

## Kajian Sambungan Antara Pilar Dan Kabel Pada Jembatan *Cable Stayed*

Yuskar Lase dan Andi Indianto

Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia

E-mail : yuskar@eng.ui.ac.id

### Abstrak

Dalam kajian ini, sambungan antara kabel dan pilar pada sebuah model struktur jembatan *cable stayed* akan diuji secara eksperimental. Kajian ini dilakukan dengan membuat sebuah model struktur jembatan *cable stayed* dimana hubungan antara pilar dengan kabelnya berupa hubungan katrol, geser atau sendi. Sambungan katrol adalah sambungan yang dapat berotasi tanpa gesekan antara kabel dan pilar. Untuk mengetahui kekakuan longitudinal dan karakteristik dinamikanya (seperti frekuensi alami pertama dan rasio redaman) dilakukan uji statik dan uji getaran bebas. Respon dinamik dari struktur jembatan diperoleh dari uji getaran paksa harmonik. Dengan menggunakan meja getar, eksitasi dalam arah memanjang jembatan dikerjakan pada model struktur tersebut. Kemudian defleksi longitudinal yang terjadi di ujung atas pilar diukur. Hasil uji model menunjukkan bahwa struktur dengan tipe sambungan sendi lebih kaku dan menghasilkan defleksi pilar yang terkecil tetapi rasio redaman rendah. Sedangkan tipe sambungan geser lebih fleksibel tetapi rasio redaman tinggi. Rasio redaman sangat dipengaruhi oleh gesekan yang terjadi pada jembatan.

**Kata Kunci :** Jembatan *cable stayed*, pilar, kabel, hubungan katrol, hubungan geser dan hubungan sendi

### Abstract

In this study, connection between cable and pylon in a *cable stayed* bridge was experimentally investigated. A structural model of *cable stayed* bridge was manufactured where connection between cable and pylon was pulley, sliding or hinged type. Pulley connection is a connection which is able to rotate without any friction between cable and pylon. To obtain longitudinal stiffness and dynamic characteristics (such as fundamental natural frequency and damping ratio), static load test and free vibration test were carried out. Dynamic responses of bridge structure were obtained from harmonic forced vibration test. Using a shaking table, excitation in the longitudinal direction was applied to that model. Then longitudinal deflection at the top of pylon was measured. Results of the model test shown that the pylon with hinged connection is more rigid and its deflection could be minimal but has low damping ratio. While sliding type connection is more flexible but has high damping ratio. Damping ratio was strongly influence by frictions occurred in the bridge.

**Key Words :** *Cable stayed* bridge, pylon, cable, pulley connection, sliding connection and hinged connection

### 1. Pendahuluan

Jembatan *cable stayed* merupakan tipe jembatan bentang panjang yang estetik dan sering digunakan sebagai prasarana transportasi yang penting. Struktur jembatan ini terdiri dari gabungan berbagai komponen struktural seperti pilar, kabel dan dek jembatan [6], [9], [10]. Dek jembatan digantung dengan kabel prategang yang diangkur pada pilar. Dengan demikian,

semua gaya-gaya gravitasi maupun lateral yang bekerja pada dek jembatan akan ditransfer ke tanah melalui kabel dan pilar. Kabel akan menerima gaya tarik sedangkan pilar memikul gaya tekan yang sangat besar disamping efek lentur lainnya [1], [10].

Respon jembatan terhadap gaya-gaya luar sangat tergantung pada interaksi dari masing-masing komponen strukturnya. Salah satu faktor yang sangat menentukan adalah sambungan antara kabel dan pilar

[6.], [10]. Lokasi sambungan tersebut tergantung pada pemilihan pola atau susunan kabel. Kabel dapat semuanya diangkur di ujung atas pilar atau disepanjang pilar secara merata atau tidak merata. Pada umumnya sambungan antara pilar dan kabel berupa sendi, namun secara teoritis sambungan ini dapat berupa katrol, geser atau sendi [6], [7]. Masing-masing tipe sambungan ini akan mempengaruhi karakteristik dan respon struktur jembatan secara keseluruhan terhadap beban gravitasi maupun beban lateral.

Untuk meneliti pengaruh tipe sambungan pilar-kabel tersebut terhadap perilaku jembatan *cable stayed*, sebuah model struktur jembatan *cable stayed* dibuat dan diuji di Laboratorium Mekanika Struktur, Departemen Teknik Sipil FTUI [2] Pilar, dek, gelagar memanjang serta sambungan antara pilar-kabel dibuat dari bahan aluminium sedangkan kabel dari bahan tembaga paduan dengan diameter 0,6 mm. Tumpuan rol dari roda *head type* dipasang pada kedua ujung model jembatan. Sambungan antara masing-masing komponen menggunakan paku keling. Dimensi model jembatan adalah panjang 90 cm, lebar 15 cm dan tinggi pilar 34 cm dimana dek terletak di tengah-tengah ketinggian pilar. Model jembatan tersebut dipasang di atas sebuah meja getar sedangkan alat penggetarnya dibuat dari dinamo yang dilengkapi dengan regulator, adaptor dan stabilisator. Alat pencatat getaran menggunakan sistem analog yang dipasang di ujung atas pilar.

Serangkaian pengujian dilakukan antara lain uji material, uji beban statis, uji getaran bebas dan uji getaran paksa harmonik. Uji material kabel dilakukan untuk mengetahui modulus elastisitas dan tegangan lelehnya [3] Kekakuan struktur ditentukan berdasarkan uji statik sedangkan rasio redaman berdasarkan uji getaran bebas. Uji getaran bebas dilaksanakan dengan memberikan lendutan awal pada struktur, selanjutnya struktur dilepas sehingga bergetar secara bebas [4], [5]. Riwayat waktu lendutan yang terjadi dicatat dan dievaluasi. Dengan mengetahui kekakuan struktur dan massanya (dengan cara

menimbang), frekuensi alami dari model struktur dapat diestimasi.

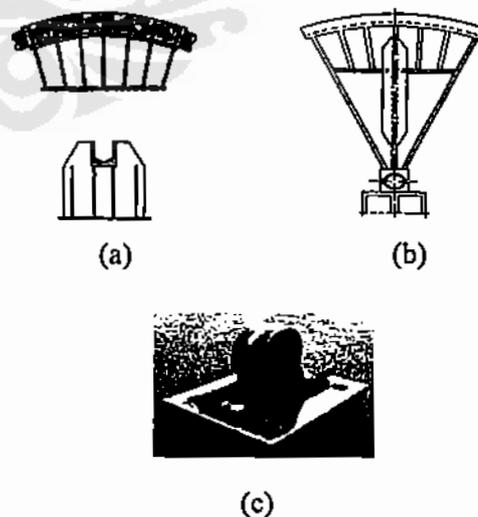
Uji getaran paksa harmonik dilakukan dengan menggetarkan meja getar dengan alat penggetar yang sudah dipersiapkan [2], [8] Model jembatan yang dibaut di atas meja getar tersebut turut bergetar dalam arah memanjangnya. Riwayat waktu lendutan yang terjadi dicatat secara grafis melalui goresan pena diatas gulungan kertas, yang dapat berputar sesuai dengan frekuensi alat penggetar. Dari grafik pencatatan tersebut, amplitudo lendutan pada ujung atas pilar dapat diukur. Pengujian dilakukan berulang-ulang dengan berbagai tipe sambungan pilar-kabel (sambungan katrol, geser dan sendi) dan berbagai variasi frekuensi alat penggetar.

## 2. Sambungan antara Kabel dan Pilar

Secara teoritis sambungan antara kabel dan pilar dapat dibuat sebagai sambungan katrol, geser atau sendi [6], [7].

### 2.1. Sambungan Katrol

Jenis sambungan ini sering digunakan pada jembatan gantung dan pada sambungan antara kabel *multi-strand* dengan pilar.



Gambar 1.  
Sambungan Katrol (a) dan (b) Model Teoritis,  
(c) Model Benda Uji

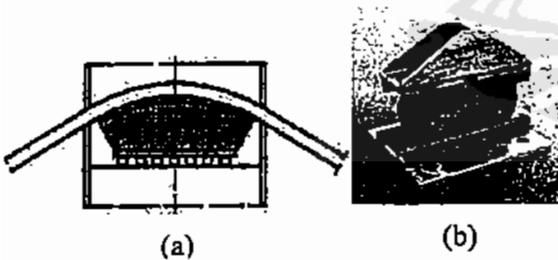
Sambungan katrol dapat dibedakan atas 2 (dua) tipe yaitu:

- Tipe pertama adalah sambungan katrol dimana kabel dapat bergerak (bergeser) diatas pelana, dilengkapi dengan alur yang diberi bahan pelapis agar gesekan antara kabel dengan pelana sekecil mungkin. (gambar 1a).
- Tipe kedua adalah kabel tetap, tidak dapat bergeser, di atas pelana yang dilengkapi dengan sendi dibawahnya, sehingga memungkinkan pelana dapat berputar ketika gaya dalam kabel tidak seimbang (gambar 1b).

Model benda uji dari sambungan katrol dibuat dengan menggunakan katrol yang dapat berputar pada sumbu sedangkan kabelnya dapat bergerak di atas katrol tersebut (gambar 1c).

## 2.2. Sambungan Geser

Kabel dipasang menerus di atas pelana beroda, yang berfungsi sebagai roll dan dapat bergerak/bergeser dalam arah *longitudinal*. Jenis sambungan ini cocok digunakan pada jembatan *cabl stayed* untuk mengurangi lendutan dan momen pada pilar.



Gambar 2.

Sambungan Geser (a) Model Teoritis, (b) Model Benda Uji

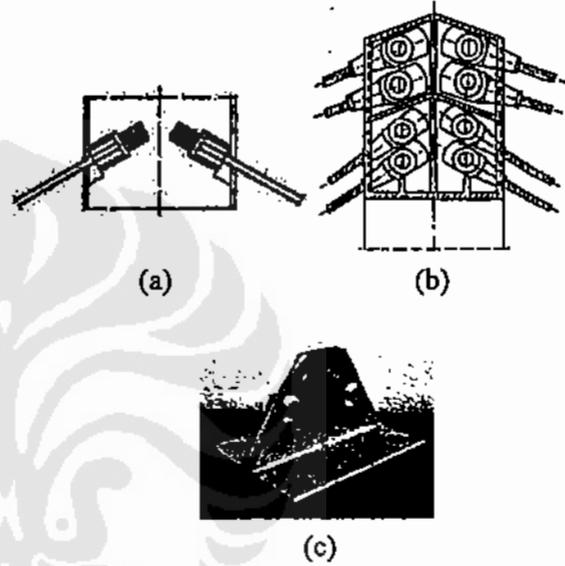
## 2.3. Sambungan Sendi

Kabel tidak menerus tetapi salah satu ujung kabel diangkur pada pilar yang dapat dianggap sebagai ikatan sendi. Jenis sambungan ini, cukup cocok untuk jembatan *cabl stayed* dengan banyak kabel (*multi-cable stayed bridges*) yang memiliki

derajat kebebasan banyak dan juga untuk jenis kabel *mono strand*.

Sambungan sendi terdiri dari dua jenis :

- Kabel disambung pada pilar dengan menggunakan baut. Penggunaan baut dimaksudkan agar kabel dapat dikencangkan melalui putaran baut. (gambar 3a)
- Kabel diklem pada ikatan sendi, lalu sendi dibaut pada pilar. Dengan cara ini kabel dapat dimungkinkan bergerak secara leluasa dalam arah vertikal. (gambar 3b).



Gambar 3.

Sambungan Sendi (a) dan (b) Model Teoritis, (c) Model Benda Uji

## 3. Formulasi Struktural dan Dinamik

### 3.1. Hubungan Tegangan-Regangan

Kurva tegangan-regangan diperoleh melalui pengujian contoh material. Dalam kondisi elastis-linier, hubungan tegangan  $\sigma$  - regangan  $\epsilon$  dari suatu material dapat dituliskan sebagai berikut [3]:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

dimana E adalah modulus elastisitas material.

Modulus elastisitas dan tegangan leleh material ditetapkan berdasarkan regangan sebesar 0,2 %. Sudut antara kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  linier dan sumbu regangan menunjukkan modulus

elastisitas, sedangkan perpotongan antara garis yang sejajar kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  linier pada regangan  $\epsilon = 0,2 \%$  dengan kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  merupakan tegangan leleh material.

### 3.2. Hubungan Gaya – Lendutan

Kurva gaya-lendutan diperoleh melalui pengujian struktur dimana struktur tersebut dibebani dengan gaya  $f$  dan lendutan  $v$  yang terjadi diukur. Dalam kondisi elastis-linier, gaya  $f$  proporsional terhadap kekakuan  $k$  dan lendutan  $v$  [3].

$$f = k v \quad (2)$$

### 3.3. Frekuensi Alami

Jika kekakuan  $k$  dan massa  $m$  dari sebuah struktur diketahui maka frekuensi alaminya dapat dihitung berdasarkan rumus sebagai berikut [5]:

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (3)$$

### 3.4. Rasio Redaman

Persamaan getaran bebas dari sebuah struktur satu derajat kebebasan dapat ditulis sebagai berikut :

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = 0 \quad (4)$$

dimana  $m$ ,  $c$  dan  $k$  adalah massa, redaman dan kekakuan struktur sedangkan  $\ddot{v}$ ,  $\dot{v}$  dan  $v$  adalah percepatan, kecepatan dan lendutan struktur.

Koefisien redaman bersifat viskos dan proporsional terhadap massa dan kekakuan. Dalam analisa dinamik, koefisien redaman  $c$  seringkali diwakili oleh rasio redaman ekivalen  $\xi$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (5)$$

Jika sistem dinamik dari persamaan (4) di atas diganggu oleh kondisi awal berupa lendutan awal  $v(0)$  dan atau kecepatan awal  $\dot{v}(0)$ , respon struktur menjadi

$$v(t) = \rho e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) \quad (6)$$

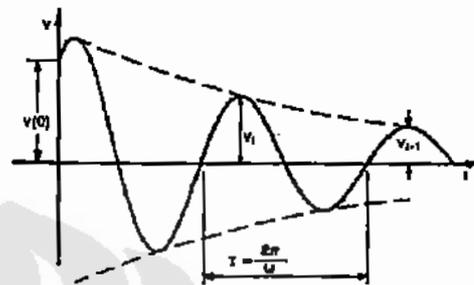
dimana

$$\rho = \sqrt{v(0)^2 + \left( \frac{\xi\omega_n v(0) + \dot{v}(0)}{\omega_d} \right)^2} \quad (7a)$$

$$\tan(\theta) = v(0) / \left( \frac{\xi\omega_n v(0) + \dot{v}(0)}{\omega_d} \right) \quad (7b)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (7c)$$

Variasi lendutan terhadap waktu dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4.  
Lendutan getaran bebas

Dalam kondisi getaran bebas, amplitudo lendutan berkurang secara logaritmik. (*logarithmic decrement*) akibat adanya redaman dalam struktur [5]. Dengan demikian, rasio redaman dapat diukur dengan melakukan percobaan getaran bebas. Jika amplitudo lendutan pada detik  $t_i$  adalah  $u_i$  dan setelah  $j$  siklus getaran (pada detik  $t_{i+j}$ ), amplitudo lendutan menjadi  $u_{i+j}$  maka rasio redaman dapat dihitung berdasarkan rumus

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \left( \frac{u_i}{u_{i+j}} \right) \quad (8)$$

### 3.5. Lendutan Getaran Paksa

Jika struktur satu derajat kebebasan tersebut digetarkan oleh percepatan tanah  $\ddot{g}(t)$  maka persamaan getaran paksa yang teredam adalah:

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = -m\ddot{g}(t) \quad (9)$$

Dalam kasus eksitasi harmonik melalui meja getar dengan  $\omega$  dan  $\Delta$  adalah frekuensi dan simpangan maksimum meja getar maka

percepatan yang bekerja diperletakkan model jembatan menjadi [4,5]

$$\ddot{g}(t) = -\Delta\omega^2 \sin(\omega t) \quad (10)$$

Dengan metode integral Duhamel, solusi getaran paksa dari persamaan (9) di atas adalah

$$v(t) = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t \Delta\omega^2 \sin(\omega\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau \quad (11)$$

#### 4. Pembuatan dan Pengujian Model Jembatan Cable Stayed

##### 4.1. Pembuatan Model Struktur [2]

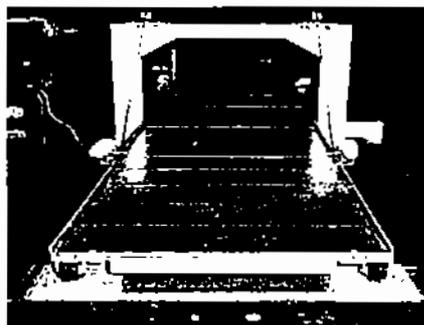
Model struktur jembatan yang dibuat mempunyai panjang 900 mm, lebar 150 mm dan tinggi pilar 340 mm dimana dek jembatan terletak di tengah-tengah ketinggian pilar. Model jembatan ini menggunakan satu buah pilar tipe *twin pylon* dengan perletakan sendi di atas meja

getar. Penampang pilar terbuat dari profil box aluminium dengan tinggi 21,05 mm, lebar 10,16 mm dan ketebalan 0,6 mm. Dek jembatan terbuat dari pelat aluminium dengan dimensi 50 mm × 120 mm × 2 mm dan pelat besi 50 mm × 120 mm × 3,9 mm.

Gelagar memanjang terbuat dari profil siku aluminium 19,73 mm × 12,73 mm × 0,99 mm. Semua sambungan menggunakan paku keling dengan pelat sambung dari aluminium dengan ketebalan 2 mm. Kabel yang menghubungkan pilar dan dek terbuat dari bahan tembaga paduan dengan diameter 0,6 mm. Sambungan antara pilar dan kabel menggunakan tipe katrol, geser dan sendi. Tumpuan rol dari roda *head type* dipasang pada kedua ujung model jembatan. Kedua perletakan rol ini ditopang oleh kepala jembatan dari bahan kayu yang dibuat menyatu dengan meja getar. Gambar 5 dan 6 memperlihatkan model struktur jembatan dan tipe sambungan antara pilar dan kabel.

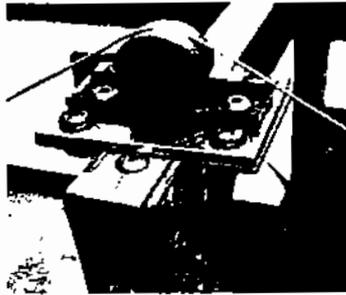


(a)

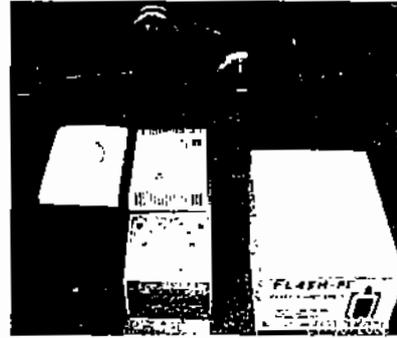


(b)

Gambar 5. Model Struktur Jembatan (a) Tampak Samping Model Struktur, (b) Tampak Depan Model Struktur



(a)



(a)



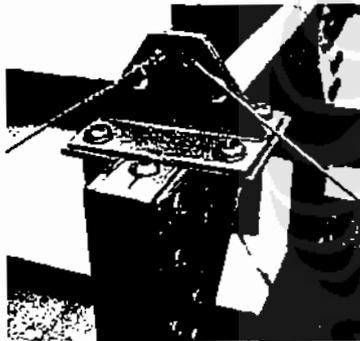
(b)



(b)



(c)



(c)

Gambar 6.

Sambungan Pilar dan Kabel (a) Sambungan Katrol, (a) Sambungan Geser, (c) Sambungan Sendi

#### 4.2. Peralatan Uji [2]

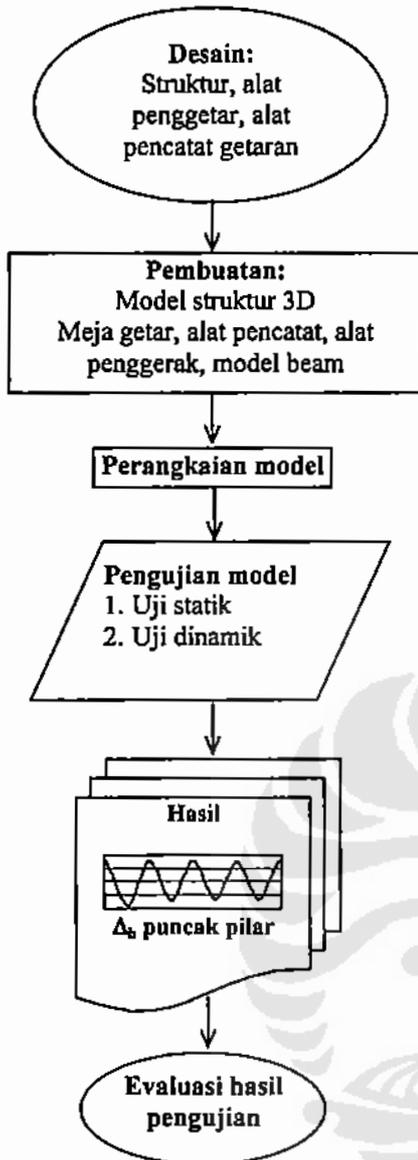
Untuk menguji model jembatan tersebut terhadap eksitasi dalam arah longitudinal dibuat meja getar dari bahan kayu. Meja getar ini mempunyai 4 (empat) buah roda yang dapat bergerak di atas rel. Alat penggetar yang dapat menghasilkan eksitasi harmonik dibuat dari dinamo yang dilengkapi dengan regulator, adaptor dan stabilisator sehingga frekuensi getarnya dapat dikontrol dengan baik. Untuk mevariasikan amplitudo lendutan,

Gambar 7.

Peralatan Uji (a) Alat Penggetar, (b) Alat Pencatat Getaran, (c) Dial Gauge

digunakan pelat baja berbentuk lingkaran yang dilengkapi beberapa lobang yang jaraknya bervariasi terhadap pusat lingkaran. Pelat baja berbentuk lingkaran ini dibuat pada dinamo.

Kemudian sebuah lengan dari baja menghubungkan salah satu lobang tadi dengan meja getar sehingga ketika dinamo berputar akan menghasilkan eksitasi harmonik pada meja getar. Karena perletakan pilar dari model jembatan telah dibuat di atas meja getar maka model jembatan tersebut juga mengalami eksitasi dalam arah longitudinalnya. Alat pencatat getaran menggunakan sistem analog yang dipasang di ujung atas pilar. Riwayat waktu lendutan yang terjadi tercatat secara grafis melalui goresan pena diatas gulungan kertas yang dapat berputar sesuai dengan frekuensi alat penggetar. Untuk mengukur lendutan statik digunakan dial gauge. Gambar 7 menunjukkan peralatan uji yang digunakan dalam penelitian ini.

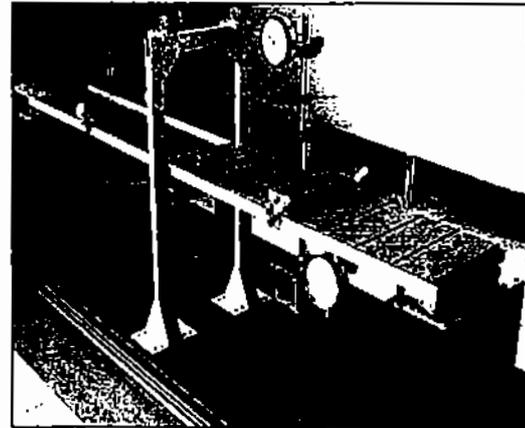


Gambar 8.  
Alur Pengujian Model Struktur

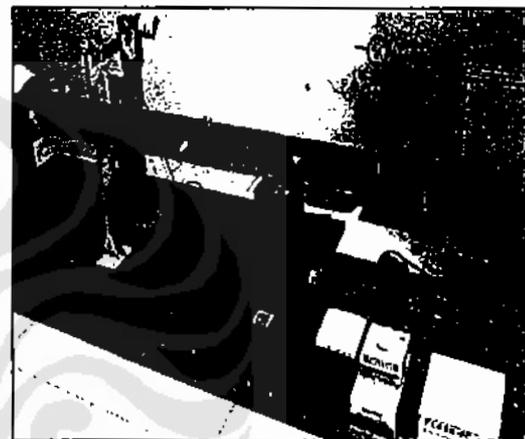
#### 4.3. Pengujian Model Struktur [2], [8]

Sebelum model struktur jembatan *cable stayed* ini diuji secara statik maupun dinamik (uji getaran bebas dan getaran paksa), dilakukan uji tarik pada kabel yang digunakan. Selain untuk mengetahui modulus elastisitas dan tegangan leleh kabel, hasil pengujian ini akan digunakan untuk menentukan besarnya gaya tarik yang diberikan pada kabel.

Uji model struktur terdiri dari uji statik dan uji dinamik. Uji statik dilakukan



(a)



(b)

Gambar 9.  
Pengujian Model Struktur (a) Uji Statik, (b) Uji Dinamik

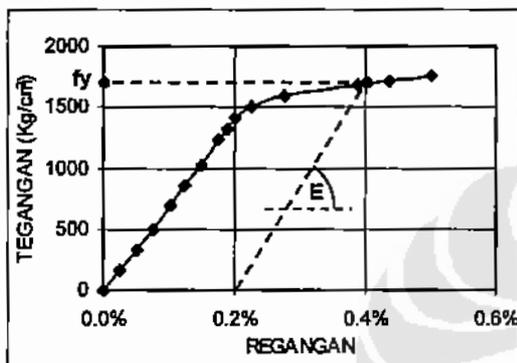
dengan mengerjakan beban horizontal pada pilar, sedangkan uji dinamik dilakukan dengan menggetarkan struktur dalam arah memanjang jembatan dengan menggunakan meja getar.

Pengujian model struktur jembatan *cable stayed* berdasarkan alur kerja pada gambar 8. Sedangkan foto pengujian statik dan dinamik pada model struktur jembatan *cable stayed* ditunjukkan dalam gambar 9. Sekalipun alat-alat uji yang digunakan cukup sederhana namun metodologi pengujian dilaksanakan sedekat mungkin dengan standar pengujian yang berlaku. Akurasi pengukuran yang diperoleh relatif cukup baik, khususnya akurasi relatif terhadap berbagai tipe sambungan.

## 5. Hasil Pengujian dan Diskusi

### 5.1. Modulus Elastisitas dan Tegangan Leleh

Kabel yang terbuat dari tembaga terpadu dengan diameter 0,6 mm dan panjang 400 mm diuji tarik dengan pembebanan secara bertahap. Perpanjangan kabel diukur dengan dial gauge. Selanjutnya tegangan dan regangan kabel dihitung dan dibuat grafik hubungan antara kedua parameter tersebut. Gambar 10 menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan kabel.



Gambar 10.

Kurva Tegangan-Regangan Kabel

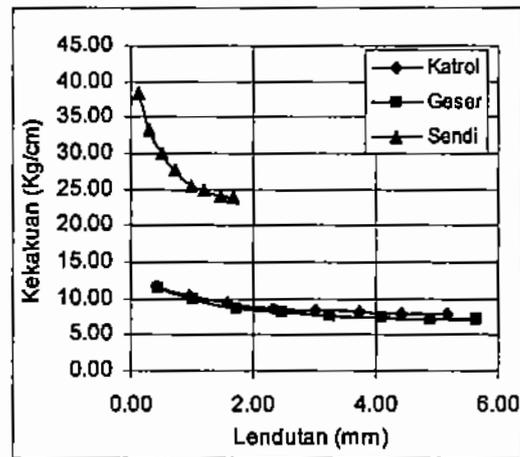
Dari kurva tegangan-regangan tersebut di atas diperoleh tegangan leleh kabel  $f_y = 700000 \text{ kg/cm}^2$  dan modulus elastisitasnya  $E = 1700 \text{ kg/cm}^2$ .

### 5.2. Kekakuan

Kekakuan model struktur jembatan cable stayed ditentukan berdasarkan uji statik. Gaya statik horizontal dikerjakan pada puncak pilar. Kemudian lendutan yang terjadi dipuncak pilar diukur dengan dial gauge. Dengan menggunakan persamaan (2) hubungan antara kekakuan dan lendutan pilar diberikan pada gambar 11.

Kurva tersebut menunjukkan bahwa pada lendutan yang kecil, kekakuan struktur cenderung besar. Hal ini disebabkan karena adanya friksi di perletakan dan sambungan komponen. Semakin besar lendutan, kekakuan semakin mengecil dan akhirnya konstan. Pada lendutan maksimum, kekakuan model struktur jembatan cable

stayed adalah berturut-turut 7 kg/cm, 7,8 kg/cm dan 24 kg/cm untuk sambungan geser, katrol dan sendi.

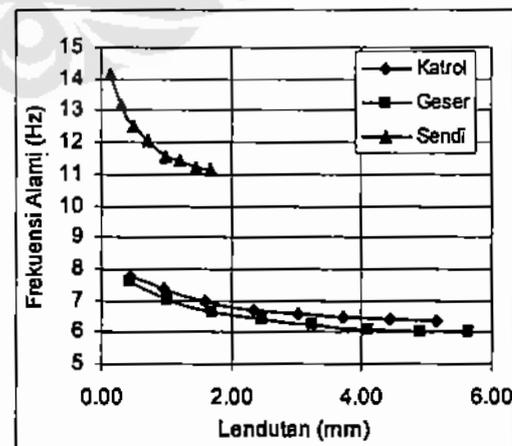


Gambar 11.

Hubungan Kekakuan-Lendutan

### 5.3. Frekuensi Alami

Berat model struktur jembatan cable stayed dengan masing-masing tipe sambungan kabel-pilarnya ditimbang. Massanya adalah berturut-turut  $0,499 \text{ kgd}^2/\text{m}$ ,  $0,487 \text{ kgd}^2/\text{m}$  dan  $0,485 \text{ kgd}^2/\text{m}$  untuk sambungan geser, katrol dan sendi. Dengan menggunakan persamaan (3) hubungan antara frekuensi alami dan lendutan pilar diberikan pada gambar 12.



Gambar 12.

Kurva Frekuensi Alami-Lendutan

Sama seperti kekakuan, frekuensi alami struktur pada lendutan yang kecil sangat dipengaruhi oleh friksi yang terjadi pada

sambungan komponen struktur dan perletakan. Jika friksi tidak diperhitungkan, frekuensi alami model struktur jembatan *cable stayed* adalah 5,96 hz, 6,37 hz dan 11,20 hz untuk masing-masing untuk sambungan geser, katrol dan sendi.

#### 5.4. Rasio Redaman

Dari hasil uji getaran bebas yang diterapkan pada persamaan (5) diperoleh rasio redaman model struktur jembatan *cable stayed* sebesar 35%, 25% dan 19% untuk masing-masing sambungan geser, katrol dan sendi. Rasio redaman ini relatif cukup tinggi karena faktor friksi yang cukup besar. Friksi yang timbul pada sambungan geser mempunyai kontribusi besar dalam peningkatan rasio redaman struktur.

#### 5.5. Amplitudo Lendutan Dinamik

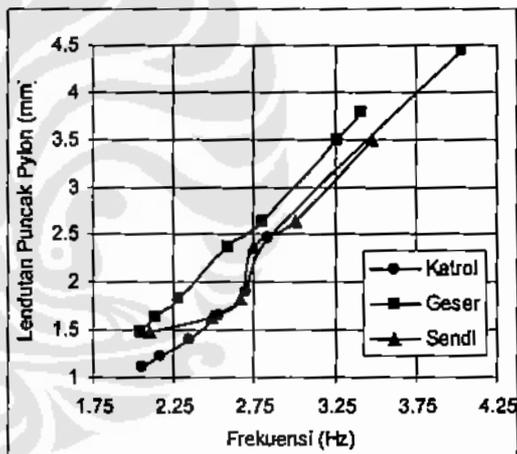
Lendutan dinamik diukur melalui uji getaran paksa. Namun sebelum pengujian ini dilaksanakan, perlu dilakukan pengujian frekuensi alat getar. Uji ini dilakukan untuk menentukan frekuensi maksimum dari alat getar, yang diperbolehkan untuk menggetarkan struktur sampai batas kemampuan alat dan struktur. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa frekuensi alat getar dibatasi setinggi-tingginya 4,5 hz. Pada frekuensi yang lebih tinggi dari nilai tersebut, hasil pengukuran sudah tidak akurat lagi dan kabel sudah mencapai kondisi leleh hingga putus.

Karena frekuensi alat getar jauh lebih kecil dari frekuensi alami dari model struktur jembatan *cable stayed* maka lendutan dinamik yang terukur hanya pada frekuensi rendah. Eksitasi longitudinal diberikan melalui getaran harmonik dari meja getar. Amplitudo meja getar terukur sebesar 23,8 mm sedangkan gaya tarik awal yang diberikan pada kabel sebesar 1,80 kg.

Dari hasil pengujian getaran paksa diperoleh riwayat waktu lendutan di puncak pilar. Nilai maksimum pengukuran merupakan amplitudo lendutan dinamik dari pilar tersebut dalam arah memanjang jembatan. Frekuensi alat getar divariasikan dan amplitudo lendutan dinamik untuk masing-masing frekuensi diukur. Frekuensi

alat getar divariasikan pada interval 2,05 hz s/d 4,03 hz untuk sambungan katrol, 2,04 hz s/d 3,41 hz untuk sambungan geser dan 2,10 s/d 3,48 hz untuk sambungan sendi. Gambar 13 menunjukkan hasil pengukuran amplitudo lendutan dinamik.

Karena pengujian dilakukan pada frekuensi yang cukup rendah maka hasil pengukurannya sangat dipengaruhi oleh sifat statik (kekakuan) struktur dimana semakin besar kekakuan maka semakin kecil lendutan yang terjadi. Kekakuan struktur dengan sambungan sendi adalah lebih besar dari kekakuan struktur dengan tipe sambungan lainnya sehingga menghasilkan amplitudo lendutan yang lebih kecil. Sebaliknya, amplitudo lendutan untuk sambungan geser jauh lebih besar karena kekakuannya lebih kecil dari tipe sambungan lainnya.



Gambar 13.  
Kurva Amplitudo Lendutan

## 6. Kesimpulan

Dari hasil uji model struktur jembatan *cable stayed* dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Struktur dengan sambungan pilar-kabel tipe sendi memiliki nilai kekakuan tertinggi (24 kg/cm), frekuensi alami tertinggi (11,20 Hz) tetapi rasio redaman terendah (19%).
2. Struktur dengan sambungan pilar-kabel tipe katrol memiliki nilai kekakuan

- yang sedang (7,38 kg/cm), frekuensi alami yang sedang (6,37 Hz) dan rasio redaman yang sedang (25 %).
3. Struktur dengan sambungan pilar-kabel tipe geser memiliki nilai kekakuan terendah (7 kg/cm), frekuensi alami terendah (5,96 hz) tetapi rasio redaman tertinggi (35 %).
  4. Karena keterbatasan alat dan model struktur, pengujian getaran paksa hanya dilakukan pada kondisi frekuensi rendah sehingga amplitudo lendutan dinamik yang diperoleh sangat dipengaruhi oleh sifat statik (kekakuan) struktur dimana semakin tinggi kekakuan semakin kecil lendutan yang terjadi. Dalam kondisi sesungguhnya, jembatan *cable stayed* sangat fleksibel sehingga frekuensi alaminya jauh lebih rendah dari frekuensi getar gempa bumi. Dengan demikian, kekakuan rendah akan memperkecil lendutan dinamik.
- [8]. Sugiharto Firman, *Pengujian Struktur Pada Gempa*, Yayasan Pelatihan Teknologi Gempa Indonesia, Bandung., 2002.
  - [9]. Wai-Fah Chen, Lian Duan, *Bridge Engineering Handbook*, CRC Press LLC, New York USA, 1999.
  - [10]. Walther Rene et all., *Cable Stayed Bridges*, Thomas Telford, London, 1999.

#### Daftar Acuan

- [1]. Aboul-Ella, Fakhry, *Analysis of Cable-Stayed Bridges Supported by Flexible Tower*, Journal. Struct. Eng., ASCE, 108(10), 2004.
- [2]. Andi Indianto, *Pengaruh Tipe Hubungan Antara Pilar dengan Kabel Terhadap Kinerja Jembatan Cable Stayed*, Tesis FTUI, Depok, 2005.
- [3]. BVoresi A P, Schmidt R J, Sidebottom O.M., *Advanced Mechanics of Materials*, John Wiley & Sons, New York, USA., 1993.
- [4]. Chang CC, Chang TYP, Zhang QW, *Ambient Vibration Of Long Span Cable Stayed Bridge*, Journal Of Bridge Engineering, ASCE, vol.6 No. 1, 2001.
- [5]. Chopra Anil K, *Dynamics Of Structures*, Prentice Hall International, Singapore, 2003.
- [6]. Gimsing Niels J, *Cable Supported Bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1993.
- [7]. Priestly MJN, Seible F, Calvi GM, *Seismic Design And Retrofit Of Bridge*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.