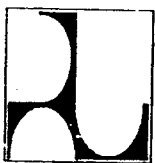


PEDOMAN

Pt T-05-2002-B

Konstruksi dan Bangunan

Penilaian Kondisi Jembatan Untuk Bangunan Atas Dengan Cara Uji Getar



DEPARTEMEN PERMUKIMAN DAN PRASARANA WILAYAH

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	I
PRAKATA	ii
PENDAHULUAN	iii
1. Ruang Lingkup.....	1
2. Acuan	1
3. Istilah dan Definisi	2
4. Alat Uji Getar	3
5. Cara Uji Getar	4
6. Parameter Penilaian Dinamik	5
7. Analisis Getaran Bebas	5
8. Contoh Kasus	8
9. Bibliografi	10

PRAKATA

Pedoman ini dipersiapkan oleh Sub Panitia Teknis di Pusat Litbang Teknologi Prasarana Transportasi, dengan konseptor Ir. Lanneke Tristanto dan Sunardi, ST.

Pedoman penilaian kondisi jembatan untuk bangunan atas dengan cara uji getar, dimaksudkan sebagai pedoman bagi semua pihak yang terlibat dalam pemeriksaan, pengujian dan penilaian kondisi bangunan atas jembatan. Dimana tujuan akhir dari suatu penilaian kondisi adalah tercapainya jaminan mutu hasil pemeriksaan dan pengujian.

Cara uji getar untuk penilaian kondisi bangunan atas jembatan, merupakan salah satu pengujian yang bertujuan mengidentifikasi daya pikul aktual dari suatu jembatan lama atau baru, dengan mana terungkap tingkat kondisi keutuhan dan tingkat kerusakan jembatan.

Pedoman penilaian kondisi jembatan untuk bangunan atas jembatan dengan cara uji getar ini mencakup : ruang lingkup, cara pengujian, analisis getaran dan contoh kasus untuk penentuan nilai kondisi dari berbagai tipe bangunan atas jembatan.

PENDAHULUAN

Pengujian getaran ini dimaksudkan untuk memperoleh gambaran tentang data kondisi aktual bangunan atas jembatan yang dapat memberikan kontribusi dengan mana penanganan jembatan ditetapkan. Cara uji getar adalah lebih ekonomis dan tidak merusak struktur, dibanding dengan cara uji percobaan pembebanan.

Salah satu cara untuk menentukan kondisi jembatan adalah dengan pengamatan secara visual, tetapi penilaian kondisi untuk menentukan keutuhan harus di-uji dan di-evaluasi. Pengujian getaran melengkapi pemeriksaan visual dalam menyediakan parameter dinamis tambahan berupa frekuensi getaran. Frekuensi adalah ukuran untuk kekakuan dan keutuhan struktur. Setiap perubahan periodik dalam parameter dinamis memberikan korelasi kondisi struktural dengan tingkat laju kerusakan. Kriteria penilaian kondisi dengan cara uji getar diterapkan untuk penilaian berbagai tipe jembatan beton bertulang, beton prategang, rangka baja dan gelagar baja komposit.

Pedoman ini digunakan untuk melakukan penilaian kondisi secara periodik dalam rangka pemeliharaan jembatan baru dan lama.

PENILAIAN KONDISI JEMBATAN UNTUK BANGUNAN ATAS DENGAN CARA UJI GETAR

1. Ruang Lingkup

Metode penilaian dengan prediksi getaran merupakan penilaian jembatan secara matematis yang berdasarkan parameter dinamis eksperimental. Pengujian getaran menggunakan beban tumbuk tidak merusak atau dengan beban lalu lintas pada bangunan atas jembatan. Getaran bebas dari bangunan atas jembatan direkam oleh pencatat getaran yang dapat menghasilkan beberapa parameter dinamis berupa frekuensi alami aktual, redaman serta moda perubahan bentuk.

Analisis modal dilakukan dalam dua dimensi untuk moda pertama, sedangkan moda yang lebih tinggi memerlukan analisis tiga dimensi. Gambaran frekuensi aktual jembatan ditentukan oleh moda rendah dari keadaan batas layan. Moda rendah mencerminkan kondisi aktual baik-cukup sedangkan moda tinggi sering mencerminkan kondisi rusak. Moda lebih tinggi sering menunjukkan keadaan batas ultimit.

Frekuensi alami pertama dari getaran vertikal digunakan untuk mengevaluasi daya pikul bangunan atas jembatan. Frekuensi aktual alami pertama yang sesuai dengan frekuensi teoritis menyatakan kapasitas yang memadai. Penurunan frekuensi aktual terhadap frekuensi teoritis sebesar 10-20% menunjukkan penurunan kondisi cukup-buruk. Rentang kondisi ini ekuivalen dengan penurunan kekakuan lentur (EI) aktual terhadap kekakuan lentur teoritis sebesar 20 -40%.

Rasio redaman yang tinggi sering disebabkan oleh penyerapan energi lewat retakan dalam beton. Beton utuh mempunyai rasio redaman kritis 2-5%. Beton yang retak mempunyai rasio redaman kritis 7-10%.

Pedoman ini hanya berlaku untuk jembatan bentang sederhana.

2. Acuan

The AASHO Road Test. 1961. *Dynamic Load Tests*. Chapter 4: 114-199 pp.

Cantieni, R. 1983. *Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland* Report No. 211. EMPA, CH-8600 Dubendorf, Switzerland. 79 pp.

Peraturan Perencanaan Jembatan, Bridge Management System, Volume 1 dan 2, 1992

3. Istilah dan Definisi

3.1 Daftar simbol

A	: amplitudo
A_o	: amplitudo ke-1
A_n	: amplitudo ke-n
D_{kap}	: nilai penurunan kapasitas
$D_{relatif}$: nilai kerusakan relatif
δ	: penurunan logaritmik
E	: modulus elastis Young
$E_{dinamis}$: modulus elastis Young dinamis
E_{statis}	: modulus elastis Young statis
EI	: kekakuan lentur
$(EI)_{aktual}$: kekakuan lentur aktual
$(EI)_{teoritis}$: kekakuan lentur teoritis
f	: frekuensi alami
f_{aktual}	: frekuensi alami aktual
$f_{teoritis}$: frekuensi alami teoritis
h	: redaman kritis
h_{aktual}	: redaman kritis aktual
$h_{teoritis}$: redaman kritis teoritis
I	: momen inersia
L	: bentang jembatan
m	: masa gelagar per satuan panjang
n	: jumlah osilasi

3.2 Istilah dan Definisi

Istilah dan definisi yang digunakan dalam pedoman ini sebagai berikut :

3.2.1 Getaran

Gerakan struktur yang bersifat sebagai gelombang atau osilasi.

3.2.2 Respons

Gerakan struktur akibat beban luar.

3.2.3 Beban tumbuk

Beban luar sesaat.

3.2.4 Getaran paksa

Getaran struktur akibat bekerjanya beban luar.

3.2.5 Getaran bebas

Getaran struktur setelah beban luar menghilang.

3.2.6 Frekuensi alami

Jumlah perulangan gerakan dalam satu detik pada getaran bebas (cps atau Hertz).

3.2.7 Redaman

Kehilangan energi yang diserap oleh regangan struktur.

3.2.8 Redaman kritis

Bagian redaman yang mengembalikan sistem dari deformasi ke kedudukan nol, tanpa terjadi pembalikan gelombang.

3.2.9 Modulus elastis dinamis

Modulus Young dalam analisis dinamis.

3.2.10 Vibrasi recorder

Pencatat getaran

3.2.11 Analisis modal

Analisis perhitungan ulang dari frekuensi alami.

3.2.12 Moda

Model perubahan bentuk akibat getaran.

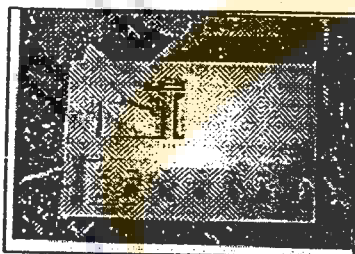
3.2.13 Bentang sederhana

Gelagar di atas dua tumpuan.

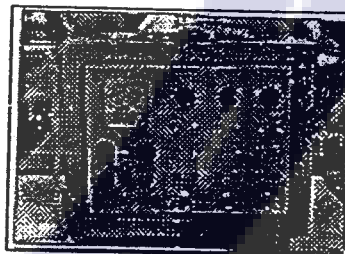
4. Alat Uji Getar

Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

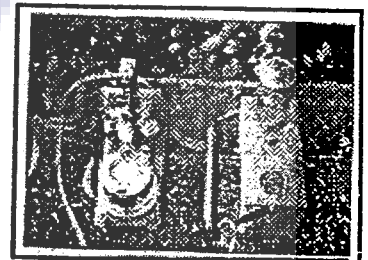
1. Alat pencatat getaran dengan sensor. (lihat skema alat - Gambar 1).
2. Alat penggetar yang tidak merusak seperti: FWD, beban tumbuk portable, blok beton dengan beban tumbuk 7,5 kN - 17 kN, atau beban kendaraan (Gambar 2).



a.

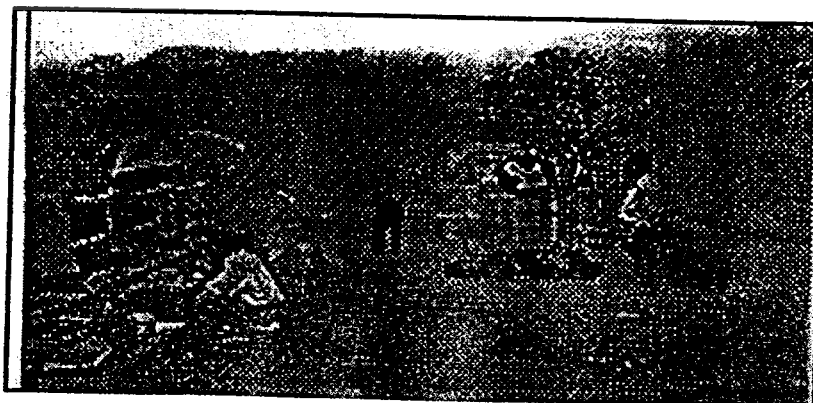


b.

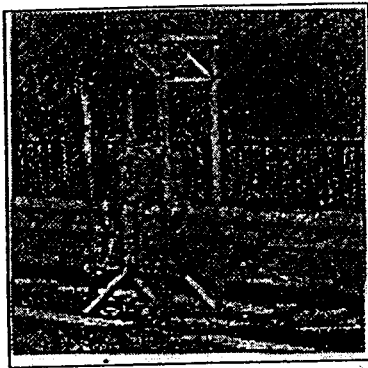


c.

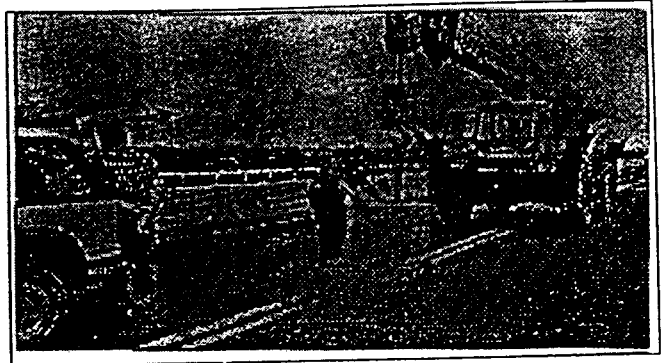
Gambar 1. Skema alat pencatat getaran.
a. Pencatat getaran b. Amplifier c. Sensor (*probe*)



a.



b.



c.

Gambar 2 : Sistem beban tumbuk pada uji getar jembatan
 a. cara FWD b. beban tumbuk portable c. blok beton
 (Contoh : massa 60 kg, tinggi jatuh 0,8 m menghasilkan beban tumbuk 17 kN)

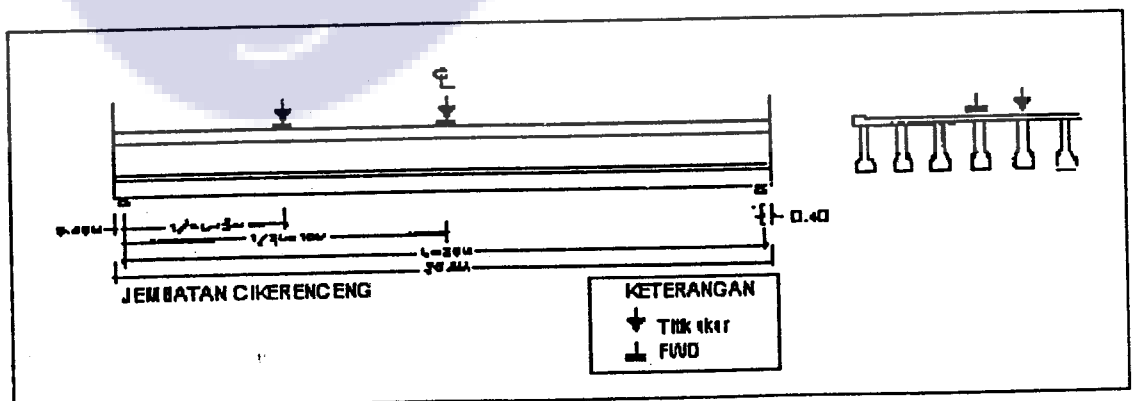
5. Cara Uji Getar

Cara pengujian adalah sebagai berikut:

1. Siapkan sensor untuk mendapatkan getaran arah vertikal.
2. Tempatkan sensor pada titik-titik pengukuran getaran di bangunan atas jembatan.
3. Tempatkan alat pencatat getaran di lokasi yang aman dan bebas dari gangguan.
4. Kalibrasikan alat pencatat getaran untuk mendapatkan rekaman yang baik.
5. Lakukan penggetaran struktur bangunan atas jembatan. (Selama melakukan pengujian diperlukan penutupan jembatan untuk beban tumbuk dan pengaturan lalu lintas bila menggunakan beban kendaraan).
6. Lakukan pencatatan getaran.

Lokasi pengukuran getaran pada bangunan atas diatur sebagai berikut :

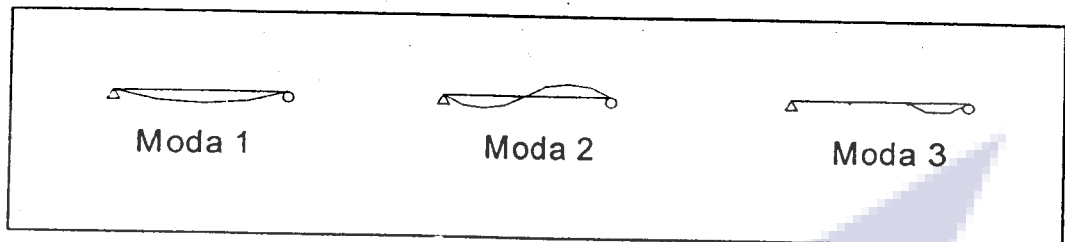
- Beban penggetar pada satu titik dengan pengukuran getaran pada berbagai titik.
- Beban penggetar pada berbagai titik dengan pengukuran getaran pada satu titik.
- Beban penggetar pada lokasi tengah dan seperempat bentang dengan pengukuran getaran pada salah satu titik dan sebaiknya di atas gelagar (Gambar 3).



Gambar 3. Contoh penempatan beban tumbuk dan sensor pengukuran getaran
 (jarak antara beban tumbuk dan sensor maksimum 15 m)

Pengukuran getaran pada tengah dan seperempat bentang adalah keperluan titik pengukuran minimal. Hal ini dilakukan karena moda tinggi tidak muncul bila titik pengukuran jatuh bersamaan dengan titik simpul dari perubahan bentuk. Sebagai contoh, moda kedua muncul bila titik pengukuran di seperempat bentang, tetapi menghilang bila titik pengukuran di tengah bentang (Gambar 4).

Untuk mencapai kecermatan analisis titik pengukuran getaran dapat diperbanyak



Gambar 4 : Perubahan bentuk sinusoidal dalam moda 1 - 3 (rendah - tinggi)

6. Parameter Penilaian Dinamis

Penilaian kondisi bangunan atas jembatan dengan menggunakan frekuensi alami aktual dimaksudkan untuk penyederhanaan analisis

Analisis adalah perhitungan ulang dari frekuensi alami ($f_{teoritis}$), berdasarkan dimensi dari balok/ gelagar jembatan.

Parameter penilaian dinamis adalah sebagai berikut :

1. Frekuensi alami pertama atau fundamental terukur (f_{aktual}) yang berasal dari rekaman getaran bebas.
2. Kekakuan lentur (EI)_{aktual}.
3. Redaman kritis (h)_{aktual}.

Penurunan frekuensi alami aktual (f_{aktual}) terhadap nilai frekuensi alami teoritis ($f_{teoritis}$) menunjukkan penurunan dari keutuhan struktural.

Parameter kekakuan lentur (EI) langsung terkait dengan frekuensi alami aktual. Penurunan kekakuan lentur aktual (EI)_{aktual} terhadap kekakuan lentur teoritis (EI)_{teoritis} menunjukkan penurunan kapasitas daya pikul.

Peningkatan redaman kritis aktual (h_{aktual}) terhadap redaman kritis teoritis ($h_{teoritis}$) dari beton utuh menunjukkan tingkat kerusakan retakan.

7. Analisis Getaran Bebas

7.1 Analisis Frekuensi

Respon jembatan berkaitan erat dengan kondisi kerusakan struktural. Nilai kerusakan struktural relatif adalah sebagai berikut :

$$D_{relatif} = \frac{(f_{teoritis} - f_{aktual})}{f_{teoritis}} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana :

$D_{relatif}$ = nilai kerusakan struktural relatif

f_{aktual} = frekuensi alami aktual

$f_{teoritis}$ = frekuensi alami teoritis

$$f_{teoritis} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2)$$

Dimana :

$f_{teoritis}$ = frekuensi alami teoritis (untuk moda pertama) [Hertz]

L = panjang bentang jembatan [m]

EI = kekakuan lentur dinamis [kN.m²]

m = massa jembatan [kN.det²/m]

$E_{dinamis}$ diperoleh dari rumus berikut :

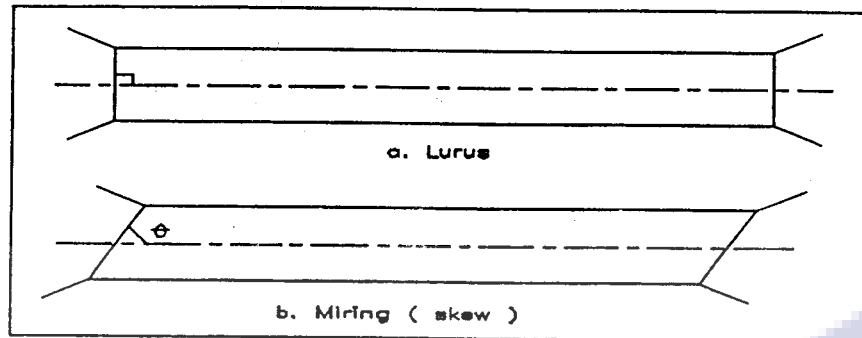
$$E_{dinamis, beton} = \frac{(E_{statis, beton} + 19 \times 10^6)}{1,25} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (3)$$

$$E_{dinamis, baja} = E_{statis, baja} \quad [\text{kN/m}^2]$$

Analisis moda pertama dilakukan dengan Rumus (2). Sedangkan analisis moda lebih tinggi dilakukan dengan bantuan program struktur analisis.

Pada analisis moda lebih tinggi akan terlihat perbedaan perubahan bentuk untuk jembatan lurus dan jembatan miring (*skew*), lihat (Gambar 5).

Jembatan lurus mempunyai perubahan bentuk lentur yang terpisah dari puntir sedangkan jembatan miring (*skew*) mempunyai kombinasi antara lentur dan puntir.



Gambar 5 : Alinyemen jembatan (a) lurus, (b) miring, skew

Nilai penurunan kapasitas (D_{kap}) dari bangunan atas adalah sebagai berikut:

$$D_{kap} = \frac{(EI)_{teoritis} - (EI)_{aktual}}{(EI)_{teoritis}} \times 100\% \quad (4)$$

Dimana :

D_{kap} = nilai penurunan kapasitas

$(EI)_{teoritis}$ = kekakuan lentur teoritis [kN/m²]

$(EI)_{aktual}$ = kekakuan lentur aktual [kN/m²]

7.2 Analisis Redaman Kritis

Redaman kritis ditentukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$h = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{(2\pi)} \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right) \times 100\% \quad (5)$$

Dimana :

h = redaman

δ = penurunan logaritmik

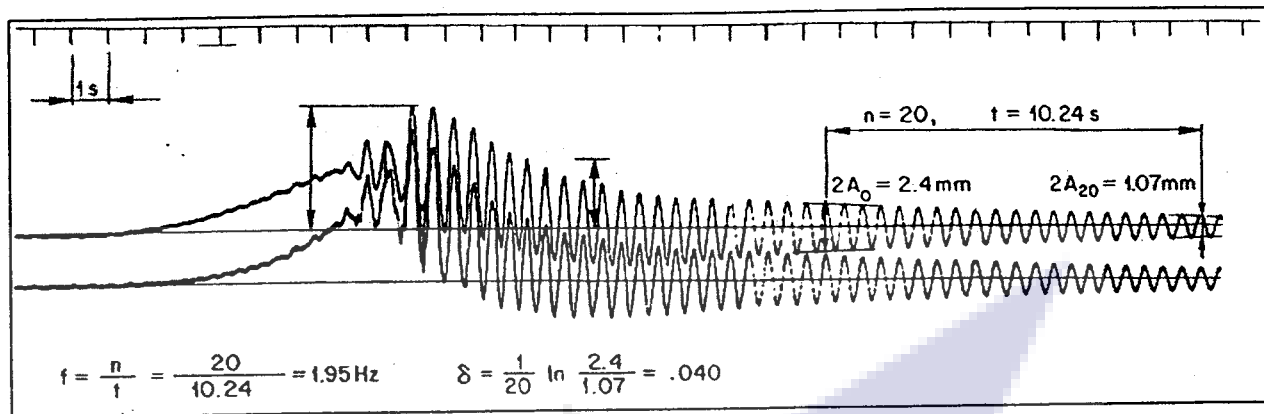
n = jumlah osilasi

A_0 = amplitudo ke-1

A_n = amplitudo ke-n

7.3 Analisis Rekaman Getaran Bebas

Cara interpretasi rekaman getaran yang tipikal diberikan dalam Gambar 6.



Gambar 6 : Interpretasi rekaman getaran tipikal

7.4 Evaluasi Hasil Analisis

Penilaian kondisi bangunan atas jembatan berdasarkan kriteria yang diturunkan dari hasil penelitian seperti terlihat pada Tabel 1.

Hasil pengamatan visual juga harus diperhitungkan dalam penilaian kondisi bangunan atas jembatan.

Luas retakan dari pengamatan visual merupakan keterangan obyektif dalam evaluasi rasio redaman. Kondisi retakan dapat diklasifikasi sebagai kondisi baik, cukup, buruk sesuai dengan pengamatan retak rambut, retak setempat, retak menyeluruh.

Tabel 1 : Penilaian Kondisi Bangunan Atas Jembatan

Nilai Kondisi	Jenis Kerusakan	Nilai Kerusakan relatif D_{rel}	Nilai penurunan kapasitas D_{cap}
baik	utuh	0%- 5%	0%- 10%
cukup	rusak ringan (non struktural)	6%- 10%	11 - 20%
sedang	rusak ringan (struktural)	11%- 17%	21% - 34%
buruk	rusak berat (struktural)	18% - 20%	35% - 40%

Catatan:

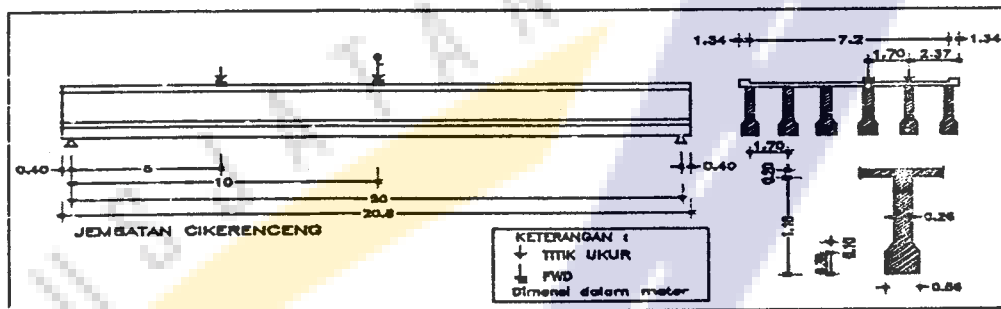
- Nilai dalam Tabel 1 berlaku untuk bahan bangunan atas yang sejenis, untuk penilaian bangunan atas komposit perlu diperhitungkan penampang sisa.
- Penilaian obyektif dibantu oleh pemeriksaan visual

8. Contoh Kasus

Jembatan Beton Bertulang

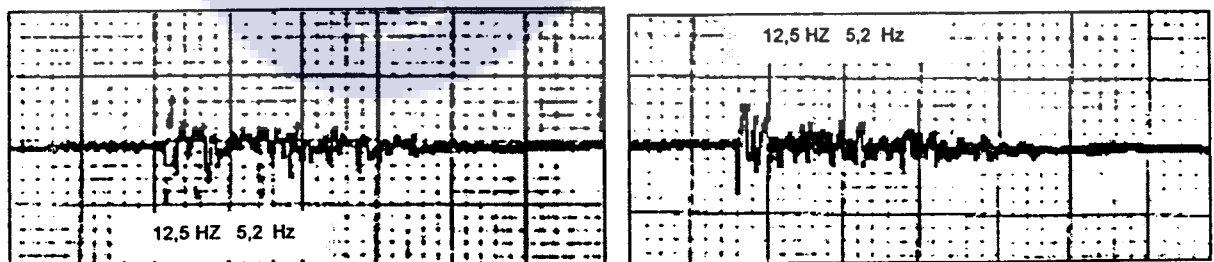
Data jembatan :

Nama jembatan	= Jembatan Cikerenceng
Tanggal pengujian	= 21 Juni 1999.
Tipe jembatan	= balok T beton bertulang
Panjang bentang	= 20 m
Lebar jembatan	= 9 m
Massa	= 2,28 kN det ² /m per balok T
Mutu beton, f_c'	= 20 MPa (teoritis)
$E_{dinamis}$	= 35.10 ⁶ kN/m ² (teoritis) – (Rumus 3)
$I_{teoritis}$	= 0,1809 m ⁴ per balok T
$(EI)_{teoritis}$	= 6,3315 .10 ⁶ kNm ² per balok T



Gambar 7 : Dimensi Jembatan Cikerenceng

Data uji getar :



lokasi tengah bentang - simpangan vibrocorder Range 50, Speed 25 - lokasi seperempat bentang

Gambar 8 : Rekaman getaran vertikal di jembatan Cikerenceng

Frekuensi moda pertama, f_{aktual} = 5,2 Hz
 Frekuensi moda lebih tinggi, f_{aktual} = 12,5 Hz
 Redaman kritis, h_{aktual} = 6-7%
 Kekakuan lentur $(EI)_{aktual}$ = 4.001.020 kNm²

Hasil evaluasi :

Frekuensi teoritis, $f_{teoritis}$ (Rumus 2) = 6,54 Hz
 Nilai kerusakan relatif, $D_{relatif}$ (Rumus 1) = 20%
 Nilai penurunan kapasitas D_{kap} (Rumus 4) = 37%

Kesimpulan:

Klasifikasi kondisi adalah buruk – kritis.

9. Bibliografi

- Biggs, J.M., Hansen R.J., Holley M.J., Minami J.K., Namyet S., Norris C.H. 1959. Vibration of Girders under Moving Traffic Loads. 416-433 pp in *Structural Design for Dynamic Load*. MCGraw – Hill.
- Fleming, J.F., Romualdi, J.P. 1961. Dynamic Response of Highway Bridges. Journal of the Structural Division. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* Volume 87, No. ST 7, October, 1961: 31 – 61 pp.
- Aramraks, T., Gaunt, J.T., Gutzwiller, M.J., Lee, R.H. 1977. Highway Bridge Vibration Studies. Bridge Tests. *Transportation Research Record* 645: 15 – 20 pp.
- Walker, W.H., Wright, R.N. 1972. Vibration and Deflection of Steel Bridges. *AISC Engineering Journal*, January. 1972: 20 – 31 pp.
- Machida, F., Matsuura, A. 1983. Dynamic Response of Concrete Railway Bridges. *IABSE Proceedings* P-60/83: 53 – 68 pp.
- Tristanto, L. 1990. Bridge Vibration Criteria, *Proceedings 6th REAAA Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia. 16 pp.
- Agardh, L. 1991. Modal Analyses of Two Concrete Bridges in Sweden. *Structural Engineering International* 4/91: 35 – 39 pp. IABSE, Switzerland.
- Tristanto, L. 1992. High Rise Pier Vibration Test. *Proceedings 7th REAAA Conference* Volume 2: 757-764 pp. Singapore.
- Vrouwenvelder, A.C.W.M., Waarts, P.H. 1993. Traffic Loads on Bridges. *Structural Engineering International* 3/93: 169 – 177 pp. IABSE, Switzerland.
- Cantieni, R., Felber, A. 1996. Advances in Ambient Vibration Testing : Ganter Bridge, Switzerland. *Structural Engineering International* 3/96: 187 – 190 pp. IABSE, Switzerland.
- Skrinar, M., Strukelj, A. 1996. Eigenfrequency Monitoring during Bridge Erection. *Structural Engineering International* 3/96: 191 – 194 pp. IABSE, Switzerland.
- Wahab, M.A., De Roeck, G. 1997. Effect of Temperature on Dynamic System Parameters of a Highway Bridge. *Structural Engineering International* 4/97: 266 – 270 pp. IABSE, Switzerland.
- Tristanto, L., Sunardi. 2000. Microtremor prediction for bridge rating. *Proceedings 10th REAAA Conference* Japan.