.6 s

5.3.3 Beban manusia pada struktur JPO

Setelah mengetahui fungsi dari beban berjalan normal, dibuat pemodelan beban berjalan manusia dengan program bantu SAP2000. Dengan bantuan menu *Bridge-Vehicle*, beban manusia ditransformasikan menjadi beban terpusat yang berjalan dengan berat massa 800 N. Lalu, lintasan beban mulai dibuat dengan memanfaatkan lane pada menu *bridge*. Lintasan yang digunakan adalah ditengah bentang jembatan, mulai jarak 0 m – 22 m untuk JPO beton dan 0 m – 25 m untuk JPO baja seperti ditunjukkan pada Gambar 13 dan 14 secara berurutan.



Gambar 13. Lintasan pada JPO beton



Gambar 14. Lintasan pada JPO baja

Langkah selanjutnya setelah lintasan didefinisikan adalah menentukan *load pattern* untuk kedua struktur JPO. Beban yang digunakan adalah beban manusia dengan tipe *bridge live*. Waktu mulai beban pada detik ke 0. Jarak yang dibutuhkan untuk struktur JPO beton adalah 22 m. Sedangkan untuk struktur JPO baja membutuhkan jarak 25 m. Kecepatan orang berjalan normal adalah 1.39 m/s seperti yang diutarakan oleh El-Dardiry (2003). Sehingga waktu yang dibutuhkan oleh beban untuk sampai pada ujung lintasan adalah 15.8 detik untuk JPO beton dan 18 detik untuk JPO baja.

Setelah *load pattern* terdefinisi, langkah selanjutnya adalah menentukan *load case* yang akan dipakai. Dengan menggunakan tipe *load case time history*, fungsi beban yang dipakai adalah beban manusia yang telah didefinisikan dengan fungsi *time history* antara beban tekanan tubuh dengan waktu seperti tergambar pada Gambar 12 dengan $F(t)$ berdasarkan fungsi waktu 0.6 detik. Proses *running* mulai dilaksanakan setelah langkah-langkah di atas terpenuhi. Untuk proses *running*, hanya beban manusia dan beban mati yang digunakan

5.4 Deformed shapes

Setelah proses *running*, *deformed shapes* struktur JPO dapat diketahui menurut fungsi waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 15 sampai 22. Gambar tersebut menunjukkan deformasi yang terjadi pada struktur akibat beban dinamis manusia yang berjalan pada lintasan mulai dari 0 detik, di tengah bentang dan di ujung bentang jembatan.



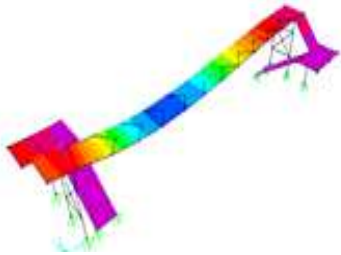
Gambar 15. Deformed shape JPO beton saat $t=0$ s



Gambar 16. Deformed shape JPO baja saat $t=0$ s



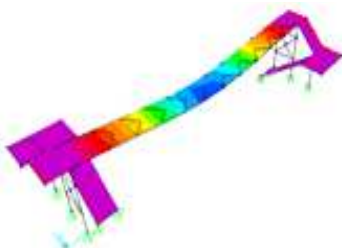
Gambar 17. Deformed shape JPO beton saat t= 3 s



Gambar 18. Deformed shape JPO baja saat t= 3 s



Gambar 19. Deformed shape JPO beton saat t= 8 s (tengah bentang)



Gambar 20. Deformed shape JPO baja saat t= 9 s (tengah bentang)



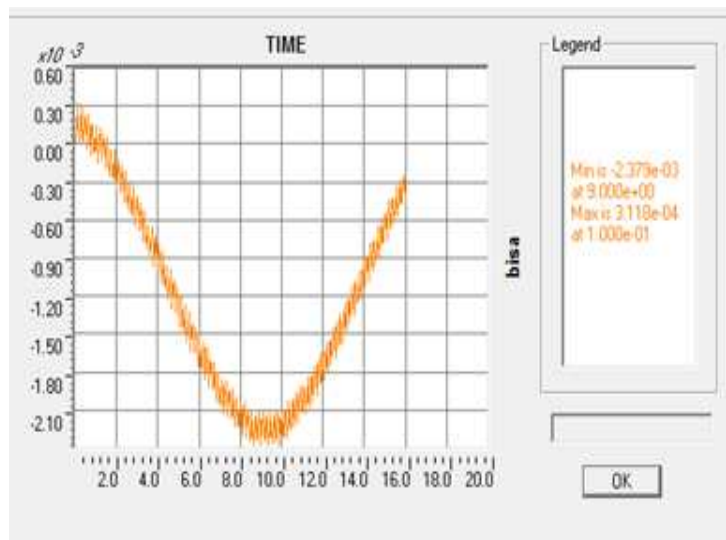
Gambar 21. Deformed shape JPO beton saat t= 18 s (ujung bentang)



Gambar 22. deformed shape JPO baja saat t= 18 s (ujung bentang)

Dari beberapa gambar di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa ketika beban berjalan saat waktu dan jarak tertentu, keseluruhan struktur mengalami deformasi. Namun deformasi terbesar terjadi di titik dimana beban sedang bekerja pada struktur yaitu pada tengah bentang.

Untuk mengetahui nilai perpindahan dari struktur JPO, dipakai titik di tengah bentang struktur sebagai acuannya seperti ditunjukkan pada **Gambar 23**. Didapatkan bahwa displacement maksimal untuk JPO baja sebesar 0.007915 mm pada waktu 1 detik dan displacement minimal sebesar -0.0377 mm pada waktu 8.8 detik.



Gambar 23. Perpindahan struktur JPO baja

Untuk tanda (+) menunjukkan bahwa perpindahan mengarah ke atas. sedangkan untuk tanda (-) menunjukkan bahwa perpindahan mengarah ke bawah. Begitu juga dengan struktur JPO beton seperti ditunjukkan pada **Gambar 24**

Didapatkan bahwa perpindahan maksimal untuk JPO beton sebesar 0.008432 mm pada waktu 1.5detik dan perpindahan minimal sebesar -0.0293 mm pada waktu 7.45 detik.

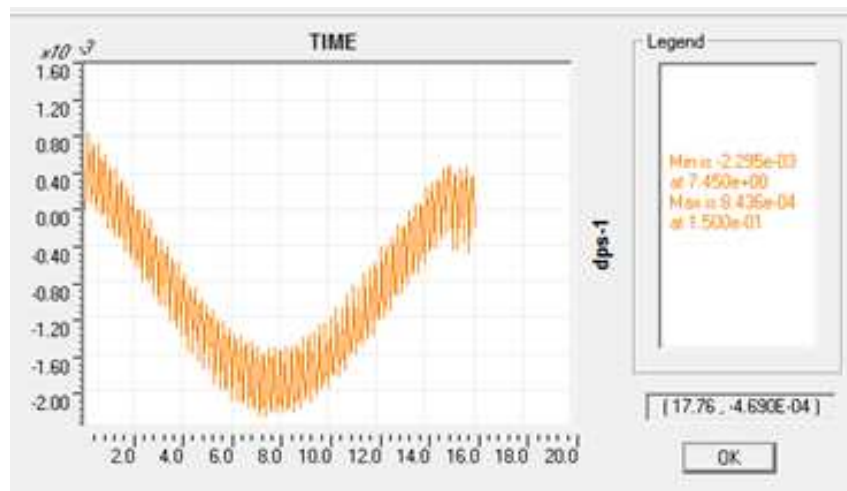
6.5 Frekuensi struktur JPO akibat beban dinamis manusia

Ketika struktur JPO menerima beban dinamis manusia, maka struktur tersebut akan mengalami getaran. Sehingga tiap tipe struktur akan memiliki frekuensi yang berbeda-beda menurut konstruksi struktur itu sendiri ketika menerima beban dinamis manusia (Piccardo dan Tubino, 2008).

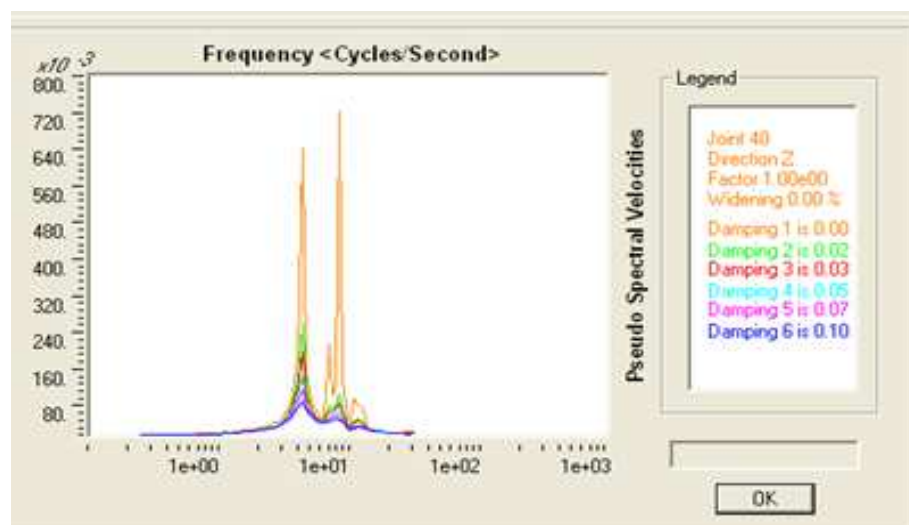
Beban yang berjalan akan memberikan frekuensi yang berbeda-beda di setiap titik yang ditinjau pada struktur. Hal ini dikarenakan ketika beban dinamis manusia berada di satu titik struktur jembatan, maka keseluruhan struktur jembatan akan memberikan respon getaran yang berbeda-beda di tiap segmen struktur tersebut.

Beban dinamis manusia akan dimodelkan berjalan tiap 2 m untuk JPO beton dan JPO baja, dan akan ditinjau nilai frekuensi dari struktur JPO tersebut. Salah satu grafik hasil pengambilan hasil frekuensi di tengah bentang pada JPO beton dan JPO baja dapat dilihat pada **Gambar 25** dan **26**.

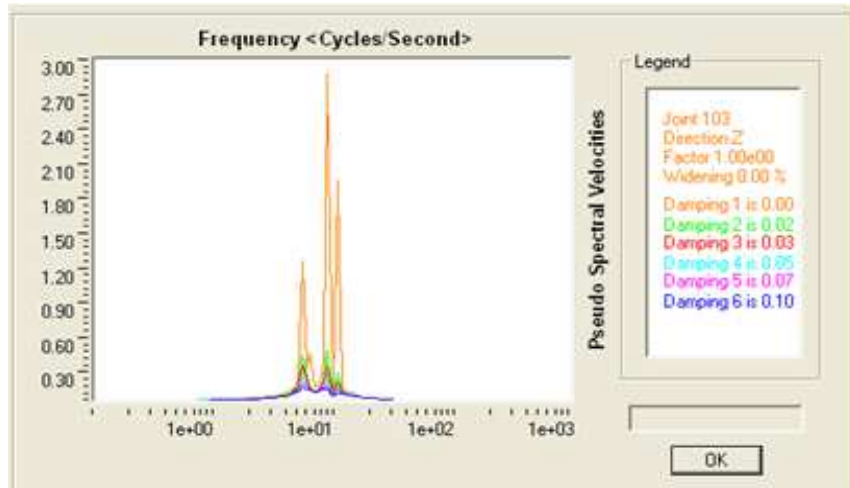
Frekuensi yang terjadi pada struktur JPO baja lebih besar dibandingkan frekuensi yang terjadi pada struktur JPO beton. Hal ini dikarenakan struktur JPO baja apabila terkena beban dinamis manusia akan lebih mudah bergetar bila dibandingkan dengan struktur JPO beton seperti ditunjukkan pada **Tabel 4**.



Gambar 24. Displacement struktur JPO beton



Gambar 25. Frekuensi JPO beton pada tengah bentang



Gambar 26. Frekuensi JPO baja pada tengah bentang

Tabel 4. Perbandingan nilai frekuensi struktur JPO akibat beban dinamis dengan frekuensi alami

Jarak (m)	Frekuensi (Hz)		Frekuensi Alami (Hz)	
	JPO Beton	JPO Baja	JPO Beton	JPO Baja
2	0.54	1.34		
4	0.39	2.71		
6	0.43	1.4		
8	0.56	2.2	2.75	7.675
10	0.75	2.25		
12,5		2.9		

Struktur JPO akan mengalami resonansi ketika frekuensi akibat beban dinamis manusia mendekati frekuensi alami dari struktur JPO tersebut. Apabila nilai perbandingan frekuensi struktur adalah (Litter, 2003):

$$\frac{f_{dinamis}}{f_{alami}} < 0.5 \text{ atau } \frac{f_{dinamis}}{f_{alami}} > 2$$

Maka struktur tidak mengalami resonansi. Dari Tabel 5 di atas dapat dilihat bahwa nilai perbandingan kedua frekuensi adalah kurang 0.5, sehingga kedua JPO tersebut tidak mengalami resonansi.

6. Kesimpulan

1. Pada mode pertama, struktur JPO beton didominasi oleh bentuk getaran horisontal, sedangkan struktur JPO baja didominasi oleh bentuk getaran vertikal. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur JPO beton sangat rentan terhadap beban horisontal, sedangkan struktur JPO baja sangat rentan terhadap beban vertikal.
2. JPO beton memiliki frekuensi fundamental sebesar 2.75 Hz (arah horisontal), sedangkan untuk JPO baja memiliki frekuensi fundamental sebesar 7.675 Hz (arah vertikal). Dalam peraturan British

Standard (BSI, 2005), untuk struktur yang frekuensi alami fundamental untuk getaran melebihi 5 Hz dalam arah vertikal dan 1,5 Hz untuk getaran arah horisontal, berarti memenuhi persyaratan servis getaran pada struktur.

3. Struktur JPO memiliki frekuensi yang berbeda – beda ketika beban manusia berjalan di sepanjang struktur. Frekuensi terbesar terjadi ketika beban dinamis manusia mencapai tengah bentang dari struktur JPO tersebut. Dari perhitungan yang dilakukan pada JPO beton dan JPO baja, bahwa perbandingan antara frekuensi akibat beban dinamis manusia dengan frekuensi alami dari struktur JPO kurang dari 0.5 sehingga struktur tidak terjadi resonansi.

Daftar Pustaka

- BMS, 1992, *Bridge Design Code Vol. 1*, Bridge Management System, Jakarta: Dinas Pekerjaan Umum.
- BSI (British Standard Institution), 1978, *Steel, Concrete and Composite Bridges; Part 1 – General Statement*, BS 5400-1, BSI, London, UK.
- BSI (British Standard Institution), 2005, *Human response to vibration – Measuring instrumentations*, BS EN ISO 8041: 2005, BSI, London, UK.
- Brownjohn, J.M.W., Pavic, A., 2007, *Experimental methods for estimating modal mass in foot-bridges using human-induced dynamic excitation*, Elsevier, Engineering Structures, 29(21): 2833-2843.

- Chopra, A.K., 2007, *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 3rd Edition, London, UK: Pearson Education Ltd.
- Dallard, P., Fitzpatrick, A.J., Flint, A., Lee Bourva, S., 2001, *The London Millenium Footbridge*, IStructE, The Structural Engineer, UK, 79 (22): 17-33.
- El-Dardiry, E., 2003, *Floor Vibration Induced by Walking Loads*. PhD thesis, Manchester, University of Manchester.
- Ellis, B.R., 2003, *The Influence of Crowd Size on Floor Vibrations Induced by Walking*, *The Structural Engineering* 81(6): 20 - 27.
- Ellis, B.R., and Ji, T., 2004, *Load generated by jumping crowds: numerical modelling*, *The Structural Engineer* 82(17):35 - 40.
- Figueiredo, et al, 2008, *A Parametric Study of Composite Footbridges Under Pedestrian Walking Loads*, *Engineering Structures*, 30(3), 605-615.
- ISO, 1989, *ISO 2631-2. Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration*, International Standards Organisation.
- Litter, J.D., 2003, *Frequencies of Synchronized Human Loading from Jumping and Stamping*. IStructE, The Structural Engineer, 81(11): 27-35
- Piccardo, G., Tubino, F., 2008, Parametric Resonance of Flexible Footbridges Under Crowd-Induced Lateral Excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 311: 353-371.
- SNI-T-02-2005, 2005, *Standar Pembebanan untuk Jembatan*, Bandung: Badan Litbang Pemukiman dan Prasarana Wilayah.
- Wahyuni, E., 2007, *Static Stiffness and Modal Stiffness of a Structure*, PhD thesis, University of Manchester, Manchester, UK.
- Wahyuni, E, 2009a, *Using Dynamic Measurements to Predict Structural Responses of a Composite Floor Induced by an Individual Walking Load*. The 1st International Seminar on Sustainable Infrastructure and Built Environment in Developing Countries, November 2-3, 2009, Bandung - Indonesia.
- Wahyuni, E, 2009b, *Structural Responses of a Concrete Beam Subjected to Human Dynamic Load*. Engineering and Science International Conference, November 24-25, 2009, Curtin University of Technology, Sarawak Campus, Miri, Sarawak.
- Wyatt, T.A., 1989, *Design Guide on The Vibration of Floors*, London, UK: Ascot, Steel Construction Institute.

