



PENGARUH VIBRASI TERHADAP PILAR JEMBATAN

Lanneke Tristanto

Ringkasan

Respon vibrasi dari pilar tinggi dievaluasi untuk analisa interaksi gaya pada struktur . Pilar tinggi dan fleksibel dengan beban bangunan atas di puncak, cenderung mengalami vibrasi.

Analisa modal berdasarkan vibrasi terukur pada puncak pilar, merupakan pendekatan secara matematik untuk simulasi pengaruh gaya dan gerakan pada kondisi pilar di lapangan.

Summary

The vibration response data of high piers is evaluated to analyze the force interaction with the structure. Flexible high piers with bridge super structures on top, are susceptible to vibration.

The modal analysis is based on the measured vibration of the pier crest. Mathematical approach is used to simulate force and motion effects on the built pier condition.

I. PENDAHULUAN

Tendensi perencanaan pilar jembatan yang lebih tinggi dan penggunaan bentang jembatan yang lebih panjang, menuju pada kelangsingan - fleksibilitas dan vibrasi pilar.

Karakteristik dinamik pilar jarang diperhitungkan dalam perencanaan. Masalah utama adalah perilaku pondasi pilar yang sulit dievaluasi karena data dan interaksi tanah sulit ditentukan.

Vibrasi pilar terjadi sebagai perlawanan struktur terhadap gaya luar. Perlawanan struktur dinyatakan dalam parameter dinamik : frekwensi dan intensitas vibrasi. Tes vibrasi memerlukan gaya penyebab eksitasi dalam bentuk gaya peletakan bangunan atas pada tepi atas pilar dan / atau aliran air pada badan dan tiang pilar. Pengamatan vibrasi pada tepi atas pilar dilaksanakan pada kondisi beban lalu lintas biasa.

Berdasarkan test pengukuran parameter dinamik vibrasi, dapat diadakan analisa elastik. Dengan demikian tes vibrasi merupakan salah satu cara untuk memudahkan analisa dinamik pilar, yang selama ini terbentur pada keterbatasan data.

II. METODA PENELITIAN

Percobaan getar dilaksanakan dengan peralatan 'vibrasi monitor' yang merekam getaran bangunan atas dan pilar jembatan pada saat bersamaan. Gerakan yang terjadi akibat lintasan lalu lintas pada jembatan, direkam dalam tiga arah :

- L = longitudinal atau memanjang jembatan
- V = vertikal atau tegak lurus jembatan
- T = transversal atau melintang jembatan

Gerakan dalam dimensi perpindahan dinamik (dynamic displacement) - kecepatan getar (vibration velocity) - dan percepatan getar (vibration acceleration) - dapat direkam dalam tiga arah dan pada dua titik ukur secara bersamaan. Dengan demikian diperoleh rekaman dalam urutan L-V-T + L-V-T untuk dimensi terpilih, untuk titik tengah bangunan atas dan titik puncak pilar.

Data getar kemudian dievaluasi dengan memperhatikan parameter sebagai berikut :

- . waktu perioda getar alami = T (detik)
- . frekwensi getar alami = f (Hertz = cps)
- . intensitas getar dalam dimensi mm, mm/d, g(= 980 gals)

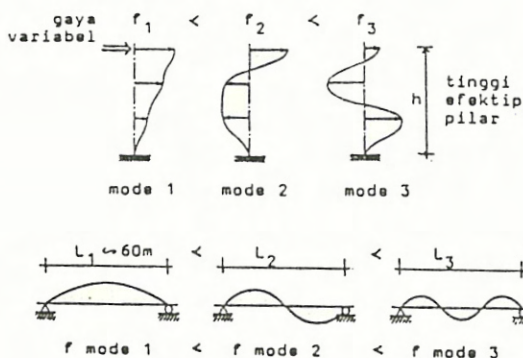
Parameter getar menjadi data dasar untuk melanjutkan analisa modal dan analisa sederhana untuk struktur pilar.

III. KERANGKA PEMIKIRAN

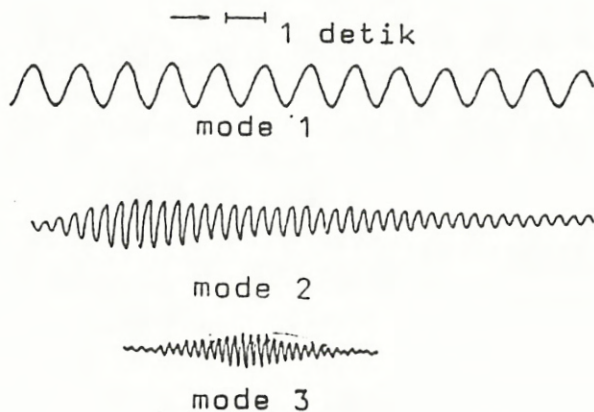
3.1. Test Dinamik Jembatan

Test dinamik dan analisa lengkap, memerlukan persiapan dan peralatan yang hanya mungkin diadakan di laboratorium untuk skala struktur terbatas. Penilaian jembatan memerlukan test getar sederhana yang memberikan data perilaku getar dan mewakili kondisi skala penuh aktual.

Kesulitan evaluasi test dinamik jembatan, khususnya pilar sebagai bangunan tinggi, terletak pada fakta bahwa gaya eksitasi yang variable akan menimbulkan frekwensi dan perubahan bentuk - mode yang variabel pula (Gambar 1.). Hasil test lapangan memberikan suatu data rekaman getaran dengan frekwensi variabel sesuai perubahan bentuk - mode yang terjadi dalam jembatan, (Gambar 2.).



Gambar 1. Perubahan bentuk - mode shape getaran pada pilar dan bangunan atas jembatan.



Gambar 2. Contoh rekaman getar - frekwensi - mode

3.2. Kriteria Dinamik Jembatan

Umumnya suatu test dinamik jembatan dianalisa terhadap 'ketahanan gempa', yang merupakan kejadian jarang dan khusus, Dalam kenyataan, kelayakan jembatan sangat terpengaruh oleh beban lalu lintas dan arus sungai, yang menjadi segi pertimbangan untuk mewujudkan suatu kriteria dinamik jembatan.

Tingkat 'seismisitas' selama umur pelayanan jembatan menjadi tolak ukur untuk penilaian kondisi struktur. Berdasarkan nilai hasil test yang selama ini dilaksanakan pada berbagai jembatan, dapat diperoleh suatu batas kriteria yang sesuai untuk tipe dan kondisi pilar beton dan jembatan baja di Indonesia (Tabel 1.).

Tabel 1. Batas kriteria dinamik jembatan

Batas kondisi	: Kenyamanan → Kelayakan → Keamanan
kecepatan getar	: 5 mm/d → 15 mm/d → 25 mm/d
percepatan getar	: 0.1 g → 0.3 g → 0.5 g
frekwensi jembatan	: $f(\text{cps}) \geq 125/L$ (bentang dalam m)
frekwensi pilar	: maksimum dua mode (1 - 2)

3.3. Prosedur Analisa Vibrasi Pilar

Analisa vibrasi dengan cara 'Modal Analysis' merupakan perhitungan dinamik pendekatan untuk memperoleh tinggi efektif pilar sebagai kantilever terjepit sederhana.

Prosedur 'Analisa modal' adalah sebagai berikut :

- i. Penentuan massa m dan kekakuan EI untuk besaran penampang pilar
- ii. Penentuan frekwensi sirkular ($\omega = 2\pi f$) pada tingkat perubahan bentuk lentur 'mode shape'
 $u = f(x, h)$
 $\sin \omega t = u_0 \sin \omega t$ berdasarkan :

$$\text{Enersi potensial} = \frac{1}{2} k u^2$$

$$\text{Enersi Kinetis} = \frac{1}{2} m u^2 \quad (1)$$
 dengan :

$$u_0 = (x/h)^n \text{ untuk } n = 2, 3, 4 \dots \text{ pada mode : } 1, 2, 3 \dots$$

Rumus (1) diuraikan sebagai berikut :

$$\frac{1}{2} k u_0^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} m u_0^2 \cos^2 \omega t$$

Nilai maksimum terjadi pada

$$\sin \omega t = 1$$

$$\cos \omega t = 1$$

$$u_0 = u$$

sehingga :

$$\frac{1}{2} \int EI (u'')^2 dx = \frac{1}{2} \omega^2 \int m u^2 dx$$

$$\omega^2 = \frac{\int EI (u'')^2 dx}{\int m u^2 dx} \quad (2)$$

$$\omega^2 = \frac{k^*}{m^*} \frac{\text{'kekakuan'}}{\text{'massa'}}$$

iii. Penentuan faktor partisipasi perubahan bentuk :

$$\beta = \frac{\int m u dx}{\int m u^2 dx} \quad (3)$$

iv. Penentuan respon struktural pilar : $R_{d,v,a}$

$$R_i = \beta \cdot u \cdot S_i \cdot dx \quad (4)$$

dengan :

S_i = getaran terukur dalam perpindahan, kecepatan atau percepatan - sebagai nilai spektral $S_{d,v,a}$

v. Gaya P ekwivalen pada puncak pilar dan Momen M ekwivalen pada elevasi titik cepit pilar, ditentukan sebagai berikut :

$$P = \int m \cdot dR_a \quad (5)$$

$$M = \int dP \cdot x = \int m \cdot dR_a \cdot x \quad (6)$$

vi. Frekwensi alami dapat diperoleh dengan rumus sederhana sebagai berikut

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{W}{g \cdot K}} \quad (7)$$

$$f = 1/T \quad (8)$$

Rumus (7) hanya berlaku untuk pilar dengan pondasi yang tertanam dalam tanah

dengan :

- T = waktu getar untuk satu perioda gelombang dalam detik - pada mode 1 dari struktur pilar
- f = frekwensi alami fundamental dalam Hertz (=cps)
- W = berat pilar dan bagian bangunan atas yang didukung oleh pilar yang ditinjau
- K = kekakuan pilar, untuk pilar yang terpisah dari bangunan atas dapat dianggap sebesar $3 EI/h^3$ dengan EI rata - rata.
- E = Moduli Young pilar
- I = Momen inersia pilar dalam arah yang ditinjau
- h = tinggi pilar efektif terjepit
- g = akselerasi gravitasi 9.8 m/d²

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Vibrasi Pilar Jembatan Mahakam

Hasil pengukuran vibrasi pilar menunjukkan frekwensi kekakuan pilar relatif kecil, yang mencerminkan perilaku pilar fleksibel. Fleksibilitas pilar dalam hal ini merupakan reaksi gabungan dari faktor pengaruh sebagai berikut :

- i. tinggi bebas pilar di atas dasar sungai (30-40m)
- ii. gaya gesek perletakan dalam arah memanjang, terutama pada kelandaian bangunan atas (5-7.5% pada jalan masuk dan bentang pinggir)
- iii. gaya aliran sungai pada pilar dan pondasi, dalam arah melintang (konsentrasi arus pada pilar) dan arah memanjang - vertikal (turbulensi arus - gaya hisap & angkat, antara lain akibat lalu lintas kapal pada alur antar pilar)

Gaya luar pada pilar tidak dapat ditentukan secara tepat karena arah dan besarnya selalu berubah. Pengaruh gaya luar pada pilar dapat di ukur dan dianalisa melalui respon getar, sebagai suatu simulasi kondisi pilar.

Frekwensi pilar relatif kecil diperoleh dalam arah memanjang - pilar 1 & 5 pada kelandaian bangunan atas, dan dalam arah melintang - pilar 3 & 4 pada konsentrasi arus. Sebagai kasus analisa dipilih pilar no. 4. , dengan tinggi bebas maksimum (44m). Data pengukuran getar pilar no. 4. pada kondisi lalu lintas 'ringantruk tunggal' adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Pengukuran getar pilar 4

Arah getar	Frekwensi-Intensitas pengukuran 1986	Frekwensi-Intensitas pengukuran 1991
L	2.5cps - 1.8mm/d	4-6.7cps - 0.8mm/d
V	0.3mm/d	0.38mm/d
T	1.7-2cps - 2.8mm/d	3-3.5cps - 0.25mm/d

Getaran pilar dalam tiga dimensi kemudian dianalisa secara terpisah untuk arah Longitudinal dan Transversal dengan kondisi pengukuran 1986- 1991 sebagai data. Ikhtisar analisa simulasi matematik dalam tabel 3 - 4 memberikan perbandingan respon dan kondisi pilar pada aliran - arus sungai yang 'deras' vs 'tenang'. Cara perhitungan analisa modal adalah lebih tepat, mengingat besaran penampang yang tidak tetap sepanjang tinggi pilar portal dan pondasi tiang. Dalam hal ini tidak dapat digunakan rumus sederhana (7). Pengukuran getar pada tahun 1986 dan 1991 mewakili suatu kondisi arus 'deras' dan 'tenang'.

Tabel 3. Analisa pilar no. 4. - arah transversal

	'Arus deras'	vs	'Arus tenang'
1. Kekakuan pilar :			
frekuensi (cps)	2	--	3.25 rata ²
h efektif (m)	50.08	--	39.08
d ₁ 'cepit' (m)	6	--	--
d ₂ batuan (m)	6.5	--	12.5
2. Gaya pada pilar:			
P semu (ton)	5.8 (total)	--	1.66 (total)
P arus air (ton)	9.8	--	2.3
v arus air (m/d)	1.3	--	0.7
σ tiang (MPa)	2	--	1.7
3. Deformasi pilar:			
d ₁ lentur (mm)	0.3	--	0.025
seismisitas (g)	0.005	--	0.001
K=P semu/d ₁ (t/m)	19333	--	66400

Fleksibilitas pilar untuk tinggi efektif h = 50.08m dengan frekwensi 2 cps, adalah sebagian studi kasus, yang diuraikan sebagai berikut :

- i. Massa (m) pilar dan kekakuan inersia (EI_x dalam arah transversal) terbagi secara tidak merata, mengingat dimensi pilar --- Gambar dan tabel 3a
- ii. Frekwensi circular teoritik ω rad/d diperoleh dengan mempersamakan enersi potensial maksimum dan enersi kinetik maksimum sesuai rumus (2)

Tabel 3a. Massa(m) dan Inersia(EI) pilar arah T(ransv.)-L(ong.)

Interval x-(m)	Massa m-(td ² /m ²)	Inersia I-(t.m ² .106)-L
0.00 - 6.00	0.625	172.98 44.11
6.00 - 37.50	4.030	484.28 122.09
37.50 - 38.70	19.643	1979.48 1027.77
38.70 - 39.50	12.347	1258.52 227.6
39.50 - 40.00	4.224	292.00 11.17
40.00 - 43.60	1.298	176.71 2.57
43.60 - 44.80	2.440	205.98 3.17
44.80 - 47.78	1.298	176.71 2.57
47.78 - 48.58	1.001	275.64 6.89
48.58 - 49.78	*53.554	1062.00 13.93
49.78 - 50.08	4.285	531.00 6.96
tinggi 0-h	G/9.8	EI _x EI _y

* termasuk massa - berat sendiri jembatan rangka baja :
 bentang 608 : 187.5 t } 529 t
 bentang 1008 : 341.5 t }
 massa terbagi rata sepanjang tinggi x=1.2m : 529/(1.2x9.8) = 44.98 td²/m²

Dengan anggapan bahwa perubahan bentuk pilar mengikuti mode-1 atau $u = (x/h)^2$, tinggi efektif pilar 50.08m - h, diperoleh frekwensi sirkular ω atau $f = 2 \text{ cps } (= \omega/2\pi)$:

$$\frac{1}{2} \int_0^h EI_x (u'')^2 dx = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^h m u^2 dx \quad (2)$$

$$\omega = 12.65 \text{ rad/d}$$

Faktor partisipasi dinamik diperoleh dengan rumus (3) :

$$\beta = \frac{\int_0^h m u dx}{\int_0^h m u^2 dx} \quad (3)$$

$$\beta = 1.347$$

Nilai spektral tergantung pada respon kecepatan getar S_v sebesar 2.8 mm/d sebagai berikut :

$$S_a = \omega S_v = 35.17 \text{ mm/d}^2 \text{ untuk } f = 2 \text{ cps}$$

$$S_d = S_v / \omega = 0.223 \text{ mm untuk } f = 2 \text{ cps}$$

Respon struktural pilar R_a dan R_d diperoleh dengan rumus (4) :

$$R_a = \beta u S_a = 47.4 \text{ mm/d}^2 \approx 0.005 \text{ g seismisitas puncak pilar} \quad (4)$$

$$R_d = \beta u S_d = 0.3 \text{ mm} = d_1 \text{ lenturan pada pilar-arah Transv.}$$

Gaya p semu pada puncak pilar dan momen M pada elevasi cepit pondasi, diperoleh dengan rumus (5) dan (6) :

$$\sum P_{\text{semu}} = \int_0^h m \beta u S_a dx = 5.78 \text{ t (total)} \quad (5)$$

$$M_{\text{cepit}} = \int_0^h m \beta u S_a x dx = 243.46 \text{ tm} \quad (6)$$

Tegangan tiang pada elevasi cepit diperhitungkan berdasarkan M cepit - Gaya vertikal pada pondasi akibat beban jembatan dan pilar - konfigurasi dan inersia tiang pancang baja-sehingga diperoleh :

$$\sigma_{\text{tiang}} = \sigma_M + \sigma_V = 1.9 \text{ MPa}$$

Berdasarkan M cepit dapat diperoleh gaya arus aktual (P air) dan kecepatan arus (v air) sebagai berikut :

$$P_{\text{air}} = M / h_p \approx 9.8 \text{ t dengan } h_p = 24.9 \text{ m}$$

$$v_{\text{air}} = \sqrt{(P_{\text{air}} / 0.04 A)} \approx 1.3 \text{ m/d}$$

dengan A - luas tiang yang terpengaruh

oleh arus, 5 tiang @ diameter 1m, $A = (5 \times 1 \times 31.5) \text{ m}^2$

Kekakuan struktural identik dengan gaya yang menimbulkan satuan lenturan pada puncak pilar :

$$K \text{ struktural} = P \text{ semu} / d_1 \\ = 19333 \text{ t/m}$$

Mengingat pilar mempunyai frekwensi dalam dua arah utama :

transversal atau dalam arah sumbu inersia kuat - dan longitudinal atau dalam arah sumbu inersia lemah, maka diperoleh tinggi efektif h yang berbeda untuk setiap arah getaran pilar - tabel 3 - 4.

Variabilitas frekwensi dalam setiap arah getaran, terjadi karena gaya penyebab - eksitasi selalu berubah, sehingga pilar mengalami perubahan bentuk sesuai mode 1 - dengan tinggi efektif yang variabel. Dengan demikian dapat terjadi 'cepit semu' pada setiap elevasi pilar - pondasi, yang perlu diperhitungkan dalam rencana tipe pilar dengan tiang pancang di atas dasar sungai.

Pilar tinggi dengan massa bangunan atas pada puncak, akan mempunyai perilaku fleksibel, mengingat bahwa massa berat tersebut selalu ikut bergerak dengan seluruh instruktur pilar.

- lihat catatan (*) dalam tabel 3a.

Tabel 4. Analisa pilar no. 4. - arah longitudinal

	'Arus deras'	vs	'Arus tenang'
1. Kekakuan pilar :			
frekwensi(cps)	2.5	--	4 - 6.7
h efektif(m)	30.58	--	22.58 - 16.58
2. Gaya pada pilar :			
P semu (ton)	3.3 total	--	2.0 - 2.8 total
P arus air(ton)	8.0	--	6.7 - 17.3
v arus air(m/d)	1.3	--	1.5* - 4 *
3. Deformasi pilar :			
d_1 lentur (mm)	0.15	--	0.04 - 0.02
seismisitas (g)	0.004	--	0.003- 0.004
$K=P_{\text{semu}}/d_1$ (t/m)	22000	--	50000 - 140000
			*kecepatan arus saat kapal lewat

Bentang pelayaran kapal adalah ~80m dan berada pada alur bebas antara pilar 3 dan 4 - bentang rangka baja 100m. Arah dan kecepatan arus mengalami

'percepatan' pada saat kapal lewat antara fender pilar. Lintasan kapal dapat mempercepat arus, sampai 4m/detik pada kondisi arus tenang yang identik dengan $v = 0.7 \text{ m/d}$, lihat tabel 3 - 4.

Rencana dan konstruksi fender memerlukan pengetahuan dan pengalaman dinamik mendalam agar fender mempunyai kekuatan dan perubahan bentuk yang mampu menahan tumbukan kapal. Dengan demikian fender melindungi konstruksi utama pilar.

Analisa modal untuk pilar 4 - Tabel 3 - 4 - berlaku secara umum untuk pilar 3. Pilar 3 mempunyai dimensi identik dan frekwensi - respon kurang lebih sama dengan pilar 4. Kedalaman pondasi tertanam adalah lebih besar untuk pilar 3 - sesuai kondisi 1986 pada saat jembatan selesai dibangun.

Fleksibilitas pilar untuk tinggi efektif $h = 30.58$ dalam arah longitudinal - dengan frekwensi 2.5 cps - Tabel 4. - diuraikan sebagai berikut :

- i. Penentuan frekwensi pilar berdasarkan mode shape $u = x^2/h^2$ dengan $h = 30.58 \text{ m}$:

$$\omega^2 = \int_0^h EI (u'')^2 dx / \int_0^h m u^2 dx = \int_0^h EI (2/h^2)^2 dx / \int_0^h m (x^4/h^4) dx \\ = (4/h^4 \cdot \Sigma EI_y) / (1/5 h^4 \cdot \Sigma m x^5) = 15.37^2 (\text{RAD/DETIK})^2 \\ f = \omega / 2 \pi = 2.45 \text{ cps} \approx 2.5 \text{ cps terukur}$$

- ii. Penentuan faktor partisipasi dinamik :

$$\beta = \int_0^h m u dx / \int_0^h m u^2 dx = (1/3 \int_0^h m x^3) / (1/5 h^4 \cdot \Sigma m x^5) = 1.297$$

- iii. Penentuan nilai respon getar berdasarkan

$$S_v = R_v = 1.8 \text{ mm/d} :$$

$$R_d = \beta \cdot (x/h)^2 \cdot S_d = 1.297 \times 1.8 / (2 \pi \times 2.45) = 0.15 \text{ mm}$$

$$R_a = \beta \cdot (x/h)^2 \cdot S_a = 1.297 \times (2 \pi \times 2.45 \times 1.8) = 36 \text{ mm/d}^2 = 4 \text{ gal}$$

Respon diperhitungkan untuk $x = h$ atau pada puncak pilar

- iv. Penentuan gaya horisontal pada pilar yang ekuivalen getaran yang terjadi :

$$P_{\text{semu-total}} = \int_0^h m R_a dx = \int_0^h m \beta (x/h)^2 S_a dx = 3.3 \text{ tonforce}$$

- v. Penentuan momen pada cepit pilar yang ekuivalen getaran yang terjadi :

$$M_{\text{total}} = \int_0^h m R_a x dx = \int_0^h m \beta (x/h)^2 S_a \cdot x \cdot dx = 86.7 \text{ tm}$$

- vi. Penentuan gaya aliran air yang sebenarnya merupakan gaya eksitasi getaran :

$P_{air} \cdot h_a = M_{total}$ sehingga : untuk titik tangkap gaya
 aliran = 0.6 tinggi air, $h_a = 10.8$ m
 $P_{air} = 8.03$ ton , dengan koefisien aliran 0.04 untuk tiang
 bulat-dan luas pengaruh $7 \times \phi 1 \text{ m} \times 18$ m diperoleh :
 $v_{air} = \sqrt{8.03 / (0.04 \times 7 \times 1 \times 18)} = 1.3$ m/d

vii. Kekuatan semu sebagai nilai pembanding fleksibilitas :

$K = 3.3 / (0.15 \times 10^3) = 22000$ t/m

viii. Evaluasi mengenai ketepatan analisa modal :

Perhitungan analisa modal yang diterapkan untuk pilar no. 3-4 mendekati nilai getar aktual, berarti nilai respon getar (R) kurang lebih sama dengan hasil tes getar.

4.2. Analisa Vibrasi Pilar Jembatan Krasak

Pilar jembatan Krasak adalah tipe tembok dengan pondasi sumuran terbuka. Gerakan pilar terjadi dalam arah longitudinal jembatan, akibat gaya gesek perletakan dan stabilisasi pondasi. Pondasi yang tertanam dalam dasar sungai telah mengalami penggerusan, sehingga penggunaan rumus sederhana (7) untuk penentuan frekwensi pilar dalam hal ini berlaku secara terbatas. Data vibrasi pilar adalah sebagai berikut - Tabel 5.

Tabel 5. Pengukuran getar pilar jembatan Krasak

Arah getar	Frekwensi	Intensitas mm/d	mm	g
L	3.8-6.1 cps	5.6	0.04	0.010
V	-	0.65	0.005	0.012
T	-	0.2	0.0	0.0

Getaran pilar dalam arah longitudinal dianalisa dengan cara sederhana dan cara integrasi 'analisa modal', dan hasil perhitungan dibandingkan dalam tabel 6.

Tabel 6. Analisa pilar jembatan Krasak - arah L

	Analisa modal		Analisa sederhana
1. Kekakuan pilar :			
frekuensi (cps)	6.1	- 3.8	3.1 (kolcm)
h efektif (m)	17	- 24	15* (anggapan)
2. Gaya pada pilar :			
P semu (ton)	29.7	- 19.7	-
3. Deformasi pilar :			
d ₁ lentur (mm)	0.08	- 0.20	-
seismisitas(g)	0.025	- 0.017	-
K=P _{semu} /d ₁ (t/m)	371000	- 98500	-

dasar sungai
2 sumuran ϕ 7m

Mode 1 dengan h yang variabel

Analisa modal untuk pilar Jembatan Krasak diuraikan untuk kondisi h efektif 24 m (dasar tanah batuan) dengan frekwensi $f = 3,8$ cps - Tabel 6 - sebagai berikut :

i. Penentuan massa dan besaran inersia EI_y :

Tabel 6. Massa (m) dan EI_y pilar Jembatan Krasak

Interval x-h	Massa	Inersia
0 - 7	19.63	412.492
7 - 8.5	38.775	2026.65
8.5 - 9.0	24.489	1004.993
9.0 - 12.375	11.11	71.647
12.375 - 15.75	8.988	43.345
15.75 - 19.125	7.094	24.586
19.125 - 22.5	5.357	12.348
22.5 - 23.2	6.887	28.476
23.2 - 24	150.254	73.125
(meter)	$t \text{ d}^2 / \text{m}^2$	$t \text{ m}^2 \cdot 10^6$

ii. Penentuan frekwensi pilar berdasarkan mode shape $u = (x/h)^2$ dengan $h = 24$ m :

$\omega = 24.6$ rad/detik atau $f = \omega / 2\pi = 3.9$ cps

Frekwensi teoritik kurang lebih sama dengan frekwensi terukur $f = 3.8$ cps

iii. Penentuan faktor partisipasi dinamik :

$\beta = 1.235$

iv. Penentuan nilai respon getar berdasarkan $S_{v,a}$:

$R_d = 1.235 \times S_a / (2\pi \times 3.9)^2 = 0.2 \text{ mm}$ untuk $S_a = 0.010$

$R_a = 1.235 \times S_v (2\pi \times 3.9) = 170 \text{ mm/d}^2 = 0.017 \text{ g}$
 untuk $S_v = 5.6 \text{ mm/d}$

Dalam hal ini respon hasil tes getar-agak menyimpang dari nilai teoritik

v. Penentuan gaya P semu pada puncak pilar berdasarkan $S_v = 5.6 \text{ mm/d}$:

$P \text{ puncak} = \int_{23.2}^{24} m R_a (x/h)^2 dx = 19.7$ ton

vi. Kekakuan semu adalah :

$K = (19.7 / 0.2) 10^3 = 98500$ t/m

vii. Analisa sederhana berdasarkan anggapan bahwa terjadi cepit pada dasar kolom ($h = 15$ m) :

$T = 2\pi \sqrt{W/g.k}$ dengan $K = 3 EI/h^3 = 3(716475)/1500^3$
 $W = 1627$ ton (berat jembatan)
 $= 636.8$ t/cm

$W = 1627$ ton (berat jembatan)

$T = 0.32$ detik atau $f = 3.1$ cps (lebih kecil dari 3.8 cps, jadi : cepit aktual terjadi pada elevasi pondasi sumuran)

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dan saran mengenai pengaruh vibrasi terhadap pilar jembatan, diuraikan dalam butir-butir berikut :

i. Tipe Vibrasi

Pengamatan dan analisa vibrasi ditujukan pada pengaruh gaya gesek peletakan - gaya aliran air yang bekerja selama masa pelayanan jembatan. Gaya penyebab getaran berada pada bagian pilar di atas tanah - dasar sungai, dan tanah sekitar pondasi berada dalam keadaan diam 'at rest'.

Pembahasan dalam laporan ini tidak menghubungkan vibrasi dengan pengaruh gempa. Gaya gempa adalah gerakan tanah - ground motion & shaking - yang menimbulkan getaran pilar pada kondisi batas - ultimate putus.

ii. Perubahan bentuk - mode pilar

Pilar berubah bentuk menurut mode pertama dengan tinggi efektif variabel. Tinggi efektif ditentukan oleh letak cepit semu - sendi plastis, yang berada antara elevasi dasar poer & kedalaman pondasi - (Tabel 7.) Variasi antara nilai aktual frekwensi : $f_2 = (1.2 - 1.7)f_1$ menunjukkan mode - 1, mengingat : mode kedua memerlukan nilai $f_2 \cong 2.5 f_1$ hal mana tidak terjadi pada beban biasa.

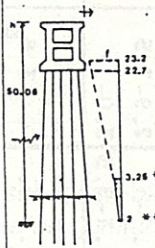
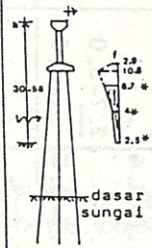
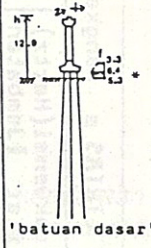
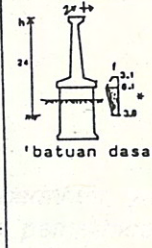
Cepit semu tidak terjadi pada dasar kolom pilar, yang selama ini dianggap kritik untuk perencanaan tulangan dan ketahanan gempa. Mengingat bahwa lapisan tanah teratas umumnya sedimen - tanah lunak - tergerus - dengan perlawanan minimal terhadap gaya horizontal, maka letak cepit semu menjadi lebih dalam dari dugaan rencana semula. Untuk perencanaan disarankan penggunaan tulangan sama - tulangan utama dan sengkang - sepanjang tiang/sumuran pondasi - sehingga mencakup lokasi cepit - cepit semu.

iii. Rumus sederhana vs analisa modal

Rumus sederhana (7) untuk perencanaan tahan gempa - hanya memberi frekwensi teoritik mode 1. untuk dasar kolom dengan anggapan pondasi tertanam. Rumus (7) tersebut hanya sesuai untuk tipe pilar 'tembok' dengan penampang kurang lebih tetap, sedang analisa modal sesuai untuk semua tipe pilar.

Analisa modal memperhitungkan kekakuan balok - balok koppel - pengikat dan pengaruh massa terberat (= beban reaksi jembatan) pada puncak pilar, yang diinterpretasi melalui 'integrasi bertahap' dalam suatu nilai struktural yang relevan

Tabel 7. Frekwensi f pilar sebagai tinggi fungsi h efektif

Jembatan Mahakam		Comal	Krasak
Arah Transv.	Arah Long.	Arah Long.	Arah Long.
			
$f^* = 3 - 3.5 \text{ cps}$ $f_2 = 1.2 f_1$ $h = 39.08 \text{ m}$	$f^* = 4 - 6.7$ $f_2 = 1.7 f_1$ $h = 22.58 - 16.58$	$f^* = 5.3 - 6.4$ $f_2 = 1.2 f_1$ $h = 12.9 - 11.9$	$f^* = 3.8 - 6.1 \text{ cps}$ $f_2 = 1.6 f_1$ $h = 24 - 17 \text{ m}$
Catatan : f* = hasil tes 1991 ; f** = hasil tes 1986			

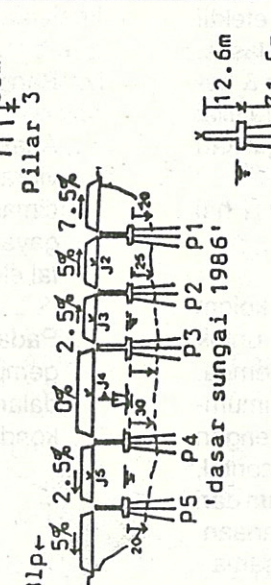
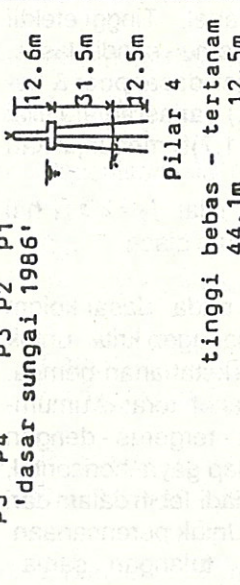
iv. Penggunaan analisa modal

Analisa berlaku secara umum untuk setiap tipe vibrasi. Dengan demikian, data laporan ini dapat dimanfaatkan untuk : perencanaan pilar terhadap gaya - gaya horizontal (termasuk gaya horizontal ekwivalen akibat gempa).

Pada beban luar biasa dan beban khusus seperti gempa, dapat terjadi perubahan bentuk pilar dalam mode lebih tinggi - yang menyebabkan kondisi ultimate - putus.

DAFTAR PUSTAKA

- i. R.L. Wiegel, Earthquake Engineering, Prentice Hall, Inc., U.S.A. - 1970
- ii. C.H. Norris - R.J. Hansen - M. Holley Jr. - J.M. Biggs - S. Namyet - J.K. Minami, Structural Design for Dynamic Loads - McGraw Hill - 1959
- iii. Dynamic Load Tests - Bridge Research - The AASHO Road Test, Report No. 4, 1961
- iv. I. Nagayama, S. Jikan, Study on Dynamic Behaviour of Concrete Dam during Earthquake with Hydro - dynamic Interaction, Public Works Research Inst. Journal, Japan - 1986
- v. E. Kuribayashi, Y. Iida, T. Fukuta, Measurements of Vibration in Itashima Bridge, Japan 1973

TES GETAR PILAR DAN JEMBATAN (LALU LINTAS ≡ Rangkaian □ / satu TRUK)									
Jembatan	Pondasi	Tinggi Pilar(m) bebas tertanam	Arah	Frekuensi (Hertz) Pilar	Intensitas Getar Pilar	Perpindahan (mm) dinamik			
Mahakam tiang pancang		42.6m 30m 12.6m 30m 30m Pilar 3	L	5.0-6.4	0.03	0.02			
			V	-	0.004	0.325			
			T	3.3-3.6	0.004	0.03			
			L	4.3-6.	0.9	0.5			
			V	-	0.2	7.8			
			T	3.1-3.5	0.4	1.0			
			L	-	0.010	0.008			
			V	-	0.004	0.036			
			T	-	0.002	0.016			
						J(4)=100m			
						P(3)			
				44.1m 12.5m 12.6m 1.5m 2.5m Pilar 4	L	4.0-6.7	0.025	0.02	
V	-	0.004			0.135				
T	3.1-3.5	0.008			0.03				
L	4.2-6.4	0.8			0.5				
V	-	0.38			3.8				
T	-	0.25			1.5				
L	-	0.003			0.002				
V	-	0.002			0.026				
T	-	0.001			0.005				
					J(4)=100m				
					P(4)				

Pengukuran getar pilar no.4 pada kondisi arus sungai deras :
 L - f=2.5 Hz - kec.getar 1.8mm/d
 V - f=2.0 Hz - " 0.3mm/d
 T - f=2.0 Hz - " 2.8mm/d

- vi. Earthquake Resistant Design of Bridges, Japan Society of Civil Engineers, Japan - 1985
- vii. Introduction to Earthquake Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Japan 1985
- viii. Tristanto L., Vibrasi Pilar Jembatan Mahakam, Jurnal Pusat Litbang Jalan, Pebr. 1989
- ix. Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, IABSE Colloquium, Copenhagen - 1983

Penulis :

Ir. Lanneke Tristanto, Ajun Peneliti Bidang Konstruksi Bangunan Pelengkap Jalan. Bekerja di Direktorat Bina Program Jalan, Bina Marga tahun 1970 - 1979. Dan di Pusat Litbang Jalan tahun 1979 - Sekarang.