



# **PERENCANAAN TEKNIS JEMBATAN *CABLE STAYED***

● Redrik Irawan ● Lanneke Tristanto ● Tommy Virlianda WN

# PERENCANAAN TEKNIS JEMBATAN ***CABLE STAYED***

Penyusun  
Redrik Irawan  
Lanneke Trisanto  
Tommy Virlanda WN



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Kementerian Pekerjaan Umum  
[www.pusjatan.pu.go.id](http://www.pusjatan.pu.go.id)

# **PERENCANAAN TEKNIS JEMBATAN CABLE STAYED**

Redrik Irawan, Lanneke Tristanto, Tommy Virlanda WN  
Desember, 2011

Cetakan Ke-1 2011, 70 halaman

© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Cover Luar : Balerang Bridge : 1 of 6 karya haryadi be diunduh pada situs  
<http://www.panoramio.com/photo/52725222>

No. ISBN : ISBN 978-602-8256-40-7

Kode Kegiatan : 11-PPK2-01-100-11

Kode Publikasi : IRE-TR-001A/ST/2011

Kata kunci : *cabl* *stay*ed, jembatan, perencanaan teknis

## **Ketua Program Penelitian:**

Redrik Irawan, Puslitbang Jalan dan Jembatan

## **Ketua Sub Tim Teknis:**

Redrik Irawan, Puslitbang Jalan dan Jembatan

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2011, pada Paket Kerja Penyusunan Naskah Ilmiah Litbang Teknologi Jembatan Bentang Panjang (Kajian Perencanaan Jembatan Cable-Stayed dan Jembatan Gantung).

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

## **Diterbitkan oleh:**

Kementerian Pekerjaan Umum

Badan Penelitian dan Pengembangan

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40293

## **Pemesanan melalui:**

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan

[info@pusjatan.pu.go.id](mailto:info@pusjatan.pu.go.id)



# Puslitbang Jalan dan Jembatan

**Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan)** adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

## KEANGGOTAAN TIM TEKNIK & SUB TIM TEKNIK

### Tim Teknis

Prof. (R). DR. Ir. M.Sjahdanulirwan, M.Sc.  
Ir. Agus Bari Sailendra, MT  
Ir. I Gede Wayan Samsi Gunarta, M.Appl.Sc  
DR. Ir. Dadang Mohammad, M.Sc  
DR. Ir. Poernomosidhi, M.Sc  
DR. Drs. Max Antameng, MA  
DR. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc  
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc  
Prof. (R). Ir. Lanneke Tristanto  
Prof. (R). DR. Ir. Furqon Affandi, M. Sc  
Ir. GJW Fernandez  
Ir. Joko Purnomo, MT  
Ir. Soedarmanto Darmonegoro  
Ir. Lanny Hidayat, M.Si  
Ir. Moch. Tranggono, M.Sc  
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc  
Redrik Irawan, ST., MT.  
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc  
DR. Ir. Triono Jumono, M.Sc  
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc  
DR. Ir. Doni J. Widianono, M.Eng.Sc  
Ir. Teuku Anshar  
Ir. Hendro Mulyono  
Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc  
DR. Ir. Theo. A. Najooan

Ir. Yayan Suryana, M.Sc  
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc  
Ir. Saktyanu, M.Sc  
Ir. Herman Darmansyah  
Ir. Rachmat Agus  
DR. Ir. Hasroel, APU  
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc

### Sub Tim Teknis

Redrik Irawan, ST., MT.  
Prof. (R). Ir. Lanneke Tristanto  
DR. Mardiana Oesman  
DR. Soemargo  
DR. Johannes Adhiyoso  
DR. Paulus Kartawijaya  
Herbudiman, ST., MT.  
DR. Aswandy  
DR. Bambang Hari Prabowo  
Agus Sulistijawan, S.Si  
DR. Transmissia Semiawan  
Ir. Koesno Agus  
Ir. Wahyudiana  
Ir. Rahadi Sukirman  
Ir. Roeseno Wirapradja, M.Sc.



# Kata Pengantar

Penulisan naskah ilmiah dibuat dengan tujuan untuk menguraikan aspek-aspek yang harus dikaji dalam melakukan perencanaan teknis jembatan *cable-stayed*, yang dilatarbelakangi oleh peningkatan pembangunan jembatan kabel bentang panjang yang dapat diindikasikan dengan pertumbuhan penyediaan infrastruktur berdasarkan pertumbuhan ekonomi Indonesia yang bernilai positif dari tahun ke tahun. Dimana melalui perencanaan teknis yang dimaksud dapat memberikan panduan penerapan jembatan *cable-stayed* bagi para pengelola jembatan terutama ketika harus melakukan pembinaan dan pengawasan dari perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jembatan kabel bentang panjang. Selain itu pengembangan perencanaan teknis dapat memperbaiki kemampuan perancangan komponen struktur jembatan bentang panjang sehingga pada akhirnya didapatkan suatu bentuk struktur yang semakin handal dan berkelanjutan.

Naskah ilmiah ini disusun dengan melakukan kajian terhadap beberapa aspek penting yaitu : 1) kajian analisa struktur statis; 2) kajian metode konstruksi; 3) kajian analisa struktur dinamis berdasarkan referensi perencanaan jembatan kabel bentang panjang yang ada di dalam dan luar negeri.

Hasil yang diperoleh dari kajian ini adalah perlunya dilakukan kajian yang lebih detail pada: 1) aksi yang saling terkait dari karakteristik sistem lantai, sistem tata letak kabel untuk jembatan kabel stay, bentuk pilon, dan kekakuan masing-masing elemen sistem lantai dan pilon, serta hubungan antara pilon dengan dengan sistem lantai, panjang bentang sisi, dan sistem perletakan dan sokongan antara pada tahap analisis struktur statis; 2) penggunaan metode dengan perancah dan metode kantilever berimbang; dan 3) pengujian aerodinamis dan perangkat penyeimbang getaran, dan pengidentifikasian frekuensi natural pada tahap analisis struktur dinamis.

Akhirnya penulis ingin memberikan apresiasi atas kepada berbagai pihak yang terlibat dalam penyusunan naskah ilmiah ini terutama kepada Kepala Puslitbang Jalan dan Jembatan beserta seluruh jajarannya atas perhatian dan dukungannya. Semoga naskah ilmiah ini dapat memberikan sumbangan bagi pengenalan wawasan pengetahuan yang diperlukan untuk pengembangan teknologi jembatan.

Bandung, Desember 2011

**Redrik Irawan**

*Penyusun*

# Daftar Isi

Puslitbang Jalan dan Jembatan .....	iii
Kata Pengantar .....	v
Daftar Isi .....	vii
Daftar Gambar .....	viii
Daftar Tabel .....	x
<i>Bab 1</i> Pendahuluan .....	13
Latar Belakang.....	13
Tujuan dan sasaran penulisan naskah ilmiah.....	15
Metodologi dan Sumber Data.....	15
Sistematika Pembahasan .....	15
<i>Bab 2</i> Gambaran Umum dan Pemetaan .....	19
Deskripsi Isu, Permasalahan Utama dan Elemen Kunci yang Berkontribusi terhadap Permasalahan .....	19
Permasalahan Pokok dan Sumber-sumber Permasalahan (Variabel) dan Interdependensinya.....	23
Kondisi Ideal yang Diharapkan dari Masing-masing Elemen Kunci serta Interaksi yang Diinginkan untuk Mengoptimalkan Sistem Solusi terhadap Masalah Utama .....	23
Upaya-upaya Umum yang Telah Dilakukan untuk Menyelesaikan Sumber-sumber Masalah dan Efektifitasnya.....	24
<i>Bab 3</i> Pengelolaan/Peningkatan Kinerja pada Tahap Analisis Statis .....	27
Penjelasan Umum dari Analisis Statis.....	27
Aspek Penting dari Analisis Statis .....	28
Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Analisis Statis .....	30
Spesifikasi teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Analisis Statis.....	46
Referensi Analisis Statis .....	47



<i>Bab 4</i>	Pengelolaan/Peningkatan Kinerja pada Tahap	
	Metode Konstruksi .....	49
	Penjelasan Umum dari Metode Konstruksi (ESDEP, 2004) .....	49
	Aspek penting dari Metode Konstruksi (Gimsing, 1983) .....	51
	Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Metode Konstruksi .....	56
	Spesifikasi teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator	
	Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Metode Konstruksi .....	59
	Referensi Metode Konstruksi .....	59
<i>Bab 5</i>	Pengelolaan/Peningkatan kinerja pada Tahap	
	Analisis Dinamis .....	61
	Penjelasan Umum dari Analisis Dinamis .....	61
	Aspek Penting Dari Analisis Dinamis .....	62
	Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Analisis Dinamis - Pengidentifikasian	
	frekuensi natural .....	65
	Spesifikasi Teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator	
	Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Analisis Dinamis .....	67
	Referensi Analisis Dinamis .....	67
<i>Bab 6</i>	Penutup .....	69

## Daftar Gambar

<i>Gambar 1</i>	Pencapaian Bentang Utama untuk Jembatan Gantung .....	14
<i>Gambar 2</i>	Pencapaian Bentang Utama untuk Jembatan <i>Cable Stayed</i> .....	14
<i>Gambar 3</i>	Bagan alir perencanaan jembatan kabel .....	21
<i>Gambar 4</i>	Jembatan Pasupati, bentang utama 106 m dan total 161m, menara dan	
	gelagar dari beton, prinsip kabel kaku .....	28
<i>Gambar 5</i>	Contoh tipikal untuk tiga keadaan batas perencanaan .....	29
<i>Gambar 6</i>	Contoh penampang melintang gelagar lantai tipe boks .....	33

<i>Gambar 7</i> Jembatan lalu lintas ringan, bentang 240m dengan lebar bersih 2,5m di Sukabumi. beban gandar maksimum 3 ton, prinsip gelagar kaku + menara tinggi + kabel ekonomis.....	33
<i>Gambar 8</i> Perilaku kolom pada menara.....	34
<i>Gambar 9</i> Tipe menara .....	35
<i>Gambar 10</i> Perilaku deformasi lantai jembatan untuk beberapa sistem menara.....	35
<i>Gambar 11</i> Sketsa pelimpahan gaya angin ke puncak menara .....	37
<i>Gambar 12</i> Sketsa pelimpahan gaya gempa ke puncak menara .....	37
<i>Gambar 13</i> Contoh aktual gaya awal vs gaya akhir cable-stayed keadaan batas layan, urutan penarikan dari 1-5 sesuai pelaksanaan bentang utama secara segmental dan kantilever, kabel 5ka dan 1ki mudah melepas karena gaya tarik akhir berdekatan gaya tarik awal .....	40
<i>Gambar 14</i> Skema tipikal stay sebagai perletakan kaku pada beban tetap.....	40
<i>Gambar 15</i> Angkur blok sebelum dan sesudah didesain ulang.....	44
<i>Gambar 16</i> Pelat pengaku di pipa kabel.....	44
<i>Gambar 17</i> Pelat pengaku di badan pylon .....	45
<i>Gambar 18</i> Konfigurasi beban hidup.....	47
<i>Gambar 19</i> Metode pemasangan jembatan cable-stayed) .....	48
<i>Gambar 20</i> Pelaksanaan pemasangan segmen jembatan dengan penyokong sementara .....	50
<i>Gambar 21</i> Contoh ilustrasi pemasangan satu segmen lantai dengan sokongan sementara .....	51
<i>Gambar 22</i> Contoh ilustrasi pemasangan satu blok segmen lantai dengan sokongan sementara .....	51
<i>Gambar 23</i> Pemasangan kabel dua sisi dengan kantilever bebas berimbang dua sisi....	52
<i>Gambar 24</i> Pemasangan kabel dua sisi dengan kantilever bebas berimbang satu sisi ..	53
<i>Gambar 25</i> Pemasangan satu blok besar segmen lantai pada metode kantilever bebas berimbang .....	54
<i>Gambar 26</i> Pemasangan pylon .....	54

<i>Gambar 27</i> Pemasangan segmen rantai dengan kantilever bebas berimbang.....	55
<i>Gambar 28</i> Skema bangunan bawah .....	57
<i>Gambar 29</i> Skema pemasangan gelagar tepi .....	57
<i>Gambar 30</i> Skema pemasangan kolom menara .....	57
<i>Gambar 31</i> Skema pemasangan bentang utama secara segmental, penarikan awal cable-stayed mulai dari menara sampai gelagar tersambung .....	57
<i>Gambar 32</i> Tipikal tahapan pemasangan bentang utama dan penarikan cable-stayed.....	58
<i>Gambar 33</i> Penstabilan sementara oleh kabel tie-down .....	63
<i>Gambar 34</i> Kabel ikat melawan getaran yang disebabkan oleh air hujan dan angin pada Dames Point Bridge .....	65
<i>Gambar 35</i> Pengujian beban-getar prototipe Jembatan Bailey modifikasi kabel.....	67

## Daftar Tabel

<i>Tabel 1</i> Lendutan teoritis akibat berat sendiri gelagar pada.....	59
<i>Tabel 2</i> Kecepatan Angin Flutter Kritis —Sidney Lanier Bridge.....	64





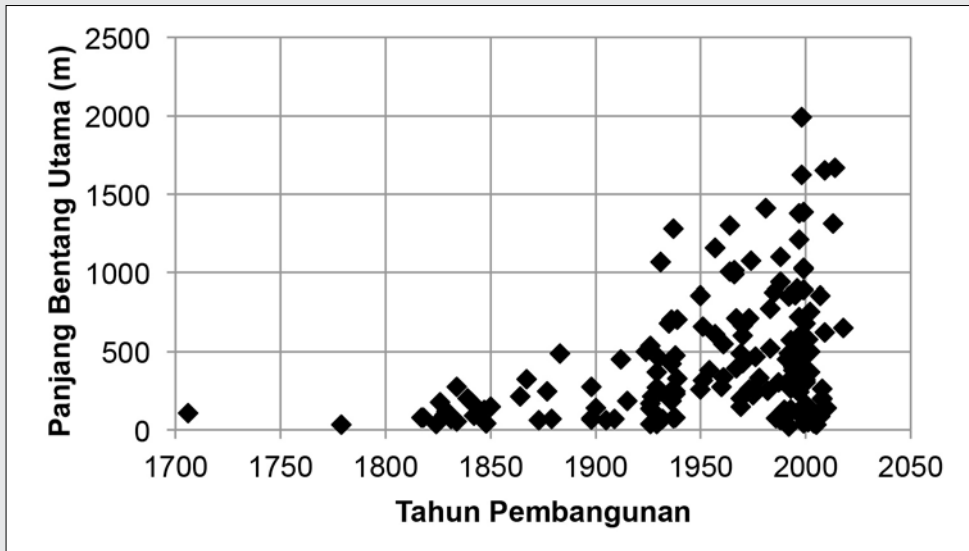
*Bab 1*

# Pendahuluan

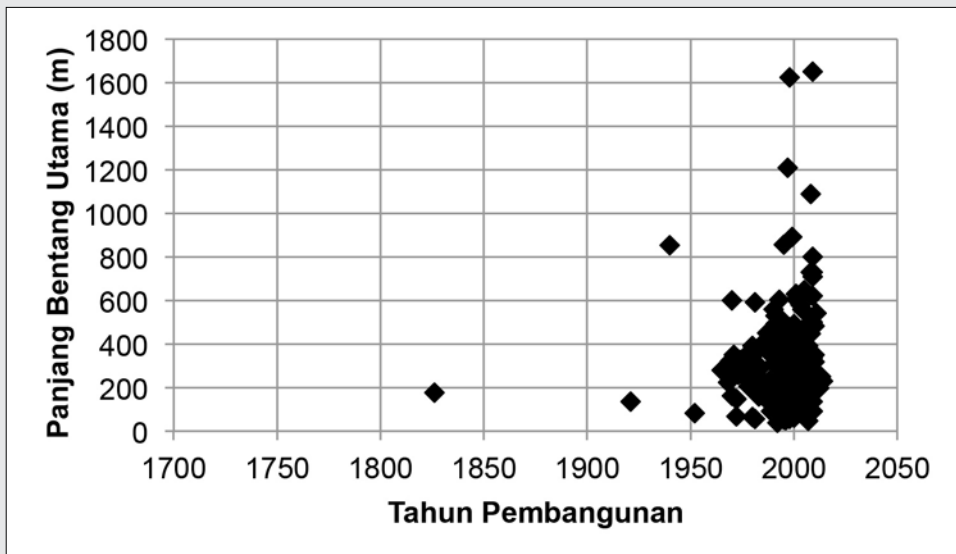
## Latar Belakang

**P**erencanaan teknis dalam struktur jembatan memegang peranan yang penting karena perencanaan teknis akan menentukan kinerja jembatan yang diinginkan dari suatu fenomena beban yang teridentifikasi. Sayangnya ketentuan seperti itu sampai saat ini tidak didapatkan secara luas untuk jembatan bentang panjang khususnya jembatan kabel yang secara garis besar terdiri dari jembatan gantung dan jembatan cable-stayed. Beberapa ketentuan perencanaan teknis untuk bentang panjang mungkin sudah dibahas pada spesifikasi desain atau peraturan bentang standar seperti pada spesifikasi perancangan untuk jembatan dari AASHTO dan National Standard of Canada atau European Standard. Tetapi hal itu masih belum mencukupi terutama persyaratan kinerja jembatan bentang panjang yang berkaitan dengan kenyamanan dan kestabilan struktur.

Sampai saat ini masing-masing untuk jembatan gantung dan jembatan cable-stayed telah dibangun jembatan yang mempunyai



**Gambar 1** Pencapaian Bentang Utama untuk Jembatan Gantung ([www.structurae.de](http://www.structurae.de))



**Gambar 2** Pencapaian Bentang Utama untuk Jembatan Cable Stayed ([www.structurae.de](http://www.structurae.de))

panjang bentang utama adalah sebesar 1991 meter dan 1088 meter yang terletak masing-masing di Jepang dan RRC. Dimana perkembangan dan distribusi bentang utama untuk masing-masing jembatan dapat dilihat pada *Gambar 1* dan *Gambar 2*. Di samping itu dengan perkembangan inovasi jembatan kabel dengan sistem penjangkaran sendiri untuk jembatan gantung atau penjangkaran ke tanah untuk jembatan *cable-stayed* menuntut pengkajian kinerja yang lebih detail dan lebih kompleks.

Hal inilah yang mendorong dilakukan pengidentifikasian berbagai ketentuan mengenai jembatan bentang panjang tahun ini dengan tujuan akhir untuk mendapatkan gambaran yang utuh mengenai perencanaan teknis jembatan bentang panjang secara detail.

## Tujuan dan sasaran penulisan naskah ilmiah

Tujuan dari penulisan ini adalah menguraikan langkah-langkah tipikal yang diperlukan untuk dapat menerapkan suatu konstruksi jembatan. Sasaran dari penulisan ini adalah :

1. Menguraikan konsep perencanaan analisis statis
2. Menguraikan konsep metode konstruksi sebagai bahan penentuan perencanaan
3. Menguraikan konsep perencanaan analisis dinamis

## Metodologi dan Sumber Data

Desain riset yang dipergunakan dalam penyusunan naskah ilmiah bersifat studi non-eksperimental dengan pemaparan yang bersifat deskriptif terhadap beberapa hal diterapkan dalam melakukan perencanaan jembatan *cable-stayed*. Data utama yang diperlukan adalah ketentuan referensi perencanaan jembatan kabel yang memperlihatkan adanya berbagai perencanaan praktis dan teoritis. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan instrumen yang harus dielaborasi menjadi suatu aspek penting yang dipaparkan dalam beberapa bagian dalam naskah ilmiah ini. Selama proses penyusunan hambatan paling utama adalah mendapatkan peraturan suatu institusi pemerintah yang memaparkan secara detail mengenai jembatan kabel. Untuk mengatasi hal tersebut beberapa aspek penting dielaborasi dari berbagai referensi yang sesuai yang dipublikasi dan dapat diakses secara penuh.

## Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan:

1. Bab 1 : Pendahuluan, yang berisi : i) Latar Belakang, ii) Tujuan dan Sasaran Penulisan; iii) Metodologi dan Sumber data; dan iv) Sistematika Pembahasan;
2. Bab 2 : Gambaran Umum dan Pemetaan



- Masalah yang terdiri dari ; i) Deskripsi Isu, Permasalahan Utama dan Elemen Kunci yang Berkontribusi terhadap Permasalahan; ii) Permasalahan Pokok dan Sumber-sumber Permasalahan (Variabel) dan Interdependensinya; iii) Kondisi ideal yang Diharapkan dari Masing-masing Elemen Kunci serta Interaksi yang Diinginkan untuk Mengoptimalkan Sistem Solusi terhadap Masalah Utama; iv) Upaya-upaya Umum yang Telah Dilakukan untuk Menyelesaikan Sumber-sumber Masalah dan Efektifitasnya;
3. Bab 3 : Pengelolaan/ Peningkatan Kinerja pada Tahap Analisis Statis yang terdiri dari : i) Penjelasan Umum dari Analisis Statis; ii) Aspek penting dari Analisis Statis; iii) Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Analisis Statis; iv) Spesifikasi teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Analisis Statis;
  4. Bab 4 : Pengelolaan/ Peningkatan Kinerja pada Tahap Metode Konstruksi yang terdiri dari i) Penjelasan Umum dari Metode Konstruksi; ii) Aspek penting dari Metode Konstruksi; iii) Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Metode Konstruksi; iv) Spesifikasi teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Metode Konstruksi;
  5. Bab 5 : Pengelolaan/ Peningkatan Kinerja pada Tahap Analisis Dinamis yang terdiri dari i) Penjelasan Umum dari Analisis Dinamis; ii) Aspek penting dari Analisis Dinamis; iii) Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Analisis Dinamis; iv) Spesifikasi teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Analisis Dinamis.
  6. Bab 6 : Penutup yang memaparkan mengenai : i) rangkuman pembahasan; ii) hasil kajian; dan iii) pengkajian lebih lanjut yang diperlukan. ■





---

## Bab 2

# Gambaran Umum dan Pemetaan Permasalahan

### Deskripsi Isu, Permasalahan Utama dan Elemen Kunci yang Berkontribusi terhadap Permasalahan

#### Deskripsi Isu

**R**ekayasa jembatan dengan sistem *cable-stayed*, yang merupakan salah satu teknologi jembatan kabel, telah semakin berkembang pesat dan sangat menarik perhatian para arsitek dan para insinyur sipil. Jembatan *cable-stayed* diminati, mengingat tampilan akhir yang berkesan sederhana tetapi mengandung unsur estetis yang tinggi serta ketangguhannya secara struktural yang tidak diragukan.

Setelah sistem *cable-stayed* diperkenalkan, rekayasa teknologi telah menghasilkan kreasi-kreasi dari struktur tipe baru yang memiliki karakteristik yang sangat baik dan keuntungan yang sangat besar. Dan yang paling menonjol adalah karakteristik-karakteristik secara struktural, efisiensi dan pengaplikasian yang sangat luas. Karakteristik struktural dasar, alasan pembangunan secara cepat serta keberhasilan dari jembatan.

Sistem *cable-stayed* menghadirkan suatu sistem ruang, yang terdiri dari balok-balok pengaku (*stiffening girder*), rantai jembatan baja atau

beton dan bagian-bagian pendukung seperti pylon yang beraksi pada tekanan dan kabel-kabel miring yang beraksi pada tegangan. Karakteristik utama dari sistem *cable-stayed* ini adalah aksi yang integral dari balok-balok pengaku dan prestressed ataupun post-tensioning kabel, yang berjalan turun dari puncak menara ke titik-titik anker pada balok-balok pengaku. Kuat tekan secara horisontal yang dikarenakan aksi kabel diambil alih oleh balok-balok pengaku dan anker-anker yang tidak masif yang sangat diperlukan. Pengenalan dari sistem ortotropik telah menghasilkan penemuan-penemuan baru dari tipe-tipe superstruktur yang dengan mudah akan membawa gaya-gaya horisontal dari kabel-kabel pengaku dengan hampir tanpa penambahan bahan baku, bahkan untuk bentang yang sangat panjang.

Karakteristik struktural lainnya dari sistem *cable-stayed* adalah bahwa sistem ini secara geometris tidak berubah di bawah pembebanan pada berbagai posisi pada jembatan, dan seluruh kabel ada dalam posisi tegang.

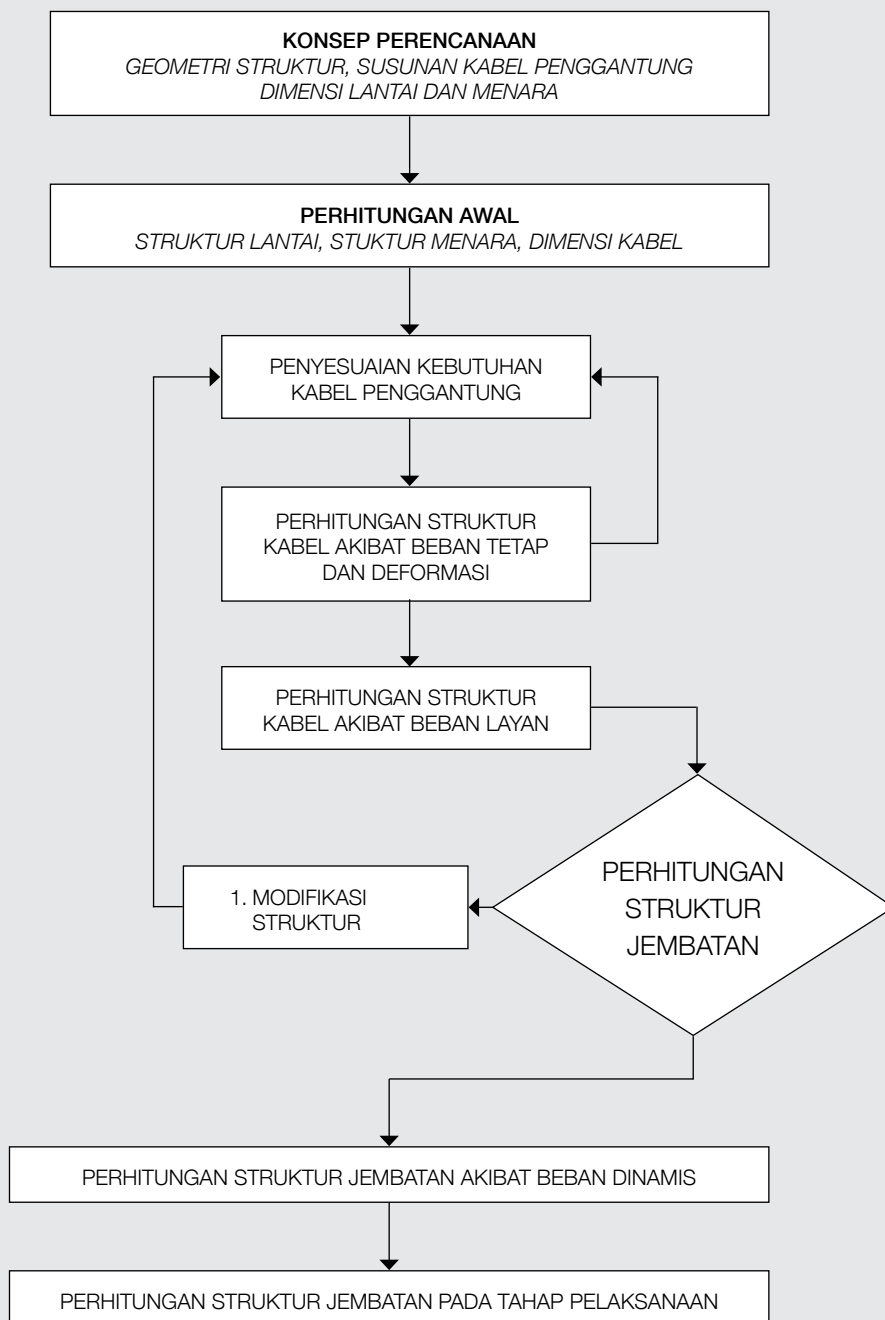
Sistem pun dapat diterapkan pada bentang menengah, panjang bahkan sangat panjang. Pada sistem lainnya, dengan bentang yang sangat panjang, memerlukan gelagar yang sangat besar pula. Sistem memberikan solusi dalam hal ini, yaitu dengan sistem struktural yang terdiri dari

lantai ortotropik dan gelagar yang menerus yang ditopang oleh kabel pengaku. Pada aplikasi pembangunan, sistem *cable stayed* pada jembatan memberikan tambahan nilai secara ekonomis yang sangat tinggi, terutama dari penghematan yang didapat dari waktu pengerjaan yang relatif cepat.

Sistem pada jembatan merupakan suatu pilihan yang layak untuk dipertimbangkan, karena sistem ini bukan saja memenuhi seluruh kebutuhan fungsi pada jembatan dan seluruh persyaratan strukturalnya, tetapi juga memberikan tambahan nilai baik dari segi arsitektur maupun segi finansial.

Tahapan umum perencanaan, sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 3**, meliputi:

1. Konsep disain struktur jembatan yang meliputi faktor:
  - a. Dimensi dan geometri dari struktur jembatan
  - b. Susunan kabel penggantung
  - c. Dimensi dan geometri dari lantai jembatan
  - d. Dimensi dan geometri dari pylon
2. Perhitungan awal struktur jembatan akibat beban permanen pada jembatan, yang terdiri dari:
  - a. Perhitungan struktur untuk lantai kendaraan
  - b. Perhitungan struktur untuk menara atau pylon



**Gambar 3** Bagan alir perencanaan jembatan kabel

- c. Perhitungan kebutuhan dari susunan kabel penggantung
- 3. Penyesuaian dimensi dan geometri struktur jembatan akibat beban permanen
- 4. Perhitungan struktur jembatan akibat beban layan pada jembatan, yang terdiri dari:
  - a. Perhitungan struktur untuk lantai kendaraan
  - b. Perhitungan struktur untuk menara atau pylon
  - c. Perhitungan kebutuhan dari susunan kabel penggantung
- 5. Penyesuaian dimensi dan geometri struktur jembatan akibat beban layan
- 6. Perhitungan struktur jembatan akibat beban dinamis pada jembatan, yang terdiri dari:
  - a. Perhitungan struktur untuk lantai kendaraan
  - b. Perhitungan struktur untuk menara atau pylon
  - c. Perhitungan kebutuhan dari susunan kabel penggantung
- 7. Pemilihan Metoda Pelaksanaan Jembatan
- 8. Perhitungan struktur jembatan akibat beban pelaksanaan pada jembatan, yang terdiri dari:
  - a. Perhitungan struktur untuk lantai kendaraan

- b. Perhitungan struktur untuk menara atau pylon
  - c. Perhitungan kebutuhan dari susunan kabel penggantung
- 9. Penyesuaian dimensi dan geometri struktur jembatan akibat beban pelaksanaan

### **Permasalahan Utama**

Permasalahan utama dari penerapan jembatan tipe ini adalah :

1. Jembatan ini dibangun dengan biaya konstruksi yang tinggi yang terlihat dari signifikansi kuantitas penggunaan bahan-bahan konstruksi, sehingga diperlukan metode perencanaan dan pelaksanaan yang akurat dan penggunaan bahan-bahan konstruksi dengan spesifikasi kinerja tinggi.
2. Dampak ekonomi dan sosial yang akan timbul mulai dari pengadaan lahan, pelaksanaan konstruksi, dan pengoperasian jembatan.

### **Elemen kunci**

Elemen kunci dari perencanaan jembatan tipe ini adalah :

1. Analisis Statis
2. Metode Konstruksi
3. Analisis Dinamis

## Permasalahan Pokok dan Sumber-sumber Permasalahan (Variabel) dan Interdependensinya

Permasalahan pokok dan sumber-sumber permasalahan (variabel) dan interdependensinya:

1. Keterbatasan ketentuan yang dibakukan untuk perencanaan dan pelaksanaan jembatan kabel yang mengakomodasi ketersediaan sumber daya yang ada di Indonesia
2. Keterbatasan sumber daya yang mempunyai pengalaman memimpin suatu proyek perencanaan dan pelaksanaan, serta pengawasan konstruksi jembatan kabel.

### Interdependensinya

Minimnya pengetahuan dan pengetahuan mengidentifikasi pengelolaan proyek jembatan bentang panjang, akhirnya membuat para pengelola jembatan tidak mampu membuat suatu proposal jembatan kabel yang cukup komprehensif yang mampu diterapkan di lapangan. Oleh karena itu, proyek perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jembatan bentang panjang hanya sedikit. Hal ini yang pada akhirnya membuat sumber daya engineer yang tersedia di

lapangan tidak tertarik untuk mempelajari perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jembatan bentang panjang dan membuat tidak cukup ekonomisnya penyediaan peralatan yang diperlukan untuk membuat konstruksi jembatan bentang panjang di Indonesia.

## Kondisi Ideal yang Diharapkan dari Masing-masing Elemen Kunci serta Interaksi yang Diinginkan untuk Mengoptimalkan Sistem Solusi terhadap Masalah Utama.


Kondisi ideal yang diharapkan dari masing-masing elemen kunci serta interaksi yang diinginkan untuk mengoptimalkan sistem solusi terhadap masalah utama. :

1. Tersedianya sumber daya perencana dan pelaksana konstruksi jembatan bentang panjang dengan kualitas internasional yang berkelanjutan;
2. Tersedianya ketentuan sebagai dasar pengetahuan para pemangku kebijakan dan pengelola jembatan dalam memahami konsep penerapan jembatan bentang panjang;
3. Tersedianya peralatan konstruksi jembatan bentang panjang dengan biaya yang ekonomis.



### Upaya-upaya Umum yang Telah Dilakukan untuk Menyelesaikan Sumber-sumber Masalah dan Efektifitasnya

Upaya-upaya umum yang telah dilakukan untuk menyelesaikan sumber-sumber masalah adalah :

1. Sosialisasi mengenai kajian studi kelayakan , jembatan bentang panjang pada daerah-daerah yang mempunyai konsep pengembangan jaringan jalan yang akan melintasi suatu lebar sungai atau halangan spasial lainnya dengan bentang lebih dari 150 meter, agar mereka mampu memahami dan membuat proposal yang cukup komprehensif tentang penerapan jembatan bentang panjang.
  2. Sosialisasi mengenai mata pelajaran jembatan khususnya jembatan bentang panjang di perguruan tinggi agar mahasiswa lebih tertarik untuk mempelajari perencanaan dan konstruksi jembatan bentang panjang. Hal ini cukup efektif juga diberlakukan pada universitas yang berada daerah-daerah yang mempunyai ketahanan ekonomis yang cukup baik, sehingga akhirnya akan dihasilkan sumber daya manusia yang cocok untuk membangun daerah tersebut.
  3. Peningkatan kompetensi pelaksana jembatan lokal di mana jembatan bentang panjang kemungkinan dapat dilaksanakan melalui pendidikan informal atau kesempatan ikut dalam konstruksi proyek-proyek jembatan bentang panjang secara mandiri atau melalui pembinaan konsultan nasional yang lebih maju sumber dayanya agar didapat suatu peningkatan pemahaman perencanaan jembatan bentang panjang.
- 





**Bab 3**

# Pengelolaan/ Peningkatan Kinerja pada Tahap Analisis Statis

## Penjelasan Umum dari Analisis Statis

Jembatan *cable-stayed* menjadi pelopor dalam pembangunan jembatan bentang panjang. Kabel stay adalah kabel eksternal dengan dwi fungsi. Kabel stay berfungsi sebagai perancah dalam pemasangan gelagar lantai dengan sistem kantilever bertahap dan sebagai perletakan elastis/pegas atau pilar antara dalam struktur akhir. Bentang yang dicapai dengan sistem *cable-stayed* adalah empat kali bentang gelagar sederhana bila dimensi dipertahankan sama.

Kabel eksternal bergetar bebas dan fatik akibat perulangan beban. Dengan demikian tegangan akhir kabel dibatasi maksimum 45% tegangan putus ( $= 45\% \times 1860 \text{ MPa}$ ) untuk kondisi daya layan, dan maksimum 60% tegangan putus untuk kondisi ultimit. Tegangan awal kabel direncanakan 20-30% tegangan putus agar mampu menahan beban pelaksanaan dan pelayanan.

Jembatan *cable-stayed* kuat terhadap gempa karena letak pusat massa yang rendah, tetapi peka terhadap penurunan diferensial. Penurunan



**Gambar 4** Jembatan Pasupati, bentang utama 106 m dan total 161m, menara dan gelagar dari beton, prinsip kabel kaku

fondasi menara menarik kabel kebawah sehingga menyebabkan pertambahan gaya tarik dalam *cable-stayed*.

Kabel stay kuat terhadap gaya tarik aksial akibat pembebanan lalu lintas normal, tetapi lemah terhadap gaya tekan dan momen akibat gaya angin. Getaran dan goyangan akibat angin mempengaruhi stabilitas aerodinamis jembatan *cable-stayed* bentang panjang.

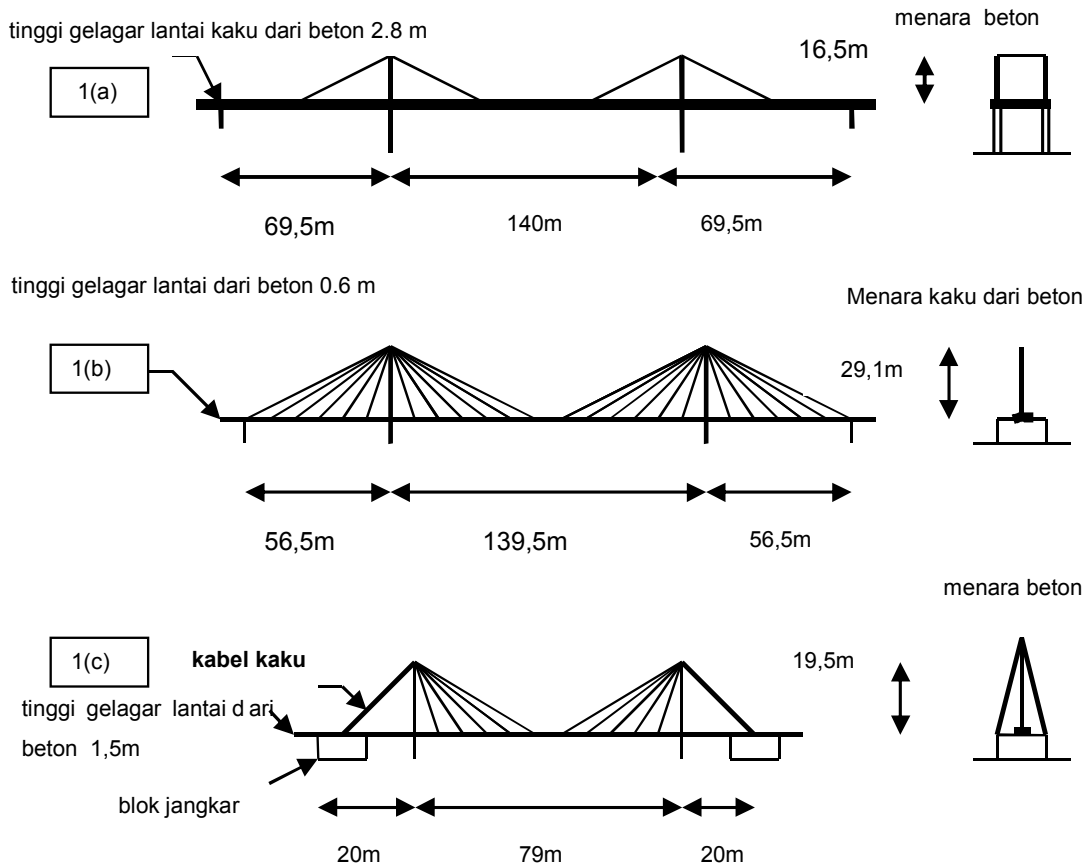
### Aspek Penting dari Analisis Statis

Terdapat banyak kemungkinan untuk membuat sistem *cable-stayed* dengan tiga pilihan bebas yang juga dapat saling digabung. Pilihan dimensi mencakup rasio kelangsingan  $h/L$  (tinggi gelagar lantai terhadap bentang utama) yang

berkisar antara  $1/50$ - $1/100$ . Juga terdapat pilihan untuk mempertinggi menara agar mereduksi keperluan tinggi gelagar lantai. Setiap jembatan *cable-stayed* yang selesai dibangun dengan demikian ciptaan dengan karakteristik tersendiri sebagaimana yang terlihat *Gambar 4*.

Interaksi antara kabel, gelagar lantai dan menara dalam kinerja struktural secara keseluruhan dipengaruhi oleh tiga keadaan batas berikut :

1. Gelagar lantai sangat kaku (*Gambar 5a*) dengan jumlah kabel terbatas sebagai perletakan elastis antara di tempat dimana tidak mungkin dibangun pilar, yang serupa sistem ekstradosed. Menara relatif langsing dan tidak perlu tinggi karena hanya memikul momen lentur kecil.



**Gambar 5** Contoh tipikal untuk tiga keadaan batas perencanaan

2. Menara sangat kaku (*Gambar 5b*) yang memikul momen arah memanjang dengan gelagar lantai relatif langsing yang memikul momen arah melintang kecil terutama bila jarak antara kabel dibuat berdekatan.
3. Kabel sangat kaku (*Gambar 5c*) sebagai elemen stabilitas struktural. Bentang samping umumnya dibuat lebih pendek dari setengah bentang utama agar kabel jangkar tidak kehilangan gaya tarik, dan sering digunakan blok jangkar/pilar jangkar. Blok atau pilar jangkar/antara mengurangi lendutan bentang utama sehingga dimensi gelagar lantai dapat direduksi, dan digunakan untuk memperoleh stabilitas bentang utama yang panjang. Dengan demikian menara dan gelagar lantai menjadi relatif langsing.

## Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Analisis Statis

Perencanaan dilakukan berdasarkan beberapa aspek berikut ini:

1. Lokasi Jembatan
2. Layout Jembatan
3. Sistem lantai jembatan
4. Sistem menara jembatan
5. Sistem kabel penggantung
6. Beban jembatan
7. Tahapan umum perencanaan
8. Pemodelan analisis struktur

### Lokasi Jembatan

Kinerja dan ukuran-ukuran efektifitas aspek ini adalah :

1. Panjang bentang terpendek yang mungkin dari jembatan;
2. Jembatan harus berada pada bagian lurus dari sungai atau arus, jauh dari cekungan tempat erosi dapat terjadi;
3. Pilih lokasi dengan kondisi fondasi yang baik untuk penahan kepala jembatan;
4. Lokasi harus sedekat mungkin dengan jalan masuk yang ada atau lintasan lurus;
5. Lokasi harus memberikan jarak bebas yang baik untuk mencegah banjir dan harus meminimalisasi kebutuhan untuk pekerjaan tanah pada jalan masuk untuk menaikkan permukaan pada jembatan;
6. Arus sungai harus memiliki penguraian yang baik dan jalan aliran yang stabil

dengan resiko yang kecil dari perubahan karena erosi;

7. Lokasi harus terlindung dan seminimal mungkin terkena pengaruh angin;
8. Lokasi harus memberikan jalan masuk yang baik untuk material dan pekerja;
9. Akan sangat membantu bila terdapat penyedia material setempat yang mungkin digunakan dalam konstruksi seperti pasir dan batu;
10. Lokasi harus mendukung masyarakat setempat.

### Beban Rencana

Kinerja dan ukuran-ukuran efektifitas aspek ini adalah :

1. Beban rencana individual
  - a. Beban permanen
    - i. Berat Sendiri
    - ii. Beban mati tambahan
  - b. Beban lalu lintas
    - i. Beban Hidup
    - ii. Faktor Beban Dinamis
  - c. Beban dari lingkungan
    - i. Beban Angin
    - ii. Beban Gempa
      - Beban Horizontal Statis Ekuivalen
      - Beban Vertikal Statis Ekuivalen
      - Tekanan Air Lateral Akibat Gempa
2. Kombinasi beban
  - a. Kombinasi untuk aksi tetap.
  - b. Perubahan aksi tetap terhadap waktu.

- c. Kombinasi pada keadaan batas daya layan.
- d. Kombinasi pada keadaan batas ultimate.
- e. Berdasarkan tegangan kerja, dalam tinjauan terbatas.

### Layout Jembatan

Kinerja dan ukuran-ukuran efektifitas aspek ini adalah :

1. Layout jembatan harus disesuaikan dengan lokasi jembatan akan dibangun. Hal ini berpengaruh pada performa struktur jembatan terutama dalam aspek pelaksanaan dan aspek ekonomi. Tinjauan geometris struktur terdiri dari layout melintang jembatan dan layout memanjang jembatan.
2. Untaian grup kabel penggantung, secara umum grup kabel penggantung memiliki dua sisi atau berada pada ujung tepi lantai kendaraan dari arah melintang jembatan. Selain tipe dua sisi, terdapat pemasangan kabel dalam satu sisi grup kabel penggantung yang berada pada bagian tengah lantai kendaraan pada arah memanjang jembatan. Panjang bentang jembatan sangat berpengaruh pada penentuan tipe untai kabel. Layout kabel secara melintang dapat disusun dari satu sisi, dua sisi atau banyak sisi.
3. Pemilihan layout memanjang dipengaruhi oleh:

- a. Optimasi kabel
- b. Topografi daerah lokasi rencana jembatan
- c. Kondisi geoteknik tanah
- d. Penentuan geometri sudut kabel. Sudut kabel optimum arah memanjang adalah 45 derajat

4. Jarak titik angkur pada lantai jembatan ditentukan oleh panjang segmen lantai jembatan yang akan digunakan. Hal ini berpengaruh pada kapasitas lantai kendaraan dan metoda perakitan jembatan.

### Sistem lantai jembatan

Kinerja dan ukuran-ukuran efektifitas aspek ini adalah :

1. Tinggi Lantai Kendaraan
  - a. Lantai jembatan/*deck* merupakan elemen yang memiliki nilai kekakuan yang dapat menerima beban jembatan terutama kapasitas lentur lantai jembatan. Pengurangan jumlah kabel penggantung dapat mengakibatkan kebutuhan penampang *deck* semakin besar. Lebar lantai kendaraan disesuaikan pada dimensi dari jenis pylon atau menara yang akan dipakai.
  - b. Kekakuan lantai/*deck* ditentukan oleh dimensi penampang lantai. Semakin besar penampang lantai jembatan maka berat sendiri struktur lantai semakin besar. Untuk mendapatkan nilai optimum antara



- panjang segmen lantai digunakan perhitungan rasio kelangsingan antara tinggi lantai dan jarak antar kabel penggantung.
- c. Nilai rasio kelangsingan adalah  $1/50$  sampai dengan  $1/70$ .
  - d. Untuk kabel *backstay* yang diikatkan pada peletakan di atas tanah, rasio kelangsingan sampai dengan  $1/100$ .
  - e. Kekakuan lantai jembatan dipengaruhi juga oleh:
    - i. Sistem penggantung
    - ii. Lebar lantai jembatan
2. Menentukan elevasi dek  
Tinggi banjir rencana disarankan menggunakan ketinggian rata-rata periode 5 tahun. Ketinggian dari dek harus menyediakan jarak bebas dengan mempertimbangkan material yang terbawa air banjir.
3. Jarak bebas  
Jarak bebas yang dianjurkan adalah:
- a. Pada daerah yang agak datar ketika air banjir dapat menyebar ke batas ketinggian permukaan air dianjurkan jarak bebas minimum 1 m;
  - b. Pada daerah berbukit dan memiliki kelandaian lebih curam ketika penyebaran air banjir lebih terbatas, jarak bebas harus ditingkatkan. Jarak bebas lebih dari 5 m disarankan untuk daerah berbukit dengan arus sungai yang mengalir pada tepi jurang yang curam.
  - c. Faktor kritis lain dari jarak bebas untuk perahu dan lokasi dari kepala jembatan juga perlu diperiksa untuk melihat kriteria mana yang mengatur tinggi minimum dek.
4. Desain Khusus Lantai Jembatan  
Tipe lantai ortotropik dapat diperhitungkan untuk mendapatkan nilai optimum antara kapasitas kekakuan sistem lantai kendaraan dan berat struktur yang digunakan. Sistem lantai tipe ini harus memperhitungkan semua elemen dengan tata cara perencanaan yang lazim dan rasional.
5. Gelagar lantai dibuat dari beton dan/atau baja. Pada bentangan besar umumnya dipilih gelagar lantai dari baja. Berat sendiri langsung berpengaruh pada keperluan kapasitas stay, menara dan fondasi.
- a. Besaran berikut dapat digunakan sebagai perkiraan awal untuk gelagar lantai fleksibel dengan tinggi gelagar sekitar  $1/100$  terhadap panjang bentang utama  $L$  :
  - b. Lantai baja : 2,5-3,5 kN/m<sup>2</sup>, misalnya boks baja, rangka baja
  - c. Lantai komposit baja-beton 6,5 – 8,5 kN/m<sup>2</sup>, misalnya boks dengan flens beton dan badan dari komponen rangka baja, seperti yang terlihat pada *Gambar 6*.
  - d. Lantai beton 10,0-15 kN/m<sup>2</sup>, misalnya boks beton



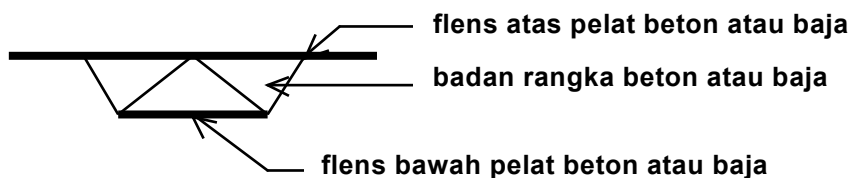
**Gambar 7** Jembatan lalu lintas ringan, bentang 240 m dengan lebar bersih 2,5 m di Sukabumi. beban gandar maksimum 3 ton, prinsip gelagar kaku + menara tinggi + kabel ekonomis

6. Dalam perhitungan pendekatan, besaran momen inersia dari rangka baja dapat diperhitungkan dengan pengaruh luas batang tepi atas dan batang tepi bawah terhadap garis berat longitudinal rata-rata pada pertengahan tinggi rangka, seperti pada *Gambar 7*. Pengaruh inersia diagonal dan besaran inersia terhadap sumbu sendiri dapat diabaikan. Perhitungan berat sendiri mencakup semua batang rangka ditambah perkiraan persentase 30% untuk ikatan pengaku, pelat simpul, sambungan koppel, dan baut.

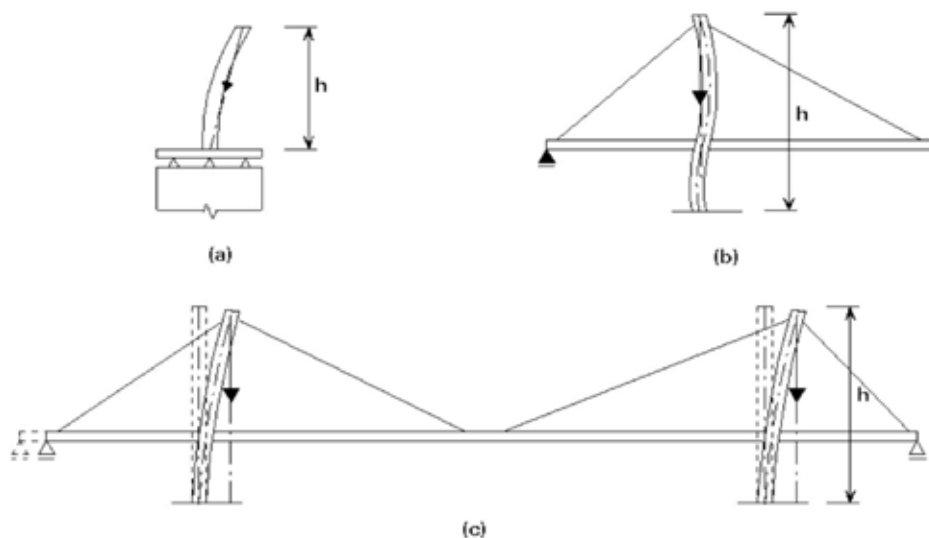
#### Sistem menara jembatan

Kinerja dan ukuran-ukuran efektifitas aspek ini adalah :

1. Pemilihan bentuk menara berpengaruh pada deformasi bentuk sistem lantai jembatan yang kaku;
2. Struktur jembatan cable stayed yang terdiri dari banyak bentang akan menghasilkan perilaku struktur yang berbeda;
3. Perencanaan kolom harus memper-timbangkan :
  - a. Kolom merupakan elemen yang menerima gaya tekan dan



**Gambar 6** Contoh penampang melintang gelagar lantai tipe boks



**Gambar 8** Perilaku kolom pada menara

momen akibat pengaruh gaya kabel penggantung.

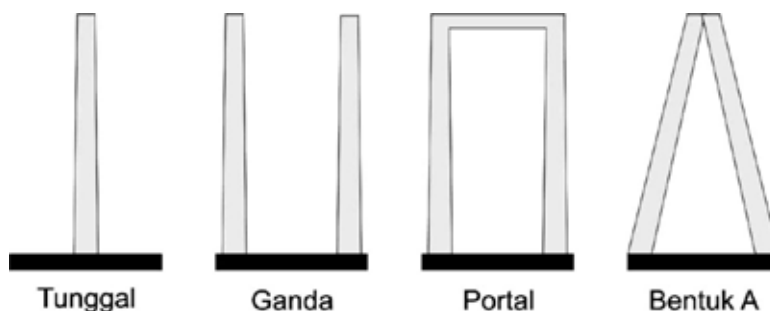
- b. Untuk geometri dan layout yang asimetris maka perlu perhitungan kapasitas torsi dari menara

**Gambar 8** menjelaskan beberapa hal :

- Gambar (a) menjelaskan tekuk yang terjadi pada menara dimana titik kumpul kabel penggantung terdapat di ujung menara dan menara berdiri bebas sehingga resultan gaya kabel berada pada sumbu jembatan. Panjang tekuk untuk model tersebut sama dengan tinggi menara ( $L_c$ ). Untuk kondisi yang khusus dari keadaan tersebut maka panjang efektif mencapai 2 kali tinggi menara;
- Gambar (b) menjelaskan tekuk pada

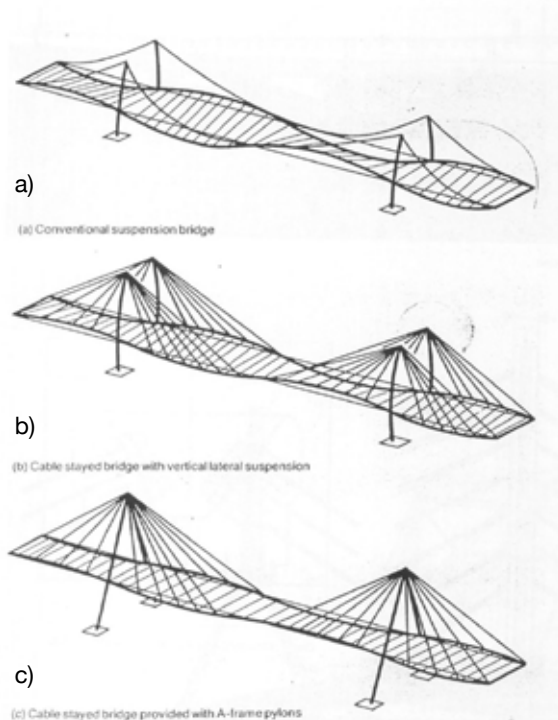
arah memanjang jembatan dimana pada ujung jembatan digunakan peletakan sendi. Panjang efektif adalah 0,7 kali tinggi menara;

- Gambar (c) menjelaskan tekuk pada menara dimana lantai jembatan tidak terikat pada arah memanjang jembatan. Tekuk terjadi akibat adanya pergerakan menara ke arah memanjang jembatan dan panjang efektif pylon adalah dua kali tinggi menara.
4. Sebagai acuan awal untuk penentuan tinggi menara dapat diperoleh **Rumus 1**.
 
$$h = 1/3 \times \text{bentang} \quad (\text{Rumus 1})$$
  5. Penentuan tipe menara yang akan direncanakan dipengaruhi oleh:
    - a. Lebar rencana lantai jembatan
    - b. Ruang bebas antara lantai jembatan dan kolom menara



**Gambar 9** Tipe menara

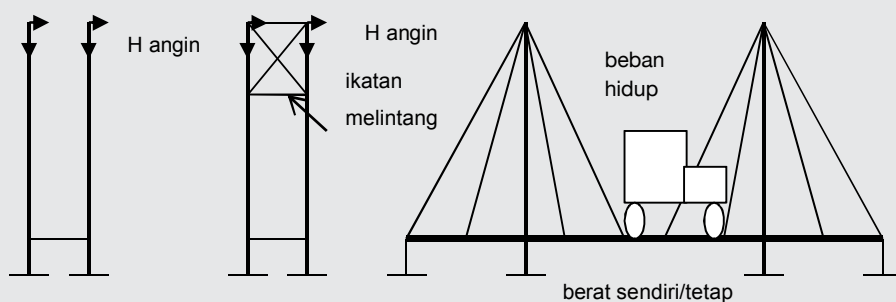
- c. Layout memanjang kabel
  - d. Layout melintang kabel, sudut terhadap lantai jembatan arah melintang
  - e. Konstruksi menara harus cukup kaku dan mempunyai stabilitas terhadap lantai jembatan karena perilaku lantai jembatan dianalogikan sebagai benda yang terapung dan terikat oleh kabel penggantung di setiap penghubungnya.
  - f. Dimana tipe menara, seperti yang terdapat pada **Gambar 9**, yang ada :
    - i. Menara tunggal
    - ii. Menara Ganda
    - iii. Menara Portal
    - iv. Menara A
  - g. Gambaran umum perilaku deformasi lantai jembatan untuk beberapa jenis menara dan sistem kabel penggantung dijelaskan dalam **Gambar 10**.
6. Menara jembatan *cable-stayed* menahan tekanan tinggi karena memikul hampir semua berat sendiri/tetap dan beban



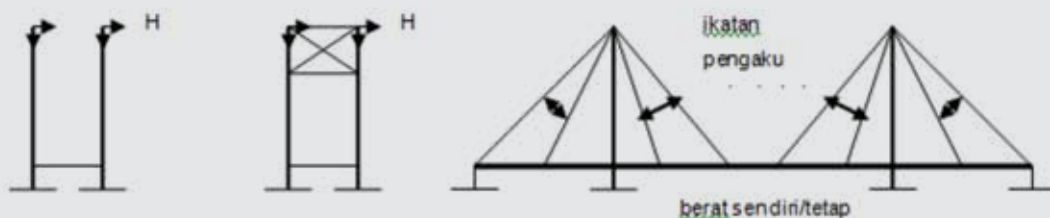
- a) Jembatan gantung konvensional
- b) Jembatan *cable-stayed* dengan suspensi lateral vertikal
- c) Jembatan *cable-stayed* yang dilengkapi pylon bentuk A

**Gambar 10** Perilaku deformasi lantai jembatan untuk beberapa sistem menara (Walther 1988)

- hidup yang berada pada struktur. Menara umumnya langsing sehingga stabilitas menjadi dominan;
7. Beton mempunyai sifat tidak linier, sedangkan baja umumnya linier. Disain menara beton lebih rumit dari menara baja karena memerlukan pengecekan analisis tingkat kedua. Kolom menara yang terdiri dari profil baja yang dibungkus dalam beton umumnya bersifat linier. Untuk kondisi pelaksanaan di Indonesia, lebih aman menggunakan bahan baja atau komposit baja-beton untuk struktur menara;
  8. Menara dalam arah memanjang stabil oleh keseimbangan konfigurasi *cable-stayed*. Selain ini menara ditahan oleh tekanan akibat beban tetap dan hidup. Disain arah memanjang secara mendasar mengendalikan tegangan dan lendutan. Momen lentur menara pada beban tetap sedapat mungkin hilang dan terimbangi oleh kabel utama dan kabel jangkar;
  9. Menara dalam arah melintang dihitung dengan model 2D *freebody* rangka sebidang (*Gambar 9*). Stabilitas arah melintang dipengaruhi oleh gaya angin yang dianggap bekerja melalui titik hubungan kabel di puncak menara. Gaya kabel arah vertikal akibat berat sendiri/tetap dan beban hidup dikombinasikan dengan gaya horizontal akibat angin. Menara dapat dibuat dengan kolom bebas atau sistem portal. Ikatan melintang berguna untuk menjaga stabilitas serta menghemat dimensi kolom menara. Momen lentur akibat beban tetap memberikan kontribusi berarti pada lentur total. Pengecekan kapasitas daya pikul dalam arah melintang dihitung secara manual. Model 3D digunakan untuk tujuan lain seperti analisis frekuensi lentur natural dalam arah melintang jembatan;
  10. Menara dalam arah memanjang dapat menjadi kritis di bagian dasar kolom yang terbebani paling berat. Ikatan pengaku antar kabel (*Gambar 11*) dapat meningkatkan redaman dan mengurangi getaran kabel karena terjadi kerjasama kabel secara keseluruhan yang mendukung keadaan batas daya layan maupun ultimit;
  11. Menara dalam arah melintang dihitung dengan model 2D *freebody* rangka sebidang (*Gambar 12*). Beban gempa adalah beban ultimit (faktor beban = 1) yang dikombinasikan dengan berat sendiri struktur pada tingkat daya layan (faktor beban = 1). Gaya kabel arah vertikal akibat berat sendiri/tetap dikombinasikan dengan gaya horizontal ekuivalen gempa, yang merupakan perkalian koefisien gempa statis ekuivalen (0,10-0,35) dengan gaya kabel vertikal akibat berat sendiri/tetap.
  12. Tipe hubungan antara menara dan gelagar lantai dapat dibuat sebagai berikut :



**Gambar 11** Sketsa pelimpahan gaya angin ke puncak menara



**Gambar 12** Sketsa pelimpahan gaya gempa ke puncak menara

- lantai merupakan kesatuan monolitik dengan menara, dengan keuntungan besarnya momen berkurang;
- lantai melayang melalui menara, struktur tidak tertahan mempunyai keuntungan pengaruh rangkang-susut, perubahan temperatur dan gempa berkurang;
- lantai berada diatas perletakan di menara, dengan keuntungan struktur lebih banyak tumpuan tetap.

### Sistem kabel penggantung

Kinerja dan ukuran-ukuran efektifitas aspek ini adalah :

- Kabel penggantung (*stays*) merupakan elemen jembatan yang menghubungkan
  - kan antara lantai jembatan dan menara. Kabel penggantung meneruskan beban-beban yang bekerja pada lantai jembatan pada menara jembatan. Secara umum kabel penggantung harus mempunyai kapasitas terhadap gaya-gaya aksial yang bekerja pada jembatan. Terdiri dari 2 bagian yaitu kabel *backstay* dan kabel *midstay*. Hal yang berpengaruh pada penentuan dimensi kabel penggantung;
- Rumus pendekatan : jumlah kabel pada bentang sisi lebih besar dari setengah jumlah kabel pada bentang tengah;
- Bahan baja yang diperlukan :
  - Material baja struktur, profil dan pelat mengacu pada ASTM A36 dan mempunyai tegangan leleh minimal

- 240 MPa dengan  $F_y = 36$  ksi dan  $F_u = 58 - 80$  ksi;
- b. Baut mutu tinggi menggunakan tipe A325 (ASTM), Kuat Tarik Minimum 120/105 ksi;
  - c. Baut penahan dan jangkar mempunyai tegangan leleh minimal 500 MPa;
  - d. Pengelasan disesuaikan dengan tebal pelat dan mutu baja;
4. Bahan kabel prategang yang diperlukan :
    - a. Bahan kabel dapat dipabrikasi dengan kekuatan atau mutu tinggi;
    - b. Dengan kapasitas yang sama mempunyai berat dan penampang 25-35% dari kapasitas baja pada umumnya;
    - c. Strand baja terdiri dari 7 (tujuh) kawat dengan tegangan putus minimal 1860 MPa (A416-270);
    - d. Diameter nominal strand baja adalah 12,7 mm;
    - e. Untuk perlindungan terhadap korosi maka dianjurkan menggunakan strand yang bergalvanis, diselubungi oleh grease atau material grout dan berselubung polyethylene (HDPE);
    - f. Selubung HDPE juga berfungsi untuk mengurangi efek beban dinamis pada struktur jembatan akibat angin.
  5. Pada analisis kabel penggantung, kabel diasumsikan hanya menerima gaya tarik. Pada kenyataannya kabel mempunyai berat sendiri yang mengakibatkan adanya kurva pada saat kabel terpasang pada struktur jembatan.
  6. Untuk jembatan dengan bentang sampai dengan 150 m maka pengaruh berat sendiri kabel bisa diabaikan. Tetapi untuk bentang yang lebih panjang maka pengaruh kekakuan kabel akibat berat sendiri diperhitungkan.
  7. Perhitungan dilakukan dengan memasukkan nilai modulus elastisitas kabel  $E$  ke dalam modulus elastisitas ekuivalen  $E_{eq}$  menurut *Rumus 2*.
 
$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{\gamma^2 a^2}{24} \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} E}$$

(*Rumus 2*)

dengan pengertian:

$\gamma$  = berat jenis material kabel  
 $a$  = proyeksi horizontal kabel  
 $\sigma_1$  = Tegangan akibat beban mati awal  
 $\sigma_2$  = Tegangan akibat beban mati akhir (akibat beban mati dan beban hidup)

Persamaan (2) merupakan secant modulus, dan iterasi pada analisis struktur dimana  $\sigma_2$  adalah variable yang tidak diketahui pada kondisi inisial.

Untuk jembatan dengan proyeksi horizontal 250-300 m maka diambil  $\sigma_2 = \sigma_1 = \sigma$ , sehingga diperoleh *Rumus 2a* yaitu :

$$E_{tan} = \frac{E}{1 + \frac{\gamma^2 a^2 E}{12 \sigma_1^3}}$$

(Rumus 2a)

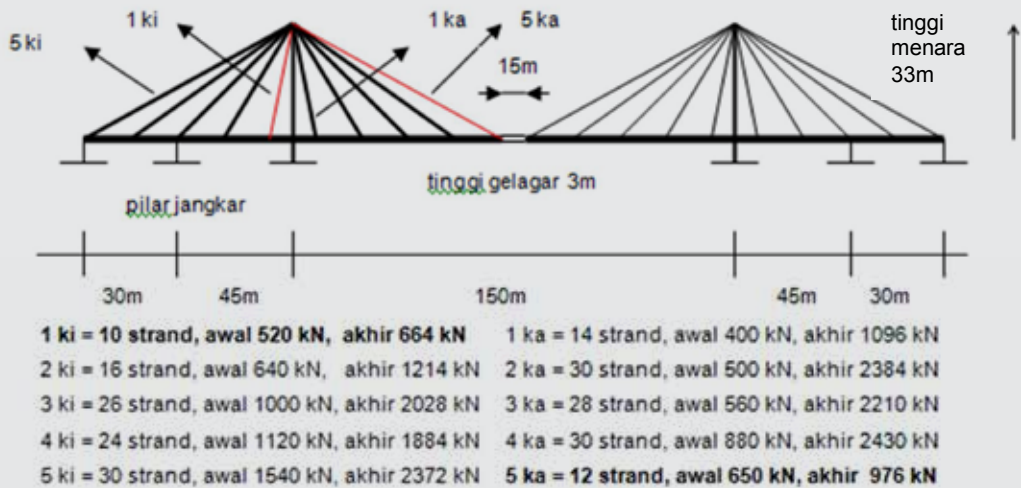
Untuk perhitungan yang lebih teliti, maka dengan iterasi diperhitungkan berdasarkan kekakuan aksial kabel memakai  $E_{eq}$  dimana kekakuan diketahui dari persamaan  $E_{tan}$

8. Angkur dengan mutu kabel yang terbentuk dari kuantitas baja karbon dan hampir 5 kali lebih besar dari baja struktur biasa maka kabel tidak bisa dihubungkan dengan menggunakan cara pengelasan. Kabel terikat pada suatu sistem angkur dimana baji menjepit kabel pada blok angkur.
9. Sistem angkur terdiri dari:
  - a. Angkur Hidup adalah sistem dimana lokasi gaya kabel dapat disesuaikan;
  - b. Angkur Mati adalah sistem dimana lokasi kabel terikat secara permanent;
  - c. Blok angkur adalah bagian yang menghubungkan sistem kabel dengan elemen struktur yang mengikat pada struktur lantai jembatan dan menara.
10. Hal yang diperhatikan dalam perencanaan sistem angkur adalah:
  - a. Sudut antara sumbu kabel dan lantai jembatan arah melintang jembatan.

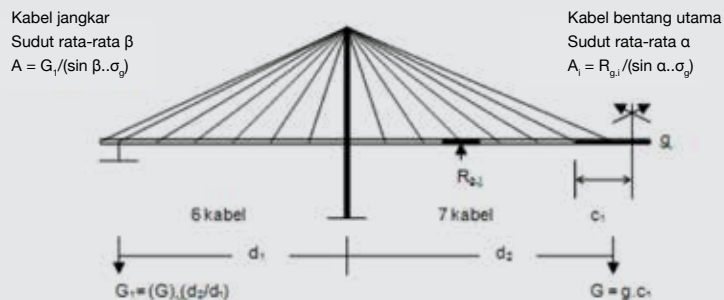
- b. Sudut antara sumbu kabel dan lantai jembatan arah memanjang jembatan

11. Di Indonesia digunakan tipe kabel untaian yang ekonomis, tetapi peka terhadap korosi yang diatasi dengan perlindungan efektif. Untaian mempunyai kualitas yang sangat bervariasi karena dibuat oleh banyak produsen, sehingga pengujian laboratorium harus dilakukan terlebih dahulu;
12. Angkur prategang menggunakan baji dan lebih sesuai untuk kabel yang terikat dalam beton. Kabel stay bebas bergetar sehingga perulangan beban membuat angkur cepat fatik. Jembatan Bailey tipe *cable-stayed* dengan kabel dari 2-3 untaian dapat menggunakan angkur prategang yang di-modifikasi dengan peredam elastomer di ujung kabel. Pada jembatan kabel kecil/ sederhana, angkur hidup ditempatkan di gelagar agar lebih praktis dalam pelaksanaan penarikan kabel. Jembatan *cable-stayed* umumnya menggunakan angkur hidup di puncak menara dan angkur mati di gelagar, dan perlu platform di menara untuk pelaksanaan penarikan kabel;
13. Angkur *cable-stayed* yang standar memfasilitasi 9-108 untaian. Tipe paling kecil dapat digunakan untuk menjangkar 1-9 untaian, yang untuk kabel kecil kurang ekonomis;





**Gambar 13** Contoh aktual gaya awal vs gaya akhir cable-stayed keadaan batas layan, urutan penarikan dari 1-5 sesuai pelaksanaan bentang utama secara segmental dan kantilever, kabel 5ka dan 1ki mudah melepas karena gaya tarik akhir berdekatan gaya tarik awal



**Gambar 14** Skema tipikal stay sebagai perletakan kaku pada beban tetap

14. Detail dudukan angkur pada gelagar dan menara merupakan titik hubungan utama yang memikul dan menyalurkan seluruh beban jembatan kedalam struktur, sehingga harus dibuat kuat-kaku dan tahan fatik. Pendetailan dudukan angkur perlu perhatian khusus;
15. Jembatan *cable-stayed* merupakan sistem redundan tinggi. Lintasan gaya terutama ditentukan oleh kekakuan relatif elemen pemikul beban, yaitu *cable-stayed*, menara dan gelagar lantai. Dimensi akhir kabel harus ditentukan dengan perhitungan uji-coba dimensi gelagar lantai terhadap menara dan terhadap gaya awal dan gaya akhir kabel sehingga keseimbangan struktur terjamin pada tiap tahap pelaksanaan sampai jembatan berfungsi. Contoh tipikal bentang 300m (*Gambar 13*) menggunakan prinsip gelagar kaku (tinggi boks baja 3m = 1/50 L), dengan pilar jangkar untuk menjaga stabilitas dan mengurangi lendutan bentang utama. Tipikal tersebut dengan bentang lebih pendek sebesar 250m (62,5m+125m+62,5m) masih cukup stabil tanpa pilar jangkar. Pilar jangkar sering diperlukan untuk pencapaian bentang panjang;

Dimensi awal kabel diperkirakan sebagai berikut :

Pada beban tetap, gelagar lantai dianggap menerus pada perletakan kaku dan

momen akan berkurang bila jarak *stay* diperdekat (*Gambar 13*). Dalam pelaksanaan pemasangan lantai secara kantilever dianggap bahwa setiap *cable-stayed* memikul berat satu tahapan yang sesuai dengan berat lantai antara dua *stay* dalam arah memanjang. Pemberian gaya awal *stay* sedemikian rupa agar elemen baru dapat dipasang tepat, dan sumbu memanjang jembatan relatif rata atau sesuai lawan lendutan pabrikan pada saat lantai selesai terpasang. Gaya *stay* di bentang utama diperkirakan sebesar reaksi perletakan bentang sederhana (*Gambar 14*) dengan *Rumus 3* sampai dengan *Rumus 5*.

$$N_{gi} = R_{gi} / \sin \alpha_i \quad (\text{Rumus 3})$$

dengan pengertian :

$N_{gi}$  : gaya kabel utama

$R_{gi}$  : reaksi perletakan bentang sederhana akibat berat sendiri dan beban tetap

$\alpha_i$  : sudut *stay* terhadap sumbu memanjang jembatan

$$\sigma_g = \sigma_{ijin} [g / (g+q)] \quad (\text{Rumus 4})$$

dengan pengertian :

$\sigma_g$  = tegangan ijin kabel akibat berat sendiri dan beban tetap

$g$  = berat sendiri dan beban tetap

$q$  = beban hidup merata

$\sigma_{ijin}$  = tegangan ijin kabel akibat beban

$$\text{total} = 0,45 \sigma_{\text{putus kabel}}$$

$$A_i = \alpha N_{gi} / \sigma_g \quad (\text{Rumus 5})$$

dengan pengertian :

$A_i$  = luas kabel utama

$\alpha$  = fraksi beban yang dipikul oleh *cable-stayed* ( $0 < \alpha < 1$ ), 1 bila kabel sangat kaku, 0 bila gelagar sangat kaku

$N_{gi}$  = gaya kabel utama

Kabel jangkar dianggap memikul secara tidak langsung bagian dari bentang utama/tengah yang tidak terimbangi oleh bentang samping (bagian  $c_1$ ). Tegangan dalam kabel jangkar diperkirakan dengan memproyeksikan gaya  $G_1$  dalam arah *stay* tersebut (skema tipikal yang tidak sama dengan contoh aktual *Gambar 14*). Kabel jangkar diperkirakan dengan *Rumus 6*.

$$A_j = G_1 / (\sin \beta_j \cdot \sigma_g) \quad (\text{Rumus 6})$$

dengan pengertian :

$A_j$  = luas kabel jangkar

$\beta_j$  = sudut kabel jangkar

$G_1$  = lawan beban =  $(G) \cdot (d_2/d_1)$

$G$  = beban tidak terimbangi =  $g \cdot c_1$

Pada beban lalu lintas, lantai menyalurkan beban antara *stay* yang bekerja sebagai perletakan elastis. Simpangan vertikal yang terjadi menghasilkan lenturan dalam kerangka, yang ditambahkan pada simpangan beban tetap. Menara yang ditahan secara elastis oleh *stay* mengalami lentur dan deformasi horizontal, yang menambah simpangan tersebut. Keseimbangan

pulih karena beban vertikal yang dipikul oleh *stay* yang miring menyebabkan gaya normal tekan dalam lantai yang membesar ke arah menara. Bila lendutan jembatan akibat perpanjangan *stay* menjadi besar, kombinasi dengan gaya normal dapat menyebabkan momen dan deformasi tidak linier tingkat kedua '*second order*'. Untuk menjaga perhitungan linier, lendutan tidak boleh melampaui batasan sebagai berikut : lendutan lantai akibat beban lalu lintas  $\leq (1/400) L$  bentang utama dan lendutan menara akibat beban lalu lintas  $\leq (1/400) h$  tinggi menara. Batasan tersebut mengijinkan lendutan lebih besar untuk gelagar lantai dibanding gelagar kaku karena perletakan pegas *cable-stayed* membuat gelagar menjadi fleksibel.

Penyetelan gaya awal *stay* harus memenuhi salah satu pilihan berikut :

- Pada beban tetap, gelagar lantai hampir horisontal, dan hanya terjadi lendutan akibat beban hidup yang diatasi dengan lawan lendutan saat fabrikasi gelagar lantai
- atau
- Pada beban tetap, lendutan diusahakan sekecil mungkin, yang bersama lendutan beban hidup diatasi dengan lawan lendutan saat fabrikasi gelagar lantai

selain ini :

gaya awal *stay* menurut cara penyetelan a) atau b) untuk setiap kondisi pelaksanaan dan pembebanan harus memenuhi keadaan batas lain sebagai berikut :

- i. gaya akhir *stay*  $\leq 0,45$  tegangan putus strand untuk keadaan batas daya layan
- ii. gaya akhir *stay*  $\leq 0,60$  tegangan putus strand untuk keadaan batas ultimit, yang umumnya aman bila keadaan daya layan terpenuhi (butir i)
- iii. gaya *stay* selalu tarik, tidak melepas/nol/tertekan, yang sering terjadi pada kabel tengah bentang utama dan kabel berdekatan menara karena perbedaan antara gaya awal dan akhir tidak jauh (*Gambar 11*), diatasi dengan penyetelan gaya awal kabel bersangkutan dan kabel disampingnya.
- iv. keseimbangan struktur dengan menjaga lendutan gelagar dan menara dalam batas ijin

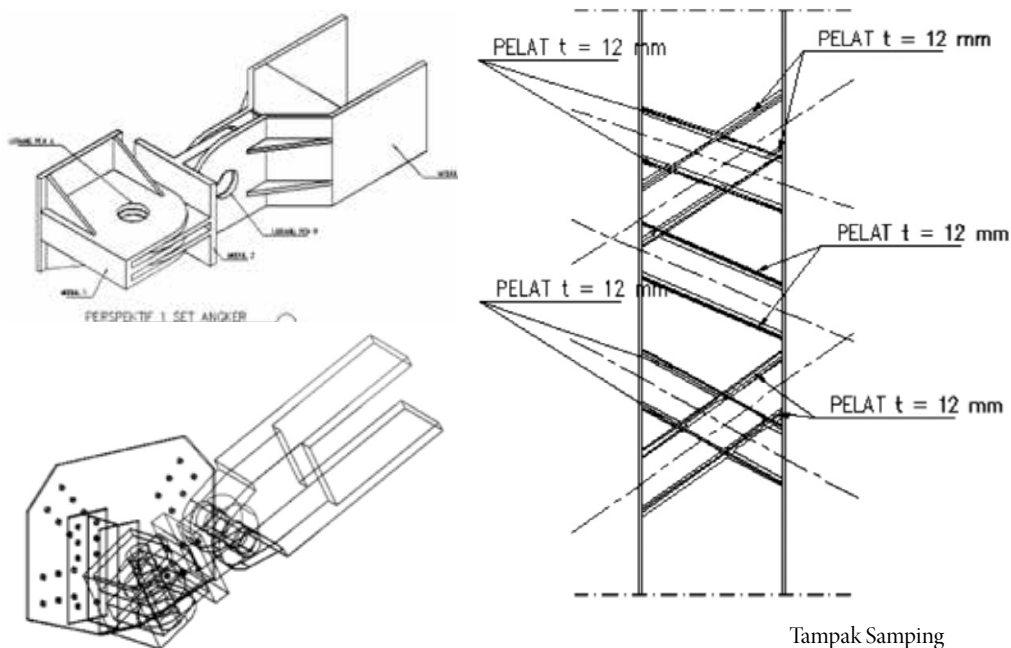
Disain jembatan kabel *stay* merupakan proses uji-coba yang sangat dipermudah dengan penggunaan perangkat lunak komputer. Bagaimanapun canggihnya perhitungan mesin, disain keseluruhan struktur dan berbagai komponennya tetap memerlukan pengalaman, intuisi dan kreativitas dari ahli teknik. Ahli teknik berperan setiap waktu dalam proses perencanaaan sampai pelaksanaan.

16. Keperluan *cable-stayed* dipengaruhi oleh berat, tipe lantai dan cara pelaksanaan. Lantai baja atau komposit baja-beton menggunakan sedikit kabel dengan jarak 15-25 m. Lantai beton perlu menggunakan banyak kabel dengan jarak 5-10 m.

17. Disain banyak kabel mempunyai keuntungan sebagai berikut :

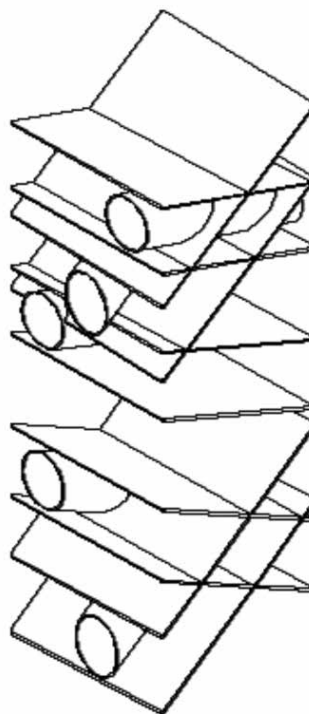
- a. Banyak kabel membuat banyak perletakan elastis/pegas yang mereduksi lentur memanjang dalam lantai selama pelaksanaan dan setelah jembatan berfungsi, sehingga pelaksanaan secara segmental kanti-lever bebas menjadi ekonomis tanpa ada keperluan penyangga tambahan.
- b. Penampang kabel lebih kecil dibanding struktur dengan kabel terkonsentrasi sehingga mempermudah pemasangan dan penjangkaran kabel.
- c. Penggantian kabel yang relatif mudah, menjadi alternatif terhadap cara perlindungan kabel terhadap korosi

18. Disain angkur yang menempel pada bagian rangka dapat dibuat sebagaimana yang terlihat pada *Gambar 15* di halaman berikut. Pendesain ulang masih dapat dilakukan sebelum dilakukan fabrikasi final untuk mengakomodasi optimasi teknik pemasangan kabel.

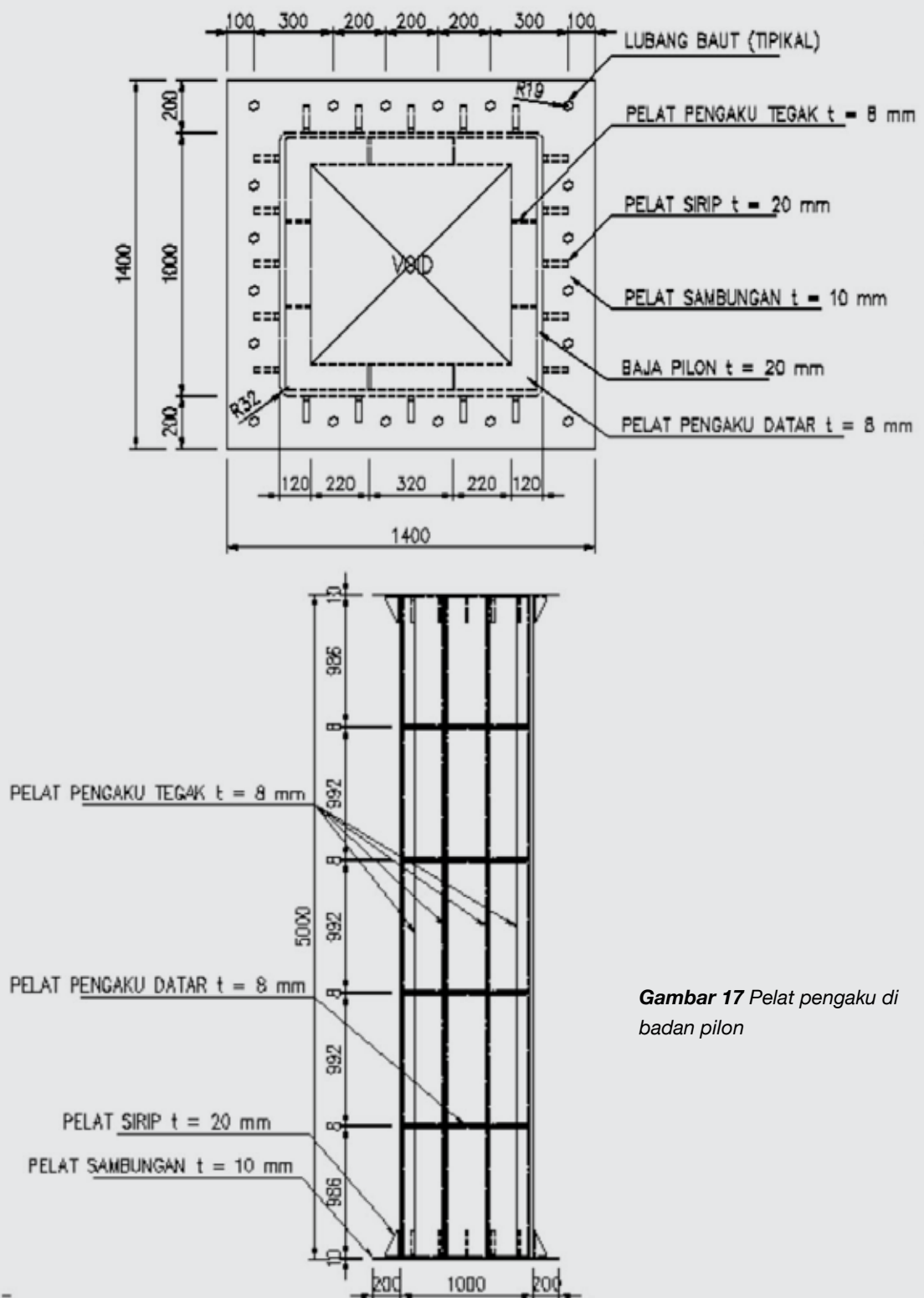


**Gambar 15** Angkur blok sebelum dan sesudah didesain ulang

19. Pelat pengaku datar dan vertikal dipasang pada struktur pilon dimaksudkan agar tidak terjadi tekuk lokal pada pelat pilon dan sekaligus memperbesar nilai inersia struktur pilon. Hal ini dikarenakan gaya pada pilon cukup besar yang meliputi gaya aksial, lentur, geser dan torsi. Selain pada pelat pilon juga dipasang pelat pengaku pada pipa kabel strand sehingga pelat pilon tidak punching shear (jebol) dan tekuk lokal akibat gaya terkonsentrasi pada end bearing cable stay, seperti yang terlihat pada **Gambar 16** dan **Gambar 17**.



**Gambar 16** Pelat pengaku di pipa kabel



**Gambar 17** Pelat pengaku di badan pylon

### Pemodelan analisis struktur

Model analisis struktur secara umum dapat menggunakan model dua dimensi ataupun model 3 dimensi dimana:

1. Pada analisis model 2 dimensi diperoleh besarnya gaya kabel penggantung akibat beban vertikal dan pelaksanaan secara kantilever pada lantai kendaraan. Selain itu diperoleh juga gaya aksial, gaya geser dan momen lentur lantai kendaraan dan menara.
2. Pada analisis model 2 dimensi perhitungan gaya-gaya lateral seperti angin diperhitungkan melalui sub perhitungan *freebody* tersendiri.
3. Model analisis 3 dimensi memperhitungkan torsi yang terjadi pada lantai jembatan dan menara akibat gaya-gaya lateral.
4. Program bantu perangkat lunak perhitungan struktur 2 dan 3 dimensi sangat diperlukan

Analisis jembatan *cable-stayed* terdiri dari beberapa tahapan yang dilakukan dalam perhitungan 2 D yang memadai, dan dijelaskan sebagai berikut :

1. Penentuan dimensi awal untuk gelagar lantai, menara dan kabelstay dengan perhitungan sederhana tanpa pengaruh susut-rangak jangka panjang, dengan gaya awal stay (10-35% tegangan tarik putus)
2. Penentuan kekuatan dan deformasi dengan perhitungan dalam keadaan

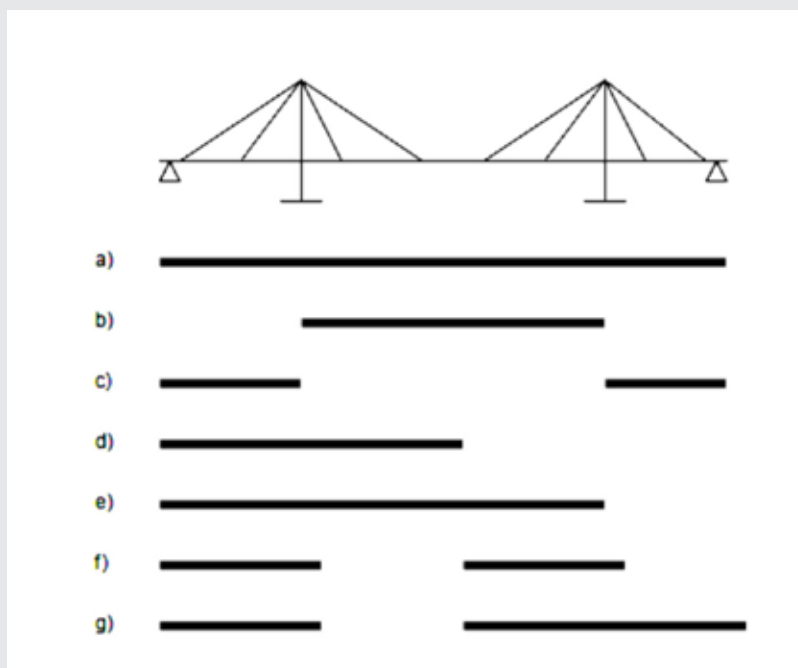
batas daya layan, pengaruh jangka panjang akibat rangkak dan susut beton, serta penurunan fondasi

3. Beban sendiri/tetap bekerja pada seluruh bentang jembatan. Kombinasi beban hidup mengikuti 3 konfigurasi utama berikut :
  - a. beban hidup penuh pada bentang utama dan pinggir (kabel tengah maksimum),
  - b. beban hidup pada bentang utama (kabel jangkar maksimum),
  - c. beban hidup pada bentang pinggir (kabel tengah melepas) (*Gambar 18*).
  - d. Jembatan bentang panjang perlu pengecekan stabilitas aerodinamis

### Spesifikasi teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Analisis Statis

Spesifikasi teknis, metoda, ataupun tata cara baku yang dapat digunakan untuk mengukur indikator efektifitas atau pengendalian mutu adalah :

1. RSNI 2000 Standar Pembebanan untuk Jembatan
2. Sistem Manajemen Jembatan, 1992, Panduan Penyelidikan Jembatan
3. CAN/CSA-S6-06 Canadian Highway Bridge Design Code



**Gambar 18** Konfigurasi beban hidup

## Referensi Analisis Statis

Referensi yang dipakai adalah :

Gimsing, Niels J. 1983. *Cable Supported Bridges : Concept and Design*. New York: Wiley Interscience Publication.

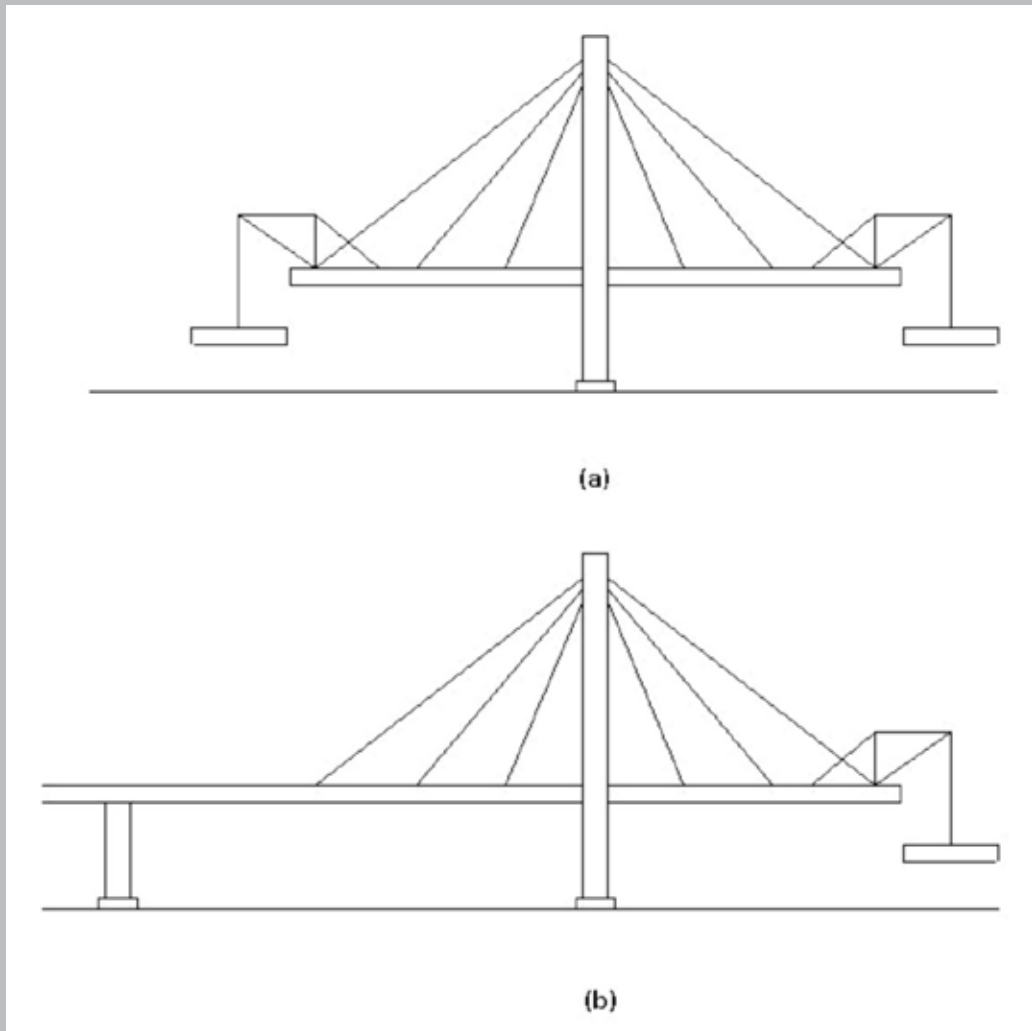
O' Connor, Collin. 1971. *Design of Bridge Superstructures*. New York : Wiley-Interscience.

Tang, Man-Chung. 2000. *Cable-Stayed Bridges*. Di dalam *Bridge Engineering Handbook*, Diedit oleh Wai-Fah Chen dan Lian Duan. Boca Raton: CRC Press.

The European Steel Design Educationa; Programme (ESDEP). “*ESDEP WG 15B : Structural Systems: Bridges*.” <http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/esdep/master/wg15b/toc.htm> (diakses tahun 2011).

Walther, René dan lain-lain. 1999. *Cable Stayed Bridges, 2nd edition*. London: Thomas Telford. ■





**Gambar 19** Metode pemasangan jembatan cable-stayed (ESDEP)

*Bab 4*

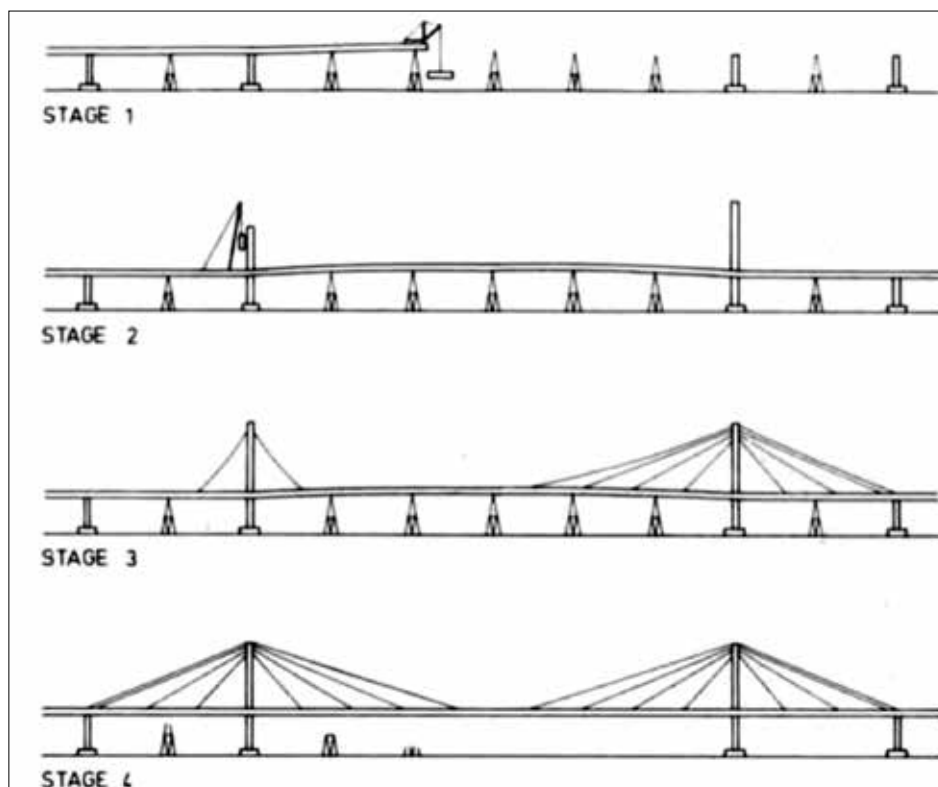
# Pengelolaan/ Peningkatan Kinerja pada Tahap Metode Konstruksi

## Penjelasan Umum dari Metode Konstruksi (ESDEP)

Sukses dari jembatan *cable-stayed* adalah pengembangan yang luas yang berhubungan dengan prosedur pemasangan yang efisien yang membuat ciri dari tipe jembatan ini. Dengan demikian, suatu jembatan *cable-stayed* dapat dipasang dengan membuat kantilever bebas dari pylon, yang mana secara simetrik dalam dua arah (*Gambar 19a*) atau hanya ke dalam bentang utama (*Gambar 19b*). Pada kasus *Gambar 19b*, bentang samping dipasang sebagai jembatan gelagar normal.

Dengan kantilever ganda, *Gambar 19a*, harus diingat bahwa kestabilan seluruhnya pada tahap pelaksanaan bergantung pada kekakuan lentur dan penjepitan pylon untuk sementara. Setelah pemasangan dan penarikan kabel selesai, jepit sementara di pylon dapat dibongkar. Dalam beberapa kasus kekakuan ini menentukan perancangan pylon.

Dengan membuat kantilever hanya ke dalam bentang utama (*Gambar 19b*) *cable-stayed* secara umum dipasang pada keduanya sehingga susunan kipas atau harpa dari bentang samping ditentukan secara serempak dengan yang berasal dari bentang utama



**Gambar 20** Pelaksanaan pemasangan segmen jembatan dengan penyokong sementara (Gimsing 1983)

Tipikalnya satu siklus pemasangan terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pembuatan kantilever gelagar pengaku dari satu titik anker kabel ke titik selanjutnya – dalam kebanyakan kasus dicapai dengan mengangkat unit-unit gelagar pengaku dengan menggunakan *crane* derek yang diposisikan pada sistem lantai jembatan.
2. Pemasangan *cable-stayed*, sering kali yang dilaksanakan dengan membuka gulungan suatu strand yang difabrikasi lebih dahulu dari suatu gulungan yang diposisikan pada sistem lantai jembatan.
3. Tegangan yang dikendalikan pada *cable-stayed* dengan menggunakan *jack* pada anker yang aktif.
4. Menggerakkan *crane* ke bagian ujung gelagar pengaku .

Dalam banyak kasus *cable-stayed* dikenakan suatu gaya tarik maksimum setelah membuat kantilever gelagar pengaku ke titik anker kabel yang berikutnya. Sesudah itu, gaya tarik dikurangi ketika *cable-stayed* yang berikut sedang ditarik.

Menjadi hal yang paling penting untuk menyadari bahwa distribusi momen akibat beban mati di dalam gelagar pengaku itu



**Gambar 21** Contoh ilustrasi pemasangan satu segmen lantai dengan sokongan sementara (Gimsing 1983)

semuanya ditentukan dengan penarikan *cabl-stayed* selama pemasangan. Suatu distribusi optimum akibat momen akibat beban mati dapat, oleh karena itu, dicapai dengan penentuan tegangan kabel yang awal.

Analisis-analisis yang diperlukan dari tahapan pemasangan mungkin dilaksanakan “mundur”, yaitu. pada pemilihan awal suatu distribusi momen akibat beban mati dan kemudian “bergerak mundur” oleh “penghilangan” struktur di dalam tahapan yang sama sebagaimana yang diasumsikan untuk pemasangan. Beberapa perangkat lunak dapat menganalisis mulai tahapan pelaksanaan sampai jembatan selesai dan berfungsi, seperti membangun jembatan dalam komputer.

Untuk menentukan momen akibat beban mati yang diterapkan pada struktur



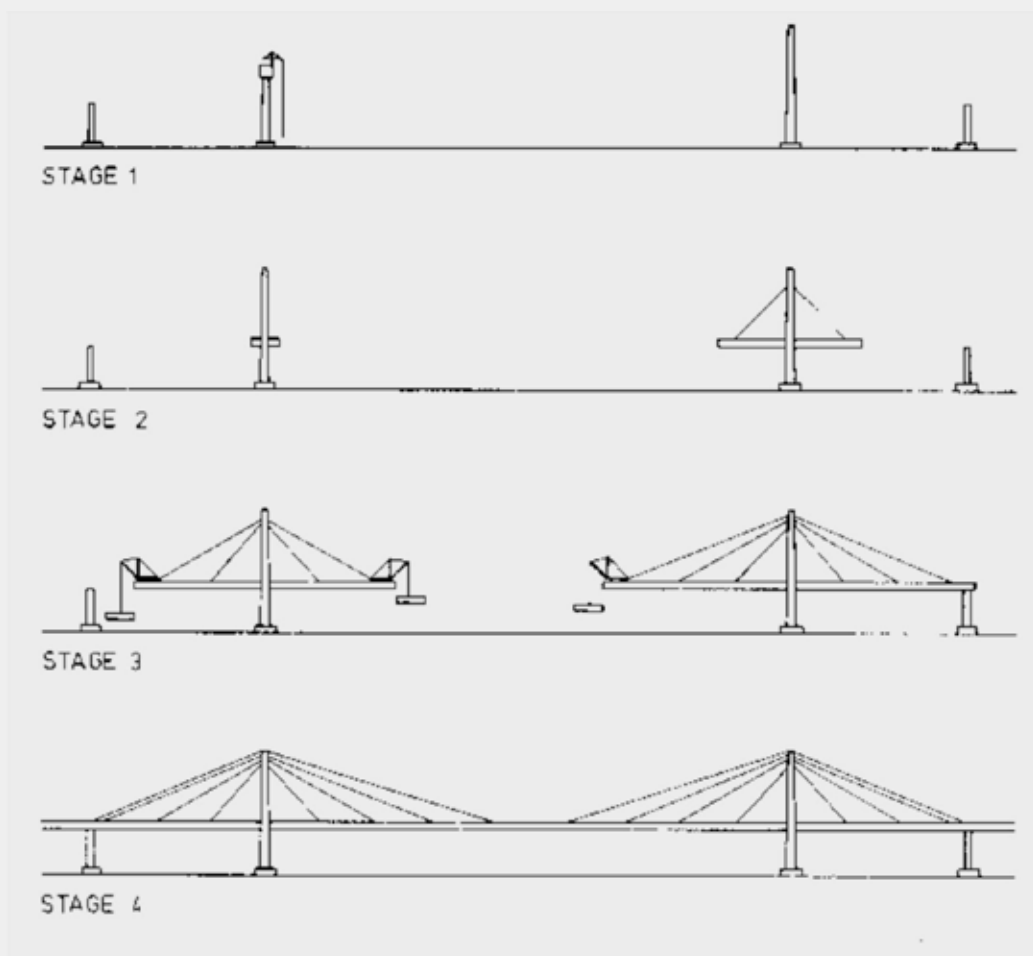
**Gambar 22** Contoh ilustrasi pemasangan satu blok segmen lantai dengan sokongan sementara (Gimsing 1983)

akhir pada beban mati elemen struktural bukanlah salah, tetapi adalah sangat tidak ekonomis dalam banyak kasus.

### Aspek penting dari Metode Konstruksi (Gimsing 1983)

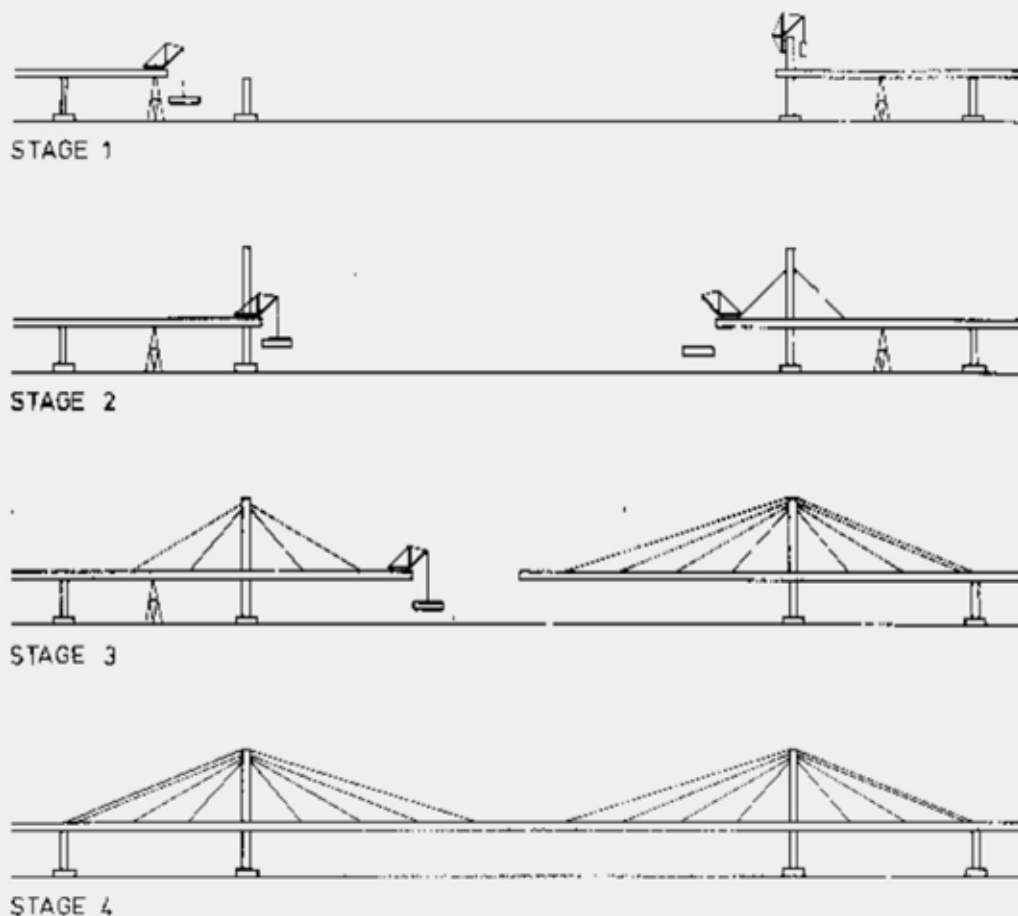
Untuk metode konstruksi dengan menggunakan perancah sementara, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 20, kinerja dari aspek penting metode konstruksi adalah :

1. Penyediaan peralatan yang memadai untuk menyokong metode konstruksi yang diperlukan baik dengan metode pemasangan satu segmen lantai atau pemasangan dengan pengangkatan berat untuk satu blok besar segmen lantai, sebagaimana yang terlihat pada *Gambar 21* dan *Gambar 22*;



**Gambar 23** Pemasangan kabel dua sisi dengan kantilever bebas berimbang dua sisi (Gimsing 1983)

2. Perhitungan analisis detail mengenai bentuk perubahan lawan lendut jembatan *cable-stayed* akibat metode konstruksi yang dipilih mulai dari ketika disokong oleh perancah sementara sampai dengan pelepasan perancah sementara dan penegangan akhir;
3. Pemasangan pilon;
4. Pemasangan pertama dengan penyokong utama sementara pada pier yang permanen ;
5. Pemasangan *cable-stayed*. Dalam kasus ini kabel hanya perlu ditegangkan secara moderat, sedangkan penegangan final akan dilakukan pada tahap berikutnya;



**Gambar 24** Pemasangan kabel dua sisi dengan kantilever bebas berimbang satu sisi (Gimsing 1983)

6. Sesudah pemasangan semua *cable-stayed*, penyokong utama sementara pada pier yang permanen dapat dipindahkan dan beban akan tersalur ke sistem kabel;
7. Pengaturan lalu-lintas kendaraan atau kapal laut yang berada di bagian bawah jembatan karena adanya perancah sementara.

Untuk metode konstruksi dengan kantilever bebas, sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 23** dan **Gambar 24**, kinerja dari aspek penting metode konstruksi adalah :

1. Penyediaan peralatan yang memadai untuk menyokong metode konstruksi yang diperlukan baik dengan metode

**Gambar 26** (kanan)  
*Pemasangan pilon (HSBE)*



**Gambar 25** (atas)  
*Pemasangan satu blok besar  
segmen rantai pada metode  
kantilever bebas berimbang  
(HSBE)*



**Gambar 26** Pemasangan pilon (HSBE)



**Gambar 27** Pemasangan segmen lantai dengan kantilever bebas berimbang (HSBE)

pemasangan satu segmen lantai atau pemasangan dengan pengangkatan berat untuk satu blok besar segmen lantai, sebagaimana yang terlihat pada *Gambar 25*;

2. Perhitungan analisis detail mengenai bentuk perubahan lawan lendut jembatan *cable-stayed* akibat metode konstruksi yang dipilih mulai dari ketika disokong oleh perancah sementara sampai dengan pelepasan perancah sementara dan penegangan akhir;
3. Pemasangan pilon, sebagaimana yang terlihat pada *Gambar 26*;
4. Pemasangan pertama dengan penyokong utama sementara pada pier yang permanen;
5. Pemasangan dengan kantilever bebas berimbang dimulai oleh dengan meng-

gunakan *derrick crane* yang diope-rasikan di bagian lantai jembatan, sebagaimana yang terlihat pada *Gambar 27*;

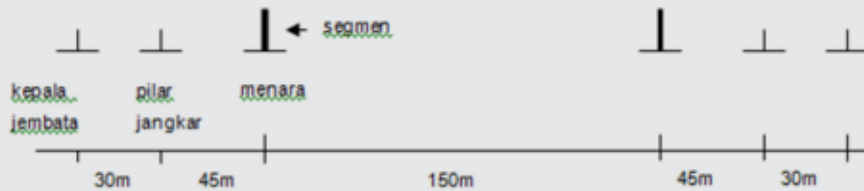
6. Pemasangan dan penarikan kabel awal untuk menyalurkan momen lentur dari gelagar, Umumnya proses penegangan kabel dikerjakan setengah ketika proses kantilever berjalan dan setengahnya lagi ketika *crane* dipindahkan;
7. Kekakuan dari elemen lantai perlu diperhitungkan ketika proses kantilever berlangsung;
8. Jarak antar *cable-stayed* untuk meng-efisienkan penggunaan sokongan sementara;
9. Derajat kekakuan penjepitan antara pilon dengan gelagar.



## Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Metode Konstruksi

Kinerja dan ukuran dari metode konstruksi diilustrasikan dalam contoh tipikal tahapan konstruksi jembatan *cable-stayed* dari bahan baja di bawah ini:

1. Buat gelagar dan menara baja secara pabrikasi dalam segmen yang mudah ditransportasi;
2. Persiapkan fondasi dan bangunan bawah serta pasang baut jangkar untuk perletakan (*Gambar 28*);
3. Pasang satu segmen kolom dasar menara (panjang 5 m) pada dasar menara berikut dengan balok tumpuan untuk perletakan gelagar lantai (*Gambar 28*);
4. Pasang gelagar tepi dengan cara peluncuran pada paking sementara di pangkal, pilar antara dan pilar utama. (*Gambar 29*);
5. Pasang perletakan rol dan sendi di pangkal/kepala jembatan dan jepit sementara untuk menahan gelagar di menara selama penarikan kabel berlangsung, serta pasang baut penahan gaya angkat gelagar di pilar jangkar (*Gambar 29*);
6. Pasang kolom menara dan tarik kabel sementara dengan wartel mur dari puncak menara ke pilar jangkar (*Gambar 30*);
7. Pasang dengan bertahap gelagar bentang utama secara kantilever segmental dari kedua sisi menara (*Gambar 31*) dan pasang kabel secara kencang tangan mulai kabel no1. sampai no. 5 pada angkur mati di gelagar dan angkur hidup di menara. Pemasangan bentang utama secara kantilever dari sisi kiri dan kanan : segmen pertama 15 m dengan pasangan kabel no.1, segmen ke-dua 12,5 m dengan pasangan kabel no.2, segmen ke-tiga 12,5 m dengan pasangan kabel no.3, segmen ke-empat 12,5 m dengan pasangan kabel no. 4, segmen ke-lima 15 m dengan pasangan kabel no.5, segmen akhir 7,5 m (segmen penutup menjadi  $2 \times 7,5 \text{ m} = 15 \text{ m}$ );
8. Setiap pemasangan segmen kantilever ditunjang oleh penarikan pasangan kabel secara bersamaan dari sisi kiri dan kanan menara (*Gambar 32* di halaman 56). Kabel sementara dapat dilepaskan setelah pasangan kabel pertama ditarik;
9. Penarikan kabel secara bertahap disertai dengan monitoring pengukuran lendutan teoritis sesuai *Tabel 1* di halaman 59. Toleransi 25% diperbolehkan untuk perbedaan antara lendutan teoritis dan aktual/terukur selama pelaksanaan;



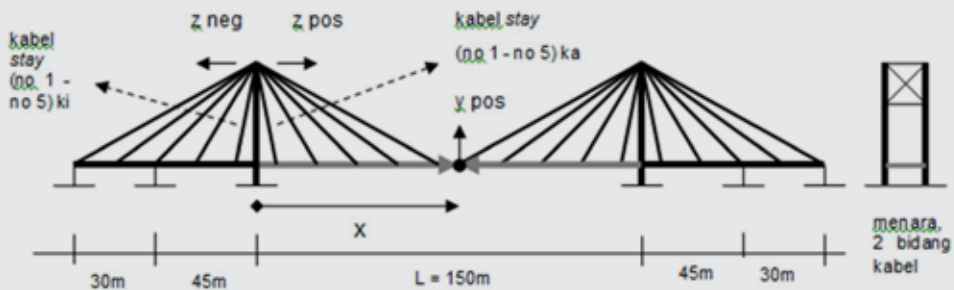
**Gambar 28** Skema bangunan bawah



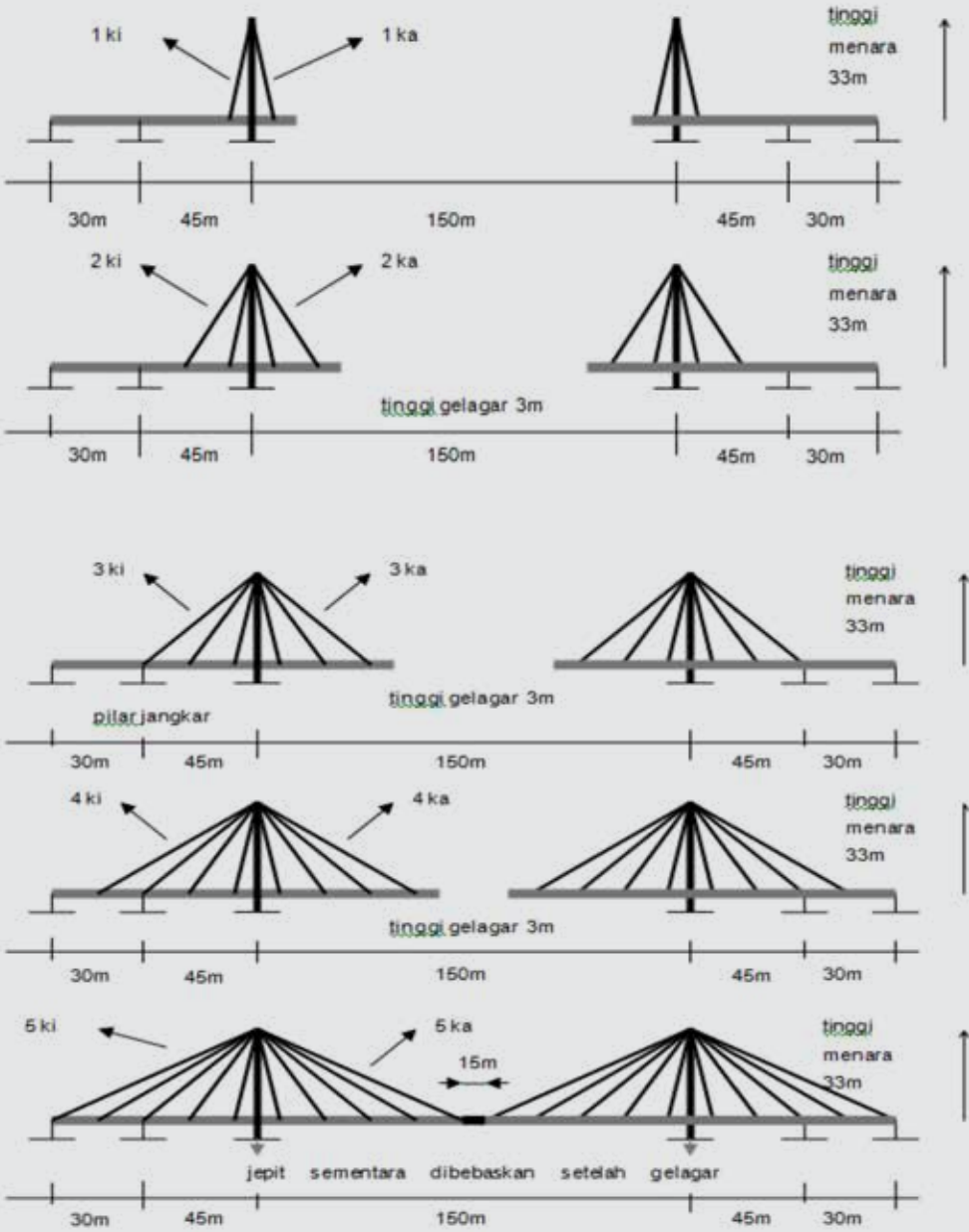
**Gambar 29** Skema pemasangan gelagar tepi



**Gambar 30** Skema pemasangan kolom menara



**Gambar 31** Skema pemasangan bentang utama secara segmental, penarikan awal cable-stayed mulai dari menara sampai gelagar tersambung



**Gambar 32** Tipikal tahapan pemasangan bentang utama dan penarikan cable-stayed

10. Jepit sementara di menara menahan gelagar selama penarikan kabel dan dibebaskan setelah gelagar tersambung di tengah bentang utama. Berbagai program komputer juga memerlukan masukan jepit sementara tersebut untuk melakukan analisis tahapan kantilever seimbang sesuai kondisi pelaksanaan aktual.

**Tabel 1** Lendutan teoritis akibat berat sendiri gelagar pada penarikan awal kabel stay secara bertahap sesuai skema **Gambar 31**

Tahapan	Lendutan y bentang L di lokasi x terhadap menara		Peralihan z menara	Gaya tarik awal kabel per bidang kabel (kN) bentang pemberat ki & bentang utama ka		Pasangan no kabel ki dan ka (=4 stay)
	y (mm)	x (m)		kiri	kanan	
I	3,8	15	-48	260	200	1
II	-20	27,5	-60	320	250	2
III	-47	40	-72	500	280	3
IV	-98	52,5	-66	560	440	4
V	-184	67,5	-74	770	325	5
VI=segmen Akhir	-256	75 = tengah bentang L	-56			

## Spesifikasi teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Metode Konstruksi

Spesifikasi teknis, metoda, ataupun tata cara baku yang dapat digunakan untuk mengukur indikator efektifitas atau pengendalian mutu adalah :

1. RSNI 2000 Standar Pembebanan untuk Jembatan
2. Sistem Manajemen Jembatan, 1992, Panduan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan
3. AASHTO LRFD Standard Specifications for Highway Bridges 17th Edition. 2005.

## Referensi Metode Konstruksi

Referensi yang dipakai adalah :

Gimsing, Niels J. 1983. *Cable Supported Bridges : Concept and Design*. New York : Wiley Interscience Publication.

Honshu Shikoku Bridge Expressway Company Limited. "Construction Technology." <http://www.jb-honshi.co.jp/english/technology/index.html> (diakses tahun 2011).

Tang, Man-Chung. 2000. *Cable-Stayed Bridges. Di dalam Bridge Engineering Handbook*, Diedit oleh Wai-Fah Chen dan Lian Duan. Boca Raton: CRC Press.

The European Steel Design Educational Programme (ESDEP). "ESDEP WG 15B : Structural Systems: Bridges." <http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/esdep/master/wg15b/toc.htm> (diakses tahun 2011). ■



---

*Bab 5*

# Pengelolaan/ Peningkatan Kinerja pada Tahap Analisis Dinamis

## Penjelasan Umum dari Analisis Dinamis

**G**elagar pengaku dari suatu jembatan *cable-stayed* biasanya didukung pada menara dan pada pilar akhir. Tergantung pada tipe dari perletakan atau tumpuan yang digunakan, perilaku dinamik struktur tersebut dapat sungguh yang berbeda. Jika tumpuan yang sangat lunak digunakan, gelagar pengaku bertindak seperti suatu pendulum. Frekuensi dasarnya akan sangat rendah. Memperkaku tumpuan dan perletakan dapat meningkatkan frekuensi secara signifikan.

Beban seismik dan aerodinamik adalah kedua beban dinamik utama untuk dipertimbangkan di dalam perancangan jembatan *cable-stayed*. Bagaimanapun, kedua beban sering kali mempunyai kebutuhan yang berlawanan pada struktur. Untuk kestabilan aerodinamika suatu struktur yang lebih kaku lebih disukai. Tetapi pada perancangan seismik, kecuali jika jembatan diletakan pada tanah yang sangat lunak, suatu jembatan yang lebih fleksibel akan memiliki lebih sedikit respon. Beberapa penyelesaian antara dua kebutuhan perancangan ini diperlukan.

Karena cara tersebut dua beban dinamik ini mengeksitasi struktur dalam bentuk yang berbeda, peralatan mekanis khusus dapat digunakan untuk membantu struktur tersebut untuk melakukan penyelesaian pada kedua kondisi beban. Respon aerodinamika terbangkitkan secara lambat. Untuk beban jenis ini gaya dalam hubungan diperlukan untuk memperkecil vibrasi yang terbangkitkan relatif kecil. Gempa bumi terjadi tiba-tiba. Terutama respon pada jembatan akan muncul tiba-tiba jika gerakan seismik juga berisi masa bebas yang besar. Sebagai konsekuensi, suatu peranti yang menghubungkan gelagar dan menara, yang akan pecah pada suatu gaya yang ditentukan tertentu akan membantu menanggapi beban seismik dan aerodinamik. Akibat aksi aerodinamika, peranti tersebut akan menekan permulaan getaran seperti hubungan yang membuat struktur lebih kaku. Di bawah beban seismik, hubungan tersebut memutuskan beban yang ditentukan dan struktur menjadi lebih fleksibel. Hal ini mengurangi frekuensi dasar jembatan tersebut.

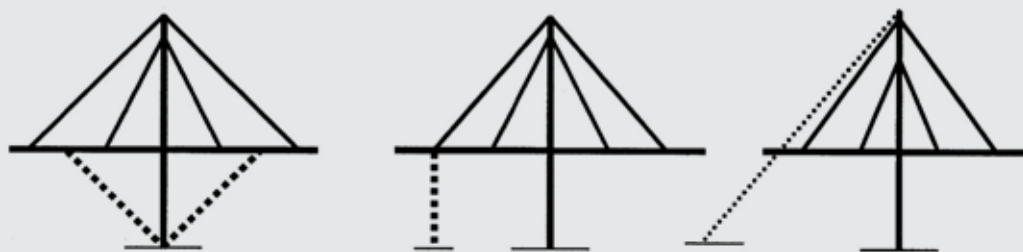
### Aspek Penting Dari Analisis Dinamis (Tang 2000)

Kestabilan aerodinamik jembatan *cable-stayed* merupakan suatu perhatian yang utama untuk banyak insinyur jembatan di awal pembangunan jembatan tersebut.

Hal ini mungkin disebabkan jembatan *cable-stayed* yang sangat langsing. Pelajaran-pelajaran yang dipelajari dari permasalahan aerodinamika pada jembatan gantung menghantarkan insinyur-insinyur untuk mencemaskan jembatan *cable-stayed*.

Pada kenyataannya, jembatan *cable-stayed*, terutama jembatan *cable-stayed* beton, telah ditemukan secara mengejutkan stabil secara aerodinamis. Meski perkiraan bahwa jembatan *cable-stayed* tidak dapat serius bergetar di bawah angin karena *interferens* dari modus-modus yang tidak berhubungan yang ada dalam suatu struktur tidaklah benar, sangat sedikit beberapa jembatan *cable-stayed* ditemukan rentan terhadap aksi angin setelah konstruksi. Perilaku aerodinamika superior dari jembatan *cable-stayed* adalah satu alasan untuk ini. Tetapi pelajaran yang dipelajari dari jembatan gantung sudah mendidik banyak insinyur sehingga mereka menyadari permasalahan aerodinamika dan dapat mengidentifikasi penampang yang lebih baik menghadapi aksi angin. Lebar sistem lantai yang lebih luas untuk jembatan *cable-stayed* paling modern juga membuat struktur lebih stabil.

Beberapa jembatan-jembatan lakukan memerlukan perlakuan khusus melawan terhadap aksi aerodinamika. Annacis Island Bridge menambahkan *fairing* angin pada bentang utamanya; Quincy Bridge



**Gambar 33** Penstabilan sementara oleh kabel tie-down (Tang 2000)

menambahkan pelat vertikal pada gelagar pengaku sebagai tambahan terhadap *fairing* horisontal. Longs Creek Bridge mempunyai bagian ujung angin yang diruncingkan pada masing-masing sisi dari gelagar pengaku.

Selama perancangan Knie Bridge pada awal tahun 1960-an, suatu studi terowongan angin dilaksanakan untuk mendapatkan suatu solusi yang baik untuk meningkatkan kestabilan aerodinamika jembatan pada kasus respon-respon yang ditemukan untuk tidak dapat diterima. Di antara berbagai alternatif, bagian ujung yang diruncingkan adalah opsi yang paling efisien.

Oleh karena itu gagasan sama ini digunakan di dalam banyak jembatan *cable-stayed* dan jembatan gantung.

Walaupun suatu jembatan *cable-stayed* kebanyakan stabil dalam kondisi akhir, hal itu sering berbahaya selama tahapan konstruksi. Selama konstruksi Knie Bridge, ikatan angin bagian bawah ditambahkan untuk menyediakan kekakuan puntiran yang diperlukan di dalam gelagar pengaku untuk menghapuskan kemungkinan *flutter*.

Tingkat yang paling tinggi untuk jembatan *cable-stayed* di dalam daerah angin yang kencang memerlukan *tie-downs* angin untuk menstabilkan struktur melawan *buffeting*.

Kembali ke tahun 1960-an, terpikirkan bahwa suatu struktur tidak akan bergetar di suatu aliran turbulen. Bagaimanapun, struktur ditemukan mempunyai suatu massa intensitas dan frekuensi yang tertentu di suatu angin turbulen, *buffeting* mungkin muncul. Dalam banyak kesempatan, respon *buffeting* dari suatu jembatan *cable-stayed* selama konstruksi dapat sungguh parah kecuali jika tindakan yang spesifik diambil untuk menstabilkan struktur.

Cara paling efisien untuk menstabilkan struktur melawan *buffeting* adalah dengan meningkatkan frekuensi dasarnya dengan menggunakan *tie-downs*, **Gambar 33**. Kebanyakan *tie-downs* adalah kabel sederhana tujuh *strand* kawat yang diangker ke fundasi tiang, beban berat, angker tanah seperti pada Annacis dan Baytown – LaPorte Bridges. Menstabilkan



**Tabel 2** Kecepatan Angin Flutter Kritis — Sidney Lanier Bridge (Tang 2000)

Rasio redaman(% dari redaman kritis)	0,5 %	1,0 %	2,0 %	3,0 %	4,0 %
Kecepatan angin flutter kritis, km/h	160	180	230	340	450

menara dengan menggunakan kabel *back-stay* dapat juga mempunyai efek yang sama seperti pada ALRT Fraser River dan East Huntington Bridges.

Penggunaan *tie-downs* dapat juga membantu mengurangi momen lentur yang tak seimbang di dalam menara selama konstruksi yang tidak dapat dipisahkan di suatu metoda kantilever.

Jumlah peredaman dapat mempunyai suatu pengaruh yang menentukan pada perilaku aerodinamika dari jembatan *cable-stayed*, terutama di kecepatan angin *flutter* kritis. Sebagai konsekuensi, asumsi dari rasio redaman yang sesuai adalah sangat penting di dalam perancangan. **Tabel 2** menunjukkan kecepatan angin *flutter* kritis untuk Sidney Lanier Bridge, Georgia, berdasarkan pada hasil pengujian model *sectional*.

Secara praktis semua pengukuran lapangan dari rasio redaman jembatan *cable-stayed* dilaksanakan dengan amplitudo kecil. Secara umum, besar rasio yang didapatkan menjadi antara 0,5 dan 1,0%. Nilai-nilai yang terukur seperti itu berhubungan dengan perilaku dari respon *vortex-shedding* yang amplitudonya rendah, yang biasanya terjadi pada kecepatan angin yang relatif

rendah. Bagaimanapun, *flutter* adalah suatu gejala yang diwakili oleh amplitudo besar; koefisien redaman aktual jauh lebih tinggi.

*Flutter* dipertimbangkan sebagai peristiwa ekstrim alami yang mungkin terjadi setiap 1000 sampai 2000 tahun. Di mana tidak akan juga ada orang di jembatan di bawah angin kencang seperti itu. Oleh karena itu, osilasi amplitudo besar dengan retakan beton dan kelelahan parsial baja dipertimbangkan dapat diterima. Di bawah kondisi-kondisi seperti itu, redaman meningkat dengan signifikan. Suatu jembatan *cable-stayed*, menjadi struktur yang sangat redundan yang memungkinkan banyak sendi plastis untuk terbentuk, menyediakan keuntungan yang menentukan dibandingkan dengan jembatan gelagar umum dan jembatan gantung konvensional.

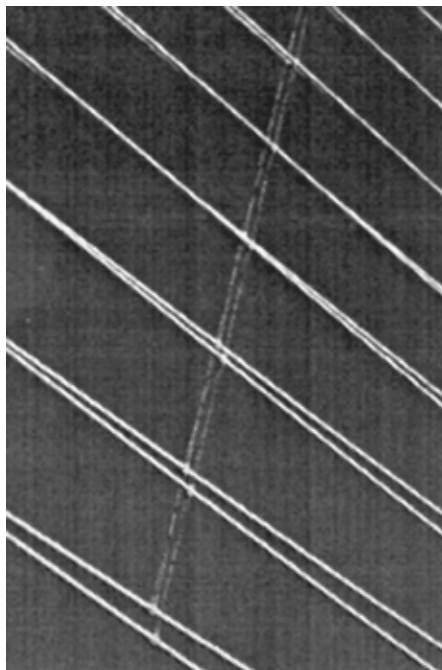
Suatu rasio redaman 5% biasanya diasumsikan pada analisis seismik, yang mana adalah suatu peristiwa kejadian alam ekstrim yang serupa. Suatu nilai dari 2 sampai 4% mungkin dapat diasumsikan secara konservatif untuk jembatan *cable-stayed* beton. Redaman yang lebih tinggi juga dapat dicapai dengan pemasangan redaman buatan.

Pengetahuan tentang vibrasi kabel juga telah maju secara ekstensif. Masalah getaran kabel *stay* pertama nampak di Neuenkamp Bridge. Masalah tersebutlah merupakan kemunculan getaran dari dua kabel dalam lokasi secara paralel dan horisontal. Masalah itu merupakan masalah baru pada saat itu. Masalah itu dikenali, dan kemudian getaran lebih lanjut ditekan dengan menghubungkan sepasang kabel bersama-sama dengan suatu peredam. Konsep ini digunakan untuk beberapa jembatan lain yang dibangun sesudahnya.

Getaran kabel yang parah diamati pada Brotone Bridge. Peredam dipasang dan mereka sukses dalam menekan getaran seperti itu. Konsep yang sama digunakan untuk Sunshine Skyway.

Vibrasi-vibrasi yang diakibatkan oleh air hujan dan angin ditemukan dalam beberapa jembatan-jembatan. Gejala ini muncul hanya selama hujan rintik-rintik dengan kombinasi dari angin yang ringan. Masalah ini ditemukan disebabkan oleh perubahan bentuk air hujan yang menutupi kabel. Meningkatkan peredaman kabel dapat menekan getaran ini. Mengikat kabel bersama-sama dengan kawat-kawat, **Gambar 34**, dan mengalirkan air dari kabel sebelum air berakumulasi adalah metoda-metoda semakin umum dan efektif dan untuk mengatasi masalah ini. Menambahkan lekukan atau betukan *spiral-wound*

*ridges* di permukaan kabel telah juga ditemukan efektif.



**Gambar 34** Kabel ikat melawan getaran yang disebabkan oleh air hujan dan angin pada Dames Point Bridge (Tang 2000)

### Kinerja dan Ukuran Aspek Penting dari Analisis Dinamis - Pengidentifikasian frekuensi natural

Frekuensi lentur dan torsi berdasarkan lendutan berat sendiri/tetap di tengah bentang utama dari hasil perhitungan statis dapat diperkirakan dengan **Rumus 7** dan **Rumus 8** yang merupakan rumus eksperimental dari PWRI, Jepang.

$$f_b = \{(1,1) / 2\pi\} \cdot (g / \delta_{maks})^{1/2} \quad (\text{Rumus 7})$$

$$f_t = (b_s / 2r) \cdot f_b \quad (\text{Rumus 8})$$

dengan pengertian :

$f_b$  = frekuensi lentur paling kecil dalam arah vertikal (frekuensi pertama) dalam Hertz

$f_t$  = frekuensi torsi dalam arah vertikal dalam Hertz (= cps)

$\delta_{maks}$  = lendutan dalam arah vertikal di tengah bentang utama (L) akibat berat sendiri/tetap dalam meter

$g$  = gravitasi = 9,81 m/detik<sup>2</sup>

$b_s$  = jarak melintang antar bidang *stay*

$r$  = jari-jari girasi dari gelagar lantai = (momen inersia)/luas

Dalam **Rumus 7** terungkap bahwa makin kecil lendutan, makin kaku jembatan dan makin besar frekuensi. Tetapi bila kabel direncanakan untuk memikul penuh berat sendiri/tetap dan lendutan menjadi hampir nol, digunakan **Rumus 9** sampai dengan **Rumus 10** yang merupakan rumus eksperimental dari PWRI, Jepang.

$$f_b = 33,8L^{-0,763} \quad (\text{Rumus 9})$$

$$f_t = 17,5L^{-0,453} \quad (\text{Rumus 10})$$

$$h = 0,0005 + 0,0148f_b \quad (\text{Rumus 11})$$

dengan pengertian :

$L$  = bentang utama dalam meter

$h$  = redaman struktural berdasarkan  $f_b$  dalam %

Perumusan diatas memberikan nilai terkecil yang harus dipenuhi dan menjadi patokan praktis dalam evaluasi hasil uji getar di lapangan dan penilaian kondisi jembatan *cable-stayed*.

Uji-coba percobaan getar pada prototipe jembatan *Bailey* modifikasi kabel dengan lendutan teoritis  $\delta_{maks}$  0,05m di tengah bentang utama  $L = 33,55m$  memberikan hasil sebagai berikut :

- Rumus 7** :  $f_b = \{(1,1)/2\pi\}(9,81/0,05)^{1/2} = 2,5$  Hertz (aktual terukur 3,3 Hz > 2,5 Hz persyaratan minimum)
- Rumus 9** :  $f_b = 33,8 \times 33,55^{-0,763} = 2,3$  Hertz ~ hasil Rumus 7
- Redaman yang bersangkutan :
- Rumus 11** :  $h = 0,0005 + 0,0148(2,3) = 0,0345 = 3,45\%$  (aktual terukur 3,5% ~ 3,45%)

Pendekatan stabilitas aerodinamis untuk contoh kasus jembatan *Bailey* modifikasi kabel diperoleh sebagai berikut :

- Rumus 9** :  $f_b = 33,8 \times (33,55)^{-0,763} = 2,3$  Hertz
- Rumus 10** :  $f_t = 17,5 \times (33,55)^{-0,453} = 3,56$  Hertz

Rasio frekuensi teoritis torsi terhadap lentur  $f_t/f_b = 3,56/2,3 = 1,54 < 2,5$  (salah satu persyaratan agar aman terhadap angin *flutter*) menunjukkan kepekaan aerodinamis. Sehingga perlu ditinjau rasio kelangsingan dari bentang utama 33,55 m terhadap lebar 3,9m = 8,6 << 30 (aman terhadap angin *flutter*). Gelagar lantai dari rangka panel *Bailey* juga aman terhadap angin vorteks, seperti yang terlihat pada **Gambar 35**, berupa pengujian beban-getar prototipe tahun 1997.



**Gambar 35** Pengujian beban-getar prototipe Jembatan Bailey modifikasi kabel

### Spesifikasi Teknis yang Dapat Digunakan untuk Mengukur Indikator Efektivitas atau Pengendalian Mutu dari Analisis Dinamis

Spesifikasi teknis, metoda, ataupun tata cara baku yang dapat digunakan untuk mengukur indikator efektifitas atau pengendalian mutu adalah :

1. ISO/TC 108/SC2 ,2002. ISO/DIS 18649:2002 Mechanical Vibration- Evaluation of measurement result from Dynamics Tests and Investigation on bridges, International Standard Organization.
2. Pt T-05-2002-B Penilaian kondisi jembatan untuk bangunan atas dengan cara uji getar

3. Pt T-06-2002-B Penilaian kondisi jembatan untuk bangunan bawah dengan cara uji getar

### Referensi Analisis Dinamis

Referensi yang dipakai adalah :

- Kawashima, K., S. Unjoh, dan M. Tsunomoto. 1991. “*Damping Characteristic of Cable Stayed Bridges for Sesimic Design.*” Journal of Research Public Works Research Institute Dec 1991.
- Walther, R., B. Houriet, P. Isler, dan J.P. Klein, 1999. *Cable Stayed Bridges, 2nd edition.* London: Thomas Telford.
- Tang, Man-Chung. 2000. *Cable-Stayed Bridges.* Di dalam Bridge Engineering Handbook, Diedit oleh Wai-Fah Chen dan Lian Duan. Boca Raton: CRC Press. ■



## Bab 6

# Penutup

Perencanaan teknis dalam struktur jembatan memegang peranan yang penting karena perencanaan teknis akan menentukan kinerja jembatan yang diinginkan dari suatu fenomena beban yang teridentifikasi. Sayangnya ketentuan seperti itu sampai saat ini tidak didapatkan secara luas untuk jembatan bentang panjang khususnya jembatan kabel yang secara garis besar terdiri dari jembatan gantung dan jembatan *cable-stayed*. Beberapa ketentuan perencanaan teknis untuk bentang panjang mungkin sudah dibahas pada spesifikasi desain atau peraturan bentang standar seperti pada spesifikasi perancangan untuk jembatan dari AASHTO dan National Standard of Canada atau European Standard. Tetapi hal itu masih belum mencukupi terutama persyaratan kinerja jembatan bentang panjang yang berkaitan dengan kenyamanan dan kestabilan struktur. Sampai saat ini masing-masing untuk jembatan gantung dan jembatan *cable-stayed* telah dibangun jembatan yang mempunyai panjang bentang utama adalah sebesar 1991 meter dan 1088 meter yang terletak masing-masing di Jepang dan RRC.

Di samping itu dengan perkembangan inovasi jembatan kabel dengan sistem penjangkaran sendiri untuk jembatan gantung atau penjangkaran ke tanah untuk jembatan *cable-stayed* menuntut pengkajian kinerja yang lebih detail dan lebih kompleks. Hal inilah yang mendorong dilakukan pengidentifikasian berbagai ketentuan mengenai jembatan bentang panjang tahun ini dengan tujuan akhir untuk mendapatkan gambaran yang utuh mengenai perencanaan teknis jembatan bentang panjang secara detail.

Pengkajian dilakukan dengan melakukan studi perbandingan berbagai macam referensi yang dianggap dapat mewakili untuk menghasilkan kesimpulan bahwa :

- 1) Respon jembatan kabel sangat ditentukan oleh aksi yang saling terkait antara sistem lantai, kabel dan pilon;
- 2) Simulasi karakteristik jembatan begitu kompleks termasuk kombinasi penempatan beban lalu-lintas dan kekakuan masing-masing elemen sistem lantai dan pilon, serta hubungan antara pilon dengan dengan sistem lantai;
- 3) Pengidentifikasi pembebanan angin sangat tergantung dari pengukuran angin di lapangan yang mewakili dan kekompleksan pengujian terowongan angin.

Hasil yang diperoleh dari kajian ini adalah perlunya dilakukan kajian yang lebih detail pada: 1) aksi yang saling terkait dari karakteristik sistem lantai, sistem tata letak kabel untuk jembatan *cable-stayed*, bentuk

pilon, dan kekakuan masing-masing elemen sistem lantai dan pilon, serta hubungan antara pilon dengan dengan sistem lantai, panjang bentang sisi, dan sistem perletakan dan sokongan antara pada tahap analisis struktur statis; 2) penggunaan metode dengan perancah dan metode kantilever berimbang; dan 3) pengujian aerodinamis dan perangkat penyeimbang getaran, dan pengidentifikasian frekuensi natural pada tahap analisis struktur dinamis.

Oleh sebab itu, pada jembatan kabel diperlukan: i) pengkajian jembatan *cable-stayed* dengan metode analisis orde kedua perlu dilakukan juga untuk mengantisipasi : (a) pengaruh ketidak-linieran yang dapat menghasilkan perubahan lendutan kabel pada semua kondisi batas; (b) deformasi dari lantai pada semua kondisi batas; (c) ketidak-linieran bahan pada kondisi batas ultimit; (d) perubahan pengaruh gaya akibat defleksi pada bagian ujung *cable-stayed* menggunakan teori defleksi besar; (e) pengaruh dari hilangnya gaya kabel ; dan (f) perencanaan penggantian kabel ; ii) pengkajian jembatan gantung yang menerapkan teori defleksi besar untuk mengakomodasi beban torsi dan beban lateral dengan menggunakan bahan yang linear elastik dan ketidak-linieran geometrik; iii) pengkajian secara intensif jembatan akibat beban-beban dinamis untuk mengidentifikasi fenomena beban dinamis yang saling terkait dengan kefleksibelan jembatan kabel. ■



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Kementerian Pekerjaan Umum  
[www.pusjatan.pu.go.id](http://www.pusjatan.pu.go.id)

ISBN 978-602-8256-40-7