

PEDOMAN

Pt T-06-2002-B

Konstruksi dan Bangunan

**Penilaian Kondisi Jembatan Untuk Bangunan Bawah
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
3.1 Daftar Simbol	2
3.2 Istilah dan Definisi	2
4. Alat Uji Getar	3
5. Cara Uji Getar	4
6. Parameter Penilaian Dinamik	5
7. Analisis Getaran Bebas	5
7.1 Analisis Frekuensi	5
7.2 Analisis Rekaman Getaran Bebas	7
7.3 Evaluasi Hasil Analisis	7
8. Contoh Kasus	9
9. Bibliografi	12

PRAKATA

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

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

Cara uji getar untuk penilaian kondisi bangunan bawah jembatan, merupakan salah satu pengujian yang bertujuan mengidentifikasi stabilitas pilar jembatan dan pangkal jembatan berdasarkan kedalaman jepit efektif terhadap kedalaman tertanam rencana dengan mana menunjukkan laju kerusakan pondasi pilar atau pangkal jembatan.

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

PRAKATA

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

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

Cara uji getar untuk penilaian kondisi bangunan bawah jembatan, merupakan salah satu pengujian yang bertujuan mengidentifikasi stabilitas pilar jembatan dan pangkal jembatan berdasarkan kedalaman jepit efektif terhadap kedalaman tertanam rencana dengan mana menunjukkan laju kerusakan pondasi pilar atau pangkal jembatan.

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

PENDAHULUAN

Pengujian getaran ini dimaksudkan untuk memperoleh gambaran tentang data kondisi aktual bangunan bawah jembatan yang dapat memberikan kontribusi dengan mana prioritas penanganan jembatan dapat 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 pengamatan secara visual tetapi penilaian kondisi untuk menentukan keutuhan dan stabilitas pondasi 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 stabilitas pondasi serta keutuhan struktural. 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 pilar dan pangkal jembatan.

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

PENILAIAN KONDISI JEMBATAN UNTUK BANGUNAN BAWAH 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. Beban vertikal pada bangunan atas dapat digunakan sebagai beban penggetar bangunan bawah. Beban penggetar dapat secara langsung diberikan dalam bentuk beban pukul/ tumbukan ringan pada bangunan bawah.

Getaran bebas direkam oleh pencatat getaran dengan sensor di puncak pilar/pangkal jembatan. Rekaman getaran dapat menghasilkan beberapa parameter dinamis berupa frekuensi alami aktual dan moda perubahan bentuk.

Analisis modal digunakan untuk evaluasi kedalaman jepit pilar/pangkal dalam arah melintang dan memanjang jembatan untuk moda lentur pertama. Kedalaman jepit menentukan panjang tekuk dari tiang pondasi sebagai kriteria penilaian kondisi untuk berbagai tipe dan kondisi pilar/ pangkal jembatan. Interaksi tanah diabaikan dalam analisis modal.

Analisis pondasi digunakan untuk mengevaluasi daya pikul pondasi/pangkal dalam arah melintang dan memanjang jembatan. Interaksi tanah diperhitungkan dalam analisis pondasi.

Analisis modal untuk pilar dan pangkal jembatan dapat dilakukan dengan menggunakan program analisis struktur. Analisis pondasi untuk pilar/pangkal jembatan dapat dilakukan dengan menggunakan program PILING.

Kondisi pilar dan pangkal jembatan yang didasarkan pada kriteria kedalaman jepit aktual yang dikaitkan dengan daya dukung pondasi aktual diberi nilai 1 untuk kondisi stabil/ baik, 2 untuk kondisi kurang stabil/ cukup, 3 untuk kondisi tidak stabil/ kurang, 4 untuk kondisi labil/ kritis.

Pedoman ini hanya berlaku untuk struktur yang dapat dimodelkan sebagai struktur kantilever.

2. Acuan

Earthquake Resistant Design of Bridges, 1985, Japan Society of Civil Engineers, Japan.

Introduction to Earthquake Engineering, 1985, Japan Society of Civil Engineers, Japan.

Peraturan Perencanaan Jembatan & Manual Perencanaan Jembatan, BMS, Volume 1 dan 2 - 1992.

Program PILING, BMS, 1992.

3. Istilah dan Definisi

3.1 Daftar Simbol

A	: amplitudo
A_o	: amplitudo ke-1
A_n	: amplitudo ke-n
δ	: penurunan logaritmik
Δ_h	: lendutan horisontal
E	: modulus elastis Young
$E_{dinamis}$: modulus elastis Young dinamis
E_{statis}	: modulus elastis Young statis
EI	: kekakuan lentur
f	: frekuensi alami
f_{aktual}	: frekuensi alami aktual
$f_{teoritis}$: frekuensi alami teoritis
G	: berat sendiri jembatan di puncak pilar/pangkal
h	: redaman kritis
I	: momen inersia
k_h	: koefisien seismik statik ekuivalen
k	: konstanta pegas di perletakan
ψ	: fungsi perubahan bentuk
K_h	: gaya pegas
L	: tinggi kantilever
$L_{melintang}$: tinggi kantilever arah melintang jembatan
$L_{memanjang}$: tinggi kantilever arah memanjang jembatan
m	: masa gelagar per satuan panjang
n	: jumlah osilasi
T	: periode getaran pilar atau pangkal
ω	: frekuensi alami sirkular
ω_{aktual}	: frekuensi alami sirkular aktual
$\omega_{teoritis}$: frekuensi alami sirkular teoritis

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

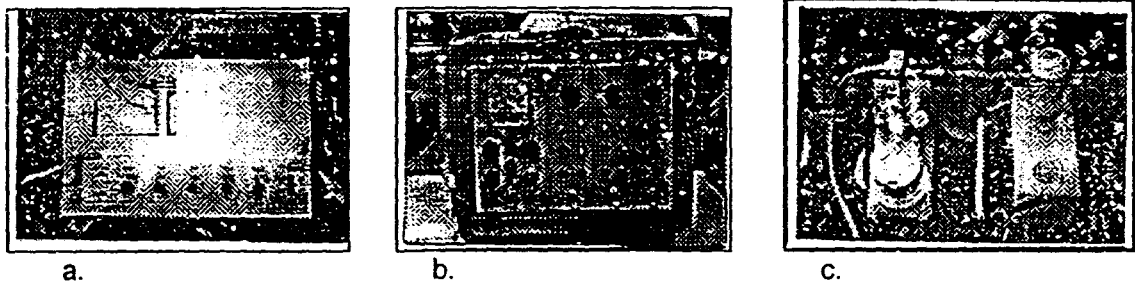
3.2.11 Analisis Modal

Analisis perhitungan ulang dari frekuensi alami

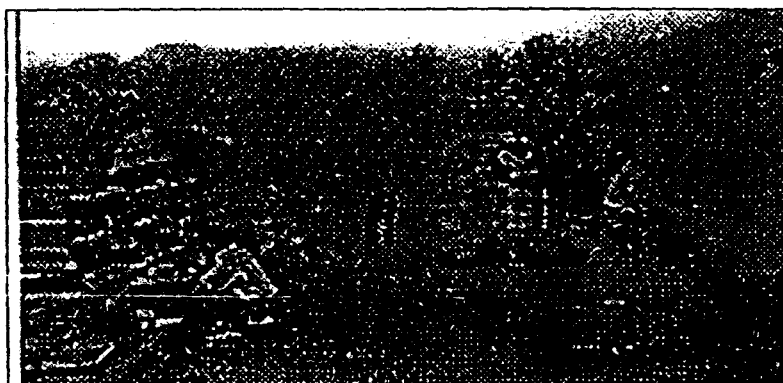
4. Alat Uji Getar

Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

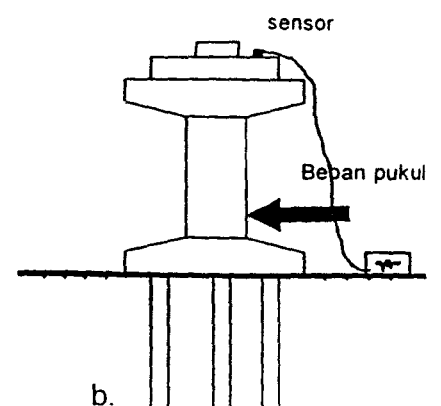
1. Alat pencatat getaran dengan sensor. (lihat skema alat – Gambar 1).
2. Alat penggetar yang tidak merusak seperti: FWD, beban tumbuk portable, blok beton dengan beban tumbuk 7,5 kN - 17 kN , atau beban kendaraan (Gambar 2).



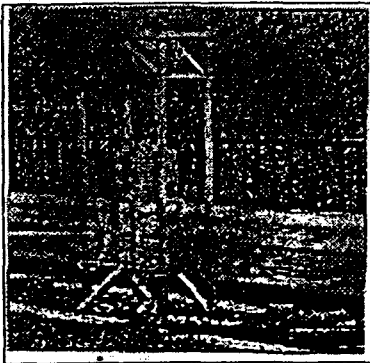
Gambar 1. Skema alat pencatat getaran.
a. Pencatat getaran b. Amplifier c. Sensor (probe)



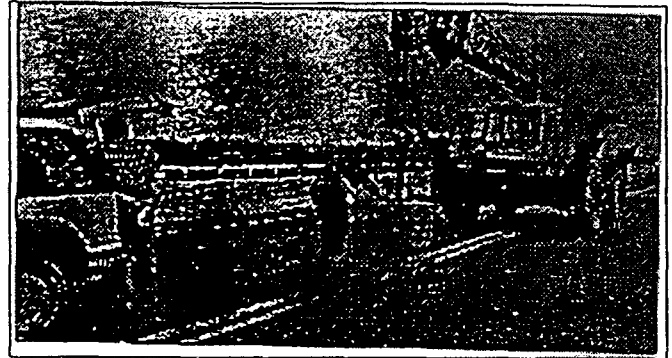
a.



b.



c.



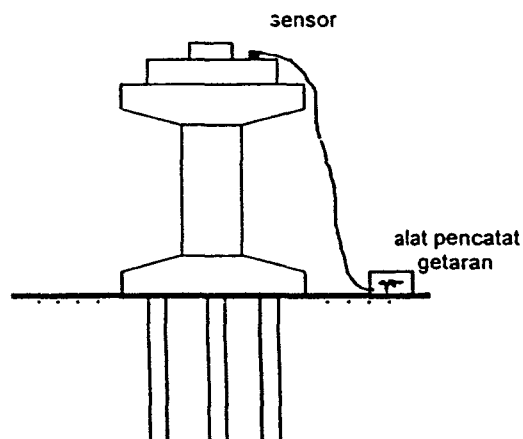
d.

Gambar 1 : Sistem beban tumbuk pada uji getar jembatan
 a. cara FWD b. beban pukul c. beban tumbuk portable d. blok beton
 (Contoh : massa 60 kg, tinggi jatuh 0,8 m menghasilkan beban tumbuk 17 kN)

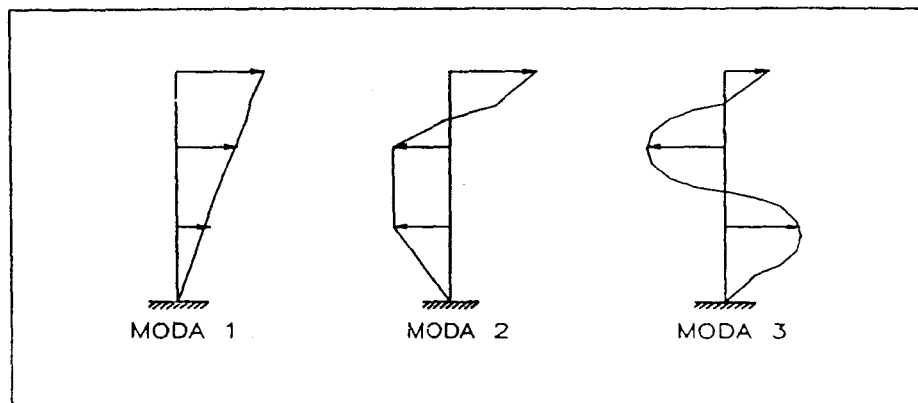
5. Cara Uji Getar

Cara pengujian adalah sebagai berikut:

1. Siapkan sensor untuk mendapatkan getaran arah horisontal.
2. Tempatkan sensor pada puncak pilar/pangkal 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 bawah jembatan (selama melakukan pengujian diperlukan penutupan jembatan untuk beban tumbuk dan pengaturan lalu lintas bila menggunakan beban kendaraan):
6. Lakukan pencatatan getaran.



Gambar 3. Contoh penempatan sensor pengukuran getaran



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

6. Parameter Penilaian Dinamis

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

Analisis adalah perhitungan ulang dari frekuensi alami ($f_{teoritis}$), berdasarkan dimensi dari pilar/pangkal 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. Kedalaman jepit pondasi (L_{aktual}).

Frekuensi alami aktual (f_{aktual}) menunjukkan kedalaman jepit aktual (L_{aktual}). Kedalaman jepit aktual menunjukkan kapasitas daya pikul pondasi.

7. Analisis Getaran Bebas

7.1 Analisis Frekuensi

Jepit semu pada tepi bawah kolom pilar menggunakan rumus dalam "Peraturan Beban - BMS 1992" - (Rumus 1) - untuk frekuensi alami teoritis ($f_{teoritis}$) sebagai berikut :

$$f_{teoritis} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot I \cdot g}{w \cdot L_{teoritis}^3}} \quad (\text{Rumus 1})$$

Dengan :

- $E_{dinamis}$ = modulus elastis dinamis kolom [KN/m²] (Rumus 3)
- I = momen inersia kolom rata-rata dalam arah horisontal yang ditinjau [m⁴]
- g = percepatan gravitasi [m/det²]
- w = berat bangunan atas (reaksi pada kolom) ditambah setengah berat kolom
- $L_{teoritis}$ = tinggi kolom terhadap tepi atas balok pondasi [m]

Kondisi pilar/pangkal dianalisis lebih lanjut dengan rumus yang disederhanakan dengan mengabaikan interaksi tanah - Rumus 2.

$$\omega^2 = \frac{\int_0^{L_{aktual}} E \cdot I \cdot (\ddot{\psi})^2 \cdot dz}{\int_0^{L_{aktual}} m \cdot \psi^2 \cdot dz} \quad (\text{Rumus 2})$$

Dengan :

- $E_{dinamis}$ = modulus elastis dinamis kantilever [KN/m²] (Rumus 3)
 I = momen inersia kantilever dalam arah horisontal yang ditinjau [m⁴]
 m = massa persatuan panjang kantilever
 L_{aktual} = tinggi kantilever [m]
 $\omega = 2\pi f$ = frekuensi sirkular alami aktual (radial/detik)
 $\psi = \left(\frac{z}{L}\right)^2$ = fungsi perubahan bentuk (moda 1)

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

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

Analisis modal dapat juga dilakukan dengan menggunakan Program Analisis Struktur dengan data masukan sebagai berikut :

- L_{aktual} dalam arah melintang dan memanjang pilar/ pangkal.
- Konstanta pegas (K) perletakan pada puncak pilar/ pangkal (Gambar 5) dengan rumus sebagai berikut :

$$\Delta_k = 250 \cdot k_h \cdot T^2$$

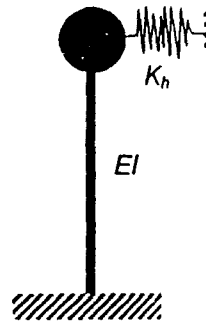
dengan:

(Rumus 4)

$$\text{Gaya Pegas} = K_h = k_h \cdot G$$

Dengan :

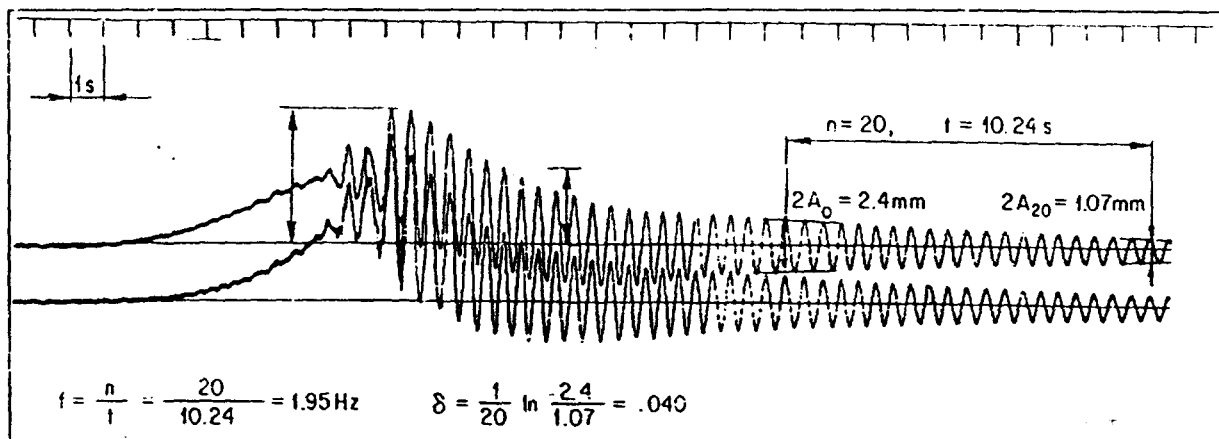
- Δ_h = lendutan horisontal [mm]
 T = periode getaran pilar atau pangkal [detik]
 k_h = koefisien seismik statik ekuivalen
 G = berat sendiri jembatan di puncak pilar/pangkal



Gambar 5 : Skema Model Analisis Komputer

7.2 Analisis Rekaman Getaran Bebas

Cara interpretasi rekaman getaran yang tipikal diberikan dalam Gambar 6.



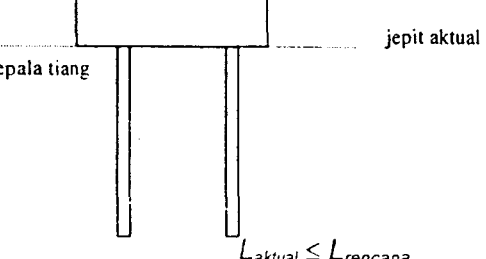
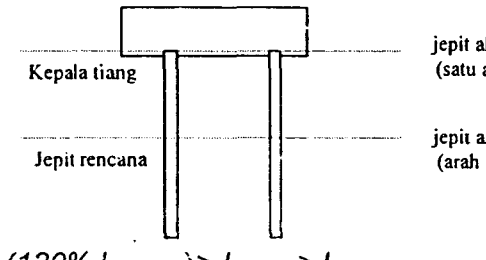
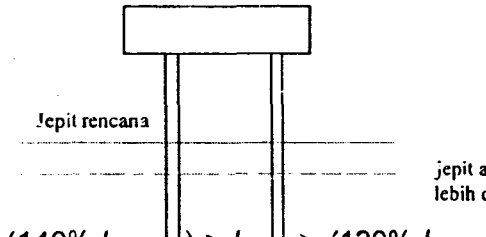
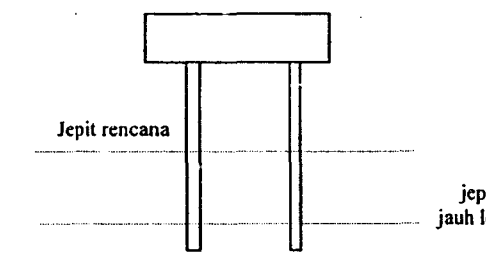
Gambar 6 : Interpretasi rekaman getaran tipikal

7.3 Evaluasi Hasil Analisis

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

- Kategori 1 : stabil/ baik
Jepit di kepala tiang dalam arah melintang dan memanjang.
- Kategori 2 : kurang stabil/cukup
Jepit satu arah di kepala tiang dan lain arah mendekati perencanaan.
- Kategori 3 : tidak stabil/kurang
Jepit lebih dalam dari rencana dalam arah melintang dan memanjang dan gaya/momen tiang mulai meningkat terhadap nilai rencana.
- Kategori 4 : labil/kritis
Jepit jauh lebih dalam dari rencana dalam arah melintang dan memanjang dan gaya/momen tiang lebih meningkat terhadap nilai rencana.

Tabel 1. Penilaian Kondisi Bangunan Bawah Jembatan

Kategori	Jepit dalam pondasi arah memanjang - arah melintang	Gaya dan Momen tiang pondasi
1. stabil/ baik	 <p style="text-align: center;">$L_{aktual} \leq L_{rencana}$</p>	Nilai aktual lebih kecil atau sama dengan nilai rencana
2. kurang stabil/ cukup	 <p style="text-align: center;">$(120\% L_{rencana}) > L_{aktual} > L_{rencana}$</p>	Nilai aktual lebih besar dari nilai rencana dan lebih kecil 120% dari nilai rencana
3. tidak stabil/ kurang	 <p style="text-align: center;">$(140\% L_{rencana}) > L_{aktual} \geq (120\% L_{rencana})$</p>	Nilai aktual lebih besar atau sama dengan 120% dari nilai rencana dan lebih kecil 140% dari nilai rencana
4. Labil/ kritis	 <p style="text-align: center;">$L_{aktual} \geq (140\% L_{rencana})$</p>	Nilai aktual lebih besar atau sama dengan 140% dari nilai rencana

Catatan :

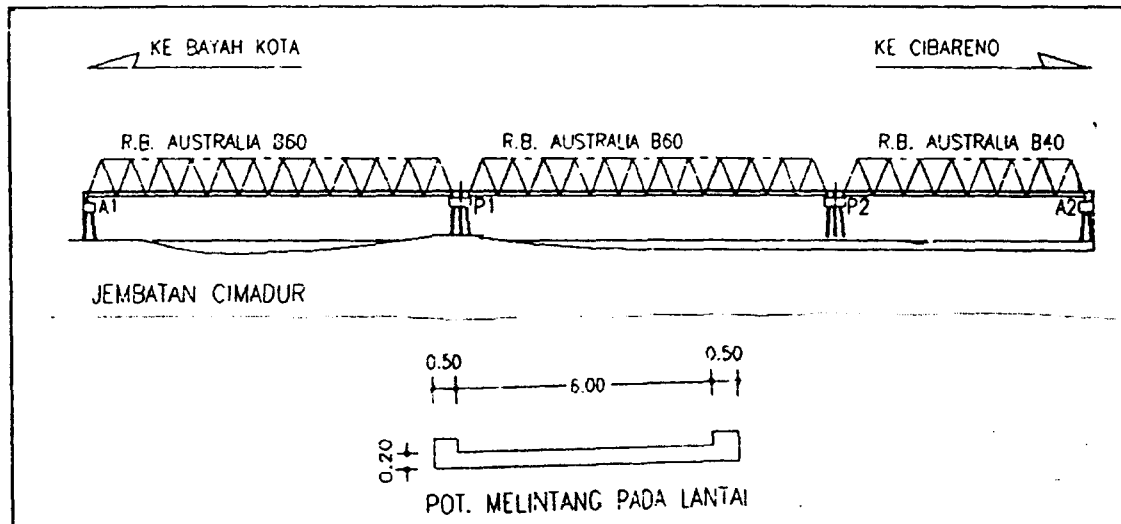
- Kriteria dalam Tabel 1 khusus berlaku untuk bangunan bawah dengan pondasi tiang. Untuk penilaian bangunan bawah dengan pondasi langsung atau sumuran diperlukan perhitungan kedalaman efektif tertahan dari pondasi.
- Penilaian obyektif dibantu oleh pemeriksaan visual.

8. Contoh Kasus

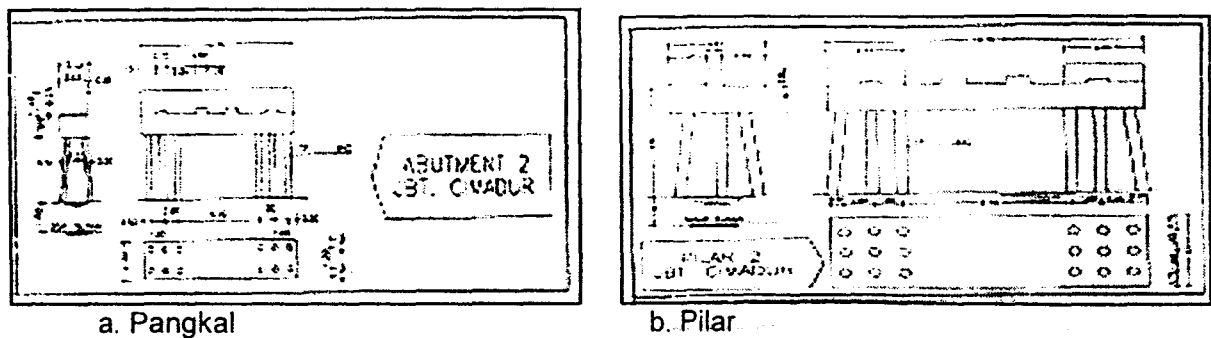
Pangkal dan Pilar tipe balok cap dengan tiang pancang beton

Data jembatan :

Nama jembatan	= Jembatan Cimadur
Tanggal Pengujian	= 18 September 2000
Tipe bangunan bawah jembatan	= balok cap beton bertulang
Tipe pondasi	= tiang pancang beton ϕ 40
Reaksi pada pilar	= 3.250 kN
Reaksi pada pangkal	= 1.460 kN
Mutu beton, f_c'	= 17,5 MPa (= $17,5 \times 10^3$ kN/m ²) (teoritis)
$E_{dinamis}$	= $2,9 \times 10^7$ kN/m ² (teoritis)



Gambar 7. Bangunan Atas Jembatan Cimadur

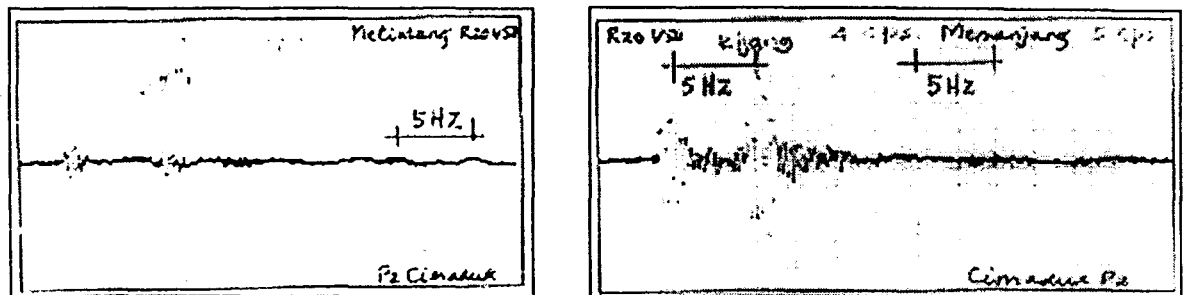


a. Pangkal

b. Pilar

Gambar 8. Bangunan Bawah Jembatan Cimadur

Data uji getar untuk pilar (P2):



simpangan vibrocorder Range 20, Speed 50

Gambar 9 : Rekaman getaran horisontal untuk pilar

Frekuensi moda pertama arah memanjang, f_{aktual} = 5 Hz
 Frekuensi moda pertama arah melintang, f_{aktual} = 5 Hz
 Konstanta pegas perletakan di pilar, $K_{\text{melintang}}$ = $3,25 \times 10^5$ kN/m²
 Konstanta pegas perletakan di pilar, $K_{\text{memanjang}}$ = $3,25 \times 10^5$ kN/m²

Hasil evaluasi dengan program analisis struktur :

Kedalaman jepit aktual untuk melintang, $L_{\text{aktual, melintang}}$ = 10,4 m
 Kedalaman jepit aktual untuk memanjang, $L_{\text{aktual, memanjang}}$ = 10,4 m

Hasil evaluasi dengan program analisis tiang pondasi :

Kedalaman jepit rencana untuk melintang, $L_{\text{rencana, melintang}}$ = 7,1 m
 Kedalaman jepit rencana untuk memanjang, $L_{\text{rencana, memanjang}}$ = 7,1 m

Gaya yang diterima oleh tiang sesuai rencana :

Gaya aksial rencana = 836 kN per tiang
 Gaya geser rencana = 36 kN per tiang
 Momen rencana = 162 kNm per tiang

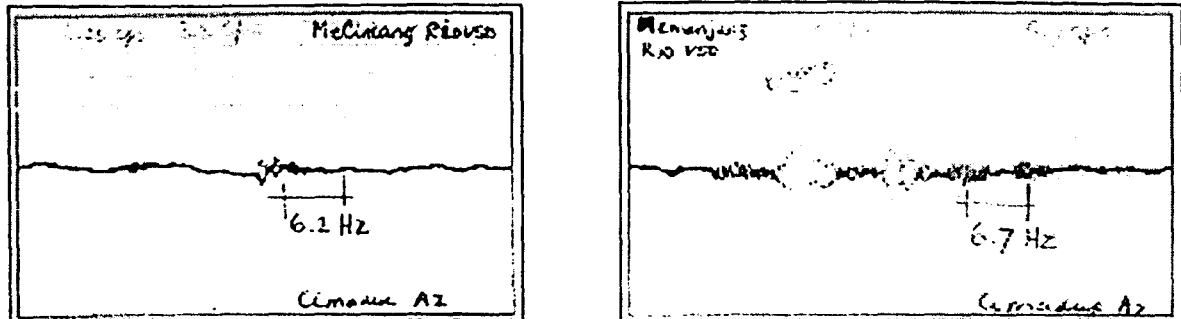
Gaya yang diterima oleh tiang sesuai kondisi lapangan :

Gaya aksial aktual = 874 kN per tiang
 Gaya geser aktual = 36 kN per tiang
 Momen aktual = 196 kNm per tiang

Kesimpulan:

Kondisi pilar P2 adalah tidak stabil (kategori 3).

Data uji getar untuk pangkal (A2):



simpangan vibrocorder Range 10, Speed 50

Gambar 10 : Rekaman getaran horisontal untuk pangkal

Frekuensi moda pertama arah memanjang, f_{aktual} = 6,7 Hz
 Frekuensi moda pertama arah melintang, f_{aktual} = 6,2 Hz
 Konstanta pegas perletakan di pangkal, $K_{\text{melintang}}$ = 224490 kN/m²
 Konstanta pegas perletakan di pangkal, $K_{\text{memanjang}}$ = 262158 kN/m²

Hasil evaluasi dengan program analisis struktur :

Kedalaman jepit aktual untuk melintang, $L_{\text{aktual, melintang}}$ = 9,8 m
 Kedalaman jepit aktual untuk memanjang, $L_{\text{aktual, memanjang}}$ = 8,1 m

Hasil evaluasi dengan program analisis tiang pondasi :

Kedalaman jepit rencana untuk melintang, $L_{\text{rencana, melintang}}$ = 8,1 m
 Kedalaman jepit rencana untuk memanjang, $L_{\text{rencana, memanjang}}$ = 8,1 m

Gaya yang diterima oleh tiang sesuai rencana:

Gaya aksial rencana = 735 kN per tiang
 Gaya geser rencana = 57 kN per tiang
 Momen rencana = 63 kNm per tiang

Gaya yang diterima oleh tiang sesuai kondisi lapangan:

Gaya aksial aktual = 1024 kN per tiang
 Gaya geser aktual = 57 kN per tiang
 Momen aktual = 179 kNm per tiang

Kesimpulan:

Kondisi pilar A2 adalah labil (kategori 4)

9. Bibliografi

- Wiegel, R.L., Earthquake Engineering, 1970, Prentice-Hall, U.S.A.
- Nagayama, I., Jikan, S., Study on Dynamic Behaviour of Concrete Dam during Earthquake with Hydro-Dynamic Interaction, 1986, Public Works Research Institute Journal, Japan
- Kuribayashi, S., Iida, Y. Fukuta, T., Measurements of Vibration in Itashima Bridge, 1973, Japan
- Earthquake Resistant Design of Bridges, 1985, Japan Society of Civil Engineers, Japan
- Introduction to Earthquake Engineering, 1985, Japan Society of Civil Engineers, Japan
- Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, 1983, IABSE Colloquium, Copenhagen
- Trisanto, L., Pengaruh Vibrasi terhadap Pilar Jembatan, 1991, Laporan Penelitian, Puslitbang Jalan
- Trisanto, L., High Rise Pier Vibration Test, 1992, Proceedings 7th REAAA Conference, Singapore
- Trisanto, L., Microtremor Prediction for Bridge Rating, 2000, Proceedings 10th REAAA Conference, Tokyo
- Peraturan Perencanaan Jembatan & Manual Perencanaan Jembatan, BMS, Volume 1 dan 2 - 1992