

**SURAT EDARAN MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT
NOMOR : 09/SE/M/2015
TANGGAL 23 APRIL 2015**

TENTANG

**PEDOMAN PELAKSANAAN STRUKTUR JEMBATAN
BERUJI KABEL**



**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT**



**MENTERI PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
REPUBLIK INDONESIA**

Kepada Yth.:

Para Pejabat Eselon I di lingkungan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

**SURAT EDARAN
NOMOR : 09/SE/M/2015**

TENTANG

PEDOMAN PELAKSANAAN STRUKTUR JEMBATAN BERUJI KABEL

A. Umum

Jembatan beruji kabel menjadi salah satu alternatif dalam pembangunan jembatan bentang panjang. Jembatan dengan sistem beruji kabel merupakan jembatan yang terdiri dari satu atau lebih menara/menara dengan susunan kabel yang memikul gelagar lantai.

B. Dasar Pembentukan

- 1) Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2006 Nomor 86, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4655);
- 2) Peraturan Pemerintah Nomor 38 Tahun 2007 tentang Pembagian Urusan Pemerintahan antara Pemerintah, Pemerintahan Provinsi, Pemerintahan Daerah Kabupaten/Kota (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2007 Nomor 82, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4737);
- 3) Peraturan Presiden Nomor 7 Tahun 2015 tentang Organisasi Kementerian Negara;
- 4) Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 15 Tahun 2015 tentang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 16);
- 5) Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 121/P Tahun 2014 tentang Pembentukan Kementerian dan Pengangkatan Menteri Kabinet Kerja Periode Tahun 2014-2019;

- 6) Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 07/PRT/M/2012 tentang Penyelenggaraan Penelitian dan Pengembangan di Bidang Jalan.

C. Maksud dan Tujuan

Surat Edaran ini dimaksudkan sebagai acuan bagi Pejabat Eselon I di Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, perencana, pelaksana dan pengawas dalam pelaksanaan teknis jembatan beruji kabel.

D. Ruang Lingkup

Pedoman ini menetapkan ketentuan mengenai hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pelaksanaan struktur jembatan beruji kabel. Aspek-aspek yang dibahas meliputi prinsip-prinsip yang berkaitan dengan:

- a) metode pelaksanaan,
- b) kontrol konstruksi,
- c) inspeksi pada tahap konstruksi.

Pedoman pelaksanaan jembatan beruji kabel disusun berdasarkan atas proses perencanaan dan pembangunan jembatan uji coba beruji kabel Jembatan Palibaja Sukabumi, sehingga panduan ini hanya berlaku untuk proyek dengan tingkat kompleksitas yang setara. Umumnya untuk jembatan beruji kabel dengan panjang bentang 300 - 600 m dan lebar jalur kendaraan 3 - 7 m.

E. Penutup

Ketentuan lebih rinci mengenai Pedoman Pelaksanaan Struktur Jembatan Beruji Kabel ini tercantum dalam Lampiran yang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari Surat Edaran Menteri ini.

Demikian atas perhatian Saudara disampaikan terima kasih.

Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 23 April 2015

**MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT,**



M. BASUKI HADIMULJONO

Tembusan disampaikan kepada Yth.:
Plt. Sekretaris Jenderal, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Daftar isi

Daftar isi.....	i
Prakata	iii
Pendahuluan.....	iv
1 Ruang lingkup	1
2 Istilah dan definisi.....	1
3 Metode pelaksanaan jembatan beruji kabel.....	4
3.1 Konstruksi menara.....	4
3.2 Konstruksi gelagar.....	7
3.3 Pemasangan kabel.....	9
3.3.1 Metode perentangan kabel	9
3.3.2 Pengendalian penarikan kabel.....	12
3.3.3 Pengendalian dan manajemen selama ereksi.....	15
3.4 Kekuatan dan kestabilan jembatan pada tahap konstruksi	16
3.5 Pengujian pada tahap konstruksi.....	17
4 Kontrol konstruksi.....	17
4.1 Perlunya kontrol konstruksi.....	17
4.2 Komponen dari kontrol konstruksi.....	17
4.3 Proses dari kontrol konstruksi	18
5 Perencanaan inspeksi konstruksi	18
5.1 Inspeksi alinyemen	18
5.1.1 <i>Lay out</i> dari titik-titik <i>bench mark</i> (BM).....	18
5.1.2 <i>Lay out</i> titik-titik kontrol elevasi di gelagar.....	19
5.1.3 <i>Lay out</i> dari titik-titik kontrol deviasi pada menara.....	20
5.2 Inspeksi penurunan fondasi.....	21
5.3 Inspeksi tegangan pada kabel	22
5.3.1 Prinsip dan teknik pengukuran tegangan kabel.....	22
5.3.2 Waktu pengukuran tegangan kabel	23
5.4 Inspeksi tegangan dan temperatur pada girder, <i>cross beam</i> , dan menara.....	23
5.4.1 Titik-titik pengukuran pada girder.....	23
5.4.2 Titik-titik pengukuran pada <i>cross beam</i>	24
5.4.3 Titik-titik pengukuran tegangan pada pelat lantai	25
5.4.4 Titik-titik pengukuran tegangan pada menara	26
5.5 Skedul Pengukuran	27
6 Rencana teknis kontrol konstruksi.....	28
6.1 Filosofi dari kontrol konstruksi.....	28
6.2 Faktor-faktor yang memengaruhi.....	28

6.3	Optimasi dan penyesuaian (<i>adjustment</i>).....	29
6.4	Komponen utama kontrol konstruksi.....	29
6.5	Tingkat ketelitian dari kontrol konstruksi.....	30
6.6	Persyaratan umum pelaksanaan kontrol konstruksi.....	30
7	Instrumen dan peralatan.....	31
8	Prosedur keselamatan kerja.....	31
8.1	Kontrol kualitas.....	31
8.2	Peralatan keselamatan.....	32
9	Pengujian sebelum jembatan beroperasi.....	32
	Lampiran A (informatif) Contoh kasus.....	33
	Gambar 1 - Konstruksi menara dengan <i>tower crane</i> dan <i>creeper crane</i>	5
	Gambar 2 - Konstruksi menara dengan <i>truck crane</i>	6
	Gambar 3 - Konstruksi menara dengan <i>uplift machine</i>	7
	Gambar 4 - <i>Staging method</i>	8
	Gambar 5 - Metode kombinasi kantilever dan <i>staging (one-side pushing method)</i>	8
	Gambar 6 - Metode <i>balancing</i>	9
	Gambar 7 - Mengangkat langsung kabel dengan alat yang dipasang pada puncak menara	10
	Gambar 8 - Menarik kabel utama sepanjang <i>catwalk</i>	10
	Gambar 9 - Metode memasang dan menarik kabel dengan penyangga.....	11
	Gambar 10 - Metode memasang dan menarik kabel dengan penyangga.....	12
	Gambar 11 - Metode penarikan kabel dengan dongkrak.....	13
	Gambar 12 - Metode mengangkat ujung gelagar menggunakan <i>false cable</i>	13
	Gambar 13 - Metode mendongkrak <i>saddle</i> pada kepala menara.....	14
	Gambar 14 - Metode pemasangan gelagar.....	14
	Gambar 15 - Metode pengangkatan gelagar untuk menarik kabel.....	15
	Gambar 16 - Sistem pengendalian selama konstruksi.....	16
	Gambar 17 - Contoh lokasi titik-titik <i>bench mark</i> pada menara.....	19
	Gambar 18 - Contoh lokasi titik-titik kontrol elevasi gelagar.....	20
	Gambar 19 - Contoh lokasi titik-titik kontrol deviasi pada menara.....	21
	Gambar 20 - Contoh arah memanjang lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada girder.....	24
	Gambar 21 - Contoh arah melintang lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada girder.....	24
	Gambar 22 - Contoh lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada <i>cross beam</i>	25
	Gambar 23 - Contoh lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada <i>cross beam</i>	25
	Gambar 24 - Contoh lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada pelat lantai.....	26
	Gambar 25 - Contoh lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada menara.....	27
	Tabel 1 - Proses konstruksi dan pokok pengukuran.....	28
	Tabel 2 - Peralatan pengukuran kontrol konstruksi.....	31

Prakata

Pedoman pelaksanaan jembatan beruji kabel disusun berdasarkan atas proses perencanaan dan pembangunan jembatan uji coba beruji kabel Jembatan Palibaja Sukabumi, sehingga panduan ini hanya berlaku untuk proyek dengan tingkat kompleksitas yang setara. Umumnya untuk jembatan beruji kabel dengan panjang bentang 300 - 600 m dan lebar jalur kendaraan 3 - 7 m.

Pedoman ini dipersiapkan oleh Panitia Teknis 91-01 Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil pada Subpanitia Teknis Rekayasa Jalan dan Jembatan 91-01/S2 melalui Gugus Kerja Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan.

Tata cara penulisan disusun mengikuti Pedoman Standardisasi Nasional (PSN) No. 08:2007 dan dibahas dalam forum rapat konsensus yang diselenggarakan pada tanggal 12 September 2012 di Bandung, dengan melibatkan para narasumber, pakar dan lembaga terkait.

Pendahuluan

Jembatan beruji menjadi alternatif dalam pembangunan jembatan bentang panjang. Ruji kabel adalah kabel eksternal dengan dwi fungsi. Ruji kabel 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 beruji kabel adalah empat kali bentang gelagar sederhana bila dimensi dipertahankan sama.

Konfigurasi kabel menghubungkan gelagar pada puncak menara sehingga terjadi keseimbangan gaya dalam poligon segitiga. Menara dibuat tunggal, ganda atau *triple* dengan bentangan gelagar lantai yang simetris atau antimetris. Ketinggian menara sangat memengaruhi dimensi struktur secara keseluruhan dan juga dibatasi oleh ruang bebas vertikal, misalnya pada lokasi yang berdekatan bandar udara.

Konstruksi dan desain jembatan beruji kabel mempunyai hubungan yang sangat erat. Banyak faktor seperti teknik konstruksi, mutu material, proses konstruksi, temperatur lingkungan, tahapan instalasi, dan gaya pada kabel yang mempunyai dampak secara langsung pada kekuatan dan keselarasan jembatan. Terdapat perbedaan antara parameter perencanaan dan kondisi nyata di lapangan, oleh karena itu, data lapangan sangat diperlukan. Setelah data di lapangan dianalisis, data lapangan tersebut dapat digunakan untuk menyesuaikan nilai teoritis serta melakukan modifikasi pada tahap-tahap konstruksi dan gaya tarik pada kabel untuk memenuhi persyaratan perencanaan yang diinginkan. Kontrol konstruksi akan dapat meminimalkan pekerjaan penyesuaian gaya pada kabel, mengurangi waktu konstruksi dan menghemat biaya konstruksi.

Dalam pelaksanaan konstruksi jembatan, pada setiap tahapan konstruksi, besarnya gaya-gaya dalam, tidak boleh melampaui kapasitas penampang dan pada tahap akhir pembebanan, perpindahan titik puncak menara dan lendutan lantai jembatan harus memenuhi yang disyaratkan dalam perencanaan.

Pelaksanaan struktur jembatan beruji kabel

1 Ruang lingkup

Pedoman ini menetapkan ketentuan mengenai hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pelaksanaan struktur jembatan beruji kabel. Aspek-aspek yang dibahas meliputi prinsip-prinsip yang berkaitan dengan:

- a) metode pelaksanaan,
- b) kontrol konstruksi,
- c) inspeksi pada tahap konstruksi.

2 Istilah dan definisi

2.1

analisis *backward construction sequence*

analisis yang bertujuan untuk mendapatkan tegangan pada kabel yang memenuhi persyaratan perencanaan, dan selanjutnya membuat model terbaik dari urutan pelaksanaan dengan memindahkan segmen jembatan dan kabel secara bertahap untuk mendapatkan gaya-gaya dalam kabel pada setiap tahapan konstruksi

2.2

analisis *forward construction sequence*

analisis yang bertujuan untuk membangun model analisis sesuai dengan urutan pemasangan gelagar dan penarikan kabel untuk mendapatkan gaya dalam dan lendutan (perpindahan)

2.3

angkur ruji kabel

bagian dari elemen ruji kabel yang berfungsi sebagai tambatan atau pengunci atau mengencangkan tarikan gaya kabel

2.4

bench mark

jaring titik kontrol atau titik referensi yang dibangun di lokasi yang aman di dekat jembatan atau di menara untuk dijadikan referensi dalam pengukuran elevasi dan koordinat

2.5

buffeting

getaran pada dek jembatan akibat variasi kecepatan angin terhadap arah dan waktu

2.6

cross beam

elemen jembatan dalam arah melintang antar gelagar jembatan

2.7

flutter

amplitudo getaran yang terus membesar (*divergent*) pada dek jembatan akibat damping negatif yang disebabkan oleh gaya aerodinamik dan dapat mengakibatkan keruntuhan jembatan

2.8

gaya putus statis

kondisi ketika kabel telah mencapai keadaan putus misalnya akibat adanya korosi pada kawat baja, kegagalan pada alat ankur, atau kasus lainnya

2.9

gelagar lantai

gelagar pengaku yang menahan deformasi akibat variasi tegangan kabel dan perubahan bentuk/simpangan menara

2.10

girder

gelagar utama dari jembatan dalam arah memanjang

2.11

jembatan beruji kabel (*cable-stayed bridge*)

jembatan yang terdiri dari satu atau lebih menara (*pylon*) dengan susunan kabel yang memikul gelagar lantai

2.12

kabel damper

bagian sistem dari bangunan atas jembatan yang berfungsi sebagai redaman untuk mengurangi getaran yang timbul pada ruji kabel

2.13

kabel jangkar (*back stay*)

ruji kabel penahan di bentang samping yang mengikat menara langsung ke abutmen atau pilar

2.14

kabel utama (*main stay*)

ruji kabel pemikul di bentang utama

2.15

kawat baja jalinan tujuh (*7-wire strand*)

kabel yang terdiri dari tujuh buah lilitan kawat dengan kuat tarik tinggi

2.16

kecepatan angin dasar (*basic wind speed*)

kecepatan angin yang dijadikan dasar untuk perencanaan semua elemen jembatan dan didefinisikan sebagai beban angin rata-rata pada elevasi 10 m di atas ketinggian muka air laut di lokasi proyek

2.17

kecepatan angin rencana (*design wind speed*)

kecepatan angin utama yang dijadikan dasar untuk menghitung beban angin atau untuk memeriksa kestabilan aerodinamik dan dihitung dari perkalian antara kecepatan angin dasar dengan faktor modifikasi untuk memperhitungkan pengaruh ketinggian elemen jembatan

2.18

kecepatan angin kritis (*critical wind speed*)

kecepatan angin terendah dengan jenis getaran divergen seperti *flutter* dapat terjadi pada jembatan

2.19

kecepatan angin pemeriksaan (*verification wind speed*)

kecepatan angin di mana jenis getaran divergen seperti *flutter* akan diperiksa. Jika kecepatan angin kritis lebih besar dari kecepatan angin pemeriksaan, maka struktur dinyatakan aman

2.20

lock up device

bagian sistem dari bangunan atas yang berfungsi memberikan suatu hubungan yang kaku (*rigid link*) antara dek jembatan dengan abutmen atau pilar jembatan

2.21

menara (*pylon*)

kolom dengan dimensi langsing yang menahan tekanan dan momen dalam memikul gaya kabel akibat beban mati dan beban hidup jembatan

2.22

modular expansion joint

bagian atas jembatan yang menyatukan segmen-segmen gelagar jembatan

2.23

perletakan elastis/pegas

hubungan kabel pada gelagar yang berfungsi sebagai pilar antara semu

2.24

ruji kabel (*stayed cable*)

kabel prategang eksternal yang merupakan unsur tarik dalam menjamin hubungan kaku antara menara dan gelagar lantai

2.25

selubung HDPE

bagian dari elemen ruji kabel yang berfungsi sebagai selubung/pembungkus dari kawat-kawat baja (*strands*) yang terbuat dari bahan *polypropylene* atau *high density polyethylene* (HDPE) dan berfungsi untuk melindungi kabel dari bahaya korosi

2.26

stabilitas aerodinamis

kinerja jembatan beruji kabel akibat pengaruh angin dinamik

2.27

strain-gauge

alat/sensor untuk mengukur besarnya regangan yang terjadi

2.28

strand

untai benang baja prategang

2.29

titik kontrol deviasi menara

lokasi di mana defleksi atau deviasi dari menara diukur pada setiap tahap konstruksi

2.30

titik kontrol elevasi

lokasi di mana elevasi dari gelagar jembatan diukur pada setiap tahap konstruksi

2.31

titik kontrol tegangan

lokasi di mana regangan/tegangan yang terjadi pada elemen jembatan diukur pada setiap tahap konstruksi

2.32

transverse limit-stop block

bagian atas jembatan yang menyatukan antara menara dan gelagar jembatan

2.33

vortex shedding

getaran pada penampang jembatan akibat terjadinya resonansi antara frekuensi pusaran angin di belakang jembatan dengan salah satu frekuensi jembatan itu sendiri

3 Metode pelaksanaan jembatan beruji kabel

Pada tahap konstruksi, struktur jembatan beruji kabel belum memiliki kekuatan dan stabilitas sepenuh tahap akhirnya. Metode ereksi jembatan yang dipilih harus diperiksa dan diperhitungkan terhadap efek-efek yang ditimbulkannya terhadap struktur demi keamanan dan ekonomisasi pelaksanaan. Perubahan-perubahan geometrik, kondisi pengekang, sifat-sifat bahan dan detail-detail struktural lainnya harus dipertimbangkan dalam proses analisis struktur tahap konstruksi. Beban-beban konstruksi mungkin saja menimbulkan tegangan besar dalam struktur yang sedang dibangun. Sifat-sifat bahan yang bergantung waktu seperti rayapan dan penyusutan berdampak signifikan, khususnya pada jembatan-jembatan dengan gelagar utama adalah gelagar fabrikasi segmental beton cetak di tempat (*in-situ*) atau penampang-penampang komposit.

Dalam tahap konstruksi jembatan beruji kabel, terdapat dua kesalahan (galat) utama yang kerap terjadi:

- kesalahan penentuan gaya tarik dalam kabel-kabel;
- kesalahan geometrik dalam pengendalian elevasi dek jembatan.

Selisih antara nilai-nilai parameter perancangan dan kenyataan, misalnya modulus elastisitas, kerapatan massa beton, berat segmen-segmen gelagar, dan penyimpangan bentuk, tidak dapat dihindari dan akan mempengaruhi kinerja struktural. Akumulasi kesalahan-kesalahan ini harus dihindari untuk menjamin keamanan rancangan. Oleh sebab itu, selama masa konstruksi, struktur harus dimonitor secara berkesinambungan sehingga penyesuaian-penyesuaian yang tepat dapat dilakukan kapanpun tindakan koreksi ini diperlukan.

3.1 Konstruksi menara

Metode pelaksanaan konstruksi menara ditentukan dengan mempertimbangkan bentuk menara, transportasi, lokasi geografis dan kondisi meteorologi di lokasi jembatan. Secara

umum, metode konstruksi menara yang digunakan adalah salah satu atau kombinasi dari metode berikut:

a) Metode dengan derek apung (*floating crane*)

Metode konstruksi dengan menggunakan *floating crane* dapat mempersingkat waktu pelaksanaan, mengurangi pekerjaan-pekerjaan di lapangan, keamanan kerja yang lebih baik dan meningkatkan mutu produksi secara terintegrasi. Namun lokasi perakitan dan dermaga kapal harus tersedia terlebih dahulu.

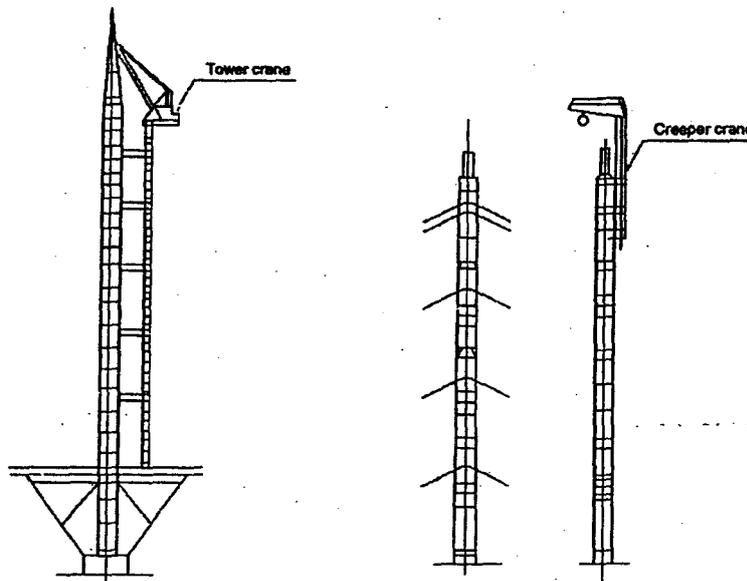
Pemilihan *floating crane* harus dilakukan di awal dan meliputi pemasangan menara dan penentuan posisi menggantungnya pada *crane*. Aspek penting yang perlu ditinjau adalah penyelidikan kestabilan struktur *crane* dan evaluasi penguatan posisi menggantung.

b) Penggunaan *crane* (*tower crane*, *crawler crane* dsb.)

Metode pemasangan dengan menggunakan *crane* seperti *tower crane* dan *crawler crane* (lihat Gambar 1) adalah sangat menguntungkan jika diterapkan pada menara yang tinggi. Namun yang perlu diperhatikan yaitu pada saat pemasangan *crane*.

Berat segmen-segmen menara yang akan diangkat cenderung dibatasi tergantung kapasitas *crane*. Hal ini akan menghasilkan peningkatan dalam jumlah penyambungan menara. Kadang kala, alat kabel pengikat perlu dipertimbangkan.

Pemasangan dengan *crawler crane* harus hati-hati dengan cara pengendalian yang teliti karena pada *crane* mungkin terjadi momen eksentris.



Gambar 1 - Konstruksi menara dengan *tower crane* dan *crawler crane*

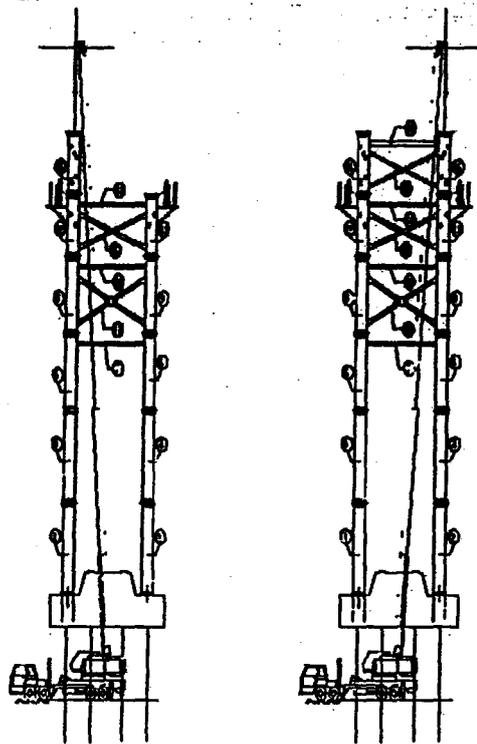
c) Penggunaan *truck crane*

Metode pelaksanaan dengan menggunakan *truck crane* (lihat Gambar 2) secara umum merupakan metode yang dapat diterima untuk pemasangan menara dan dapat menangani bermacam struktur jembatan beruji kabel dilihat dari sudut pandang pemilihan tipe *crane* yang layak.

Faktor-faktor yang harus diperhitungkan dalam pemilihan tipe *truck crane* yang digunakan adalah:

- struktur menara (tipe H, tipe A, tipe *inverted-Y*, *single tower*)
- urutan pemasangan menara (pekerjaan pendahuluan, pemasangan menara setelah instalasi gelagar pangaku)
- berat dan dimensi dari bagian-bagian menara

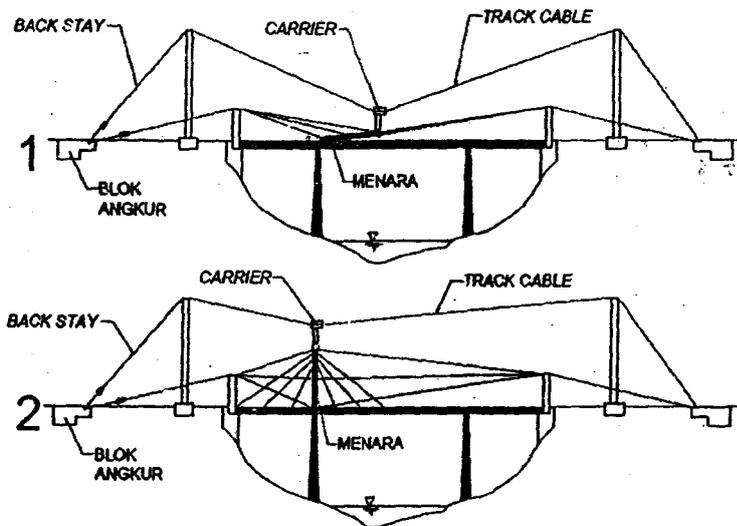
Setelah memperhatikan faktor-faktor di atas, kemudian perlu ditentukan kapasitas angkat, lama pekerjaan dan posisi *crane* untuk memperoleh tipe *crane* yang akan dipilih.



Gambar 2 - Konstruksi menara dengan *truck crane*

d) Penggunaan mesin pengangkat (*Uplift Machine*)

Pemasangan menara dengan *uplift machine* (lihat Gambar 3) dapat dikatakan metode pengecualian yang jarang dilakukan. Metode ini cenderung memerlukan terlalu banyak pengaturan yang sifatnya sementara dibandingkan dengan ukuran jembatan.



Gambar 3 - Konstruksi menara dengan *uplift machine*

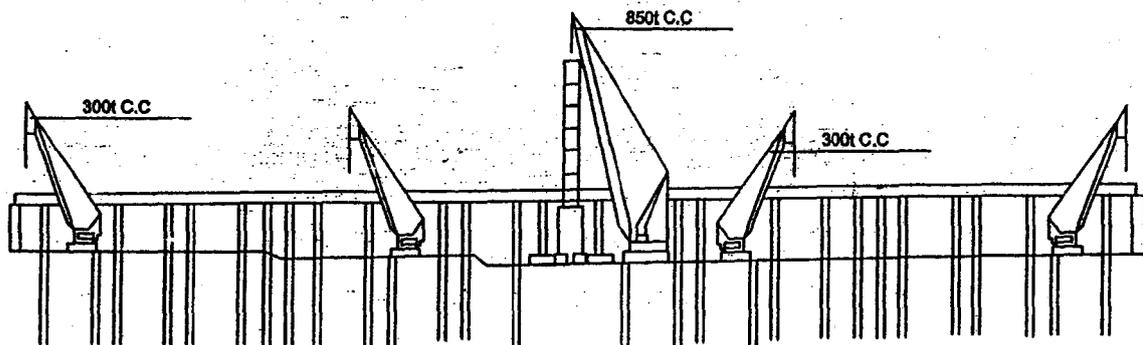
3.2 Konstruksi gelagar

Pemasangan gelagar dipengaruhi oleh kondisi-kondisi lapangan, bentuk dan penataan/proses gelagar dan kabel. Perencanaan yang memadai sangat diperlukan dalam pemilihan metode pemasangan. Pada kasus jembatan beruji kabel, instalasi menara, gelagar pangaku dan kabel dilakukan bersamaan satu dengan yang lainnya. Metode konstruksi gelagar pangaku dapat dilakukan dengan berbagai cara, di antaranya sebagai berikut:

a) Metode bertahap/*staging method (jack up & down)*

Metode bertahap (*staging method*) dapat dilakukan dengan kondisi peralatan tetap dapat dipasang pada tanah dasar atau air, dan pada saat bersamaan, alat-alat berat (*floating crane*) dipasang dengan memperhatikan ukuran jembatan beruji kabel. Ada beberapa batasan tertentu pada metode ini yang tidak dapat dihindarkan karena kondisi-kondisi pemasangan dan kepentingan lainnya. Metode bertahap (*staging method*) dijelaskan pada Gambar 4.

Gelagar pengangkut diangkat pada perancah menggunakan mesin-mesin atau *floating crane*, lalu gelagar didongkrak naik dan kabel-kabel diikatkan pada gelagar, selanjutnya gelagar didongkrak turun yang menghasilkan tegangan pada kabel.



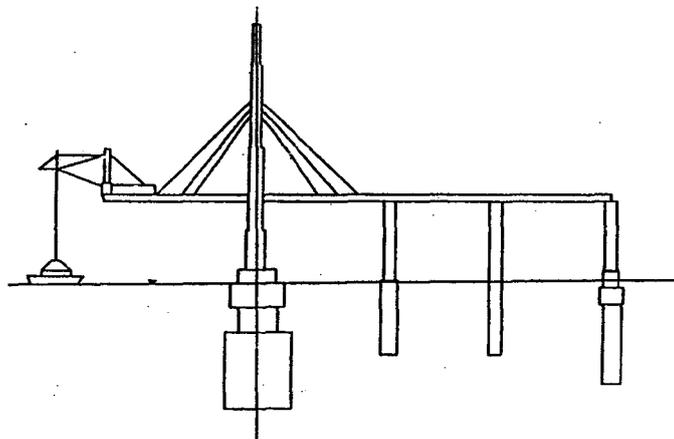
Gambar 4 - Staging method

b) Metode kombinasi kantilever dan staging (one-side pushing method)

Kombinasi metode kantilever dan *staging* pengacu pada *pushing method* (Gambar 5), yaitu memulai pemasangan gelagar pengaku pada *side span* kemudian dilanjutkan pada *central span* dengan menggantung gelagar pada kabel satu persatu. Metode ini telah sering dipakai pada jembatan panjang.

Dengan pemasangan awal gelagar pengaku pada bentang tepi, stabilitas gelagar pengaku pada bentang tengah akan meningkat, sehingga menambah peningkatan efisiensi operasi pekerjaan.

Untuk memasang gelagar pengaku pada bentang tengah digunakan *derrick crane*, *cable crane* dan *floating crane*.

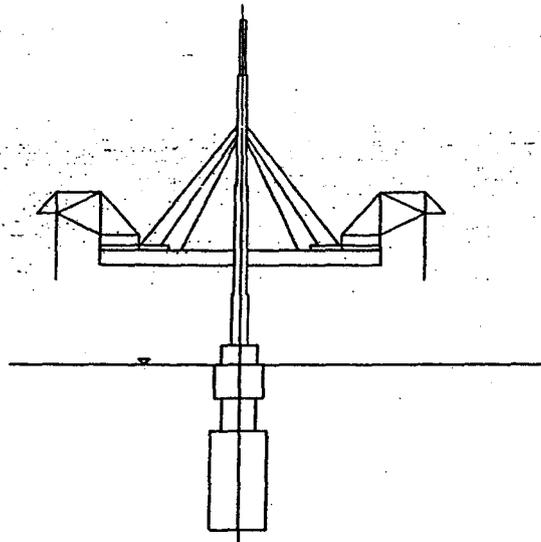


Gambar 5 - Metode kombinasi kantilever dan staging (one-side pushing method)

c) Metode penyeimbangan (balancing)

Metode pelaksanaan mengacu pada ilmu bangunan yang mengerjakan gelagar pengaku dari kedua sisi menara utama yang telah diselesaikan terlebih dahulu, jadi menjaga keseimbangan saat penarikan kabel satu-persatu dari kedua arah (lihat Gambar 6).

Karena metode ini melakukan pemasangan gelagar pengaku sambil menjaga keseimbangan dari dua sisi menara, maka pemeriksaan keseimbangan pada titik-titik tumpuan antara dan stabilitas selama pelaksanaan sangatlah penting. Pada waktu yang sama, tahanan angin dan gempa di tengah pelaksanaan harus dipelajari dengan baik.



Gambar 6 - Metode *balancing*

3.3 Pemasangan kabel

Metode pelaksanaan kabel mempunyai dua tahapan. Tahapan pertama, kabel direntangkan menghubungkan menara dan gelagar pengaku pada titik-titik tetap yang telah ditentukan. Tahap berikutnya, kabel diberi gaya tarik yang diperlukan.

3.3.1 Metode perentangan kabel

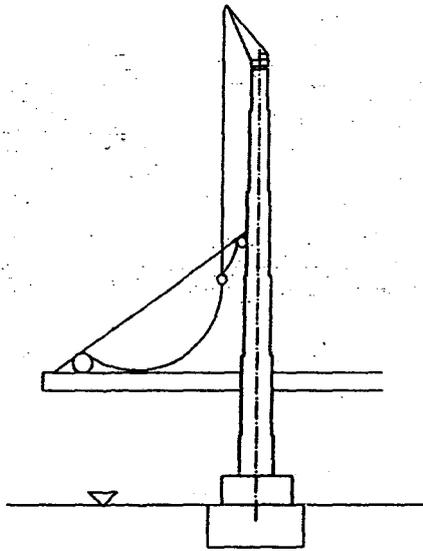
Ada empat buah prosedur perentangan kabel yaitu sebagai berikut:

- a) Penarikan kabel secara langsung menggunakan alat pengangkat yang dipasang pada kepala menara (lihat Gambar 7).

Metode ini biasanya digunakan pada tipe jembatan beruji besi kabel jamak. Kabel-kabel disebarkan di atas lantai gelagar pengaku langsung diangkat menggunakan peralatan pengangkat (*crane*) dan diikatkan pada *socket* dengan menggunakan peralatan penarik yang terpasang pada menara.

Setelah kabel terikat pada menara, maka kabel pada gelagar dibawa menggunakan peralatan penarik untuk diikatkan pada gelagar pengaku. Pada kasus tertentu, kabel pada menara diikat setelah kabel pada gelagar ditarik dan diikat.

Metode ini sangat efisien, tetapi jika luas penampang kabel meningkat (kabel menjadi lebih berat), *crane* pada menara bagian atas (peralatan penarik kabel) juga harus lebih besar sesuai dengan skala. Pada kasus ini, harus ada peninjauan pada sistem.

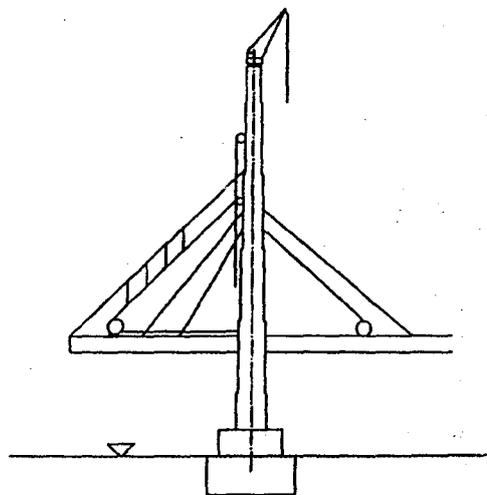


Gambar 7 - Mengangkat langsung kabel dengan alat yang dipasang pada puncak menara

- b) Pemasangan kabel menggunakan *false cable* dengan cara *roller hanger* (lihat Gambar 8)

Sebuah *false cable* yang dipasang di antara menara bagian atas dan di ujung gelagar. Kabel disebar di atas gelagar dengan menggunakan *roller hanger*, kemudian ditarik ke menara dari ujung gelagar. Setelah mengikat kabel pada sisi menara, *socket* kabel dibawa oleh peralatan penyeret kabel pada sisi gelagar untuk diikat pada gelagar memanjang.

Metode ini memerlukan penggantian *false cable* dan agak kurang efisien dibandingkan menarik langsung, namun kabel dengan penampang besar lebih besar dapat ditangani dengan metode ini.



Gambar 8 - Menarik kabel utama sepanjang catwalk

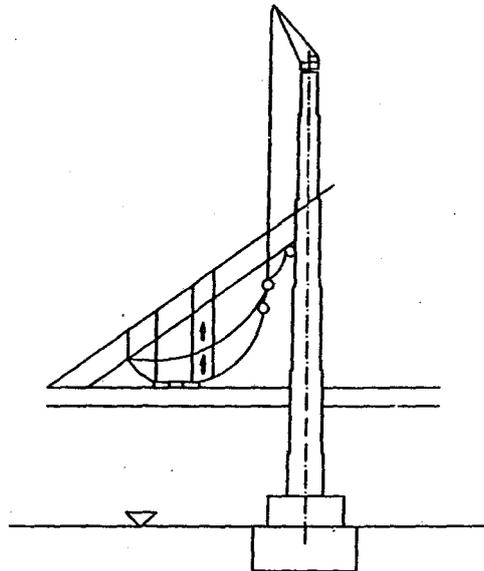
- c) Pemasangan kabel menggunakan *false cable* dengan cara *dragging stay* (lihat Gambar 9)

Sebuah *false cable* dipasang antara menara bagian atas dan ujung gelagar, kabel yang disebarakan di atas gelagar ditarik vertikal ke menara menggunakan kabel pengangkat dan diikat pada *socket* kabel.

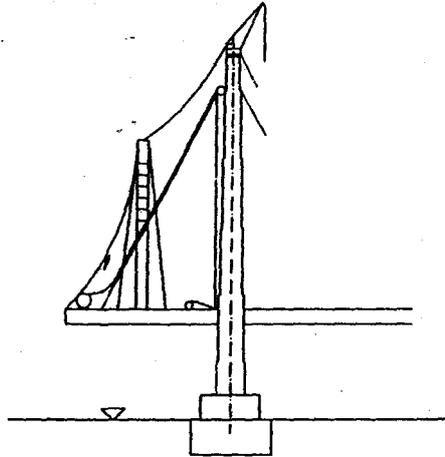
Mirip dengan metode (b) di atas, metode ini memerlukan pekerjaan penggantian *false cable*. Jika urutan pemasangan kabel dari tahapan atas dan bawah dapat dilakukan, maka kabel utama dapat dipakai sebagai *false cable*.

- d) Pemasangan kabel menggunakan *catwalk* (lihat Gambar 10)

Sebuah roller dipasang pada *catwalk* terlebih dahulu, kemudian kabel yang telah disebarakan diletakkan pada *roller* untuk dibawa ke menara lalu diikatkan pada *socket cable*, *socket* gelagar ditarik ke dalam menggunakan peralatan penarik yang dipasang pada gelagar tersebut untuk diikatkan pada gelagar.



Gambar 9 - Metode memasang dan menarik kabel dengan penyangga



Gambar 10 - Metode memasang dan menarik kabel dengan penyangga

3.3.2 Pengendalian penarikan kabel

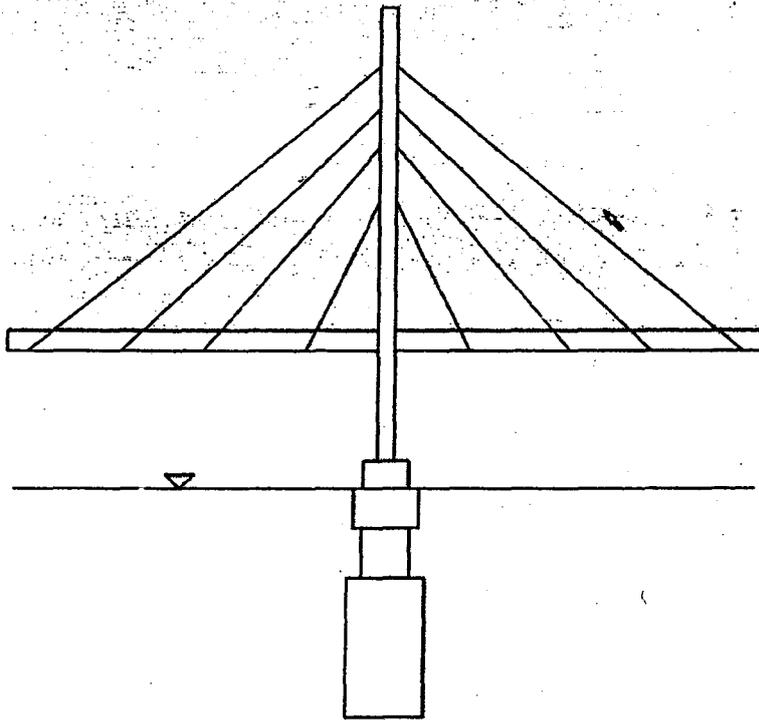
Berikut ini adalah proses pengendalian penarikan kabel yang umum digunakan:

a) Penarikan kabel menggunakan dongkrak (*jack*)

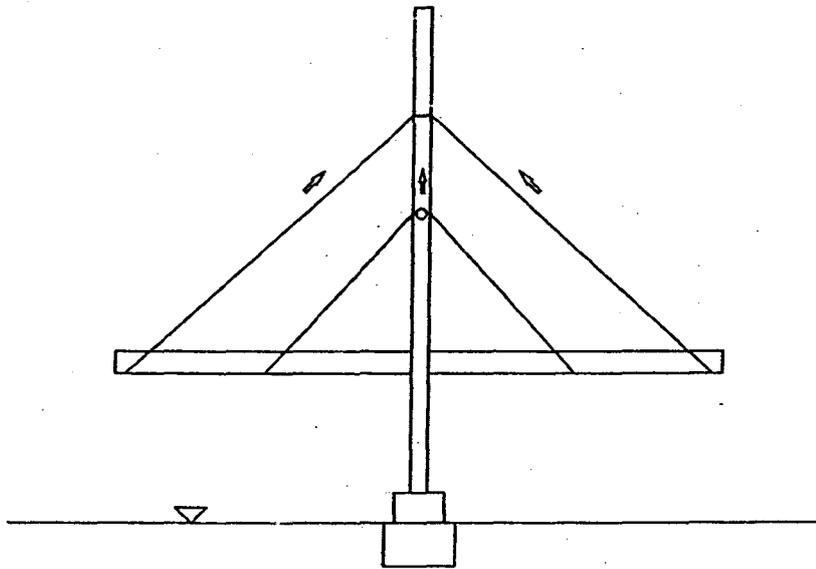
Metode menarik kabel secara langsung dengan sebuah dongkrak (lihat Gambar 11) pada sisi sebuah gelagar atau menara untuk tujuan menarik kabel agar menghasilkan *tension* (tegangan).

b) Pengangkatan ujung gelagar menggunakan *false cable* (lihat Gambar 12)

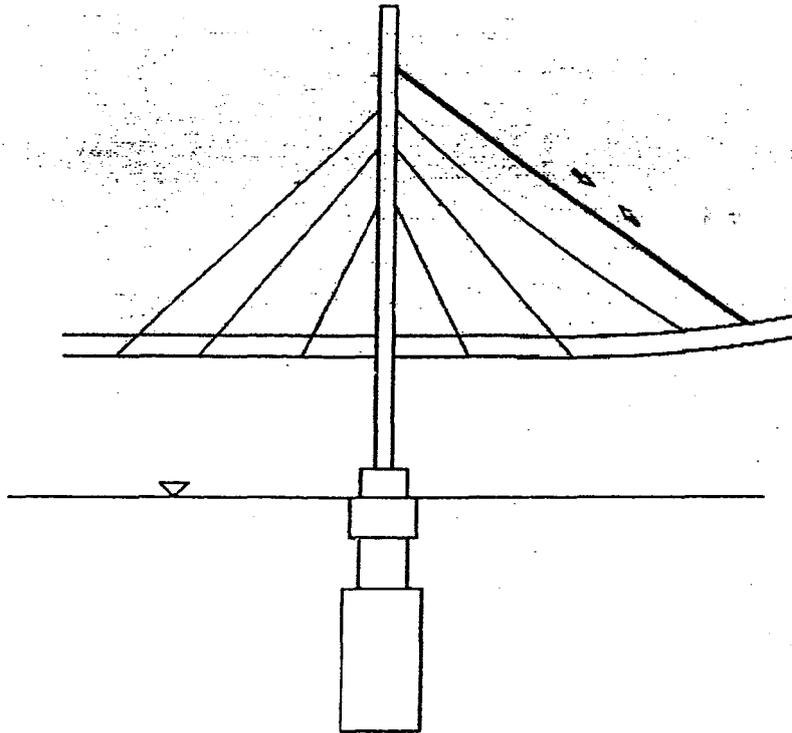
Meskipun keuntungan metode ini dapat menarik kabel tanpa menggunakan peralatan yang besar, namun cukup sulit untuk mengangkat ujung gelagar setinggi mungkin hanya dengan menggunakan *false cable*. Saat ini biasanya dilakukan dengan meninggikan atau mendongkrak *saddle* pada puncak menara.



Gambar 11 - Metode penarikan kabel dengan dongkrak



Gambar 12 - Metode mengangkat ujung gelagar menggunakan *false cable*



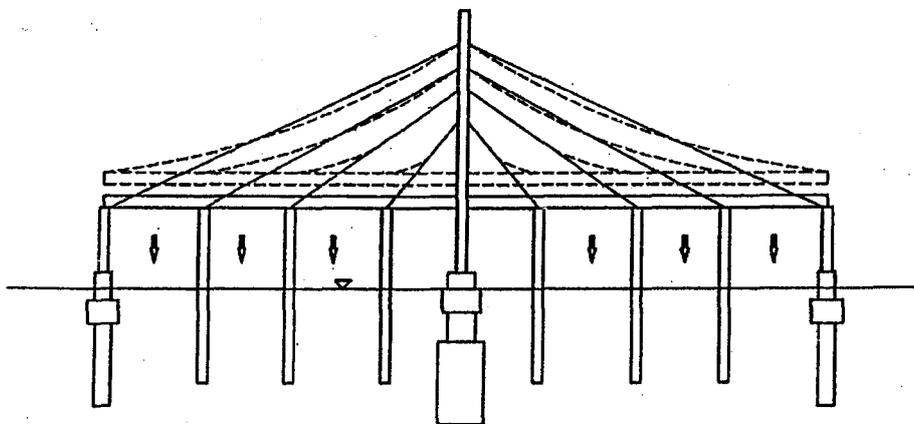
Gambar 13 - Metode mendongkrak saddle pada kepala menara

c) Pendongkrakan pelana (*saddle*) pada puncak menara (lihat Gambar 13)

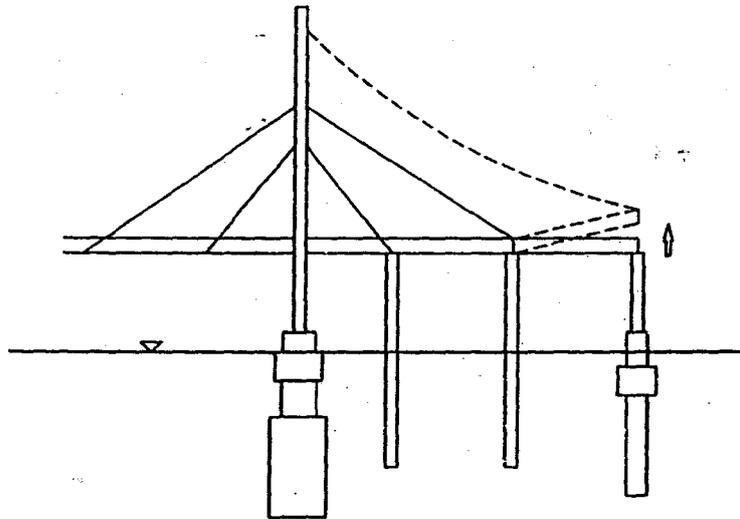
Pada metode ini terlebih dahulu pelana kabel (*cable saddle*) pada kepala menara dipasang sedikit rendah, kemudian didongkrak agar kembali ke posisi yang sebenarnya.

d) Pemasangan gelagar pada posisinya (lihat Gambar 14)

Metode pemasangan gelagar pada posisi lebih tinggi terlebih dahulu, kemudian mendongkrak ke bawah saat penyelesaian pemasangan semua kabel.



Gambar 14 - Metode pemasangan gelagar



Gambar 15 - Metode pengangkatan gelagar untuk menarik kabel

e) Pengangkatan gelagar (lihat Gambar 15)

Metode ini mempunyai keuntungan di mana kabel dapat ditarik tanpa menggunakan peralatan yang besar, tetapi pengaturan gaya tarik diperlukan karena gaya penarikan awal yang rendah. Meskipun demikian, tegangan kabel dan *camber* sangat dipengaruhi oleh menara dan gelagar sebelum pemasangan kabel.

Ujung gelagar diangkat oleh dongkrak, kemudian dilakukan pemasangan kabel. Ketika gelagar diturunkan, maka akan terjadi gaya tarik pada kabel.

3.3.3 Pengendalian dan manajemen selama ereksi

Pada jembatan beruji kabel, rencana pengendalian untuk gaya tarik kabel adalah sangat penting (lihat Gambar 16). Jembatan-jembatan beruji kabel merupakan struktur statis tak tentu dengan banyak variasi keseimbangan yang mungkin.

Pada jembatan beruji kabel, penyeimbangan tegangan yang terjadi pada kabel dan momen lentur pada gelagar dalam tahap desain dilakukan melalui hubungan perencanaan tegangan-tegangan dengan tegangan awal pada kabel.

Kelebihan regangan ataupun pengendoran pada kabel akan menyebabkan penyimpangan perencanaan bentuk dan distribusi tegangan. Situasi ini dapat menyebabkan ketidaksesuaian konfigurasi ultimit dan membuat jembatan rentan dari sudut pandang keamanan.

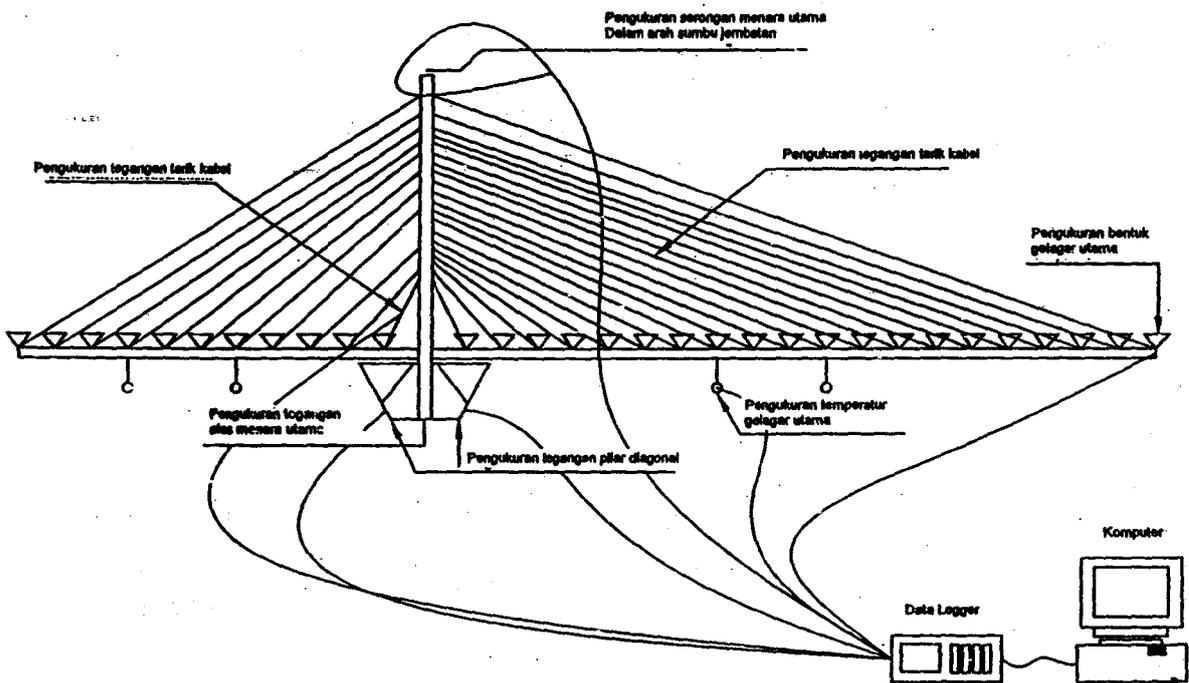
Batas kesalahan tegangan dalam setiap tahapan ereksi cenderung berakumulasi selama perkembangan pekerjaan ereksi.

Batas kesalahan tegangan tersebut harus dievaluasi dalam setiap langkah operasi ereksi berdasarkan prediksi distribusi tegangan dalam konfigurasi ultimit.

Konstruksi dan desain jembatan beruji kabel mempunyai hubungan yang sangat erat. Banyak faktor seperti teknik konstruksi, mutu material, proses konstruksi, temperatur lingkungan, tahapan instalasi, dan gaya pada kabel yang mempunyai dampak secara langsung pada kekuatan dan keselarasan jembatan.

Terdapat perbedaan antara parameter perencanaan dan kondisi nyata di lapangan maka untuk itu data lapangan sangat diperlukan. Setelah data di lapangan dianalisis, data lapangan tersebut dapat digunakan untuk menyesuaikan nilai teoritis serta melakukan modifikasi pada tahapan-tahapan konstruksi dan gaya tarik pada kabel untuk memenuhi persyaratan perencanaan yang diinginkan. Kontrol konstruksi akan dapat meminimalkan pekerjaan penyesuaian gaya pada kabel, mengurangi waktu konstruksi dan menghemat biaya konstruksi.

Dalam pelaksanaan konstruksi jembatan, pada setiap tahapan konstruksi, besarnya gaya-gaya dalam, tidak boleh melampaui kapasitas penampang dan pada tahap akhir pembeban, perpindahan titik puncak menara dan lendutan lantai jembatan harus memenuhi yang disyaratkan dalam perencanaan.



Gambar 16 - Sistem pengendalian selama konstruksi

3.4 Kekuatan dan kestabilan jembatan pada tahap konstruksi

Tahapan konstruksi harus direncanakan dengan baik untuk menjamin bahwa:

- Tegangan yang terjadi pada setiap elemen jembatan pada setiap tahap konstruksi selalu berada di bawah nilai yang diizinkan.
- Pada setiap tahap konstruksi, jembatan memiliki stabilitas yang baik dan terbebas dari kemungkinan getaran divergen akibat angin seperti *flutter*.

Jembatan yang berada pada tahap konstruksi khususnya pada saat menara berdiri sendiri (*free standing*) dan pada kondisi kantilever dari dek jembatan sangat rentan terhadap angin yang kuat. Untuk itu perlu ditanggulangi dengan melakukan pemeriksaan statik dan dinamik terhadap pengaruh dinamik angin melalui uji terowongan angin atau metode analisis lainnya jika diperlukan.

Periode ulang kecepatan angin dasar untuk pemeriksaan kestabilan pada tahap konstruksi adalah 30 tahun.

3.5 Pengujian pada tahap konstruksi

Selama tahap pembangunan jembatan, serangkaian pengujian perlu dilakukan untuk menjamin bahwa kualitas bahan yang digunakan adalah sesuai dengan spesifikasi serta untuk menjamin bahwa daya dukung lemen jembatan yang digunakan sesuai dengan apa yang direncanakan.

Secara umum pengujian material jembatan seperti beton, tulangan dan baja telah ditetapkan di dalam spesifikasi teknis pekerjaan.

Untuk pekerjaan fondasi jembatan, uji daya dukung maupun uji integritas fondasi harus dilakukan terlebih dahulu untuk memastikan bahwa daya dukung dan kualitas pekerjaan fondasi sesuai dengan rencana. Pelaksanaan pekerjaan *pile cap* baru dapat dilaksanakan setelah terbukti bahwa daya dukung dan integritas dipenuhi.

Setelah menara selesai dibangun, perlu dilakukan pengujian dari kekuatan dan integritas menara tersebut. Pengujian dapat dilakukan secara dinamik dengan membandingkan nilai frekuensi dari menara secara teoritis dan nilai frekuensi aktual di lapangan. Jika memungkinkan, pengujian perpindahan lateral juga dapat dilakukan.

4 Kontrol konstruksi

4.1 Perlunya kontrol konstruksi

Konstruksi dan desain jembatan beruji kabel mempunyai hubungan yang sangat erat. Banyak faktor seperti teknik konstruksi, mutu material, proses konstruksi, temperatur lingkungan, tahapan instalasi, dan gaya pada kabel yang mempunyai dampak secara langsung pada kekuatan dan keselarasan jembatan. Terdapat perbedaan antara parameter perencanaan dan kondisi nyata di lapangan maka untuk itu data lapangan sangat diperlukan. Setelah data di lapangan dianalisis, data lapangan tersebut dapat digunakan untuk menyesuaikan nilai teoritis serta melakukan modifikasi pada tahapan-tahapan konstruksi dan gaya tarik pada kabel untuk memenuhi persyaratan perencanaan yang diinginkan. Kontrol konstruksi akan dapat meminimalkan pekerjaan penyesuaian gaya pada kabel, mengurangi waktu konstruksi dan menghemat biaya konstruksi.

Tujuan dari kontrol konstruksi secara garis besar adalah:

- membuat alinyemen horizontal menjadi mulus dan memenuhi persyaratan perencanaan setelah segmen terakhir (*closure*) dipasang.
- mengetahui penyebab dan pengaruh dari berbagai deviasi, pengaruh beban (tegangan dan gaya pada setiap girder, menara dan kabel) pada setiap tahap konstruksi dan setelah segmen terakhir/*closure* dipasang agar sesuai dengan spesifikasi perencanaan.

4.2 Komponen dari kontrol konstruksi

Kontrol konstruksi pada jembatan adalah sebuah tahapan yang sistematis yang dibagi menjadi 2 tahap yaitu:

a) tahap pertama: pengumpulan data

Pada tahap ini dilakukan pemasangan berbagai macam sensor dan instrumen untuk memperoleh data, termasuk parameter geometri dan data *mechanical*.

b) tahap kedua: menganalisa data yang didapat

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap data yang dapat dilakukan dengan program komputer dan untuk menentukan parameter tahap konstruksi selanjutnya. Melakukan penyesuaian dan pengendalian gaya internal pada kabel dan alinyemen dari jembatan agar sesuai dengan nilai perencanaan yang sudah diperkirakan dan untuk menjamin keselamatan pada saat konstruksi serta tampilan keseluruhan dari jembatan.

Komponen utama dari kontrol konstruksi adalah:

- analisis dan perhitungan kondisi konstruksi;
- pengukuran parameter konstruksi;
- analisis kontrol dan penyesuaian.

4.3 Proses dari kontrol konstruksi

Proses dari kontrol konstruksi adalah:

- pemasangan titik-titik pengukuran pada setiap potongan mulai dari konstruksi menara;
- analisis dan perhitungan kondisi konstruksi;
- akuisisi data setiap selesai pemasangan segmen jembatan mulai dari segmen 0 dan 1, selanjutnya data tersebut diproses dan dilakukan penyesuaian terhadap parameter perencanaan, sampai seluruh asesori dan pelengkap jembatan selesai dipasang.

5 Perencanaan inspeksi konstruksi

Sistem monitoring konstruksi jembatan beruji kabel berisi monitoring dan pengujian parameter desain struktur, parameter geometrik, kondisi beban-beban, kontrol temperatur dan sebagainya. Termasuk di dalam sistem monitoring adalah survei alinyemen, survei gaya pada kabel, survei tegangan, survei temperatur.

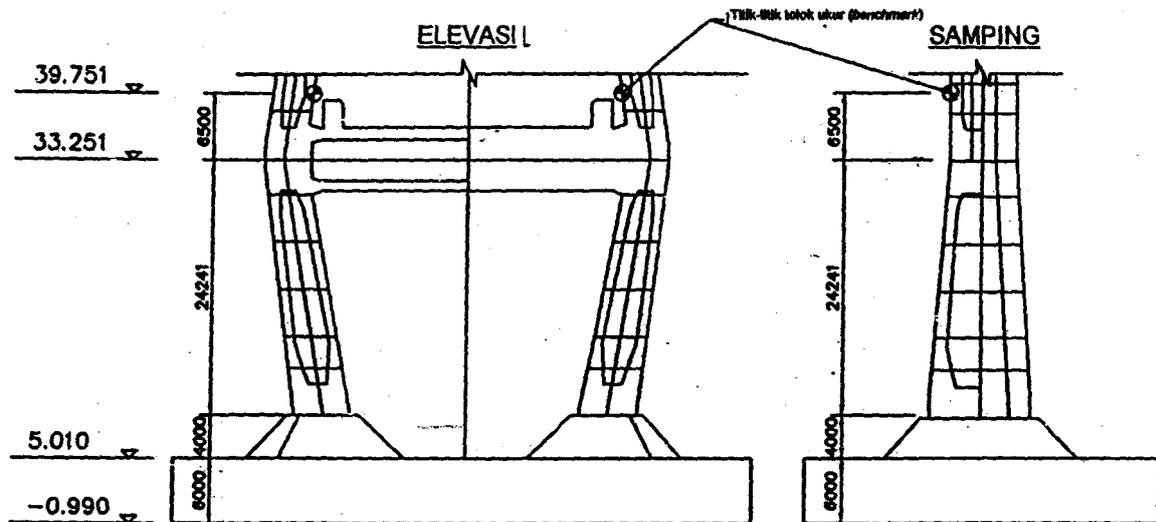
5.1 Inspeksi alinyemen

5.1.1 Lay out dari titik-titik *bench mark* (BM)

Pada setiap sisi menara perlu dibuat masing-masing 2 titik *bench mark* (BM).

Untuk jembatan beruji kabel dengan lokasi menara terletak di darat atau dekat dengan daratan, titik *bench mark* dapat dibuat di darat. Titik-titik BM tersebut harus dibuat permanen dan mudah untuk ditemukan.

Jika tidak memungkinkan untuk membuat titik *bench mark* di darat, titik-titik BM tersebut dapat dibuat di menara seperti ditunjukkan pada Gambar 17.

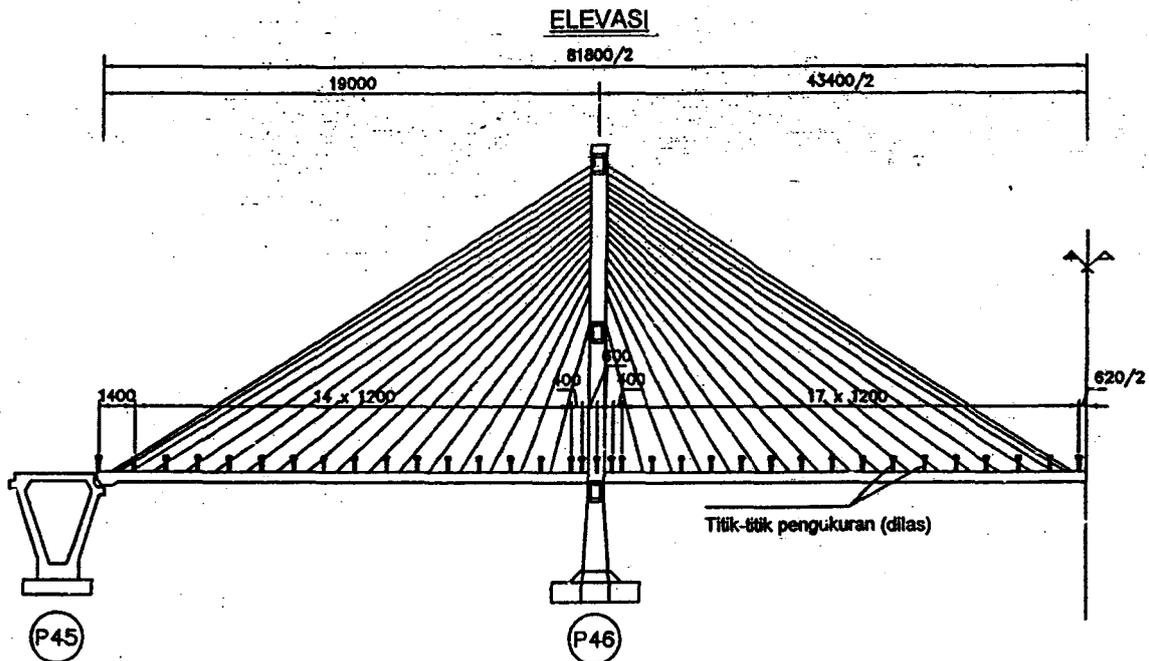


Gambar 17 - Contoh lokasi titik-titik *bench mark* pada menara

5.1.2 *Lay out* titik-titik kontrol elevasi di gelagar

Untuk memonitor defleksi/penurunan/lendutan dari gelagar, masing-masing dua titik pengamatan pada setiap gelagar harus ditetapkan. Titik pertama terletak 10 cm dari bagian depan dan titik kedua berada 10 cm dari bagian belakang. Titik-titik tersebut digunakan untuk mengetahui lendutan sebagaimana disajikan pada Gambar 18.

Titik-titik kontrol tersebut harus ditandai sebelum balok girder dinaikkan ke atas. Penandaan titik-titik kontrol dapat dilakukan dengan tambahan *plate* yang dilas ke girder baja. Reflektor dipasang di titik-titik tersebut untuk membantu proses pengukuran. Tipe atau jenis reflektor yang digunakan harus dapat memberikan ketelitian yang cukup terhadap data hasil pengamatan.



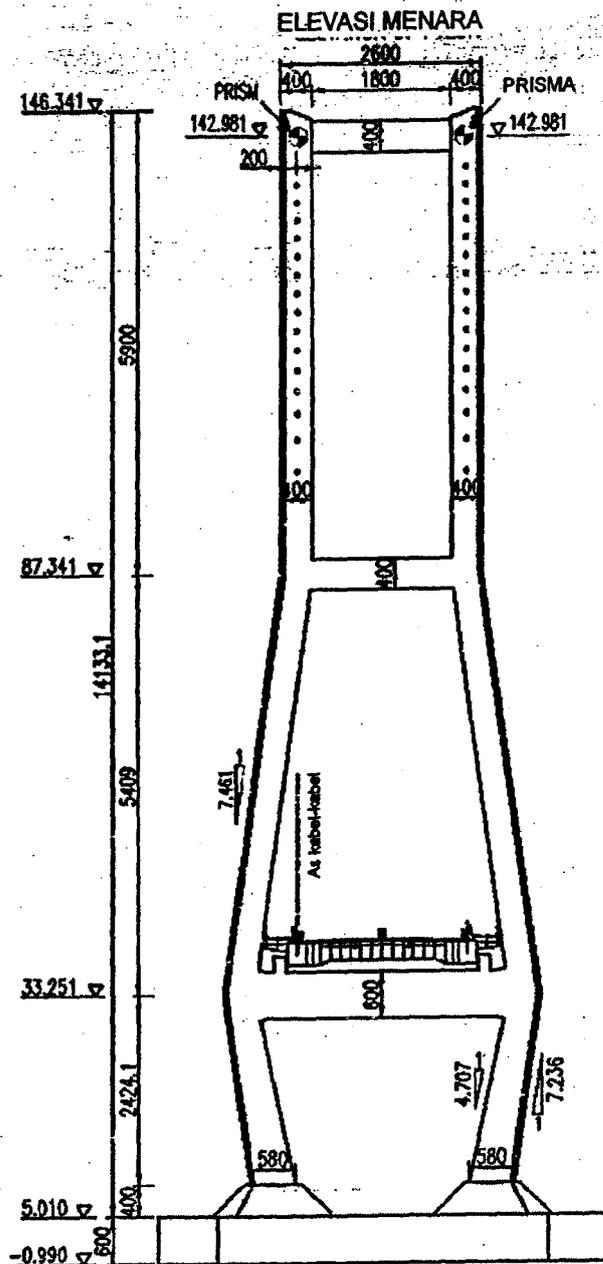
Gambar 18 - Contoh lokasi titik-titik kontrol elevasi gelagar

5.1.3 Lay out dari titik-titik kontrol deviasi pada menara

Untuk memonitor defleksi dan deviasi menara, diperlukan 2 buah titik-titik kontrol pada puncak dari masing-masing menara, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 19.

Pemeriksaan defleksi menara dilakukan pada tahap-tahap berikut

- setelah menara selesai dibangun, dilakukan pengukuran pada temperatur yang stabil dan pada kondisi tidak ada cahaya langsung dari matahari. Ambil rata-rata dari 2 hasil pengukuran sebagai nilai kondisi awal.
- pada setiap pemasangan segmen gelagar jembatan, pengukuran dilakukan setelah penarikan kabel tahap kedua selesai dilakukan.



Gambar 19 - Contoh lokasi titik-titik kontrol deviasi pada menara

5.2 Inspeksi penurunan fondasi

Pengukuran penurunan fondasi dilakukan dengan menggunakan 4 buah titik-titik pada setiap fondasi menara.

Jadwal waktu pengukuran penurunan pada fondasi adalah sebagai berikut:

- survei/pengukuran pertama dilakukan saat menara selesai dipasang.
- pengukuran kedua dilakukan saat setengah bagian girder dari bentang tepi atau seperempat bagian gelagar pada bentang tengah selesai dipasang.

- pengukuran ketiga dilakukan pada saat setengah bagian gelagar pada bentang tengah selesai dipasang
- pengukuran terakhir dilakukan seluruh elemen jembatan terpasang.

5.3 Inspeksi tegangan pada kabel

5.3.1 Prinsip dan teknik pengukuran tegangan kabel

Metode analisis spektra dapat digunakan untuk mengukur tegangan pada ruji kabel. Hasil pengukuran harus dibandingkan dan diperiksa terhadap nilai dari gaya tarik pada dongkrak penarik kabel.

Prinsip dari metode analisis spektra adalah dengan menempatkan sensor yang sangat sensitif pada kabel, membaca sinyal dari sensor, frekuensi osilasi dari kabel akan didapat dengan proses *filtering* dan pembesaran.

Berdasarkan hubungan antara osilasi dan tegangan pada kabel, nilai tegangan pada kabel akan dapat ditentukan.

Persamaan keseimbangan osilasi pada tegangan kabel adalah sebagai berikut:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - p \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Keterangan:

- EI adalah kekakuan kabel
- p adalah tegangan kabel
- m adalah massa kabel per satuan panjang
- y adalah amplitudo osilasi kabel
- x adalah koordinat kabel

Pada kasus kabel dengan perletakan sendi pada kedua ujungnya, hubungan antara frekuensi kabel (f_i) dari tegangan pada kabel (p) adalah sebagai berikut:

$$p = \frac{4ml^2 f_i^2}{i^2} - i^2 D \quad (2)$$

Keterangan:

- l adalah panjang kabel
- f_i adalah massa dari panjang kabel
- $i = 1, 2, 3, \dots$ mode dari frekuensi

D dihitung sebagai: $D = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$

Untuk kabel dengan panjang yang besar dan diameter D sangat kecil, pengaruh kekakuan lentur sangat kecil sehingga bisa diabaikan. Persamaan (2) dapat dinyatakan sebagai berikut

$$p = \frac{4ml^2 f_i^2}{i^2} \quad (3)$$

Untuk kabel yang sama, nilai m dan l akan selalu sama. Jika kekuatan kabel p sama, maka nilai $\frac{f_i^2}{i^2}$ akan tetap sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\frac{f_1^2}{1^2} = \frac{f_2^2}{2^2} = \frac{f_3^2}{3^2} = \dots = \frac{f_i^2}{i^2} \quad (4)$$

Dari persamaan (4) dapat dinyatakan bahwa:

$$f_1 : f_2 : f_3 : \dots : f_i = 1 : 2 : 3 : \dots : i \quad (5)$$

dan dapat dinyatakan juga bahwa

$$f_2 - f_1 = f_3 - f_2 = \dots = f_i - f_{i-1} = f_1 \quad (6)$$

Persamaan (6) ditunjukkan dalam spektogram, di mana interval antara frekuensi yang berdekatan pada berbagai mode adalah sama dan nilai interval tersebut sama dengan nilai frekuensi pada mode pertama (f_1).

Pada saat pengamatan di lapangan, nilai interval tersebut dapat dijadikan pedoman apakah spektogram dari kabel sesuai dengan karakteristik yang umum berlaku. Jika tidak, penyebab perbedaan harus diketahui selanjutnya dilakukan pemeriksaan terhadap instrumen yang digunakan serta dilakukan survei ulang kembali untuk memastikan tingkat akurasi hasil pengamatan.

5.3.2 Waktu pengukuran tegangan kabel

Pengukuran tegangan pada kabel dilakukan pada tahap-tahap berikut

- a) 10 menit setelah dilakukan penarikan sepasang kabel
- b) 30 menit setelah dilakukan penarikan sepasang kabel
- c) 1 jam setelah dilakukan penarikan sepasang kabel

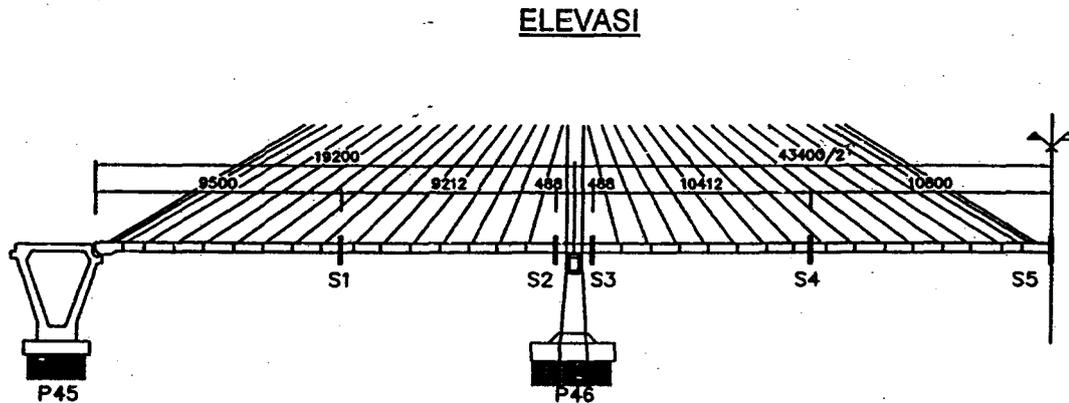
5.4 Inspeksi tegangan dan temperatur pada girder, *cross beam*, dan menara

Pengukuran tegangan dilakukan dengan memasang sejumlah *strain-gauge*. Tipe tertentu dari *strain-gauge* telah dilengkapi kemampuan untuk mengukur temperatur, sehingga regangan dan temperatur dapat diukur dengan alat yang sama.

5.4.1 Titik-titik pengukuran pada girder

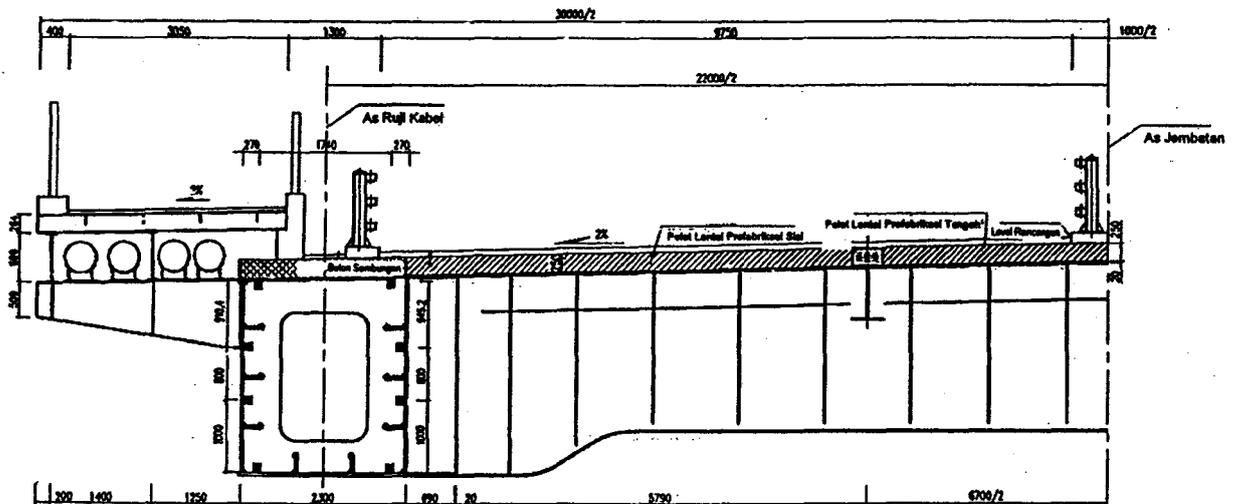
Lokasi titik-titik pengukuran tegangan dan regangan pada girder adalah (Gambar 20):

- a) Pada pertemuan girder dengan menara di dua sisi yaitu arah ke bentang tengah dan bentang tepi
- b) Pada setengah bentang tepi
- c) Pada seperempat bentang tengah
- d) Pada setengah bentang tengah



Gambar 20 - Contoh arah memanjang lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada girder

Dalam arah melintang, *strain-gauge* diletakkan pada girder utama sebagaimana disajikan pada Gambar 21 di bawah ini.

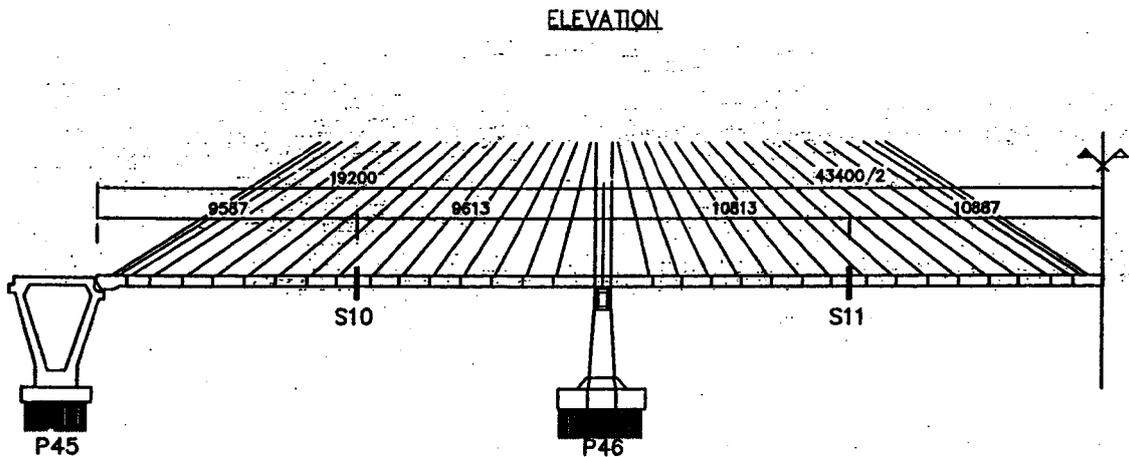


Gambar 21 - Contoh arah melintang lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada girder

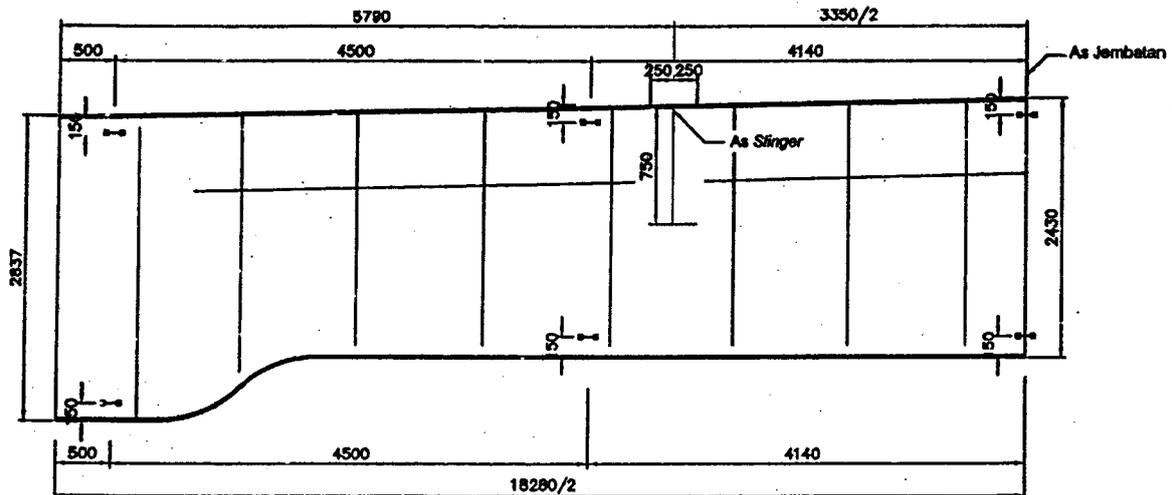
5.4.2 Titik-titik pengukuran pada *cross beam*

Lokasi titik-titik pengukuran tegangan dan regangan pada *cross beam* adalah (Gambar 22 dan Gambar 23)

- a) pada setengah bentang tepi;
- b) pada seperempat bentang tengah;
- c) pada setengah bentang tengah.



Gambar 22 - Contoh lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada *cross beam*



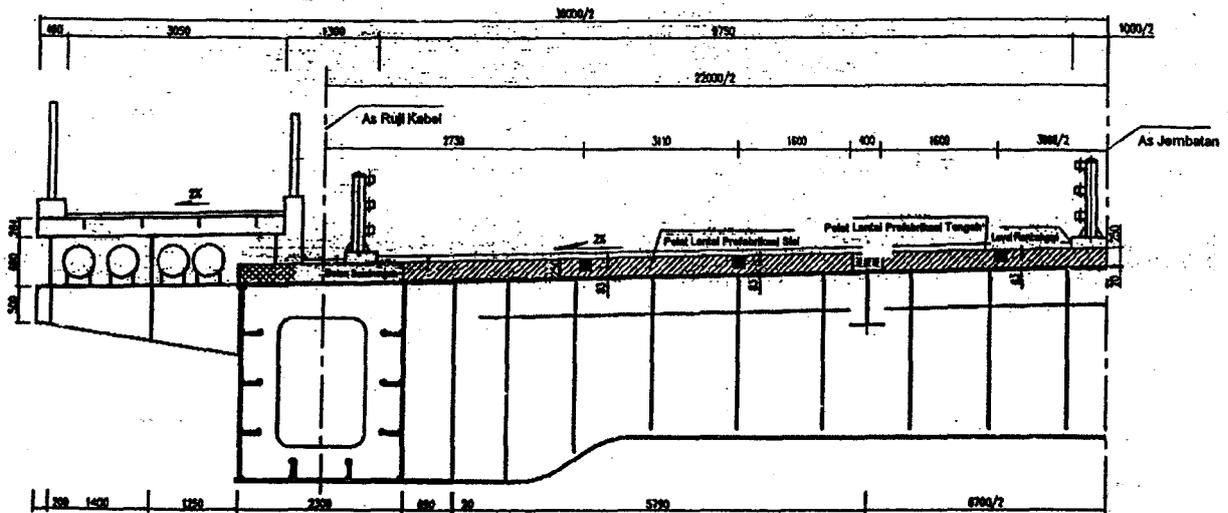
CATATAN: → sensor regangan dilas pada arah lateral *cross beam*

Gambar 23 - Contoh lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada *cross beam*

5.4.3 Titik-titik pengukuran tegangan pada pelat lantai

Lokasi titik-titik pengukuran tegangan dan regangan dalam arah lateral pada Pelat Lantai Jembatan adalah (Gambar 24):

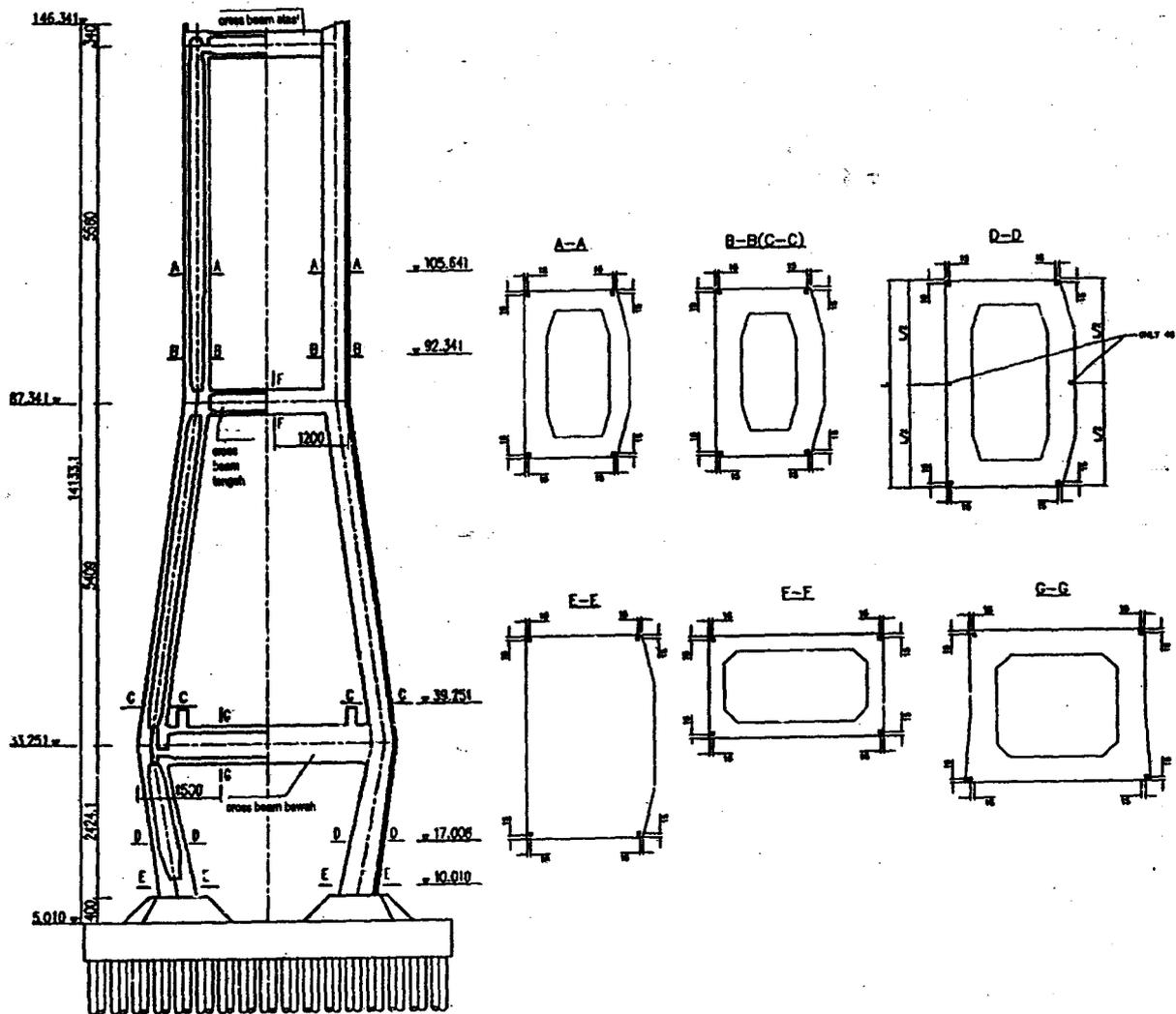
- a) pada setengah bentang tepi;
- b) pada seperempat bentang tengah;
- c) pada setengah bentang tengah.



Gambar 24 - Contoh lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada pelat lantai

5.4.4 Titik-titik pengukuran tegangan pada menara

Lokasi titik-titik pengukuran tegangan dan regangan pada menara adalah secara umum di lokasi di mana terjadi perubahan dimensi menara/segmen menara sebagaimana disajikan Gambar 25 di bawah.



Gambar 25 - Contoh lokasi pengukuran tegangan dan temperatur pada menara.

5.5 Schedule Pengukuran

Tabel 1 menyajikan contoh *schedule* pengukuran. *Schedule* pengukuran dapat berubah sesuai tahapan konstruksi, akan tetapi pokok yang diukur harus tetap.

Tabel 1 - Proses konstruksi dan pokok pengukuran

Tahap	Proses Konstruksi	Pokok Pengukuran
Segmen 0 dan 1	Menaikkan girder baja segmen 0 dan 1, ikatan sementara antara balok pada menara dengan girder Segmen 0	Tegangan, temperatur, deviasi menara, alinyemen, penurunan fondasi
	Tarik Kabel SC1 dan MC1 Secara bersamaan	Tegangan, temperatur, alinyemen, gaya pada kabel
	Menaikkan plat dek segmen 0 dan 1 yang dirakit setengah jadi di atas girder baja	Tegangan, temperatur, alinyemen, gaya pada kabel
	Penarikan kembali kabel SC1 dan MC1 secara bersamaan	Tegangan, temperatur, alinyemen, gaya pada kabel, deviasi menara
Segmen ke- i. ^A	Memasang peralatan pada segmen (i-1)	Alinyemen
	Menaikkan girder baja segmen i secara simetris	
	Memasang girder baja segmen i dan menarik kabel SCi dan MCi secara bersamaan	Alinyemen, gaya pada kabel
	Membawa peralatan ke segmen i dan menaikkan pelat lantai pracetak ke atas segmen i yang dirakit setengah jadi di atas girder baja	Alinyemen
	Pengecoran sambungan beton segmen (i-1) untuk membentuk penampang komposit dengan gelagar baja	Alinyemen
	Penarikan tahap 2 kabel SCi dan MCi secara bersamaan	Tegangan, temperatur, alinyemen, gaya pada kabel, deviasi menara
Pelengkap Jembatan	Pemasangan komponen pelengkap jembatan	Tegangan, temperatur, alinyemen, gaya pada kabel, deviasi menara

^A i adalah nomor (*integer*) yang menunjukkan urutan segmen gelagar pada konstruksi jembatan beruji kabel.

6 Rencana teknis kontrol konstruksi

6.1 Filosofi dari kontrol konstruksi

Selama proses konstruksi, identifikasi kesalahan parameter-parameter perencanaan dilakukan dengan melakukan perbandingan antara parameter konstruksi yang diukur di lapangan dengan nilai teoritisnya. Berdasarkan hal tersebut dapat ditentukan metode yang tepat untuk memperkirakan kesalahan yang terjadi akibat penggunaan parameter perencanaan dan menentukan metode terbaik untuk menyesuaikan gaya pada kabel dan alinyemen jembatan.

6.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi

Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi tegangan yang terjadi pada struktur jembatan beruji kabel selama tahap konstruksi yaitu:

- variasi dari berat sendiri setiap segmen girder;

- variasi kekakuan girder, menara dan kabel;
- variasi tegangan tarik;
- rangkap dan susut beton;
- variasi beban konstruksi;
- temperatur;
- variasi gaya prategang.

6.3 Optimasi dan penyesuaian (*adjustment*)

- melakukan penyesuaian terhadap tegangan kabel pada segmen berjalan dan segmen berikutnya
- melakukan penyesuaian alinyemen pada segmen jembatan berikutnya.

6.4 Komponen utama kontrol konstruksi

Pada perencanaan jembatan beruji kabel, pemberian tegangan pada kabel, agar memenuhi persyaratan perencanaan setelah jembatan selesai dibangun (distribusi momen yang merata, pengaruh yang kecil pada menara, dsb), harus dianalisis pada tahap perencanaan. Analisis tahap konstruksi harus meliputi *forward construction sequence* dan *backward construction sequence*.

Analisis *forward construction sequence* bertujuan untuk membangun model analisis sesuai dengan urutan pemasangan girder dan penarikan kabel untuk mendapatkan gaya dalam dan lendutan/perpindahan. Analisis *backward construction sequence* bertujuan untuk mendapatkan tegangan pada kabel yang memenuhi persyaratan perencanaan, dan selanjutnya membuat model terbaik dari urutan pelaksanaan dengan memindahkan segmen jembatan dan kabel secara bertahap untuk mendapatkan gaya-gaya pada kabel pada setiap tahapan konstruksi.

Secara teoritis, dengan menggunakan parameter yang didapat dari analisis *backward construction sequence* ke dalam analisis *forward construction sequence* akan memberikan hasil penyelesaian yang diinginkan. Akan tetapi dengan mempertimbangkan susut dan rangkap pada beton berhubungan dengan proses struktur, analisis *backwards construction sequence* tidak bisa merefleksikan gaya internal dan perpindahan secara teliti.

Nilai teoritis dari parameter yang dominan perlu ditentukan adalah sebagai berikut

- a) Nilai parameter teoritis yang dominan pada berbagai tahap konstruksi dan setelah konstruksi selesai adalah
 - elevasi dari girder utama;
 - deviasi dari menara;
 - tegangan pada kabel;
 - tegangan dan regangan pada titik-titik ukur.
- b) Nilai parameter teoritis yang dominan selama konstruksi
 - tegangan pada kabel;
 - elevasi.

6.5 Tingkat ketelitian dari kontrol konstruksi

Kondisi kerja dan variasi yang diizinkan:

- a) Penarikan kabel harus dilakukan pada kondisi temperatur relatif stabil (sebelum matahari terbit);
- b) Variasi dari elevasi girder pada saat dipasang yang diizinkan adalah $\pm 5\text{mm}$;
- c) Variasi maksimum dari regangan pada kabel yang diizinkan adalah $\pm 5\%$ dan tegangan maksimum kabel harus di bawah tegangan izin kabel.

Deviasi dari posisi segmen girder setelah segmen akhir (*closure*) dipasang adalah:

- a) Tingkat deviasi $\leq L/3000$;
- b) Deviasi gaya pada kabel setiap kabel harus memenuhi tegangan kabel maksimum yang disyaratkan;

Kontrol presisi pada menara:

- a) Variasi yang iizinkan pada menara adalah: $\leq H/3000$.

6.6 Persyaratan umum pelaksanaan kontrol konstruksi

- a) Kontrol konstruksi harus dilakukan oleh tim independen yang dibiayai oleh kontraktor pelaksana;
- b) Konstruksi jembatan sampai dengan pemasangan segmen terakhir (*closure*) harus mematuhi program konstruksi yang telah ditentukan. Modifikasi apapun baru dapat dilaksanakan setelah dilakukan analisis dan evaluasi secara ekstensif;
- c) Penyimpangan dari besarnya beban permanen balok komposit mempunyai dampak signifikan terhadap tegangan dan deformasi pada struktur, oleh karena itu penyimpangan harus dikendalikan seminimal mungkin dengan cara antara lain berat girder baja dan berat dek beton harus diperiksa dengan benar dan akurat;
- d) Survei harus dilakukan oleh pihak ketiga yang terpisah dari pihak-pihak terkait. Survei harus mencakup kondisi lapangan, tanggal, waktu, keadaan cuaca, beban khusus konstruksi, dan pengaruh beban yang lainnya;
- e) Tahap/Segmen berikutnya baru dapat dilaksanakan setelah mendapat persetujuan yang didasarkan hasil segmen/tahap pelaksanaan sebelumnya;
- f) Hasil pengukuran yang dilakukan sebelum dan sesudah instalasi girder dan penarikan kabel dilaksanakan, harus dipastikan terbebas dari pengaruh perbedaan temperatur akibat penyinaran matahari;
- g) Data yang dicatat harus dilaporkan ke inspektor segera setelah kabel ditarik pada setiap segmen. Setelah dilakukan modifikasi terhadap model perhitungan sesuai dengan perubahan parameter dan analisis atas data yang diperoleh, inspektor akan memprediksi gaya pada kabel dan level girder untuk *section* selanjutnya dan mengeluarkan jadwal pemasangan berikutnya;
- h) Konstruksi pada *section* berikutnya baru dapat dilaksanakan setelah jadwal pemasangan tersebut yang disetujui oleh pihak-pihak terkait;
- i) Beban sementara konstruksi harus dikendalikan dengan benar. Penempatan material sementara harus diawasi. Material diletakkan pada tempat yang telah ditentukan dan dengan besar beban telah ditentukan.

7 Instrumen dan peralatan

Alat-alat yang digunakan untuk pelaksanaan inspeksi kontrol konstruksi diuraikan dalam Tabel 2.

Tabel 2 - Peralatan pengukuran kontrol konstruksi

No	Nama Alat	Ketelitian Minimum	Fungsi
1	Total station	2 mm + 2 ppm	Mengukur alinyemen girder dan menara jembatan
2	Instrumen pengukur level	0.01 mm	Mengukur defleksi girder, alinyemen jembatan dan penurunan fondasi
3	Instrumen pengukur frekuensi getar kabel	0.5 % ± 0.01 Hz	Mengukur frekuensi kabel yang digunakan untuk mengukur tegangan dan gaya pada kabel
4	Strain-gauge	1 µε	Mengukur regangan/tegangan

Instrumen dan peralatan yang akan digunakan untuk melaksanakan pengukuran pada jembatan harus memiliki karakteristik berikut:

- a) tingkat presisi yang tinggi;
- b) ketahanan yang tinggi;
- c) stabilitas yang tinggi;

Semua instrumen dan peralatan harus dikalibrasi oleh otoritas yang telah ditentukan sebelum disetujui untuk digunakan.

8 Prosedur keselamatan kerja

8.1 Kontrol kualitas

- a) Pihak-pihak yang terlibat dalam pembangunan jembatan beruji kabel harus menerapkan dan memenuhi, Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan (SMK3L). Tujuan utama penerapan SMK3L adalah menciptakan suatu sistem manajemen kesehatan dan keselamatan kerja di tempat kerja dengan melibatkan unsur manajemen, tenaga kerja, kondisi dan lingkungan kerja yang terintegrasi dalam rangka mencegah dan mengurangi kecelakaan dan penyakit akibat kerja, serta terciptanya tempat kerja yang aman, efisien dan produktif;
- b) Pada tahap penyelidikan awal, semua personil teknik harus dikoordinir untuk mempelajari dokumen kontrol konstruksi dan inspeksi jembatan serta menentukan standar-standar yang terkait dengan pelaksanaan pekerjaan;
- c) Tanggung jawab harus diberikan kepada masing-masing individu, dan pelaksanaan tugas harus dilaksanakan secara sistematis;
- d) Semua peralatan dan fasilitas yang digunakan harus dikalibrasi untuk memastikan bahwa alat tersebut memenuhi persyaratan;
- e) Dalam rangka meminimumkan perubahan peralatan, tidak akan dilakukan pergantian terhadap peralatan selama pelaksanaan pekerjaan kecuali dengan alasan khusus;
- f) Pembacaan nilai pengukuran harus akurat dan pencatatan harus mengikuti prosedur. Penyimpangan yang signifikan dari prosedur yang ditetapkan harus segera dievaluasi untuk memastikan ketelitian dari data yang didapat tersebut;

- g) Selama pemeriksaan, semua peralatan harus dijaga dengan hati-hati, untuk memastikan alat tersebut dapat berfungsi normal;

8.2 Peraiatan keselamatan

- a) Pada tahap persiapan konstruksi, semua pekerja yang terlibat harus mempelajari prosedur kerja dan meningkatkan kesadaran keselamatan kerja;
- b) Membangun tanggung jawab posisi kerja. Kepala tim harus bertanggung jawab secara keseluruhan atas keselamatan kerja dan bertanggung jawab untuk menentukan langkah-langkah keselamatan kerja;
- c) Menjalankan regulasi keselamatan pekerjaan secara tegas dan pelanggaran apapun akan diperingatkan atau dihukum sesuai peraturannya;
- d) Semua fasilitas kelistrikan dan kabel harus diisolasi dengan baik. Semua pekerja harus melakukan pekerjaannya sesuai dengan prosedur;
- e) Area kerja harus ditandai dan konstruksi pada malam hari harus disediakan lampu dan peralatan keselamatan;
- f) Mengikuti dan mematuhi semua prosedur konstruksi.

9 Pengujian sebelum jembatan beroperasi

Setelah jembatan selesai dibangun dan sebelum jembatan beroperasi melayani beban lalu lintas, pemeriksaan dan pengujian yang menyeluruh dan mendetail perlu dilakukan. Data hasil pemeriksaan dan pengujian disimpan di dalam *data base* jembatan beserta dokumen perencanaan dan gambar *as-built drawing*. Hasil pemeriksaan dan pengujian yang dilakukan disebut *Bridge Signature* atau *Bridge Finger Print*.

Persyaratan pemeriksaan dan pengujian sebelum jembatan beroperasi antara lain:

- a) Pemeriksaan detail tersebut harus dilakukan oleh pihak yang memenuhi kualifikasi;
- b) Pemeriksaan detail harus dilaksanakan oleh tenaga ahli profesional dengan metode teknis yang profesional dilengkapi dengan pengujian lapangan;
- c) Hasil pengujian dan analisis harus disampaikan dalam bentuk laporan tertulis lengkap;

Pokok-pokok yang harus dilaksanakan dan diperiksa pada pengujian sebelum jembatan beroperasi:

- Data yang relevan dari jembatan beruji kabel harus dikumpulkan seperti laporan perhitungan, gambar rancangan (*design drawing*), hasil pengujian material, catatan selama konstruksi;
- Pengujian beban statis dilakukan untuk mendapatkan lendutan pada bagian penting jembatan seperti di tengah bentang dan di menara sesuai dengan standar pengujian beban yang ada;
- Pengujian beban dinamis dilakukan untuk mengukur respon dinamis dan menganalisis frekuensi alamiah serta parameter dinamik struktur, serta mengevaluasi kinerja dinamik jembatan;
- Untuk jembatan beruji kabel, pengukuran gaya pada kabel perlu dilakukan;
- Posisi dan putaran dari perletakan (*bearing*) harus dicatat dan diberi tanda;
- Posisi dari *seismic damper* jika ada harus dicatat dan diberi tanda;
- Celah dan posisi dari *modular expansion joint* harus dicatat.

Lampiran A (Informatif) Contoh kasus

A.1 Data Teknis Jembatan

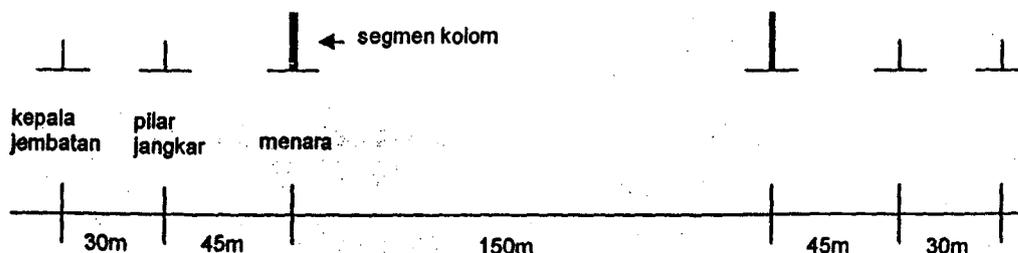
Data teknis jembatan adalah sebagai berikut

- a) Tipe jembatan = jembatan beruji dengan kabel simetris
- b) Panjang jembatan = 300m
- c) Bentangan jembatan = $(30+45) + 150 + (45+30)$ m
- d) Lebar jembatan = $0.5 + 5.5 + 0.5$ m
- e) Tipe struktur atas = gelagar boks baja dipikul oleh dua bidang kabel
- f) Menara = portal kolom baja dengan tinggi 33m.
- g) Kelandaian memanjang = 1.87 % dengan radius 4000 m
- h) Lendutan beban mati dan hidup = -718 mm
- i) Kemiringan arah melintang = 2 %

A.2 Tahapan pelaksanaan

Tahapan pelaksanaan untuk contoh tipikal jembatan beruji kabel dari bahan baja adalah sebagai berikut:

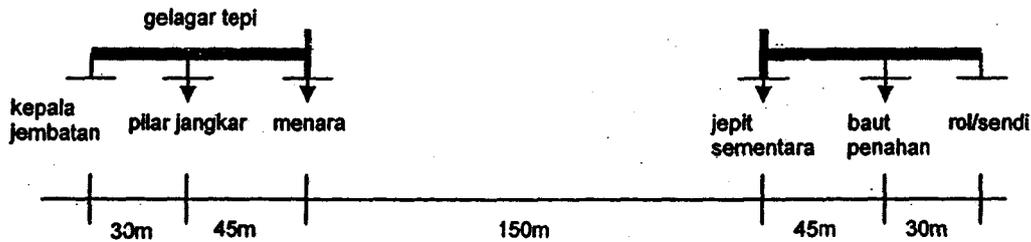
- a) Gelagar dan menara baja dibuat secara pabrikasi dalam segmen yang mudah diangkut ke lokasi jembatan;
- b) Fondasi dan bangunan bawah dibangun dengan menyertakan pemasangan baut jangkar untuk perletakan (Gambar A.1);
- c) Segmen baja pertama/bagian bawah dari menara baja sepanjang 5 meter dipasang pada dasar menara disertai dengan balok tumpuan untuk perletakan gelagar jembatan (Gambar A.1);



Gambar A.1 - Skema bangunan bawah

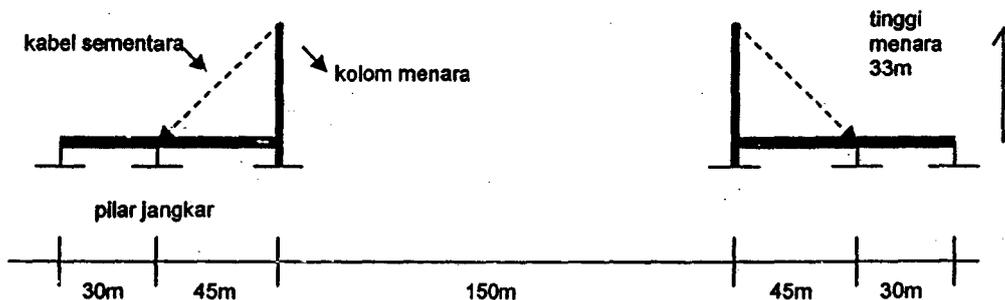
- d) Gelagar tepi dipasang menggunakan metode peluncuran dengan tumpuan sementara di pangkal, pilar antara dan pilar utama (Gambar A.2);

- e) Perletakan berupa rol dan sendi dipasang pada pangkal/kepala jembatan. Perletakan jepit sementara dipasang di menara untuk menahan gelagar selama penarikan kabel berlangsung. Pada pilar jangkar dipasang baut penahan gaya angkat gelagar (Gambar A.2);



Gambar A.2 - Skema pemasangan gelagar tepi

- f) Pasang segmen bagian dari pilar baja dan kabel sementara dengan wartel mur dari puncak menara ke pilar jangkar (Gambar A.3);



Gambar A.3 - Skema pemasangan kolom menara

- g) Pasang secara bertahap gelagar jembatan pada bentang tengah secara kantilever segmental dari kedua sisi menara (Gambar A.4) dan pasang kabel secara kencang tangan mulai kabel no.1 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 $2 \times 7,5 \text{ m} = 15 \text{ m}$).

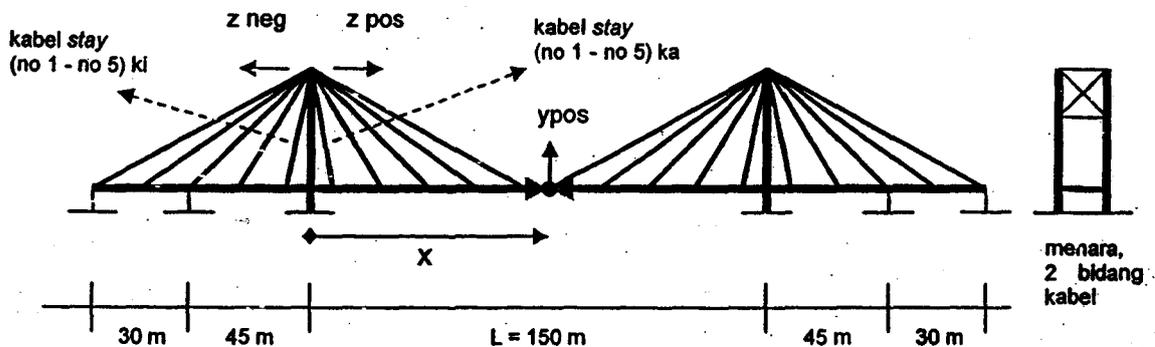
- h) Setiap pemasangan segmen kantilever harus disertai dengan penarikan pasangan kabel secara bersamaan dari sisi kiri dan kanan menara (Gambar A.6). Kabel sementara dapat dilepaskan setelah pasangan kabel pertama ditarik.

Penarikan kabel secara bertahap disertai dengan monitoring pengukuran lendutan teoritis sesuai Tabel A.1.

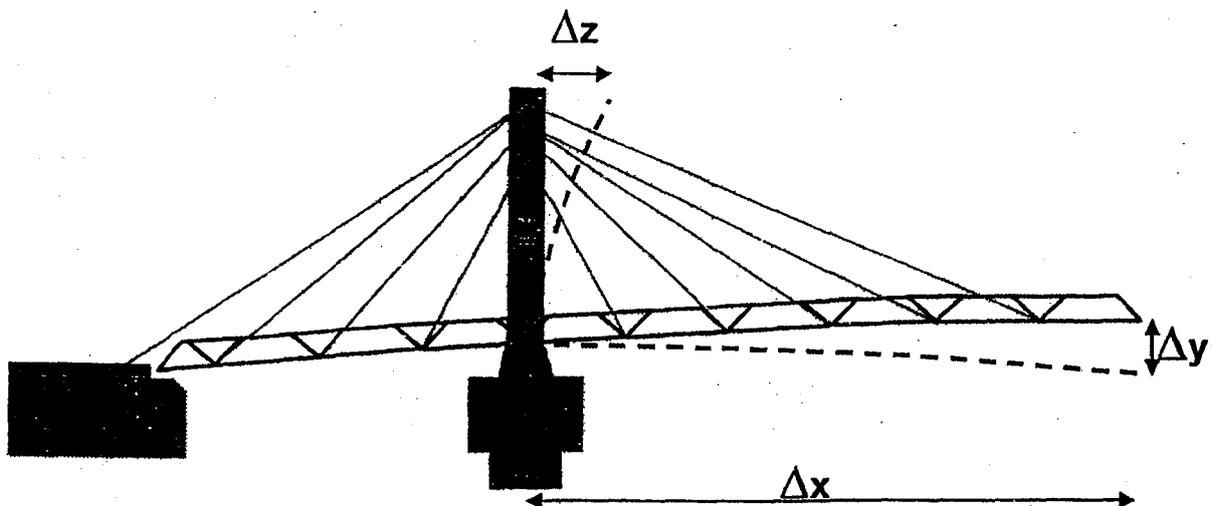
Toleransi 25% diperbolehkan untuk perbedaan antara lendutan teoritis dan aktual/terukur selama pelaksanaan (lihat Gambar A.5).

Perletakan jepit sementara pada menara digunakan untuk menahan gelagar selama penarikan kabel. Jepit sementara tersebut akan dilepaskan 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.



Gambar A.4 - Skema pemasangan bentang utama secara segmental, penarikan awal kabel stay mulai dari menara sampai gelagar tersambung di tengah bentang



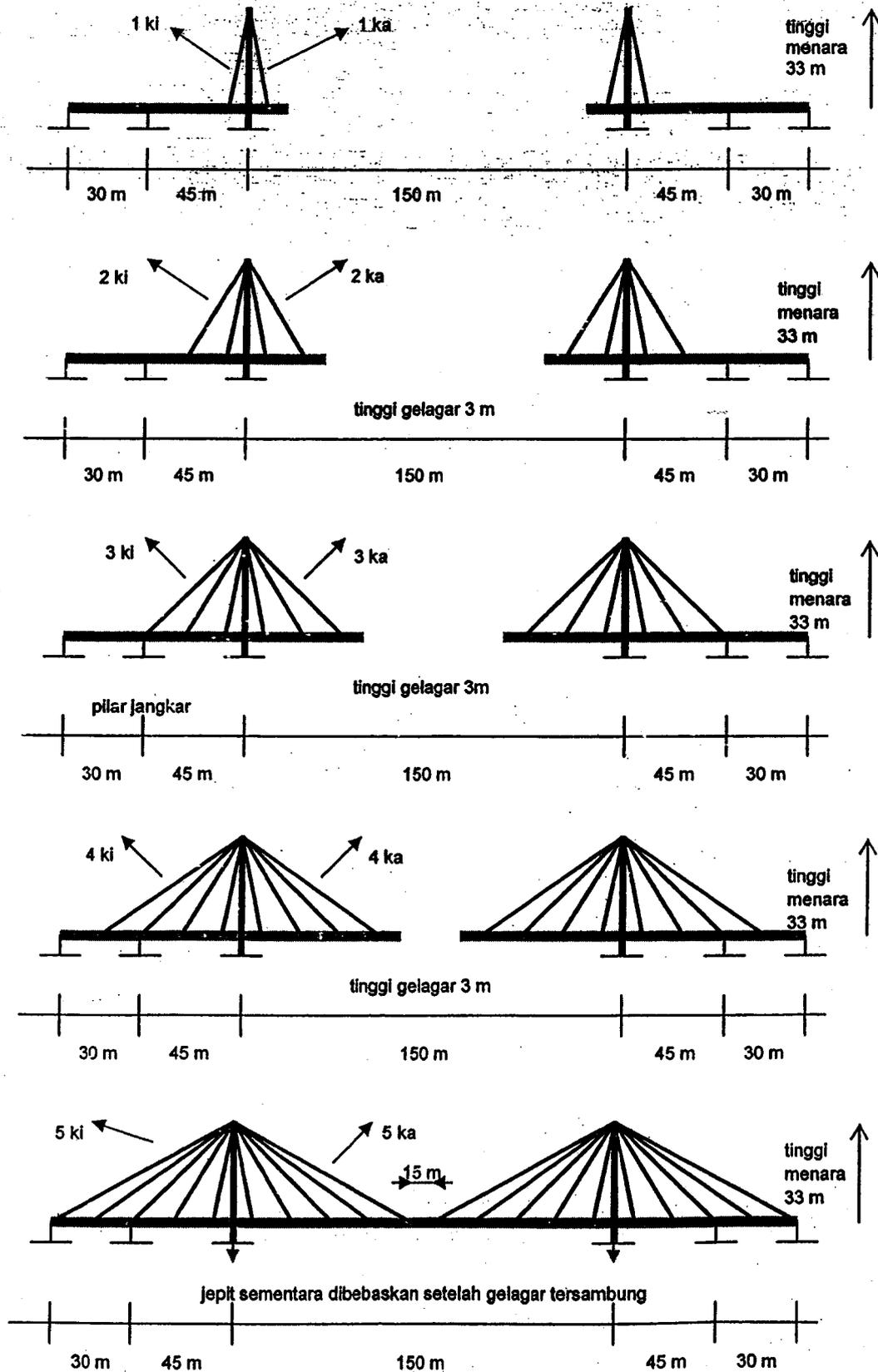
Gambar A.5 - Skema pengukuran deformasi struktur pada masa konstruksi

Tabel A.1 - Lendutan teoritis akibat berat sendiri gelagar pada penarikan awal kabel stay secara bertahap sesuai skema

Urutan Tahap Penarikan	Waktu (menit)	Lendutan (mm)	Defleksi (mm)	Waktu (menit)	Waktu (menit)	No. Tahap
1	15	+3.8	-48	260	200	1
2	27.5	-20	-60	320	250	2
3	40	-47	-72	500	280	3
4	52.5	-98	-66	560	440	4
5	67.5	-184	-74	770	325	5
6 (segmen akhir)	75 (tengah bentang)	-256	-56			

Tabel A.2 - Lendutan pelaksanaan akibat berat sendiri gelagar pada penarikan awal kabel stay secara bertahap sesuai skema

Urutan Tahap Pelaksanaan	Waktu (menit)	Lendutan (mm)	Defleksi (mm)	Waktu (menit)	Waktu (menit)	No. Tahap
1	15	+3.0	-45	261	205	1
2	27.5	-24	-55	330	258	2
3	40	-50	-68	510	300	3
4	52.5	-103	-60	565	443	4
5	67.5	-190	-75	778	330	5
6 (segmen akhir)	75 (tengah bentang)	-259	-55			



Gambar A.6 - Tahapan pemasangan bentang utama dan penarikan kabel stay

Bibliografi

- BD 49/01, *Design Rules for Aerodynamic Effects on Bridges*
- H Wenzel, Northern Gate Book CO. Ltd, 1998, *Cable Stayed Bridges, History, Design Application*
- Honshu Shikoku Bridge Authority, Agustus 2001, *Wind Resistant Design Standard for Honshu-Shikoku Bridges.*
- http://bridgepros.com/learning_center/cable-stayed.htm
- Kawashima, Kazuhiko, and Unjoh, Sigeki and Tsunomoto Meguru. 1991. *Damping Characteristics of Cable Stayed Bridges for Seismic Design*, Journal of Research, Public Works Research Institute, Japan.
- Max Irvine, 1992, *Cable Structures*, Dover Publications New York.
- M S Troitsky, *Cable-Stayed Bridges, Theory and Design, 2nd ed.*
- Niels Jimsing, *Cable Supported Bridges, Concept and Design.*
- Permen PU Peta Gempa Indonesia Tahun 2010
- Reynold, Monang S. dan Vaza, Herry. 2006. *Optimalisasi Desain Kabel Jembatan Cable-Stayed*
- RSNI T-02-2005, *Pembebanan untuk Jembatan.*
- RSNI T-03-2005, *Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan.*
- RSNI T-12-2004, *Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan.*
- Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan – Divisi 7, Struktur.
- SNI 03-1725-1989, Tata cara pembebanan perencanaan jembatan jalan raya
- SNI 03-3446-1994, Tata cara perencanaan teknis pondasi langsung untuk jembatan
- SNI 03-3447-1994, Tata cara perencanaan teknis pondasi sumuran untuk jembatan
- SNI 03-6747-2002, Tata cara perencanaan teknis pondasi tiang untuk jembatan
- Walther, Rene and Houriet, Bernard and Isler, Walmar and Moia, Pierre. 1988. *Cable Stayed Bridges*, Thomas Telford, London

Daftar nama dan lembaga

1. Pemrakarsa

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

2. Penyusun

Nama	Lembaga
Ir. Setyo Hardono, MT	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Rully Ranastra, ST.,MT	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Gatot Sukmara, ST	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Sam Randa, ST	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 23 April 2015

MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT,



M. BASUKI HADIMULJONO