

ANALISIS DINAMIS RIWAYAT WAKTU JEMBATAN GANTUNG AKIBAT PEJALAN KAKI DAN KENDARAAN RODA DUA

Sarwo Edhi¹, Muttaqin², Husaini³

¹⁾ Mahasiswa Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111,
email: sarwo.edhi90@gmail.com

²⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111

³⁾ Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111

Abstract : *Suspended footbridges has a lot of constructed in Indonesia to access many—especially rural-regions. Due to its flexibility, understanding and design of the suspension bridge is not enough to rely on static analysis. This paper deal with the dynamic behaviour of simply unstiffening suspended bridges subjected to pedestrian load and motor-cycles moving load. As the SNI 03-3428-1994 code of the technical planning for pedestrian suspension bridge is not set in consideration of dynamic analysis and design, pedestrian-load model is based on British Standard BS 5400-4: 1990 and Eurocode EN1991-2:2003. Modeling pedestrian load is done in three conditions; single pedestrian, group, and crowd. The motor-cycles moving load is modeled as a moving force model, accurate for low speed. Variations in the speed used was 10 km / h, 20 km / h, 30 km / h are considered representative. Dynamic analysis done by the time history Newmark direct integration method with the help of finite element analysis program SAP2000 v.15. Span 60 m, 80 m and 100 m was studied. As these results, dynamic interaction between the bridges and pedestrian load is not significant. The analyses have shown that the responses greatly differ between the British Standard and Eurocode. However, motor-cycle load has same results but higher with the largest DAF value 7.27% for speeds of 30 km / h interval of 2 seconds on a span of 100 m.*

Keywords : *Suspension bridge, pedestrian, motor-cycle, dynamic analysis, time history*

Abstrak: Jembatan gantung pejalan kaki telah banyak sekali dibangun di Indonesia, sebagai pemecah masalah akses antar wilayah. Dikarenakan strukturnya yang fleksible, pemahaman dan desain jembatan gantung tidak cukup sekedar mengandalkan analisis statis. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperlihatkan respons dinamis jembatan gantung pejalan kaki sederhana tanpa pengaku. Hal yang akan dipelajari adalah simpangan vertikal dan percepatan ditinjau dari sisi kenyamanan. Beban yang dikenakan adalah beban pejalan kaki dan kendaraan roda dua. Dikarenakan SNI 03-3428-1994 *Tata cara perencanaan teknik jembatan gantung untuk pejalan kaki* tidak mengatur analisis dinamis dalam pertimbangan analisis dan desain, pemodelan beban pejalan kaki didasarkan pada British Standard BS 5400-4:1990 dan Eurocode EN1990. Pemodelan beban pejalan kaki dilakukan dalam tiga kondisi; pejalan tunggal, pejalan kelompok, dan arus keramaian. Untuk beban kendaraan dimodelkan sebagai beban berjalan yang cukup akurat untuk kecepatan rendah. Variasi kecepatan yang digunakan adalah 10 km/jam, 20 km/jam, 30 km/jam dianggap cukup representatif. Analisis dinamis dilakukan secara riwayat waktu dengan metode integrasi langsung Newmark dengan bantuan program analisa elemen hingga SAP2000 v.15. Bentang yang diteliti adalah 60 m, 80 m dan 100 m. Dari hasil tersebut didapati bahwa percepatan akibat beban pejalan kaki masih kecil sehingga tak berpengaruh secara signifikan. Sedangkan beban sepeda motor juga demikian, dengan nilai *DAF* terbesar 7,27 % untuk kecepatan 30 km/jam selang 2 detik pada bentang 100 m.

Kata kunci : jembatan gantung, pejalan kaki, sepeda motor, analisis dinamis, riwayat waktu.

Jembatan gantung adalah satu tipe jembatan yang sangat diandalkan sejak zaman kuno untuk menghubungkan suatu tempat ke tempat lain dengan berbagai rintangan. Diakibatkan struktur utamanya yang cukup fleksibel, beban dinamis merupakan sesuatu yang patut diperhatikan. Kadangkala upaya pengakuan jembatan gantung seringkali juga memakan biaya yang besar (Shrubshall, 2007 : 2).

Dari riwayat beberapa kasus kegagalan struktur jembatan gantung, banyak diantaranya diakibatkan oleh fenomena resonansi mekanik. Contoh yang terkenal dalam kurun dua dasarwarsa adalah kasus Jembatan Millennium di kota London (Strogtaz, 2005: 44-45).

Di Indonesia, banyak jembatan gantung pejalan kaki yang akhirnya dilintasi oleh sepeda motor. Dalam SNI 03-3428-1994 jembatan gantung ini diklasifikasi sebagai jembatan gantung kelas I. Meskipun dalam sisi dinamika struktur, gerakan harmonik pejalan kaki lebih bersifat merusak seperti dua kasus sebelumnya, akan tetapi memahami bagaimana respon struktur terhadap gerakan sepeda motor juga perlu diperhatikan.

KAJIAN KEPUSTAKAAN

Analisis Dinamis

Persamaan kesetimbangan dinamis yang lazim diketahui adalah :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

dimana suku pertama adalah gaya inersia massa dan berhubungan dengan percepatan struktur $\ddot{\mathbf{U}}$. Suku kedua adalah gaya

redaman dan berhubungan dengan kecepatan struktur $\dot{\mathbf{U}}$. Suku ketiga adalah gaya elastis yang berhubungan dengan perpindahan struktur \mathbf{U} . \mathbf{K} adalah kekakuan, \mathbf{C} adalah rasio redaman dan \mathbf{M} adalah massa dinamis sistem. Terakhir, $\mathbf{P}(t)$ adalah beban luar (Das & Dey, 1992 : 745 -750).

Persamaan 1 secara umum bisa dipecahkan dengan dua metode yaitu metode superposisi ragam (*mode superposition*) dan metode langsung. Salah satu cara pemecahan metode langsung dengan metode Newmark. Newmark (1959) mengusulkan ekspresi berikut untuk menghitung kecepatan dan perpindahan pada waktu tertentu .

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \Delta_t U_t + [(0,5 - \beta)\Delta t^2]\ddot{U}_t + [\beta\Delta t^2]\ddot{U}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{U}_t + [\gamma\Delta t]\ddot{U}_{t+\Delta t} \quad (3)$$

dimana γ dan β adalah variabel konstanta. Lazimnya diasumsikan bahwa $\gamma = 1/2$ dimana diberikan β nilai berbeda. Dengan $\gamma = 1/2$ dan $\beta = 1/6$ atau $\beta = 1/4$, metode Newmark identik dengan percepatan linear atau metode percepatan konstan.

Analisis Beban Bergerak

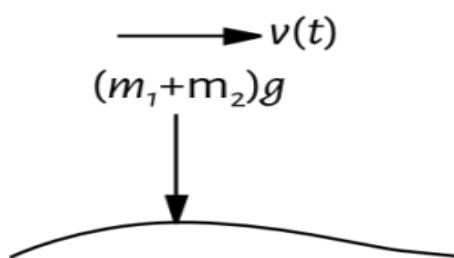
Sudah sangat banyak penelitian mengenai respon jembatan akibat beban bergerak seperti mobil, truk, dan kereta api. Kloppel dan Lie (1942 : 211-266) melakukan penelitian pioner mengenai perhitungan defleksi dinamik jembatan gantung berbentang

tiga dengan menggunakan solusi deret Fourier. Sebuah gaya bergerak di sepanjang balok secara matematis diekspresikan menjadi :

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} - \mu \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} - 2\mu\omega_b \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \delta(x - vt)P \quad (4)$$

Dengan μ adalah massa sepanjang balok, dan $\delta(x - vt)P$ adalah gaya bergerak P dalam bentuk operator Dirac (Fryba, 1972:14).

Sepeda motor memiliki beberapa komponen utama seperti mesin, ban dan sistem suspensi dan bisa disederhanakan sebagai model massa pejal, pegas dan redaman .



Gambar 1 : Model beban bergerak

Fryba (1972) percaya bahwa penggunaan model disederhanakan dapat lebih efektif dalam mengidentifikasi hubungan antara parameter interaksi jembatan-kendaraan dan respons jembatan. Model kendaraan sangat detail tidak diperlukan dan tidak memberikan keuntungan yang banyak jika tujuan utamanya adalah mempelajari respons dinamis jembatan.

METODE PENELITIAN

Pemodelan Jembatan Gantung

Jembatan gantung dimodelkan sebagai struktur dwi-matra (2D) merupakan struktur rangka balok. Kabel diasumsikan sebagai

balok yang hanya menerima tarik, sehingga lentur yang timbul diabaikan.

Desain jembatan yang digunakan sebagai tinjauan dalam penelitian ini sama dengan desain yang disertakan dalam RSNI 03-3428-1994 Lampiran B. Bentang yang diambil sebagai tinjauan adalah 60 m, 80 m dan 100 m. Ukuran diameter *hanger* atau batang penggantung digunakan 12 mm. Ketiga jembatan tersebut telah dianalisis secara statis dengan syarat lendutannya terpenuhi.

Pemodelan Pejalan Kaki

Pemodelan jalan kaki berupa beban getar bergerak sepanjang lantai jembatan. Pemodelan didasarkan pada peraturan British Standard BS5400 dan Eurocode. Ada tiga bagian Eurocode yang berhubungan dengan beban pejalan-kaki atau syarat struktural:

- Eurocode 0 (EN 1990:2002 “*Basis of Structural Design*”): Annex A2.4.3.2 memberi kriteria pejalan-kaki
- Eurocode 1 (EN 1991-2:2003 “*Actions on Structures*”): paragraph 5.7 berhubungan dengan beban pejalan kaki pada jembatan;
- Eurocode 3 (EN 1993-2:2006 “*Design of Steel Structures*”): paragraph 7.9 berhubungan dengan kriteria dayaguna jembatan pejalan-kaki.

Pemodelan pejalan kaki dibagi pada dua kondisi yaitu kondisi pejalan kaki tunggal dan pejalan kaki ramai. British Standard tidak mengatur soal pemodelan dalam keramaian. Maka dari itu untuk pemodelan ramai harus mengalikan model pejalan kaki tunggal sebanyak akar jumlah pejalan yang tersinkron

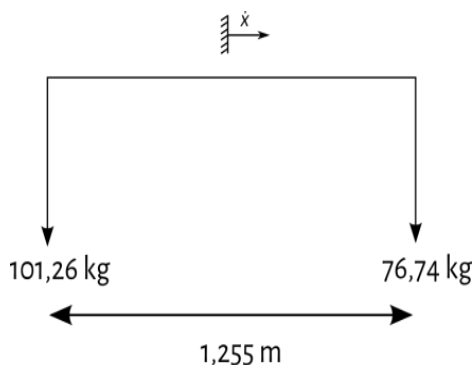
\sqrt{N} (Ross, 2009:15-16). Dalam penelitian ini dianggap dilewati 20 orang pejalan. Sedangkan Eurocode dalam membagi dua kondisi dalam kasus keramaian yaitu berkelompok dan arus ramaibolak balik. Dalam arus keramaian kepadatan pejalan kaki dianggap 0,6 orang/m². Tabel 1 menjelaskan sistem penamaan model yang akan dipakai.

Tabel 1 Penamaan kasus beban pejalan kaki

	BS5400	Eurocode
Tunggal	BS5400S	EC1
Kelompok	BS5400C	EC2
Ramai	-	EC3

Pemodelan Sepeda Motor

Pemodelan sepeda motor didasarkan pada penelitian Olviana dan Guntur (2014). Dari data tersebut sepeda motor dapat dimodelkan sebagai beban dua titik seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 : Model beban titik sepeda motor

Pada beban kendaraan, interaksi antara kendaraan dan lantai jembatan merupakan aksi gaya dinamis fungsi Ramp. Selang antara satu kendaraan dengan kendaraan selanjutnya berdasarkan UU LLAJ no.22 tahun 1999 adalah 3 detik. Agar hasil lebih realistik digunakan juga variabel 2 detik (Tabel 2).

Tabel 2 Tinjauan kecepatan dan selang waktu pengendara serta nomenklaturnya

Kecepatan (v)	Selang waktu	Kasus beban
10 km/jam (2,77 m/det)	2 detik	SM12
	3 detik	SM13
20 km/jam (5,55 m/det)	2 detik	SM22
	3 detik	SM23
30 km/jam (8,33 m/det)	2 detik	SM32
	3 detik	SM33

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Ragam (*Modal Analysis*)

Analisis ragam digunakan untuk menentukan frekuensi alami dan ragam bentuk getar yang kemudian nilainya dimasukkan pada fungsi beban pejalan kaki. Terlihat bahwa semakin panjang bentang maka frekuensinya menurun (Tabel 3).

Tabel 3 Frekuensi alami

	60 m	80 m	100 m
$f_v(1)$	1,214 Hz	0,612 Hz	0,560 Hz
$f_v(2)$	1,379 Hz	1,148 Hz	0,802 Hz
$f_v \approx 2$	2,385 Hz	1,579 Hz	1,665 Hz

Catatan : $f_v(1)$ = frekuensi vertikal pertama
 $f_v(2)$ = frekuensi vertikal kedua

Dari nilai frekuensi fundamental yang diperoleh, tidak ada satupun yang mendekati 2. Dengan demikian, bisa dikatakan bahwa jembatan gantung tersebut aman terhadap resonansi akibat pejalan kaki.

Respons Struktur Akibat Beban Pejalan Kaki Tunggal

Setelah dimasukkan frekuensi alami ke dalam persamaan pemodelan beban pejalan kaki pada kedua peraturan, selanjutnya dilakukan analisis. Hasil dari percepatan maksimum pada joint tertentu tertera pada

Tabel 4 di bawah.

Tabel 4 Percepatan maksimum pejalan kaki tunggal(dalam m/s^2).

Bentang(m)	BS5400S	EC1
60	0,00019	0,00065
80	0,0001	0,00038
100	0,000084	0,00032

Tabel 4 memperlihatkan bahwa respon percepatan yang diberikan oleh pejalan kaki tunggal BS5400 sangat jauh kecil dibandingkan dengan metode Eurocode. Respon paling besar terjadi pada bentang 60 m dengan percepatan maksimum $0,0065 m/s^2$. Meskipun demikian, nilai didapatkan jauh sangat kecil untuk bisa menghasilkan efek dinamis yang signifikan.

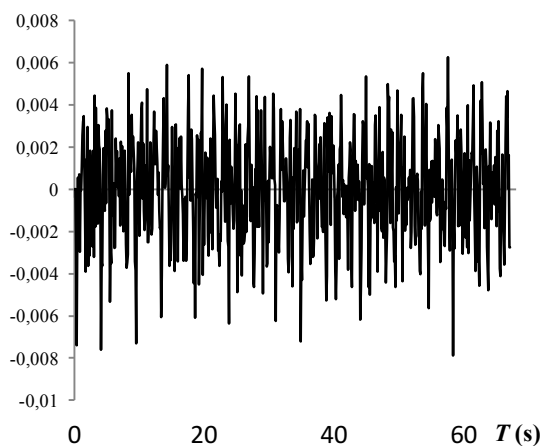
Respons Struktur Akibat Beban Pejalan Kaki Ramai

Dalam kasus pejalan kaki lebih dari satu, model BS5400 hanya mengalikan dengan jumlah pejalan kaki yang tersinkron. Pada pasal 3.3.1, asumsi yang dipakai adalah jumlah pejalan kaki 20 orang. Peraturan Eurocode memiliki dua cara dalam memodelkan pejalan kaki ramai yaitu berkelompok dan arus ramai.

Tabel 5. Percepatan maksimum pejalan kaki ramai (dalam m/s^2)

Bentang (m)	BS5400C	EC2	EC3
60	0,00085	0,00196	0,00927
80	0,00046	0,00114	0,00741
100	0,00085	0,00097	0,00788

Grafik percepatan maksimum (MBD3 pada bentang 100m) terhadap waktu diperlihatkan pada Gambar 3 .



Gambar 3. Percepatan maksimum pejalan kaki ramai terhadap waktu (dalam m/s^2).

Respon percepatan pejalan kaki berkelompok yang diperoleh oleh EC2 lebih besar dibandingkan dengan dengan BS5400C. Namun respons arus bolak balik (EC3) tetap paling besar secara signifikan dari dua kondisi sebelumnya. Respons terbesar diperoleh pada bentang 60 m untuk semua kasus beban. Namun demikian percepatan dari ketiga kondisi pada tiga bentang yang dihasilkan pun juga masih sangat kecil ($< 0,1 m/s^2$). Secara otomatis efek dinamis yang diperoleh berdasarkan kedua metode pemodelan tersebut juga tak seberapa.

Perbandingan Respons Dinamis Dengan Aturan SNI

Sebagaimana disebutkan sebelumnya, respons dinamis yang dihasilkan tidak memberikan dampak secara signifikan. Percepatan yang dihasilkan masih jauh lebih kecil dari yang dipersyaratkan yaitu $0,7 m/s^2$ sedangkan perpindahan juga dibawah 1,1 cm. Dengan kata lain efek inersia pejalan kaki tidak mampu memberi “gaya tambahan” yang

besar sehingga struktur jembatan gantung dianggap nyaman. Dapat diambil kesimpulan bahwa peraturan beban hidup dalam SNI 03-3428-1994 sudah cukup mengakomodir beban pejalan kaki, sehingga tidak diperlukan aturan tambahan terutama efek dinamis secara vertikal. Modifikasi beban hidup pejalan kaki cukup dilakukan secara statis.

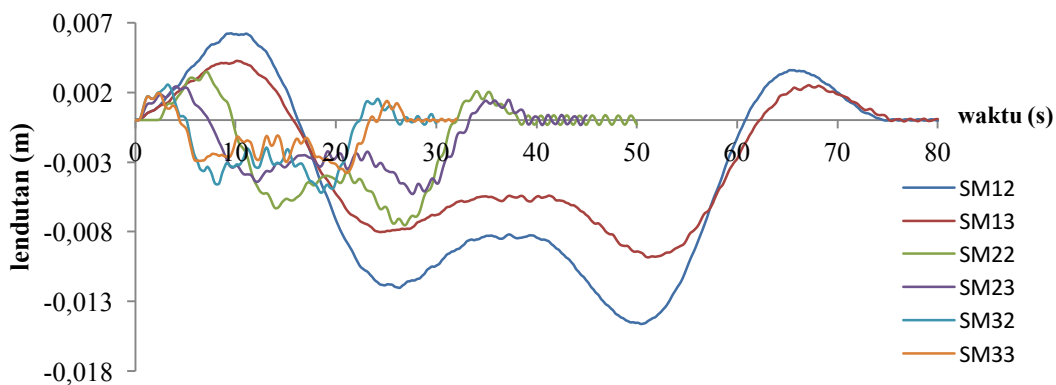
Respons Struktur Akibat Beban Sepeda Motor

Hasil percepatan maksimum dalam kasus beban sepeda motor dengan berbagai kecepatan dan selang waktu diperlihatkan pada Tabel 6.

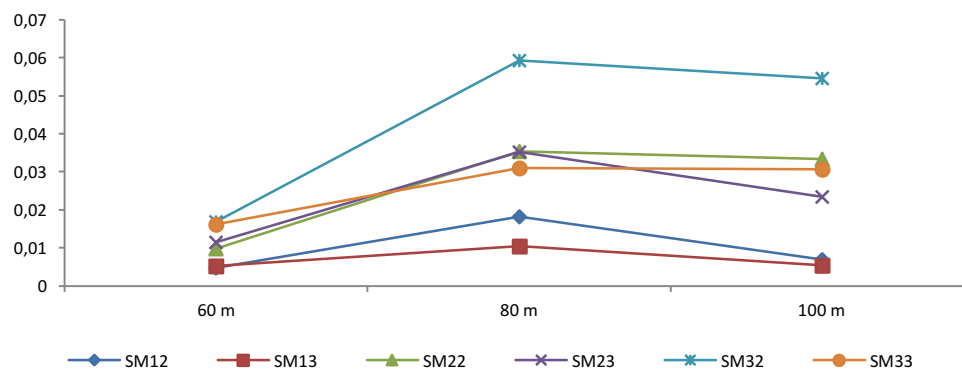
Tabel 6 Percepatan maksimum akibat sepeda motor (dalam m/s^2)

Kasus beban	60 m	80 m	100 m
SM12	0,00476	0,01818	0,00691
SM13	0,0052	0,01046	0,0054
SM22	0,00983	0,03543	0,03334
SM23	0,01143	0,0352	0,02345
SM32	0,01681	0,05936	0,05464
SM33	0,01610	0,03101	0,03066

Dari hasil diatas, respon terbesar adalah pada kecepatan 8,33 m/s (30 km/jam) dengan jarak 2 detik (SM32) untuk ketiga bentang dengan perbedaan sedikit pada bentang 60 m terhadap SM33. Percepatan terbesar didapat pada bentang 80 m, bukan 60 m sebagaimana pada kasus beban pejalan kaki. Untuk bentang di atas 100 m lebih sering juga digunakan *truss* sehingga bisa dikatakan bahwa jembatan gantung pejalan kaki antara 60 – 100 m yang kritis terhadap beban kendaraan roda dua adalah bentang 80 m. Lebih jelasnya diperlihatkan pada grafik berikut.



Gambar 4 Lendutan tengah bentang terhadap waktu bentang 100 m



Gambar 5 Percepatan maksimum (dalam m/s^2) pada tiap bentang

Lendutan maksimum terdapat pada kasus beban SM12 pada bentang 100 m dengan nilai 0,026665 m/s². Hal ini wajar karena pada kasus beban SM12 yang berkecepatan 10 km/jam dengan selang 2 detik merupakan paling banyak kendaraan yang bias ada di bentang jembatan pada keadaan penuh. Gambar4 memperlihatkan lendutan terhadap waktu pada kondisi beban SM 32 dan SM 33 pada bentang 100 m yang memiliki efek dinamis yang paling besar.

Dynamic Amplification Factor (DAF) Akibat Beban Sepeda Motor Pada Gaya Aksial

Nilai *DAF* diperlukan untuk mengetahui seberapa besar efek dinamis terhadap beban statis. Disini yang menjadi parameter perbandingan adalah gaya aksial pada kabel. Tabel 7 menampilkan nilai *DAF*.

Meskipun percepatan terbesar didapat pada bentang 80 m (Gambar 5), nilai *DAF* terbesar diperoleh pada bentang 100 m. Sehingga agak sulit mengatakan bahwa mana yang lebih rawan.

Berbeda dengan bentang 80 m dan 100 m, *DAF* pada bentang 60 m justru lebih besar pada selang waktu 3 detik. Sedangkan *DAF* 80 m dan 100 m lebih besar pada selang waktu 2 detik. Hal ini terjadi karena beberapa faktor yaitu pola pembebanan akibat kecepatan dan selang waktu yang memiliki keunikan sendiri.

Tabel 7 Nilai DAF

Bentang 60 m	
<i>Load case</i>	<i>DAF (%)</i>
SM12	0,11
SM13	0,13
SM22	0,33
SM23	0,80
SM32	1,48
SM33	1,90
Bentang 80 m	
<i>Load case</i>	<i>DAF (%)</i>
SM12	0,25
SM13	0,14
SM22	1,58
SM23	0,73
SM32	5,67
SM33	4,86
Bentang 100 m	
<i>Load case</i>	<i>DAF (%)</i>
SM12	0,58
SM13	0,52
SM22	2,63
SM23	3,70
SM32	7,27
SM33	3,77

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah (1) Pengaruh dinamis pejalan kaki sangat kecil baik statis maupun dinamisnya dibandingkan dengan beban hidup desain SNI ditinjau arah transversalnya.(2) Kendaraan bermotor dengan kecepatan 30 km/jam dengan jarak 2 detik adalah yang paling berdampak dinamis dengan *DAF* untuk aksial kabel sebesar 7,27% untuk bentang 100 m (3) Diantara ketiga bentang yang ditinjau, bentang 80 m merupakan yang paling kurang nyaman.

Saran

Penelitian beban dinamis pejalan kaki akan lebih terlihat dampaknya pada struktur

yang ringan dengan lantai jembatan yang cukup lebar, dengan mempertimbangkan posisi pejalan kaki relatif terhadap lantai.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Anonim, 2007, Pedoman – Perencanaan dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung Untuk Pejalan Kaki, Departemen Pekerjaan Umum.
- Anonim, 2006, Standar Pembebanan untuk Jembatan RSNI T-02-2005, Departemen Pekerjaan Umum.
- Anonim, 2002, Eurocode, Basis of Structural Design – Annex A2. EN 1990: 2002. European Commite for Standardization, Brussels.
- Chopra, A.K. 2001, Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Edisi Kedua, Prentice Hall, New Jersey.
- Das A.K., Dey S.S., 1992, “Effect of Tuned Mass Dampers on Random Response of Bridge”, Computer & Structures, Vol. 43, No.4.
- Fryba, L., 1999, Vibration of solids and structures under moving loads, Thomas Telford, Praha.
- Gazzola, Filippo, 2015, Mathematical Models for Suspension Bridges, MS&A Springer, London.
- Hermansyah, Dadang, 2015, November, Jembatan Gantung Putus, 4 Sepeda Motor Terjun ke Sungai, Sindonews.com, diakses dari <http://daerah.sindonews.com/read/1065271/21/jembatan-gantung-putus-4-sepeda-motor-terjun-ke-sungai-1448706999>.
- Klöppel, K., & Lie, K. H., 1942, Lotrechte Schwingungen von Hängebrücken. Archive of Applied Mechanics, 13(4), hal. 211-266.
- Meriam, J. L., dan L. G. Kraige, 1993, Mekanika Teknik- Statika, Edisi ke Dua, Erlangga, Jakarta.
- Newmark, N.M., 1959, “A method of computation for structural dynamics”, Journal of the Engineering Mechanics Division 85.3: hal 67-94.
- Ross, Iemke., 2009, Human Induced Vibrations on Footbridges, Tesis Master, Delft University of Technology, Delft.
- Shrubshall, C. J., 2007, A Critical Analysis of the Oresund Bridge Linking Sweden and Denmark. University of Bath, Bath.
- Strogatz, S. H., Abrams, D. M., McRobie, A., Eckhardt, B., & Ott, E., 2005, “Theoretical mechanics: Crowd synchrony on the Millennium Bridge”. Nature, 438(7064), 43-44.