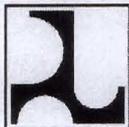


**SURAT EDARAN MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT
NOMOR : 08/SE/M/2015
TANGGAL 23 APRIL 2015**

TENTANG

**PEDOMAN PERENCANAAN TEKNIS 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 : 08/SE/M/2015**

TENTANG

PEDOMAN PERENCANAAN TEKNIS JEMBATAN BERUJI KABEL

A. Umum

Pedoman ini menetapkan perencanaan teknis jembatan beruji kabel yang 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 perencanaan teknis jembatan beruji kabel.

D. Ruang Lingkup

Pedoman ini menetapkan ketentuan mengenai dasar-dasar perencanaan jembatan beruji kabel meliputi : *layout* jembatan, sistem elemen struktur jembatan, pembebanan, persyaratan ketahanan terhadap gempa dan angin, permodelan analisis struktur dan tahapan perencanaan. Aspek-aspek yang dibahas meliputi prinsip-prinsip yang berkaitan dengan metode pelaksanaan, kontrol konstruksi, inspeksi pada tahap konstruksi.

E. Penutup

Ketentuan lebih rinci mengenai Pedoman Perencanaan Teknis 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.

LAMPIRAN
SURAT EDARAN MENTERI PEKERJAAN
UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
NOMOR : 08/SE/M/2015
TENTANG
PEDOMAN PERENCANAAN TEKNIS
JEMBATAN BERUJI KABEL

PEDOMAN

Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil

Perencanaan teknis jembatan beruji kabel



**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT**

Daftar isi

| | |
|---|----|
| Daftar isi | i |
| Prakata | iv |
| Pendahuluan | v |
| 1 Ruang lingkup | 1 |
| 2 Istilah dan definisi | 1 |
| 3 Jembatan beruji kabel | 4 |
| 3.1 Pendahuluan | 4 |
| 3.2 Keadaan batas jembatan beruji kabel | 4 |
| 4 Persyaratan umum perencanaan | 6 |
| 4.1 Lokasi jembatan | 6 |
| 4.2 Elevasi dan ruang bebas | 7 |
| 4.3 Konfigurasi bentangan jembatan | 7 |
| 4.4 Konfigurasi ruji kabel | 7 |
| 4.4.1 Konfigurasi ruji kabel arah melintang | 7 |
| 4.4.2 Konfigurasi ruji kabel arah memanjang | 8 |
| 4.4.3 Jarak ruji kabel dalam arah memanjang | 9 |
| 4.5 Pengangkuran pada menara dan dek jembatan | 9 |
| 4.6 Sistem lantai (<i>bridge deck</i>) | 12 |
| 4.6.1 Bentuk | 12 |
| 4.6.2 Tinggi gelagar jembatan | 15 |
| 4.6.3 Berat dek jembatan | 16 |
| 4.6.4 Bentuk dek jembatan dan stabilitas aerodinamik | 16 |
| 4.7 Menara | 17 |
| 4.7.1 Bentuk menara | 17 |
| 4.8 Ruji kabel | 18 |
| 4.8.1 Jenis ruji kabel | 18 |
| 4.8.2 Angkur kabel | 19 |
| 4.8.3 Proteksi kabel | 21 |
| 4.9 Fondasi jembatan | 21 |
| 4.10 Tipe hubungan jembatan beruji kabel | 21 |
| 4.11 Elemen pelengkap jembatan beruji kabel | 22 |
| 5 Persyaratan khusus jembatan beruji kabel | 24 |
| 5.1 Persyaratan kekakuan | 24 |
| 5.2 Persyaratan penarikan kabel | 24 |
| 5.3 Tekuk/ <i>Buckling</i> pada menara dan $P-\Delta$ <i>Effect</i> | 25 |
| 5.4 Metode pelaksanaan dan beban pelaksanaan | 25 |
| 5.5 Durabilitas struktur | 25 |
| 5.6 Kelelahan bahan | 25 |
| 5.7 Persyaratan pemeriksaan minimum | 25 |

| | | |
|--------|---|----|
| 6 | Survei dan investigasi..... | 26 |
| 7 | Aksi atau pembebanan..... | 26 |
| 7.1 | Gaya putus/ <i>rupture</i> statis pada ruji kabel..... | 27 |
| 7.2 | Pemeliharaan kondisi ruji kabel..... | 27 |
| 7.3 | Gaya putus/ <i>rupture</i> dinamik ruji kabel..... | 27 |
| 7.4 | Kombinasi pembebanan..... | 28 |
| 7.4.1 | Kombinasi pada keadaan batas daya layan (KBL)..... | 28 |
| 7.4.2 | Kombinasi pada keadaan batas daya ultimit..... | 30 |
| | Kombinasi beban ultimit yang umum digunakan adalah sebagaimana disajikan pada Tabel 7 berikut: 30 | |
| 8 | Ketahanan terhadap gempa..... | 30 |
| 9 | Kestabilan terhadap beban angin dinamik..... | 31 |
| 9.1 | Fenomena aerodinamik..... | 31 |
| 9.2 | Persyaratan perencanaan kestabilan terhadap angin dinamik..... | 32 |
| 9.3 | Kecepatan angin dasar, kecepatan angin rencana, dan kecepatan angin pemeriksaan 32 | |
| 9.4 | Pendekatan stabilitas aerodinamik..... | 33 |
| 9.5 | Pengujian di terowongan angin..... | 33 |
| 9.6 | Redaman struktur (<i>logarithmic decreament</i>)..... | 34 |
| 9.7 | Stabilitas ruji kabel..... | 34 |
| 10 | Urutan perencanaan..... | 36 |
| 10.1 | Permodelan dan tahapan analisis..... | 36 |
| 10.2 | Analisis 2-D..... | 37 |
| 10.3 | Analisis 3-D..... | 38 |
| 10.4 | Analisis tahapan pelaksanaan..... | 38 |
| 11 | Pra rencana jembatan beruji kabel..... | 39 |
| 11.1 | Pra dimensi kabel..... | 39 |
| 11.1.1 | Tipe kipas..... | 39 |
| 11.1.2 | Tipe harpa..... | 41 |
| 11.2 | Pra rencana dimensi menara..... | 42 |
| 11.2.1 | Tipe kipas/ <i>fan</i> | 42 |
| 11.2.2 | Tipe harpa..... | 43 |
| 12 | Pendekatan desain dinamis..... | 44 |
| 12.1 | Metode pendekatan untuk menghitung frekuensi alamiah..... | 44 |
| 12.2 | Rumus eksperimental frekuensi alamiah struktur berdasarkan nilai lendutan statik akibat berat sendiri..... | 46 |
| 12.3 | Rumus eksperimental frekuensi alamiah struktur jembatan beruji kabel..... | 47 |
| | Lampiran A | |
| | (informatif) | 48 |
| A.1. | Contoh kasus: Pra dimensi ruji kabel..... | 48 |
| A.2. | Contoh kasus: Gaya aktual awal dan gaya akhir pada jembatan beruji kabel..... | 49 |

| | |
|---|----|
| A.3. Contoh kasus : Frekuensi alamiah dasar jembatan beruji kabel | 50 |
| A.4. Contoh kasus : Kerentanan jembatan terhadap angin dinamik | 51 |
| Bibliografi..... | 52 |
| | |
| Gambar 1 - Contoh tipikal untuk tiga karakteristik jembatan beruji kabel..... | 5 |
| Gambar 2 - Jembatan Pasupati, bentang utama 106 m dan total 161 m, menara dan gelagar dari beton, prinsip kabel kaku | 6 |
| Gambar 3 - Jembatan dengan kabel satu bidang (c, d) dan dua bidang (a, b) | 8 |
| Gambar 4 - Pengaturan kabel jembatan beruji kabel | 8 |
| Gambar 5 - Alternatif pengangkuran pada menara (a), (b), (c)..... | 10 |
| Gambar 6 - Alternatif pengangkuran pada menara (d) & (e) (lanjutan)..... | 11 |
| Gambar 7 - Lokasi angkur pada dek jembatan..... | 12 |
| Gambar 8 - Gelagar jembatan dengan rangka pengaku | 13 |
| Gambar 9 – Gelagar jembatan dengan <i>solid web</i> beton | 14 |
| Gambar 10 - Gelagar jembatan dengan <i>solid web</i> baja | 15 |
| Gambar 11 - Bentuk dasar menara jembatan beruji kabel | 17 |
| Gambar 12 - Tipe-tipe ruji kabel..... | 19 |
| Gambar 14 - Bagan alir proses perencanaan jembatan beruji kabel | 23 |
| Gambar 15 - Bagan alir perencanaan ketahanan terhadap angin dinamik | 35 |
| Gambar 16 - Skema pembebanan di atas lantai kendaraan yang diterima oleh kabel dan menara | 36 |
| Gambar 17 - Konfigurasi beban hidup | 37 |
| Gambar 18 - Notasi gaya pada kabel jembatan beruji kabel | 40 |
| Gambar 19 - Notasi gaya pada kabel angkur..... | 40 |
| Gambar 20 - Kasus gelagar kaku | 41 |
| Gambar 21 - Kasus menara kaku | 42 |
| Gambar 22 - Gaya di puncak menara jembatan beruji kabel tipe harpa..... | 43 |
| Gambar 23 - Variasi dimensi menara jembatan beruji kabel tipe harpa | 43 |
| Gambar 24 - Penentuan nilai K..... | 46 |
| | |
| Gambar A. 1 - Konfigurasi jembatan beruji kabel..... | 48 |
| Gambar A. 2 - Contoh aktual gaya awal vs gaya akhir kabel <i>stay</i> keadaan batas layan, urutan penarikan dari 1-5 sesuai pelaksanaan bentang utama secara kantilever, kabel 5 ka dan 1 ki mudah melepas..... | 50 |
| Gambar A. 3 - Pengujian beban-getar prototipe jembatan <i>Bailey</i> modifikasi kabel..... | 50 |
| | |
| Tabel 1 - Jenis-jenis kabel | 18 |
| Tabel 2 - Fasilitas pelengkap jembatan..... | 22 |
| Tabel 3 - Survei dan investigasi pada perencanaan jembatan beruji kabel | 26 |
| Tabel 4 - Klasifikasi aksi beban..... | 27 |
| Tabel 5 - Kombinasi beban untuk keadaan batas daya layan (KBL) | 28 |
| Tabel 6 - Kombinasi beban untuk keadaan batas kelayakan (KBL) | 29 |
| Tabel 7 - Kombinasi beban untuk keadaan batas ultimit (KBU)..... | 30 |
| Tabel 8 - Persyaratan-persyaratan pada perencanaan tahanan gempa jembatan | 31 |
| Tabel 9 - Tingkat kerentanan jembatan terhadap angin dinamik | 33 |
| Tabel 10 - Skala pengujian di terowongan angin..... | 34 |
| Tabel 11 - Redaman struktur (<i>logarithmic decrement</i>) | 34 |
| Tabel 12 - Faktor K..... | 44 |

Prakata

Pedoman perencanaan 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 91-01/S2 Rekayasa Jalan dan Jembatan melalui Gugus Kerja Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan.

Tata cara penulisan disusun mengikuti Pedoman Standardisasi Nasional (PSN) 08:2007 dan dibahas dalam forum rapat konsensus tanggal 12 September 2012 di Bandung, dengan melibatkan para narasumber, pakar dan lembaga terkait.

Pendahuluan

Jembatan beruji kabel menjadi salah satu alternatif dalam pembangunan jembatan bentang panjang. Ruji kabel adalah kabel eksternal dengan dwi fungsi. Ruji kabel berfungsi sebagai elemen struktur penyangga dalam pemasangan gelagar lantai dengan sistem kantilever bertahap (*construction stages*) dan sebagai elemen utama struktur serta perletakan elastis/pegas atau pilar antara dalam struktur akhir. Jembatan dengan sistem beruji kabel merupakan jembatan yang terdiri dari satu atau lebih menara/menara dengan susunan kabel yang memikul gelagar lantai.

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

Jembatan beruji merupakan struktur statis tak tentu kompleks sehingga disarankan untuk menggunakan perangkat lunak dalam perencanaan dan pemasangan jembatan secara bertahap. Analisis struktur menjaga keseimbangan konfigurasi kabel yang dimonitor mulai tahap pelaksanaan sampai struktur tersambung sempurna.

Perencanaan teknis jembatan beruji kabel

1 Ruang lingkup

Pedoman perencanaan umum jembatan beruji kabel menetapkan ketentuan mengenai dasar-dasar perencanaan jembatan beruji kabel yang meliputi:

- a. *Layout* jembatan
- b. Sistem elemen struktur jembatan
- c. Pembebanan
- d. Persyaratan ketahanan terhadap gempa dan angin
- e. Pemodelan analisis struktur
- f. Tahapan perencanaan

2 Istilah dan definisi

Untuk tujuan penggunaan pedoman ini, istilah dan definisi berikut digunakan.

3.1

aksi lingkungan

pengaruh yang timbul akibat temperatur, angin, aliran air, gempa dan penyebab-penyebab alamiah lainnya

3.2

aksi nominal

nilai beban rata-rata berdasarkan statistik untuk periode ulang 50 tahun

3.3

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 pada kabel pada setiap tahapan konstruksi

3.4

analisis *forward construction sequence*

analisis yang bertujuan untuk membangun model analisis sesuai dengan urutan pemasangan girder dan penarikan kabel untuk mendapatkan gaya dalam dan lendutan/perpindahan

3.5

angkur ruji kabel

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

3.6

buffeting

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

3.7

cross beam

elemen jembatan dalam arah melintang antar girder jembatan

3.8

flutter

amplitudo getaran yang terus membesar/divergen pada dek jembatan akibat damping negatif yang disebabkan oleh gaya aerodinamik dan dapat mengakibatkan keruntuhan jembatan

3.9

gaya putus statis

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

3.10

gelagar lantai

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

3.11

girder

gelagar utama dari jembatan dalam arah memanjang

3.12

jembatan beruji kabel

jembatan yang terdiri dari satu atau lebih menara/menara dengan susunan kabel yang memikul gelagar lantai

3.13

kabel damper

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

3.14

kawat baja jalinan tujuh/ 7-wire strand

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

3.15

kabel angkut (*back stay*)

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

3.16

kabel utama (*main stay*)

ruji kabel pemikul di bentang utama

3.17

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

3.18

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

3.19

kecepatan angin flutter kritis / *critical flutter wind speed*

kecepatan angin terendah ketika *flutter* yang mempunyai jenis getaran bersifat divergen terjadi pada jembatan

3.20

lock up device

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

3.21

modular expansion joint

bagian atas jembatan yang menyatukan segmen-segmen gelagar jembatan

3.22 perletakan elastis/pegas

hubungan kabel pada gelagar yang berfungsi sebagai pilar antara semu

3.23

menara (*pylon*)

bagian yang menerima gaya atau beban dari kabel dan meneruskannya ke fondasi

3.24

ruji kabel

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

3.25

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

3.26

stabilitas aerodinamik

kinerja jembatan beruji kabel akibat pengaruh angin dinamik

3.27

strand

untaian benang baja prategang

3.28

transverse limit-stop block

bagian atas jembatan yang menyatukan antara menara dan gelagar jembatan

3.29

verifikasi kecepatan angin flutter / *verification flutter wind speed*

kecepatan angin ketika *flutter* yang mempunyai jenis getaran bersifat divergen akan diverifikasi. Jika kecepatan angin kritis lebih besar dari kecepatan angin pemeriksaan, maka struktur dinyatakan aman

3.30

vortex shedding

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

3 Jembatan beruji kabel

3.1 Pendahuluan

Jembatan beruji kabel adalah struktur yang mempunyai sederetan kabel lurus dan memikul elemen horizontal kaku (berupa balok, rangka, atau boks). Jembatan beruji kabel terdiri dari sistem struktur berupa gelagar menerus yang didukung oleh tumpuan berupa kabel yang di bentang miring dan dihubungkan ke menara sebagai penahan utama.

Pada setiap tahapan konstruksi jembatan beruji kabel, 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.

Perpindahan dari puncak menara harus diusahakan sekecil mungkin dan masih dalam toleransi. Demikian pula dengan lendutan pada lantai jembatan. Dengan dicapainya lendutan yang kecil maka bidang momen dari gelagar jembatan menjadi optimum dan sedapat mungkin dapat dicapai kondisi momen positif hampir sama dengan momen negatif pada setiap peralihan tumpuan kabel. Kondisi tersebut di atas dicapai dengan mengaplikasikan gaya pratekan secara bertahap pada kabel. Sehingga pada jembatan dengan sistem beruji kabel, metode konstruksi akan menentukan tahapan analisis.

Jembatan beruji kabel modern menyajikan suatu sistem tiga dimensi. Secara umum, gelagar dapat terbuat dari boks beton, struktur baja atau struktu komposit. Menara jembatan dapat terbuat dari beton dan baja. Karakteristik yang penting dari struktur tiga dimensi adalah keikutsertaan konstruksi melintang untuk bekerja bersama-sama, sehingga akan dapat meningkatkan momen inersia dan dapat mereduksi tinggi geleagar jembatan.

Pada umumnya elemen utama jembatan beruji kabel terdiri atas gelagar, kabel, dan menara. Masing-masing elemen mempunyai berbagai variasi tipe dan bentuk sesuai fungsinya yang diinginkan. Setiap komponen jembatan beruji kabel saling berhubungan satu sama lain. Kabel memikul beban dari gelagar yang menahan jalan raya beserta lalu lintasnya. Beban dari kabel tersebut selanjutnya ditransfer ke menara dan dilimpahkan ke fondasi jembatan.

3.2 Keadaan batas jembatan beruji kabel

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

a) Gelagar lantai sangat kaku

Jembatan beruji kabel dengan gelagar lantai sangat kaku yang memiliki jumlah kabel terbatas sebagai perletakan elastis dimana tidak mungkin dibangun pilar sebagaimana disajikan pada Gambar 1(a). Karakteristik jembatan serupa dengan sistem jembatan *ekstra-dosed*. Menara yang digunakan relatif langsing dan tidak perlu tinggi karena hanya memikul momen lentur kecil.

b) Menara sangat kaku

Jembatan beruji kabel dengan menara sangat kaku memiliki karakteristik dimana menara yang sangat kaku tersebut akan memikul momen arah memanjang sebagaimana disajikan pada Gambar 1(b). Gelagar lantai jembatan relatif langsing dengan jarak antar kabel yang berdekatan. Gelagar tersebut terutama memikul momen dalam arah melintang.

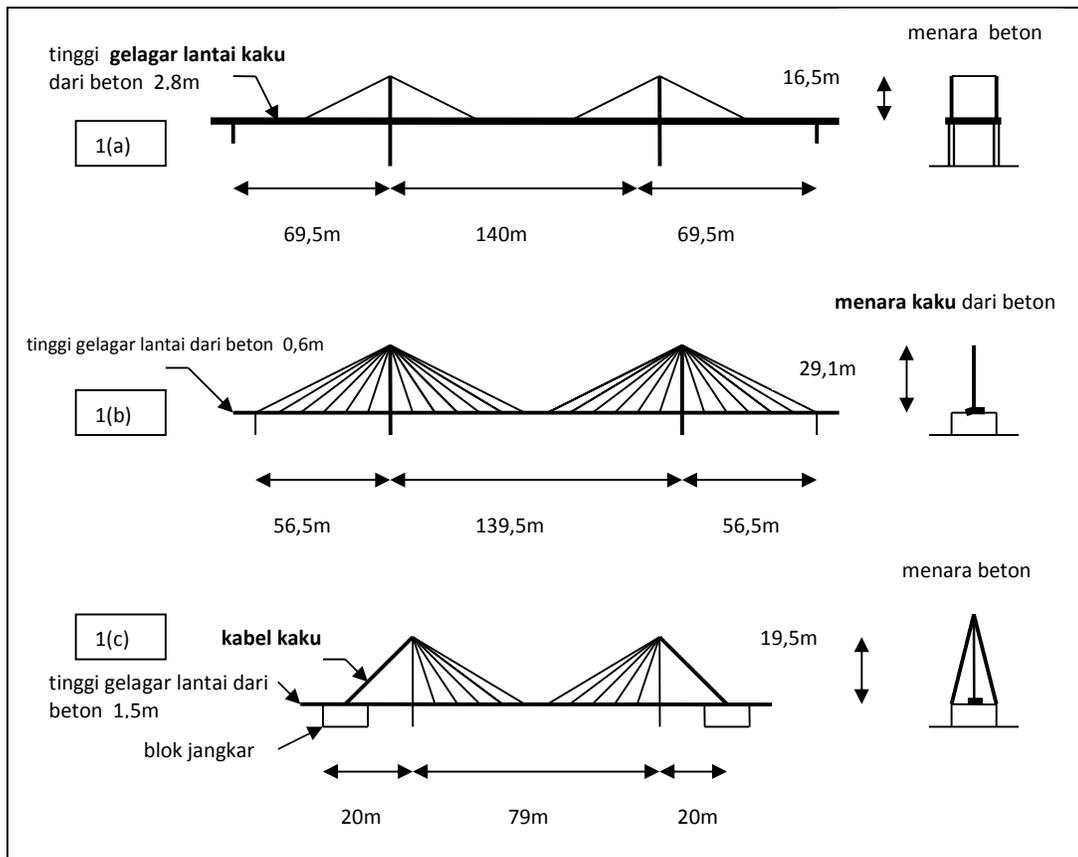
c) Kabel sangat kaku

Jembatan beruji besi dengan kabel yang sangat kaku menggunakan ruji sebagai elemen stabilitas struktural sebagaimana disajikan pada Gambar 1. Bentang samping umumnya dibuat lebih pendek dari setengah bentang utama agar kabel angkur tidak kehilangan gaya tarik, dan sering digunakan blok angkur/pilar angkur. Blok atau pilar angkur

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.

Terdapat banyak kemungkinan konfigurasi dari jembatan beruji kabel dengan jenis salah satu atau kombinasi dari tiga karakteristik di atas.

Salah satu parameter awal dalam perencanaan jembatan beruji kabel adalah penentuan rasio kelangsingan h/L (tinggi gelagar lantai terhadap bentang utama) yang berkisar antara $1/50$ -- $1/100$. Dapat juga digunakan menara yang lebih tinggi untuk mereduksi kebutuhan tinggi gelagar lantai jembatan.



Gambar 1 - Contoh tipikal untuk tiga karakteristik jembatan beruji kabel

Salah satu contoh penerapan teknologi jembatan beruji kabel adalah jembatan Pasupati, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 - Jembatan Pasupati, bentang utama 106 m dan total 161 m, menara dan gelagar dari beton, prinsip kabel kaku

4 Persyaratan umum perencanaan

4.1 Lokasi jembatan

Pemilihan lokasi jembatan harus mempertimbangkan aspek ekonomis, teknis dan kondisi lingkungan antara lain:

- a) Lokasi jembatan dipilih pada jarak terpendek antara 2 lokasi;
- b) Pilih lokasi dengan kondisi fondasi yang baik untuk menahan kepala jembatan;
- c) Kondisi tanah sebagai pendukung fondasi jembatan dan kedalaman dasar laut dapat menentukan lokasi penempatan pilar yang akan mempengaruhi juga pemilihan sistem konstruksi jembatan;
- d) Biaya pembuatan jembatan harus seoptimum mungkin;
- e) Mudah untuk proses pemasangan dan perawatan;
- f) Mudah diakses dan memberikan keuntungan untuk masyarakat yang akan menggunakannya;
- g) Berada pada daerah yang memiliki resiko minimal terhadap erosi aliran sungai;
- h) Jembatan harus berada pada bagian lurus dari sungai atau arus, jauh dari cekungan tempat erosi dapat terjadi;
- i) Lokasi harus sedekat mungkin dengan jalan masuk yang ada atau lintasan lurus;
- j) Akan sangat membantu bila terdapat penyedia material setempat yang mungkin digunakan dalam konstruksi seperti pasir dan batu;
- k) Kondisi kontur yang memungkinkan untuk membangun jembatan;
- l) Kondisi geologi.

4.2 Elevasi dan ruang bebas

Elevasi jembatan dipengaruhi oleh ketinggian muka air serta alur pelayaran yang ada di bawah jembatan. Harus tersedia ruang bebas yang memadai di atas muka air banjir.

Jika sungai atau laut yang memisahkan kedua sisi daratan adalah merupakan alur pelayaran, harus dihindari terjadinya hambatan terhadap lalu lintas kapal di alur pelayaran tersebut. Penentuan lebar dan tinggi ruang bebas di bawah jembatan harus memperhatikan lalu lintas yang menggunakan sungai atau laut tersebut.

4.3 Konfigurasi bentangan jembatan

Pemilihan sistem konstruksi jembatan harus mempertimbangkan agar lokasi pilar/menara di sungai/laut tidak mengganggu alur pelayaran.

Kondisi tanah sebagai pendukung fondasi jembatan dan kedalaman dasar laut dapat menentukan lokasi penempatan pilar/menara yang akan mempengaruhi juga pemilihan sistem konstruksi jembatan. Maka pelaksanaan pemancangan sebaiknya dilakukan dengan jumlah yang sesedikit mungkin. Dalam hal ini pemilihan bentang jembatan menjadi faktor yang penting.

Estetika bentuk jembatan yang dipilih juga harus serasi dengan alam lingkungannya.

Hal lain yang harus dipertimbangkan karena adanya kondisi yang mempengaruhi pemilihan sistem struktur jembatan yang menghubungkan kedua sisi daratan adalah jika sungai atau laut yang memisahkan kedua sisi daratan adalah merupakan alur pelayaran sehingga selama pembangunan pilar jembatan harus dihindari terjadinya hambatan terhadap lalu lintas kapal di alur pelayaran.

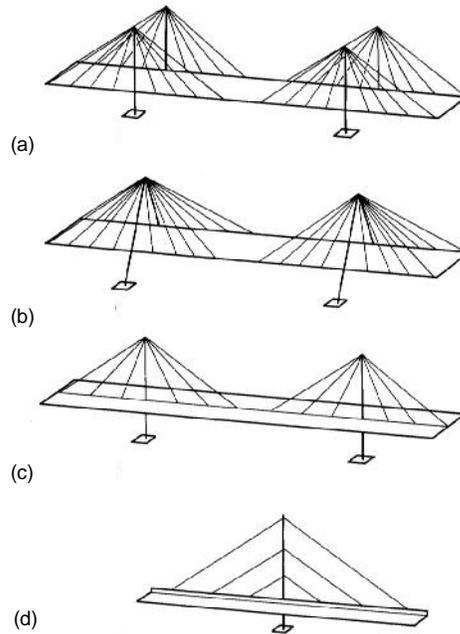
4.4 Konfigurasi ruji kabel

4.4.1 Konfigurasi ruji kabel arah melintang

Berkaitan dengan bidang penempatan kabel, umumnya digunakan 3 alternatif jumlah bidang kabel yaitu:

- a) Satu bidang/ *singe plane*;
- b) Dua bidang;
- c) Tiga atau lebih bidang.

Kabel satu bidang digunakan untuk jembatan dengan lebar yang relatif kecil serta jumlah lajur lalu lintas yang genap (lihat Gambar 3). Jembatan beruji kabel dengan jumlah bidang kabel tiga atau lebih, biasanya digunakan untuk jembatan dengan lantai yang sangat lebar. Tipe jembatan dengan jumlah bidang kabel tiga atau lebih ini jarang digunakan. Namun, karena jumlah bidang yang banyak maka memiliki keunggulan yaitu bermanfaat untuk mengurangi gaya dalam penampang kabel.

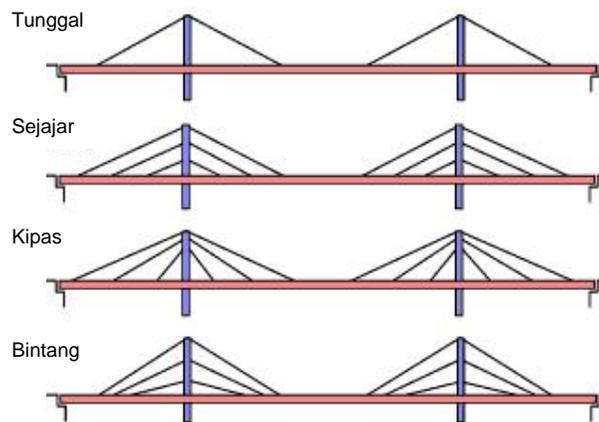


Gambar 3 - Jembatan dengan kabel satu bidang (c, d) dan dua bidang (a, b)

4.4.2 Konfigurasi ruji kabel arah memanjang

Kabel yang digunakan memencar dari menara, ke sisi luar dan dalam jembatan. Pemencaran kabel dari puncak menara dapat dipilih beberapa cara pengaturan letak kabel arah memanjang jembatan, antara lain seperti ditampilkan pada Gambar 4 di bawah ini.

- a) Kabel Tunggal (*Mono*);
- b) Bentuk Sejajar (*Harp*);
- c) Bentuk Kipas (*Fan*);
- d) Bentuk Bintang (*Star*).



Gambar 4 - Pengaturan kabel jembatan beruji kabel

Bentuk radial seperti bentuk tunggal dan kipas (Gambar 4) akan mengakibatkan angkur dan kabel di puncak menara berada pada satu elevasi sehingga akan bertumpuk dan memerlukan pelebaran kepala menara. Pada bentuk radial seperti bentuk tunggal dan kipas (Gambar 4), Pemeliharaan angkur kabel akan lebih sulit dilakukan karena kabel bertemu pada satu titik di puncak menara.

Bentuk sejajar akan memerlukan menara yang sangat tinggi dan struktur yang lebih berat. Bentuk bintang umumnya digunakan untuk bentang jembatan beruji kabel yang tidak panjang.

Letak kabel yang membentuk sudut terhadap garis horizontal dengan memanjang dan melintang jembatan akan memberikan komponen gaya kabel pada tiga arah, yaitu arah vertikal, memanjang dan melintang terhadap jembatan.

4.4.3 Jarak ruji kabel dalam arah memanjang

Jumlah ruji kabel dan jarak antar ruji kabel menentukan besarnya gaya yang terjadi pada kabel. Semakin sedikit jumlah kabel yang digunakan maka semakin besar gaya yang terjadi pada kabel sehingga membuat sistem pengangkuran menjadi lebih rumit serta daerah yang harus diperkuat pada dek jembatan menjadi makin lebar. Penggunaan jumlah kabel yang banyak dan rapat akan menyederhanakan sistem pengangkuran dan dapat mengurangi kebutuhan tinggi dek jembatan.

Jarak antar ruji kabel juga dapat berkurang dari arah menara ke tengah bentang agar gaya kabel lebih seragam. Perhatian khusus diberikan kepada kabel yang terhubung dengan kepala jembatan dan pilar, karena diperlukan gaya yang besar pada kabel untuk menahan perpindahan menara.

Jarak antar ruji kabel yang umum digunakan adalah:

- a) Dek jembatan yang terbuat dari baja atau material komposit, jarak antar ruji kabel adalah 15 meter -- 25 meter;
- b) Pada dek jembatan beton, jarak antar ruji kabel adalah 5 m -- 10 m.

Untuk panel tengah, ketika segmen dek jembatan tidak mengalami gaya tekan akibat inklinasi kabel, dimungkinkan untuk menggunakan panjang segmen yang lebih besar. Umumnya jarak kabel pada segmen tengah diambil 20 % -- 30 % lebih besar dibandingkan segmen yang lain.

Dari sisi desain, penggunaan banyak ruji kabel mempunyai keuntungan sebagai berikut:

- a) Ruji kabel berfungsi sebagai perletakan elastis/pegas dengan jumlah banyak yang akan mereduksi lentur memanjang dalam lantai selama pelaksanaan dan setelah jembatan beroperasi, sehingga pelaksanaan secara segmental kantilever bebas menjadi ekonomis tanpa ada keperluan penyangga tambahan;
- b) Penampang ruji kabel lebih kecil dibandingkan struktur dengan kabel terkonsentrasi sehingga mempermudah pemasangan dan pengangkuran kabel;
- c) Penggantian ruji kabel yang relatif mudah, menjadi alternatif terhadap cara perlindungan kabel terhadap korosi.

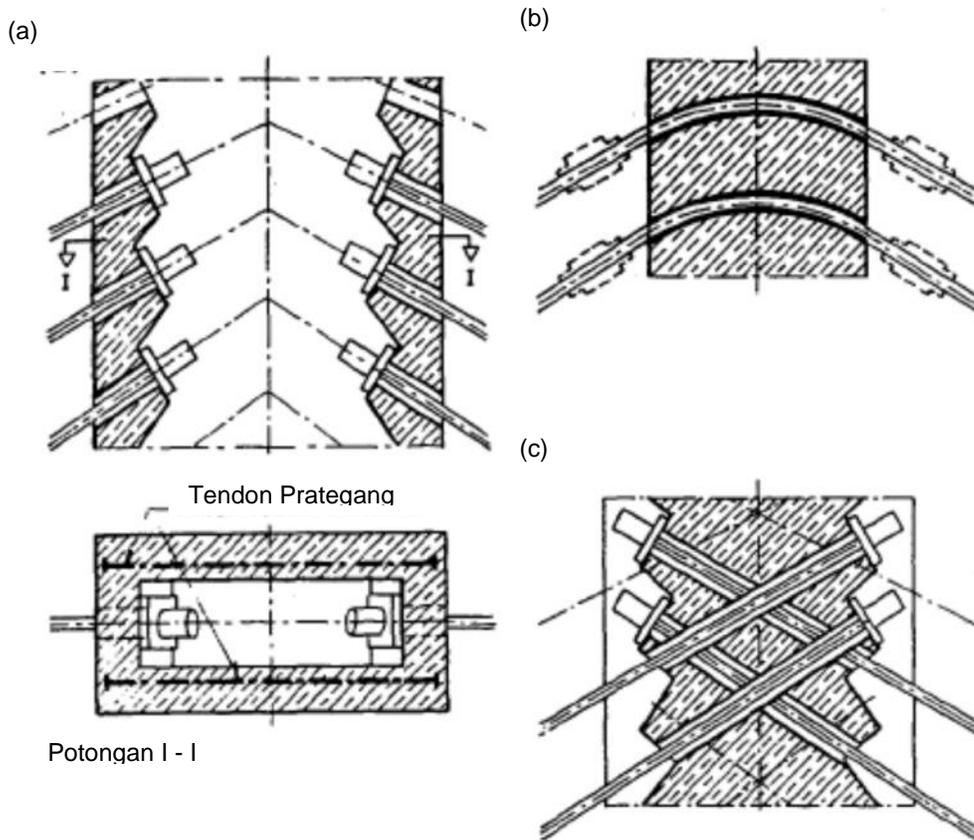
4.5 Pengangkuran pada menara dan dek jembatan

Dari menara, ruji kabel akan memancar ke arah bentang utama jembatan (*main span*) pada masing-masing sisi jembatan dan jumlah yang sama ke arah bentang samping jembatan (*side span*). Ruji kabel tersebut dipasang dengan angkur di sisi atas di kepala menara dan di sisi bawah di balok tepi lantai kendaraan. *Stressing* atau penarikan kabel dilakukan pada angkur hidup yang umumnya terletak di sisi atas, yaitu di kepala menara.

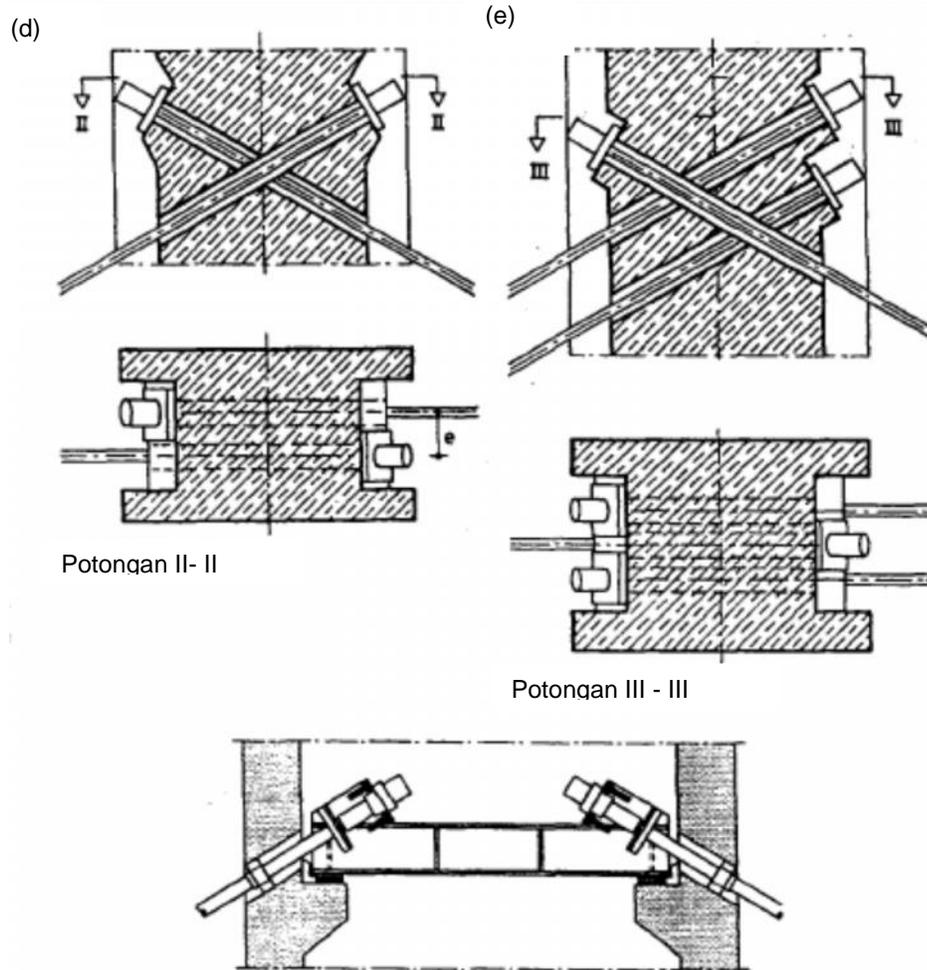
a) Pengangkuran pada menara.

Bagian dari kabel yang masuk ke dalam menara ditempatkan di dalam suatu pipa pengarah / *guide pipe* dari konstruksi baja menembus dari sisi *main span* ke sisi *side span* dan sebaliknya. Ada beberapa alternatif pengangkuran pada menara sebagaimana disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6 di bawah.

Perencana harus memperhitungkan aspek kemudahan pelaksanaan dalam penarikan kabel.



Gambar 5 - Alternatif pengangkuran pada menara (a), (b), (c)



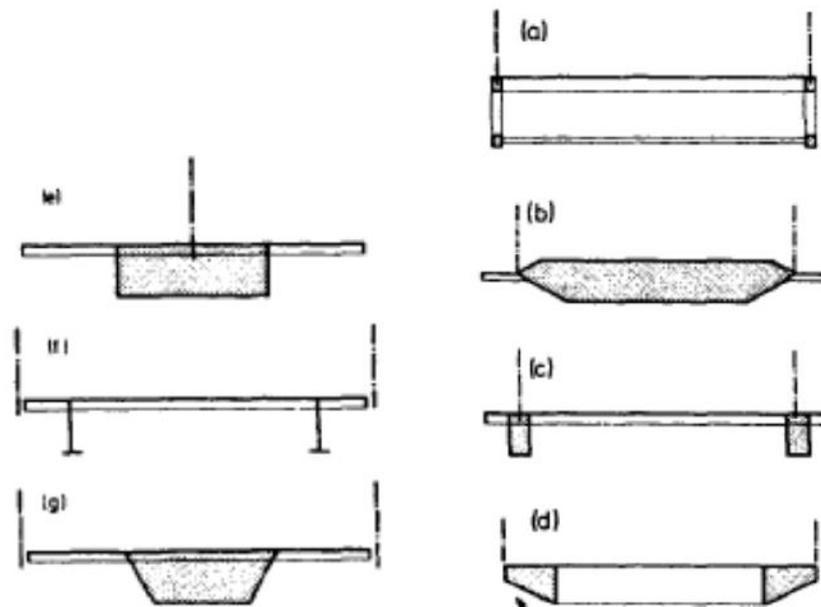
Gambar 6 - Alternatif pengangkuran pada menara (d) & (e) (lanjutan)

Penarikan / *stressing* kabel dilakukan dari kepala menara dan angkur di balok tepi hanya merupakan angkur mati. Hal ini akan lebih menguntungkan karena alat *jacking* untuk *stressing* kabel hanya di sekitar kepala menara saja.

Pada jembatan beruji kabel kecil/ sederhana, angkur hidup ditempatkan di gelagar agar lebih praktis dalam pelaksanaan penarikan kabel.

b) Pengangkuran pada dek jembatan.

Dalam perencanaan umum jembatan beruji kabel sangat penting untuk memperhatikan aliran dari gaya-gaya. Pada kasus tertentu, ruji kabel dapat diangkurkan langsung ke elemen utama dari dek jembatan, sedangkan pada kasus yang lain, angkur diletakkan di luar elemen utama sehingga perlu *bracket* khusus untuk menyalurkan gaya ke elemen utama dek jembatan. Berikut adalah lokasi angkur pada dek jembatan pada Gambar 7.

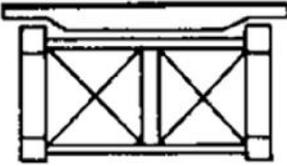
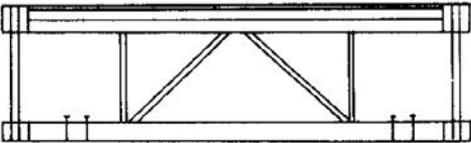
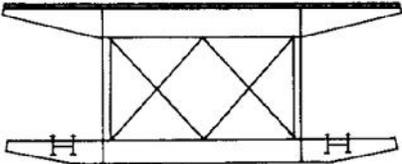


Gambar 7 - Lokasi ankur pada dek jembatan

4.6 Sistem lantai (*bridge deck*)

4.6.1 Bentuk

Bentuk gelagar jembatan beruji kabel sangat bervariasi namun yang paling sering digunakan ada tiga jenis yaitu rangka pengaku baja (Gambar 8), *solid web* beton (Gambar 9) dan *solid web* baja (Gambar 10). Pada awal perkembangan jembatan beruji kabel modern, *stiffening truss* banyak digunakan tetapi saat ini tipe tersebut sudah jarang digunakan karena membutuhkan pabrikasi yang besar, perawatan yang relatif sulit, dan kurang menarik dari segi estetika.

| No | Tipe jembatan | Penampang jembatan |
|----|---------------------------|--|
| 1 | Jalan raya |  |
| 2 | Jalan raya dan kereta api |  |
| 3 | Jalan raya dan kereta api |  |
| 4 | Jalan raya dan kereta api |  |

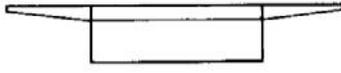
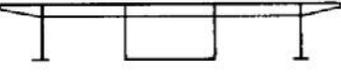
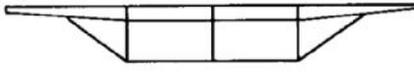
Gambar 8 - Gelagar jembatan dengan rangka pengaku

| No | Komposisi | Penampang Jembatan |
|----|------------------------------------|--------------------|
| 1 | <i>Single Box Girder</i> | |
| 2 | <i>Twin Box Girder</i> | |
| 3 | <i>Twin Box Girder</i> | |
| 4 | <i>Multiple Box Girder</i> | |
| 5 | <i>Twin Trapezoidal Box Girder</i> | |

Gambar 9 – Gelagar jembatan dengan *solid web* beton

Gelagar yang tersusun dari *solid web* yang terbuat dari baja atau beton dapat berupa:

- a) Gelagar pelat (*plate girder*), terdiri atas dua atau banyak gelagar;
- b) Gelagar box (*box girder*), terdiri atas satu atau susunan *box* yang dapat berbentuk persegi panjang atau trapesium;

| No | Komposisi | Penampang Jembatan |
|----|---|--|
| 1 | <i>Twin I Girder</i> |  |
| 2 | <i>Single Rectangular Box Girder</i> |  |
| 3 | <i>Central Box Girder dan Single Single Web Girder</i> |  |
| 4 | <i>Single Twin Cellular Box Girder dan Sloping Struts</i> |  |
| 5 | <i>Single Trapezoidal Box Girder</i> |  |
| 6 | <i>Twin Rectangular Box Girder</i> |  |
| 7 | <i>Twin Trapezoidal Box Girder</i> |  |

Gambar 10 - Gelagar jembatan dengan *solid web* baja

Material struktur atas dapat terbuat dari beton, baja, dan komposit. Struktur atas terbuat dari beton biasanya digunakan untuk bentang sampai dengan 350 meter dengan pertimbangan biaya pelaksanaan yang lebih murah. Untuk bentang yang lebih panjang, pemakaian beton pada gelagar jembatan akan menyebabkan penambahan berat sendiri yang pada akhirnya akan mempengaruhi dimensi elemen jembatan yang lain seperti kabel, menara, dan fondasi. Dengan pertimbangan tersebut, pada bentang yang lebih dari 500 meter umumnya digunakan gelagar jembatan baja. Di antaranya dapat digunakan material komposit baja dan beton. Kelebihan dari struktur komposit tersebut adalah kemudahan dalam hal pelaksanaan pekerjaan.

4.6.2 Tinggi gelagar jembatan

Gelagar jembatan merupakan elemen yang memiliki nilai kekakuan yang dapat menerima beban jembatan terutama kapasitas lentur lantai jembatan. Pengurangan jumlah kabel penggantung dapat mengakibatkan kebutuhan penampang gelagar jembatan semakin besar.

Kekakuan dari gelagar jembatan ditentukan oleh dimensi dari gelagar itu sendiri. Semakin besar penampang gelagar jembatan maka berat sendiri struktur lantai semakin besar.

Untuk mendapatkan nilai optimum antara panjang segmen lantai digunakan perhitungan perbandingan kelangsingan antara tinggi lantai dan panjang antara titik penggantung kabel. Sebagai estimasi awal tinggi gelagar jembatan pada jembatan beruji kabel dapat diambil asumsi rasio kelangsingan antara tinggi dek jembatan dengan bentang utama sebesar $1/50 - 1/70$.

Rasio $1/100$ dapat digunakan pada kasus kabel tepi diangkurkan ke pilar atau kepala jembatan.

4.6.3 Berat dek jembatan

Besaran berikut dapat digunakan sebagai perkiraan awal untuk memperkirakan berat gelagar lantai jembatan beruji kabel:

- Gelagar baja : $2,5 - 3,5 \text{ kN/m}^2$, misalnya boks baja, rangka baja;
- Gelagar komposit baja-beton : $6,5 - 8,5 \text{ kN/m}^2$, misalnya boks dengan *flens* beton dan badan dari komponen rangka baja;
- Gelagar beton : $10,0 - 15 \text{ kN/m}^2$, misalnya boks beton.

Perhitungan berat sendiri mencakup semua batang rangka ditambah perkiraan persentase 30% untuk ikatan pengaku, pelat simpul, sambungan *koppel*, dan baut.

Dalam perhitungan pendekatan, besaran momen inersia dari rangka baja dapat diperhitungkan dengan pengaruh luas batang tepi atas dan batang tepi bawah terhadap garis berat memanjang rata-rata pada pertengahan tinggi rangka. Pengaruh inersia diagonal dan besaran inersia terhadap sumbu sendiri dapat diabaikan.

4.6.4 Bentuk dek jembatan dan stabilitas aerodinamik

Pada Jembatan kabel, salah satu aspek yang harus diperhitungkan dalam perencanaan adalah kestabilan jembatan terhadap angin dinamik. Kestabilan Jembatan terhadap angin dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu

a) Bentuk penampang dek jembatan

Semakin *stream line* atau aerodinamik penampang dek jembatan, maka ia akan lebih stabil. Untuk mengantisipasi bentang yang lebih panjang, dikembangkan menjadi *twin box* atau *triple box*.

b) Kekakuan dek jembatan

Semakin kaku dek jembatan, maka jembatan tersebut akan lebih mampu menahan angin dengan kecepatan yang lebih tinggi.

c) Berat dek jembatan

Semakin berat dek jembatan, maka jembatan tersebut akan semakin stabil, akan tetapi biaya pelaksanaan akan semakin tinggi

d) Keberadaan alat kontrol

Alat tersebut diharapkan berfungsi sebagai *stabilizer* yang akan mengeliminasi pergerakan dek jembatan

Penampang *solid web* diyakini memiliki berat yang lebih kecil dibandingkan penampang berbentuk rangka dengan kinerja terhadap angin yang lebih baik. Sehingga untuk untuk

mengantisipasi bentang yang lebih panjang, penampang berbentuk *streamline box* lebih banyak digunakan.

Aspek penting lainnya dari gelagar jembatan adalah kekakuan torsional. Kekakuan torsional yang baik akan menyebabkan kestabilan yang lebih baik dari jembatan terhadap beban dinamik angin.

4.7 Menara

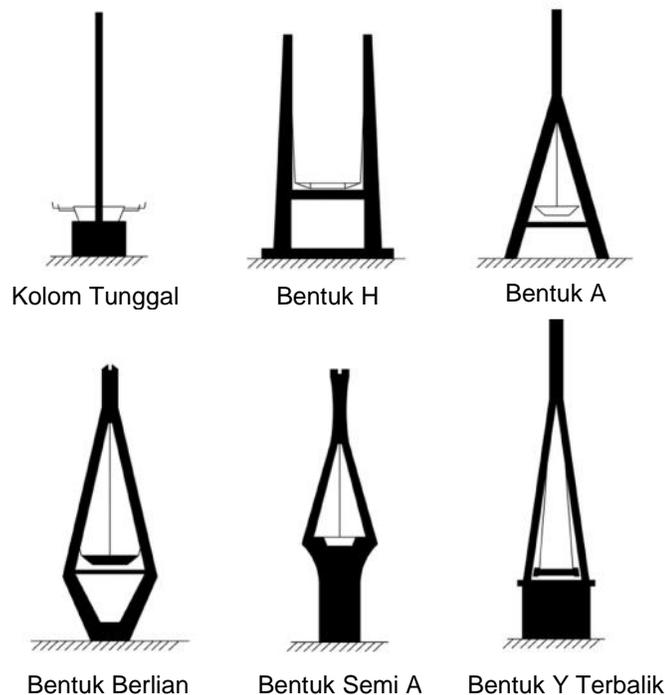
4.7.1 Bentuk menara

Perencanaan menara merupakan hal yang sangat penting dan mendasar yang akan mempengaruhi estetika, keekonomisan serta perilaku struktur dari jembatan. Menara jembatan beruji kabel menahan tekanan tinggi karena memikul hampir semua berat sendiri/tetap dan beban hidup yang berada pada struktur. Menara jembatan umumnya langsing sehingga stabilitas menjadi dominan. Menara akan menerima gaya dari gelagar yang disalurkan melalui kabel.

Secara prinsip, pemakaian beton pada menara mempunyai dasar yang kuat mengingat menara akan mengalami gaya tekan yang besar. Akan tetapi perencanaan menara beton lebih rumit dari menara baja karena memerlukan pemeriksaan analisis tingkat kedua, karena beton mempunyai hubungan perilaku tegangan-regangan yang tidak linear.

Kolom menara yang terdiri dari profil baja yang dibungkus dalam beton umumnya bersifat linear. Untuk kondisi pelaksanaan di Indonesia, lebih aman menggunakan bahan baja atau komposit baja-beton untuk struktur menara.

Bentuk dasar menara jembatan beruji kabel ada beberapa macam, seperti ditampilkan pada Gambar 11 di bawah. Pemilihan bentuk menara ditentukan oleh konfigurasi kabel, bentang jembatan dan aspek estetika.



Gambar 11 - Bentuk dasar menara jembatan beruji kabel

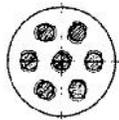
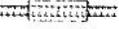
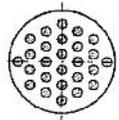
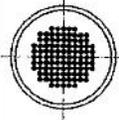
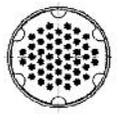
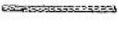
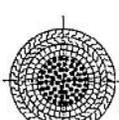
Tinggi menara ditentukan dari beberapa aspek seperti bentang jembatan, *lay-out* kabel, jumlah kabel dan aspek estetika. Sebagai acuan awal dalam penentuan panjang kabel adalah didasarkan dari fungsi bentang utama dan tinggi menara dari elevasi dek jembatan. Rasio antara bentang terpanjang dan tinggi menara dari elevasi gelagar jembatan adalah 0,19 -- 0,25.

4.8 Ruji kabel

4.8.1 Jenis ruji kabel

Tabel 1 di bawah menyajikan jenis-jenis kabel yang digunakan pada jembatan beruji kabel.

Tabel 1 - Jenis-jenis kabel

| Jenis Kabel |  Coupled bars 7 \varnothing 36 Steel 835/1030  |  Uncoupled bars 26 \varnothing 16  |  Parallel wires 128 \varnothing 7  |  Strands 27 \varnothing 15 15 mm  |  Locked-coil cables  |
|--|--|---|---|---|---|
| <i>Tendons</i> | <i>Bars</i> \varnothing 26.5, 32, 36 mm | <i>Bars</i> \varnothing 16 mm | <i>Wire</i> \varnothing 6, 7 mm | <i>Strand</i> \varnothing 0.5, 0.6, 0.7 of 7 twisted wires | <i>Wire with different profiles</i> \varnothing 2 9-7 mm |
| 0.2% proof stress, $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²) | 835 1080 | 1350 | 1470 | 1570 ~ 1670 | - |
| <i>Ultimate tensile strength, β_z</i> (N/mm ²) | 1030 1230 | 1500 | 1670 | 1770 ~ 1870 | 1000 ~ 1300 |
| <i>Fatigue</i> | | | | | |
| $\Delta\sigma$ (N/mm ²) | 80 | - | 350 | 300 ~ 320 | 120 ~ 150 |
| σ_{max}/β_z | 0.6 | - | 0.45 | 0.5 ~ 0.45 | 0.45 |
| <i>Modulus of elasticity, E</i> (N/mm ²) | 210 000 | 210 000 | 205 000 | 190 000 ~ 200 000 | 180 000 ~ 165 000 |
| <i>Failure Load</i> kN | 7339 | 7624 | 7467 | 7634 | 7310 |

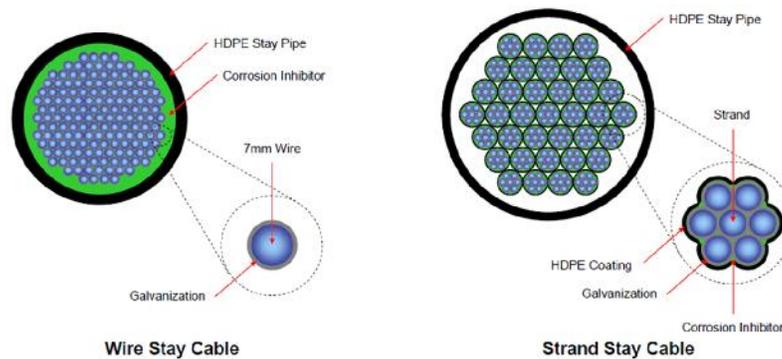
Saat ini, jenis ruji kabel yang umum dan sering digunakan adalah :

a) *Parallel Wire Cables*

Parallel wire Cable terdiri dari kawat bulat digalvanis berdiameter 5 mm sampai 7 mm berbentuk *hexagonal*, dengan suatu *helix* panjang. Kawat tersebut kemudian biasanya dibungkus oleh *High Density polyethylene (HDPE) tube* (Gambar 12).

b) *Parallel Strand Cables*

Kabel ini terdiri dari beberapa *strand*. *Strand-strand* tersebut selanjutnya dipasang secara paralel. Setiap kabel dapat terdiri dari beberapa strand antara lain sebesar 7, 19, 37, 61, 91, atau 127 buah (Gambar 12).



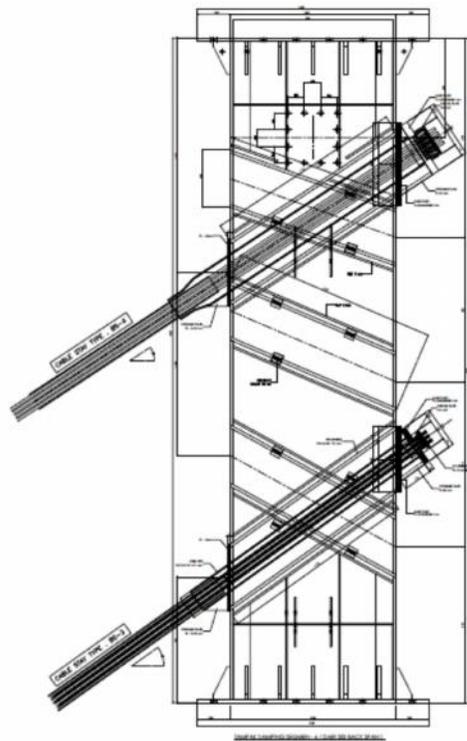
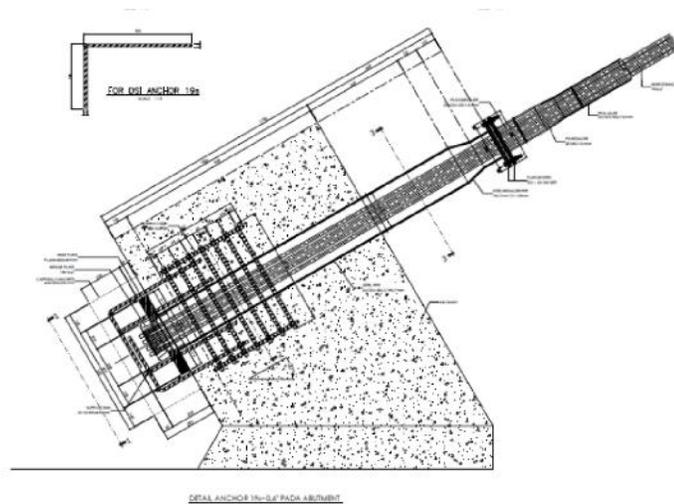
Gambar 12 - Tipe-tipe ruji kabel

4.8.2 Angkur kabel

Angkur pada sistem pratekan umumnya terletak di luar daerah kritis dan dengan variasi tegangan yang sangat kecil. Sedangkan ankur pada jembatan beruji kabel berfungsi sebagai dudukan vertikal bagi gelagar sehingga berfungsi menerima hampir semua beban vertikal yang bekerja. Karena itu tegangan yang diijinkan terjadi pada ankur jembatan beruji kabel adalah relatif kecil.

Terdapat berbagai macam sistem ankur yang digunakan untuk pada jembatan beruji kabel. Secara umum, tipe ankur dapat dibagi menjadi dua yaitu:

- a. Angkur hidup: terletak di ujung kabel ketika dilakukan pemberian tegangan, biasanya di menara jembatan (lihat Gambar 13);
- b. Angkur mati: terletak di ujung kabel ketika tidak dilakukan pemberian tegangan, biasanya di dek jembatan (lihat Gambar 13).



Gambar 13 - Angkur mati (atas) dan angkur hidup (bawah)

Angkur sistem pratekan yang menggunakan baji dapat digunakan untuk kabel yang terikat di dalam beton. Karena kabel stay bebas bergetar, maka akan terjadi beban berulang pada angkur yang menyebabkan angkur mengalami kelelahan/fatig.

Angkur ruji kabel standar mampu memfasilitasi penggunaan 9 -- 108 untai. Sehingga untuk jembatan yang relatif kecil/sederhana, digunakan tipe yang paling kecil untuk pengangkutan 1 -- 9 untai, meskipun kurang ekonomis.

Detail kedudukan 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 kedudukan angkur perlu mendapat perhatian khusus.

4.8.3 Proteksi kabel

Ruji merupakan elemen yang selalu memiliki kontak langsung dengan lingkungan, karena itu perlindungan terhadap ruji kabel perlu diberikan. Perlindungan yang umum digunakan adalah:

- a) Selongsong dan tabung
Kabel jembatan beruji kabel umumnya dilindungi dengan menggunakan selongsong baja atau plastik.
- b) Galvanis
Pemberian galvanis pada kabel akan melindungi ruji kabel dari korosi. Tebal *galvanis* umumnya berkisar antara (25 – 45) μm .
- c) *Coating*
Coating diberikan pada kabel untuk mencegah korosi. Akan tetapi pemberian *coating* kurang efektif dibandingkan dengan penggunaan ruji kabel yang telah digalvanis.
- d) Perlindungan pada bagian angkur
Pada pertemuan antara selongsong kabel dan angkur harus dicegah terhadap masuknya air.
- e) Perlindungan terhadap benturan kendaraan, kebakaran dan *vandalisme*
Pada bagian bawah kabel setinggi 2 m dapat diberikan tabung baja yang disatukan dengan tabung kabel.

4.9 Fondasi jembatan

Pada jembatan beruji kabel, beban yang bekerja dalam arah horizontal dan vertikal pada dasar menara sangat besar, sehingga diperlukan dimensi dan kedalaman fondasi yang lebih besar. Tipe fondasi *caisson* dan *bored pile* ini sangat umum digunakan pada konstruksi jembatan besar. Untuk jembatan beruji kabel yang kecil, penggunaan fondasi tiang pancang masih dimungkinkan.

Penentuan dimensi fondasi sangat ditentukan oleh kondisi tanah. Karena itu penyelidikan tanah yang akurat dan memadai perlu dilakukan untuk mendapatkan data yang akurat. Penyelidikan tanah harus dilakukan di tiap-tiap lokasi menara.

Setelah fondasi direncanakan, untuk memastikan bahwa daya dukung yang diharapkan tersedia, perlu dilaksanakan uji beban fondasi. Untuk menjamin bahwa pelaksanaan fondasi tersebut telah sesuai dengan yang dipersyaratkan pada setiap fondasi perlu dilakukan uji integritas.

4.10 Tipe hubungan jembatan beruji kabel

Umumnya jembatan beruji kabel mempunyai *expansion joint* pada ujung-ujung gelagar, sehingga dek jembatan bebas bergerak dalam arah memanjang. Gaya aksial terbesar pada gelagar jembatan terjadi pada pertemuan gelagar dengan menara. Untuk meminimalkan pengaruh gaya aksial tersebut pada menara, maka gelagar jembatan dibuat menerus. Tidak digunakannya tumpuan vertikal pada pertemuan gelagar jembatan dengan menara juga akan mengurangi momen yang terjadi pada menara. Akan tetapi karena struktur beruji kabel memiliki kekakuan yang kurang baik dalam arah lateral, maka pada pertemuan gelagar jembatan dengan menara diberikan tumpuan dalam arah lateral.

Dalam kondisi normal, menara terbebas dari gaya aksial pada gelagar. Akan tetapi pada kondisi gempa, menara diharapkan mampu menahan gaya lateral akibat gempa. Untuk itu

pada pertemuan antara gelagar dan menara dipasang *Seismic Dumper* yang hanya akan bekerja pada saat gempa terjadi.

Secara umum, tipe hubungan antara menara dan gelagar lantai dapat dibuat sebagai berikut:

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

4.11 Elemen pelengkap jembatan beruji kabel

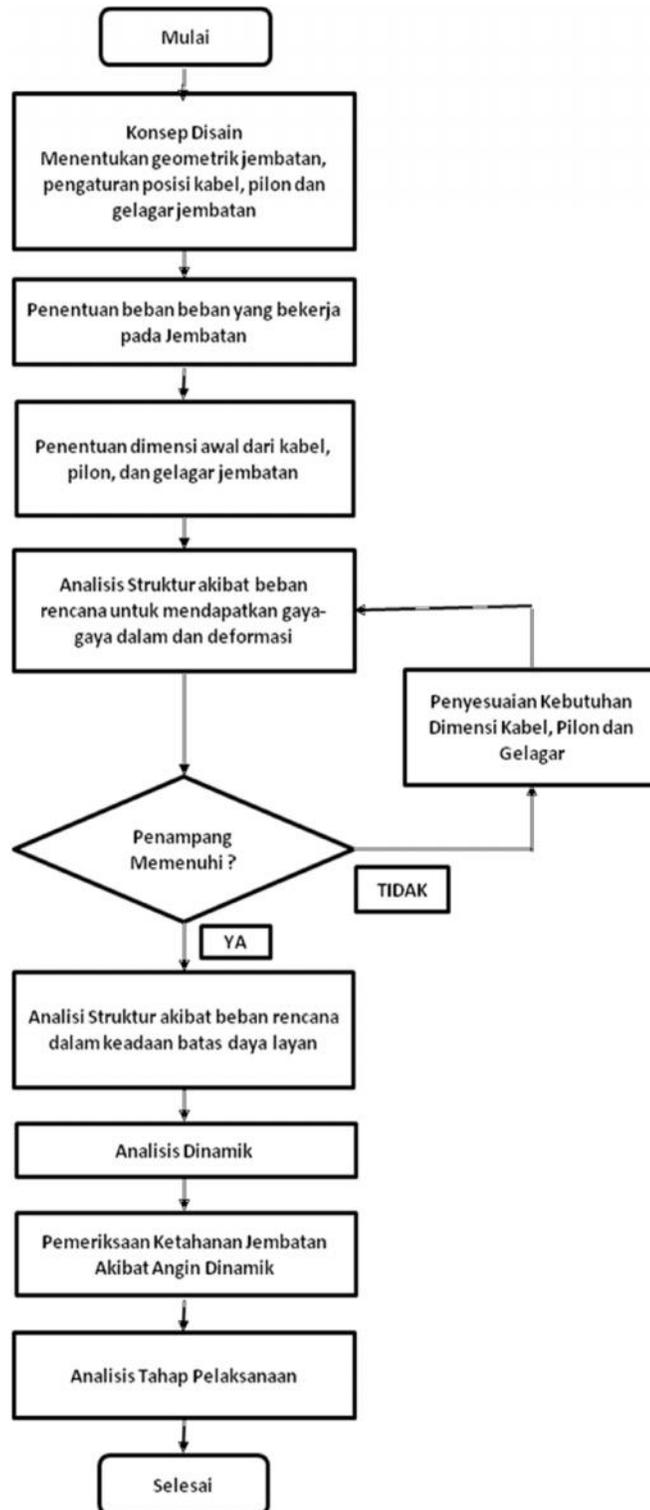
Untuk tujuan kemudahan, keamanan dan keselamatan pengguna jembatan, lalu lintas yang ada di bawah jembatan, serta lalu lintas di atas jembatan, jembatan beruji kabel perlu dilengkapi dengan berbagai fasilitas/element pelengkap.

Tabel 2 di bawah menyajikan daftar fasilitas/element pelengkap yang perlu direncanakan dan dipasang pada jembatan beruji kabel.

Tabel 2 - Fasilitas pelengkap jembatan

| No | Nama Fasilitas | Lokasi | Fungsi |
|----|---|--------------------------------|--|
| 1 | Fasilitas Pemeliharaan – Gondola | Di menara atau gelagar | Untuk memudahkan akses untuk pemeliharaan |
| 2 | Fasilitas Pemeliharaan – Jalan Inspeksi | Di gelagar dan dek jembatan | Untuk memudahkan akses untuk pemeliharaan |
| 3 | Fasilitas Pemeliharaan – Tangga Monyet | Di Menara | Untuk memudahkan akses untuk pemeliharaan |
| 4 | Penangkal Petir | Di puncak menara | Melindungi pengguna jembatan dari sambaran petir |
| 5 | Lampu Navigasi | Di bawah gelagar dan di menara | Memandu lalu lintas dibawah jembatan |
| 6 | Lampu Aviasi | Di puncak menara | Petunjuk tinggi hambatan untuk penerbangan |
| 7 | Lampu Penerangan | Di sepanjang jembatan | Penerangan bagi pengguna jembatan |
| 8 | Lampu Artistik | Di jembatan | Menambah nilai estetika di malam hari |
| 9 | Ruang Utilitas | Di sepanjang jembatan | Menyediakan tempat bagi utilitas seperti kabel listrik, kabel telekomunikasi, pipa air, pipa gas, dll. |

Diagram aliran proses perencanaan jembatan kabel beruji dapat digambarkan seperti Gambar 14 berikut ini.



Gambar 14 - Bagan alir proses perencanaan jembatan beruji kabel

5 Persyaratan khusus jembatan beruji kabel

5.1 Persyaratan kekakuan

Akibat beban lalu lintas pada jembatan, gelagar jembatan yang ditahan oleh ruji kabel akan mengalami lendutan dalam arah vertikal. Deformasi total dari gelagar adalah penjumlahan dari deformasi akibat beban tetap dan beban lalu lintas.

Menara jembatan yang ditahan dalam arah lateral oleh ruji kabel akan mengalami lentur dan deformasi dalam arah horizontal. Deformasi menara tersebut akan menambah besarnya deformasi vertikal di gelagar.

Beban vertikal pada gelagar jembatan ditahan oleh kabel *stay* yang miring. Keseimbangan terjadi karena gaya pada kabel *stay* di terima oleh gelagar jembatan dalam bentuk gaya normal aksial tekan. Kombinasi gaya aksial tekan dan deformasi vertikal pada gelagar dapat menyebabkan momen dan deformasi tidak linear tingkat kedua '*second order*'.

Untuk menjaga agar kondisi dapat diasumsikan sebagai linear, maka lendutan akibat beban hidup tidak boleh melampaui batasan sebagai berikut.

Lendutan yang terjadi pada dek jembatan harus lebih kecil dari

- $L/400$ untuk penampang baja dan komposit;
- $L/800$ untuk penampang beton.

Lendutan pada terjadi pada puncak menara harus lebih kecil dari

- $H/400$ untuk penampang baja;
- $H/800$ untuk penampang beton.

Batasan tersebut mengizinkan lendutan lebih besar dibanding jembatan dengan gelagar kaku karena perletakan pegas dari ruji kabel membuat gelagar jembatan beruji kabel menjadi fleksibel.

5.2 Persyaratan penarikan kabel

Penyetelan gaya awal pada ruji kabel harus memenuhi salah satu pilihan berikut :

- a) Pada beban tetap, gelagar lantai hampir horizontal, dan hanya terjadi lendutan akibat beban hidup yang diatasi dengan lawan lendutan saat fabrikasi gelagar lantai;

atau

- b) Pada beban tetap, lendutan diusahakan sekecil mungkin, yang bersama lendutan beban hidup diatasi dengan lawan lendutan saat fabrikasi gelagar lantai.

selain ini :

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

- gaya akhir pada ruji kabel $0,45$ tegangan putus *strand* untuk keadaan batas daya layan;
- gaya akhir pada ruji kabel $0,60$ tegangan putus *strand* untuk keadaan batas ultimit, yang umumnya aman bila keadaan daya layan terpenuhi (butir di atas);
- gaya pada ruji kabel harus selalu berupa gaya tarik, tidak melepas/nol/tertekan, yang sering terjadi pada kabel tengah bentang utama dan kabel berdekatan dengan menara

- karena perbedaan antara gaya awal dan akhir tidak jauh, diatasi dengan penyetelan gaya awal kabel bersangkutan dan kabel disampingnya;
- keseimbangan struktur dengan menjaga lendutan gelagar dan menara dalam batas izin.

5.3 Tekuk/*Buckling* pada menara dan P-U *Effect*

Menara jembatan beruji kabel umumnya memiliki kekakuan dan kelangsingan yang kecil dalam arah memanjang jembatan dan kekakuan yang lebih besar dalam arah melintang jembatan. Menara jembatan beruji kabel akan menerima akumulasi gaya dari ruji kabel dalam bentuk gaya tekan yang sangat besar.

Kombinasi dari kelangsingan menara dalam arah memanjang jembatan dan gaya aksial tekan yang sangat besar, menyebabkan menara rentan terhadap bahaya tekuk. Karena itu menara jembatan beruji kabel perlu direncanakan aman terhadap tekuk.

Gaya lateral pada jembatan, ketidak-simetrisan konfigurasi jembatan serta ketidak-simetrisan posisi beban pada lantai jembatan menyebabkan menara mengalami perpindahan arah memanjang dan lateral. Kelangsingan jembatan, gaya aksial yang besar, serta perpindahan puncak menara dalam arah memanjang dan lateral akan menimbulkan momen sekunder tambahan sebagai akibat efek P- Δ . Karena itu perencanaan menara jembatan beruji kabel dipersyaratkan memperhitungkan pengaruh momen sekunder efek P- Δ .

5.4 Metode pelaksanaan dan beban pelaksanaan

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

Karena itu pada analisis struktur jembatan sistem beruji kabel, metode konstruksi dan beban pelaksanaan akan menentukan tahapan analisis.

5.5 Durabilitas struktur

Faktor-faktor yang mempengaruhi durabilitas dari beton adalah selimut beton, kadar air semen, tingkat pemadatan beton, karakteristik dari semen, iklim, lingkungan dan lain sebagainya.

Untuk struktur baja, metode perlindungan terhadap korosi dan api sangat penting untuk mencapai durabilitas baja yang diharapkan.

5.6 Kelelahan bahan

Selama umur layan, elemen jembatan akan mengalami gaya yang bervariasi. Oleh karena itu pemeriksaan terhadap kelelahan bahan harus dilakukan pada saat perencanaan.

5.7 Persyaratan pemeriksaan minimum

Jembatan beruji kabel merupakan struktur yang rumit dengan derajat ketidak-laziman yang tinggi. Karena itu sebaiknya perencanaan jembatan beruji kabel melibatkan pemeriksaan pembuktian yang bebas / *Independent Proof Check*.

6 Survei dan investigasi

Perencanaan jembatan beruji kabel membutuhkan informasi yang mendetail dari berbagai aspek teknis. Untuk mendapatkan data-data tersebut perlu dilakukan serangkaian survei dan investigasi. Survei dan investigasi yang diperlukan seperti disajikan pada Tabel 3 meliputi:

Tabel 3 - Survei dan investigasi pada perencanaan jembatan beruji kabel

| No | Jenis Survei dan Investigasi | Tujuan |
|----|--|---|
| 1 | Topografi di darat dan di bawah permukaan air | Untuk mendapatkan peta profil permukaan tanah di darat dan di dasar laut |
| 2 | Survei Geologi | Untuk mendapatkan informasi tentang kondisi geologi di lokasi proyek jembatan |
| 3 | Georadar (<i>GPR/Geo Penetrating Radar</i>) dan <i>Sub Bottom Profilling (SBP)</i> | Untuk mengetahui profil permukaan bawah tanah |
| 4 | Survei Hidrologi dan Muka Air Banjir | Untuk mengetahui elevasi muka air banjir di lokasi jembatan |
| 5 | <i>Scouring</i> | Untuk mengetahui tingkat penggerusan di lokasi fondasi jembatan |
| 6 | Studi Kegempaan / <i>Seismic Hazzard Assesment</i> | Untuk mengetahui parameter kegempaan di lokasi jembatan |
| 7 | Survei Material dan Jalan Akses | Untuk mengetahui lokasi material yang bisa dimanfaatkan bagi pembangunan jembatan serta akses jalan dari dan menuju lokasi jembatan serta material tersebut |
| 8 | Survei Geoteknik | Untuk mengetahui kondisi tanah di pilar jembatan untuk perencanaan fondasi |
| 9 | Survei Kelautan/Oceanografi | Untuk mengetahui parameter-parameter kelautan seperti pasang, arus, salinitas, dan lain-lain |
| 10 | Survei Cuaca/Klimatologi | Untuk mengetahui parameter parameter lingkungan di lokasi jembatan seperti suhu, angin, kelembaban. |
| 11 | Survei Tingkat korositas | Untuk mengetahui laju korosi di lokasi jembatan |
| 12 | Uji Terowongan Angin | Untuk mengetahui kinerja jembatan terhadap beban angin statik dan dinamik |

7 Aksi atau pembebanan

Aksi atau pembebanan yang terjadi pada struktur jembatan adalah aksi permanent, variabel dan tak terduga (*accidental*). Klasifikasi aksi pada struktur jembatan secara mendetail ditampilkan pada Tabel 4 di bawah. Semua aksi akan dikombinasikan untuk mendapatkan kondisi yang paling kritis selama proses perencanaan struktur jembatan.

Tabel 4 - Klasifikasi aksi beban

| No. | Aksi Permanen | Aksi Variabel | Aksi Accidental |
|-----|-------------------------------------|---|---|
| 1 | Berat sendiri struktur & Beban mati | Beban kendaraan | Gaya tumbukan kapal atau <i>drifter</i> |
| 2 | Gaya prategang | Gaya kejut kendaraan | Gaya tumbukan kendaraan |
| 3 | Susut dan rangkai beton | Tekanan lateral tanah akibat kendaraan | Aksi gempa (seismik) |
| 4 | Gaya hanyutan air | Beban pejalan kaki (termasuk beban lajur sepeda motor) | Gaya dinamik <i>rupture</i> ruji kabel |
| 5 | Penurunan fondasi | Gaya pengereman kendaraan | |
| | | Beban angin | |
| | | Tekanan air (termasuk tekanan air mengalir dan beban ombak) | |
| | | Efek temperatur | |
| | | Tahanan friksi perletakan | |
| | | Gaya <i>rupture</i> statis ruji kabel | |
| | | Efek penggantian ruji kabel | |

7.1 Gaya putus/*rupture* statis pada ruji kabel

Pengertian dari putus/*rupture* statis pada ruji kabel adalah sebuah kondisi ketika kabel telah mencapai keadaan putus/*rupture*. Umumnya, putus/*rupture* pada ruji kabel terjadi akibat adanya korosi pada kawat baja, kegagalan pada alat angkut, atau kasus lainnya yang memungkinkan gaya retak/putus aktual (*actual breaking force*) dari kabel menjadi lebih kecil dari pada gaya retak/putus rencana (*design breaking force*).

7.2 Pemeliharaan kondisi ruji kabel

Perencanaan harus memperhatikan beban-beban dan kekuatan struktur pada saat perencanaan untuk penggantian kabel saat pemeliharaan.

Penggantian ruji kabel didefinisikan sebagai sebuah kondisi ketika satu pasang kabel pada bentang tengah dan bentang samping dengan bidang kabel yang sama dan diangkur pada tingkat yang sama dan pada satu menara.

Satu pasang kabel yang rusak harus diganti dan ditarik pada saat yang bersamaan. Penarikan dari satu pasang kabel ini harus diproses secara simetris dan serempak. Selama proses penarikan satu hal yang perlu diperhatikan bahwa gaya penarikan maksimum tidak seimbang yang boleh terjadi pada kabel dibatasi yaitu kurang dari 10% dari target gaya penarikan.

7.3 Gaya putus/*rupture* dinamik ruji kabel

Putus dinamik /*Dynamic rupture* dari ruji kabel didefinisikan sebuah kondisi dimana ruji kabel telah mencapai keadaan putus/*rupture*. Untuk memberikan keamanan terhadap efek maksimum *rupture* kabel pada struktur maka besarnya nilai gaya putus/*rupture* dinamik dapat mengadopsi hasil produk dari gaya putus/*rupture* statis dan faktor dinamik. Faktor dinamik dapat diambil sebesar 2.0.

7.4 Kombinasi pembebanan

7.4.1 Kombinasi pada keadaan batas daya layan (KBL)

Kombinasi pada keadaan batas daya layan primer terdiri dari jumlah pengaruh aksi tetap dengan satu aksi transien adalah sebagaimana disajikan pada Tabel 5. Pada keadaan batas daya layan, lebih dari satu aksi transien bisa terjadi bersamaan.

Faktor beban yang sudah dikurangi diterapkan daam hal ini untuk mengurangi kemungkinan dari peristiwa tersebut. Kombinasi beban yang umum digunakan adalah sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 - Kombinasi beban untuk keadaan batas daya layan (KBL)

| | |
|--------------------|---|
| Kombinasi primer | Aksi tetap + satu aksi transien* ⁽¹⁾ ⁽²⁾ |
| Kombinasi sekunder | Kombinasi Primer + 0,7 x (satu aksi transien lainnya) |
| Kombinasi tersier | Kombinasi primer + 0,5 x (dua atau lebih aksi transien lainnya) |
| (1) | Beban lajur "D" yaitu T_{TD} atau beban Truk "T" yaitu T_{TT} diperlukan untuk membangkitkan gaya rem T_{TB} dan gaya sentrifugal T_{TR} pada jembatan. Tidak ada faktor pengurang yang harus diberikan apabila T_{TB} atau T_{TR} terjadi dalam kombinasi dengan T_{TD} atau T_{TT} sebagai kombinasi primer |
| (2) | Gesekan pada perletakan T_{BF} bisa terjadi bersamaan dengan pengaruh temperature T_{ET} dan harus dianggap sebagai satu aksi untuk kombinasi beban |

Tabel 6 - Kombinasi beban untuk keadaan batas kelayakan (KBL)

| Aksi | Keadaan Batas Kelayakan | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Aksi permanen : | | | | | | |
| Berat sendiri | | | | | | |
| Beban mati tambahan | | | | | | |
| Susut rangkai | | | | | | |
| Pratekan | X | X | X | X | X | X |
| Pengaruh beban tetap pelaksanaan | | | | | | |
| Tekanan tanah | | | | | | |
| Penurunan | | | | | | |
| Aksi Transient : | | | | | | |
| Beban lajur "D" atau beban Truk "T"; gaya rem atau gaya Sentrifugal | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Beban pejalan kaki | 0 | X | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gesekan perletakan; pengaruh suhu | 0 | 0 | X | 0 | 0 | 0 |
| Aliran/hanyutan/ batang kayu dan hidrostati/ apung | 0 | 0 | 0 | X | 0 | 0 |
| Beban angin | 0 | 0 | 0 | 0 | X | 0 |
| Aksi Khusus | | | | | | |
| Gempa | | | | | | |
| Beban tumbukan | | | | | | |
| Pengaruh getaran | X | X | | | | |
| Beban pelaksanaan | | | | | | X |
| (X) : Beban yang selalu aktif | (1) Aksi permanen (X) KBL + Beban aktif (X) KBL + 1 beban (0) KBL | | | | | |
| (0) : Beban yang boleh dikombinasikan dengan beban aktif tunggal atau seperti yang ditunjukkan | (2) Aksi permanen (X) KBL + Beban aktif (X) KBL + 1 beban (0) KBL + 0.7 beban (0) KBL | | | | | |
| | (3) Aksi permanen (X) KBL + Beban aktif (X) KBL + 1 beban (0) KBL + 0.5 beban (0) KBL + 0.5 beban (0) KBL | | | | | |

7.4.2 Kombinasi pada keadaan batas daya ultimit

Kombinasi beban ultimit yang umum digunakan adalah sebagaimana disajikan pada Tabel 7 berikut:

Tabel 7 - Kombinasi beban untuk keadaan batas ultimit (KBU)

| Aksi | Keadaan Batas Kelayanan | | | | | |
|--|--|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Aksi Permanen : | | | | | | |
| Berat sendiri | | | | | | |
| Beban mati tambahan | | | | | | |
| Susut rangkai | | | | | | |
| Pratekan | X | X | X | X | X | X |
| Pengaruh beban tetap pelaksanaan | | | | | | |
| Teknan tanah | | | | | | |
| Penurunan | | | | | | |
| Aksi transient : | | | | | | |
| Beban Laur "D" atau beban truk "T"; gaya rem atau gaya sentrifugal | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Beban pejalan kaki | 0 | X | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gesekan perletakan | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pengaruh suhu | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Aliran/hanyutan/ batang kayu dan hidrostati/ apung | 0 | 0 | X | 0 | 0 | 0 |
| Beban angin | 0 | 0 | 0 | X | 0 | 0 |
| Aksi khusus | | | | | | |
| Gempa | | | | | X | |
| Beban tumbukan | | | | | | |
| Pengaruh getaran | X | X | | | | |
| Beban pelaksanaan | | | | | | X |
| (X) : Beban yang selalu aktif | (1) Aksi permanen (X) KBU + Beban aktif (X) KBU+ 1 beban (0) KBL | | | | | |
| (0) : Beban yang boleh dikombinasikan dengan beban aktif tunggal atau seperti yang ditunjukkan | | | | | | |

8 Ketahanan terhadap gempa

Saat ini banyak terdapat standar perencanaan struktur jembatan yang berhubungan dengan beban gempa tetapi hanya terbatas pada aplikasi tipe jembatan biasa/ sederhana. Hanya sedikit yang dapat memberikan gambaran terhadap dampak gempa pada jembatan bentang panjang (*extraordinary bridge structures*). Dampak gempa pada jembatan bentang panjang mempunyai karakteristik yang bervariasi dan sulit diprediksi. Dampak gempa pada jembatan bentang panjang harus disesuaikan pada situasi yang bervariasi dan studi teknis diperlukan untuk mendapatkan karakteristik gempa yang akurat. Desain sistem penahan terhadap beban gempa harus dibagi menjadi dua tingkat (*level*), yaitu:

a) Level I: Intensitas seismik dasar

Dengan periode ulang gempa 475 tahun, maka beban nominal seismik harus diadopsikan dan harus mempunyai nilai yang besarnya dapat menjamin bahwa struktur jembatan bentang utama tidak akan mengalami kerusakan dan berada pada keadaan elastis apabila beban gempa tersebut diatas terjadi.

b) Level II: Intensitas seismik kuat

Dengan periode ulang gempa 2500 tahun, kerusakan minor dapat terjadi pada struktur jembatan, dek pada jembatan bentang utama mungkin akan mendekati (mulai) batas leleh dan retak-retak akan terdapat pada struktur beton. Sendi plastis (*plastic hinge*) ditoleransikan terdapat pada *menara* jembatan bentang utama, dek dan pilar pada jembatan pendekat. Kemungkinan kerusakan berat yang mungkin terdapat pada struktur jembatan kemudian harus diperbaiki.

Tabel 8 di bawah melampirkan beberapa persyaratan yang harus dipenuhi pada sistem tahanan terhadap aksi seismik.

Tabel 8 - Persyaratan-persyaratan pada perencanaan tahanan gempa jembatan

| Tingkat probabilitas tahanan gempa | Persyaratan kinerja dari struktur | Target pemeriksaan elemen struktur |
|---|--|--|
| Tingkat I: Periode ulang = 475 tahun | Struktur utama dalam kondisi baik dan kondisi elastis | Tegangan aktual kemudian diperiksa untuk <i>superstruktur</i> . Kapasitas dukung untuk substruktur diperiksa |
| Tingkat II: Periode ulang = 2500 tahun | a. Kerusakan minor dapat terjadi, terdapat retak pada beton superstruktur, sendi plastis dapat muncul pada struktur menara. Kerusakan dapat diperbaiki, deformasi harus dibatasi | Tegangan aktual pada <i>superstructure</i> diperiksa dan kapasitas dukung. Kapasitas dukung dengan menimbang daktilitas (jika diperlukan) pada menara dan struktur bawah perlu diperiksa. Deformasi harus dibatasi |
| | b. Pada struktur dek atau pier terdapat retak dan sendi plastis. Kerusakan dapat diperbaiki, deformasi harus dibatasi | Kapasitas tahanan atau kapasitas tahanan dengan menimbang daktilitas pada struktur utama harus diperiksa. Deformasi harus dibatasi |

9 Kestabilan terhadap beban angin dinamik

9.1 Fenomena aerodinamik

Untuk jembatan bentang panjang seperti jembatan beruji kabel, pengaruh beban dinamik angin sangat berperan dalam menentukan kestabilan dari struktur jembatan. Pengaruh angin dinamik tersebut disebut aspek aerodinamik.

Interaksi antara aliran angin dan getaran dek jembatan dapat diinterpretasikan sebagai pertukaran energi antara keduanya yang akan memberikan pengaruh terhadap getaran jembatan. Interaksi tersebut dapat menyebabkan getaran pada dek jembatan berkurang atau juga sebaliknya ketika getaran pada dek jembatan menjadi semakin besar. Pengaruh dari interaksi ini dinyatakan dalam bentuk *aerodinamik damping*.

Jika interaksi tersebut menyebabkan getaran berkurang, maka nilai *aerodynamic dumping* akan positif, sedangkan jika interaksi tersebut menyebabkan getaran bertambah maka *aerodynamic dumping* akan bernilai negatif, fenomena ini disebut *flutter*. Karena fenomena *flutter* dapat menyebabkan kehancuran dari jembatan, maka fenomena *flutter* tadi berkaitan dengan aspek keamanan.

Angin yang berhembus ke dek jembatan akan menimbulkan pusaran di belakang dek jembatan tersebut. Jika frekuensi dari pusaran angin tersebut sama dengan salah satu frekuensi alamiah dari dek jembatan atau kabel, maka akan terjadi resonansi sehingga amplitudo getaran dari dek jembatan akan membesar. Akan tetapi getaran tersebut akan menghilang dengan bertambahnya kecepatan angin. Fenomena ini disebut *vortex shedding* yang umumnya terjadi pada kecepatan angin rendah.

Fenomena aerodinamik kedua adalah *buffeting* yang didefinisikan sebagai *time-variable response* dari dek jembatan akibat aliran angin dengan kecepatan yang berfluktuasi. *Buffeting* berkaitan dengan aspek *serviceability* dari dek jembatan serta berkaitan juga dengan masalah kelelahan bahan atau fatik.

Teknologi yang ada saat ini belum memungkinkan melakukan analisis terhadap dinamik angin secara analitis atau matematis. Untuk itu diperlukan suatu metode yang memerlukan pengujian di laboratorium terhadap model dari jembatan. *Wind tunnel test/* uji terowongan angin digunakan untuk memahami pengaruh dinamik angin yang disebabkan oleh vibrasi dari struktur ketika menerima beban angin.

9.2 Persyaratan perencanaan kestabilan terhadap angin dinamik

Persyaratan Utama Perencanaan Kestabilan terhadap Angin Dinamik adalah

- a) Tidak terjadi keruntuhan/ketidakstabilan akibat angin dinamik atau fenomena *flutter* pada tahap Konstruksi;
- b) Tidak terjadi keruntuhan/ketidakstabilan akibat angin dinamik atau fenomena *flutter* setelah jembatan beroperasi;
- c) Tidak terjadi amplitudo berlebihan akibat fenomena *vortex-excited-resonance*;
- d) Tidak terjadi amplitudo yang berlebihan akibat fenomena *buffeting*;
- e) Tidak terjadi ketidakstabilan akibat getaran pada ruji kabel.

9.3 Kecepatan angin dasar, kecepatan angin rencana, dan kecepatan angin pemeriksaan

Dari data statistik kecepatan angin pada posisi anemometer (elevasi muka air laut rata-rata = 10 m) untuk lokasi sekitar jembatan didapatkan kecepatan angin tertinggi rata-rata. Nilai kecepatan angin ini akan ditetapkan sebagai kecepatan angin dasar (*basic wind velocity*) V_{10} untuk keperluan perencanaan.

Untuk keperluan perencanaan, kecepatan angin dasar ditentukan berdasarkan statistik angin dengan periode ulang 150 tahun. Sedangkan selama tahap konstruksi, besarnya kecepatan angin dasar ditentukan dengan periode ulang 30 tahun

Lantai jembatan umumnya terletak pada ketinggian tertentu dari permukaan air atau tanah. Untuk itu diketahui kecepatan angin pada elevasi dek jembatan baik dalam arah melintang maupun memanjang yang disebut dengan Kecepatan Angin Rencana.

Variasi kecepatan angin rencana pada ketinggian Z di atas permukaan laut diberikan pada persamaan di bawah ini :

$$V_d = \left(\frac{Z}{10} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot V_{10} \quad (1)$$

Kecepatan Angin Pemeriksaan / *Verification wind speed* adalah kecepatan angin ketika jenis getaran divergen seperti flutter akan diperiksa. Jika kecepatan angin kritis lebih besar dari kecepatan angin pemeriksaan, maka struktur dinyatakan aman.

Besarnya kecepatan angin pemeriksaan diambil sebesar 1,3 x Kecepatan Angin Rencana

9.4 Pendekatan stabilitas aerodinamik

Tingkat kerentanan jembatan terhadap beban dinamik angin dinyatakan dengan parameter P_b , sebagai berikut:

$$P_b = \left(\frac{\rho b^2}{m} \right) \left(\frac{16V^2}{bL f_B^2} \right) \quad (2)$$

Keterangan :

- ρ adalah kerapatan udara (kg/m^3)
- b adalah lebar total dek jembatan
- m adalah berat jembatan per satuan panjang
- V_b adalah kecepatan angin rata-rata dalam periode 1 jam
- L adalah panjang bentang maksimum yang relevan dari jembatan
- f_B adalah frekuensi alamiah bending

Berikut adalah kriteria tingkat kerentanan jembatan terhadap angin dinamik disajikan pada Tabel 9 sebagai berikut:

Tabel 9 - Tingkat kerentanan jembatan terhadap angin dinamik

| | | |
|------------|---------------------------|--|
| Kategori a | $P_b < 0,04$ | Pengaruh angin dinamik pada struktur jembatan tidak signifikan |
| Kategori b | $0.04 \leq P_b \leq 1,00$ | Diperlukan perhatian terhadap bentuk penampang jembatan |
| Kategori c | $P_b > 1,00$ | Pengaruh angin dinamik sangat signifikan |

Jembatan beruji kabel umumnya termasuk dalam Kategori C ketika pengaruh angin dinamik perlu diperhitungkan sehingga diperlukan uji terowongan angin

9.5 Pengujian di terowongan angin

Pengujian terkait dengan jembatan yang dilakukan di laboratorium Uji Terowongan Angin adalah

- *Static Section Model Test* :

Pada pengujian model jembatan bersifat statis/rigid/tidak dapat bergetar, hasil yang diperoleh berupa koefisien angin statik dari jembatan.

Koefisien angin statik dapat juga diperoleh melalui simulasi komputer dengan program CFD (*Computation on Fluid Dynamic*).

- *Dynamic Section Model Test*

Model jembatan dapat bergetar, tetapi hanya sepotong dek jembatan yang dimodelkan, sebagaimana diuraikan pada bagian sebelumnya.

- *Full Model Test*

Model jembatan dapat bergetar, seluruh jembatan dimodelkan.

Dari hasil uji terowongan angin tersebut dapat diketahui tingkat kestabilan jembatan yang disebut dengan *flutter* dan amplitudo getaran jembatan akibat beban angin dinamik.

Skala dari pengujian di terowongan angin yang direkomendasikan disajikan pada Tabel 10 sebagai berikut:

Tabel 10 - Skala pengujian di terowongan angin

| No | Tipe Pengujian | Skala |
|----|-------------------|------------------------|
| 1 | Model Topografi | 1 : 20.000 |
| 2 | Lingkungan Lokal | 1 : 600 sampai 1 : 300 |
| 3 | Model Aerodinamik | 1 : 200 sampai 1 : 100 |
| 4 | Section Model | 1 : 80 sampai 1 : 40 |

9.6 Redaman struktur (*logarithmic decreament*)

Untuk pemeriksaan kestabilan angin akibat pengaruh angin dinamik, diperlukan nilai redaman yang dimiliki oleh struktur jembatan, Tabel 11 menyajikan besarnya nilai redaman struktur untuk berbagai konfigurasi jembatan.

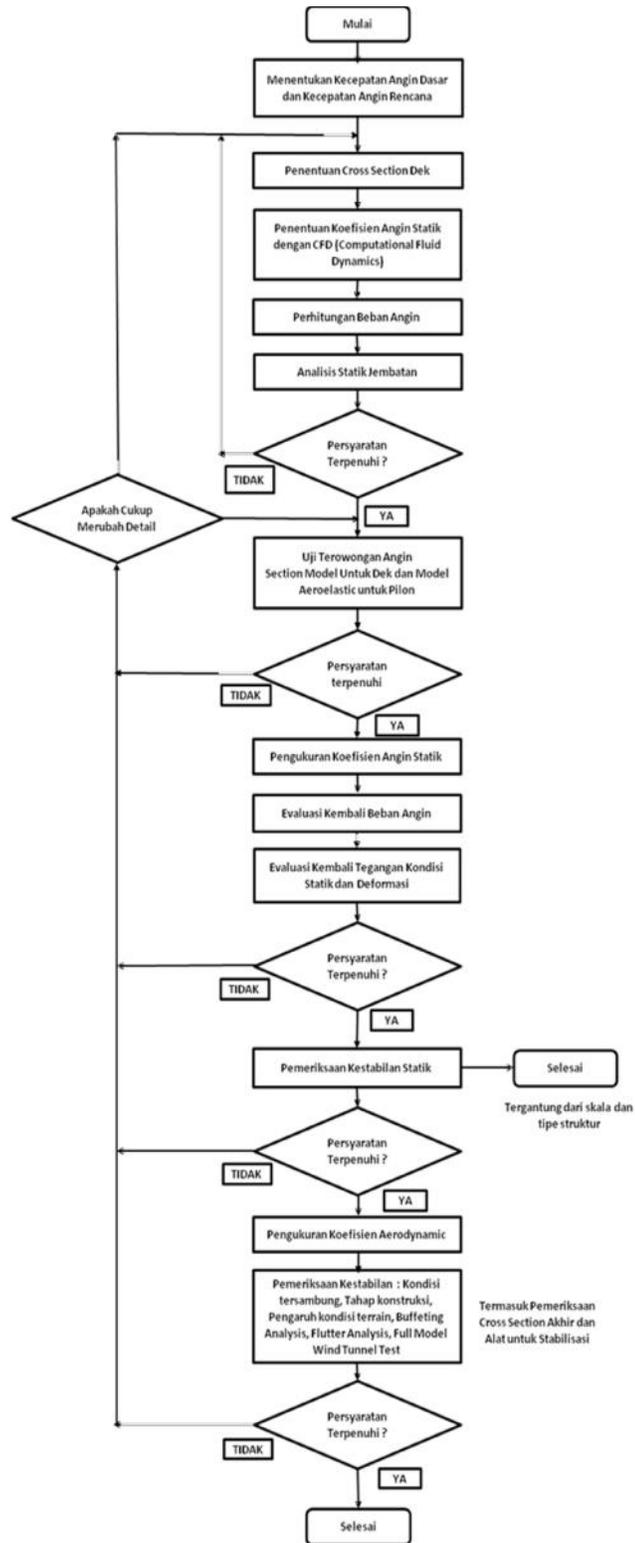
Tabel 11 - Redaman struktur (*logarithmic decreament*)

| Pola Getar dan Elemen Struktur | | <i>Logarithmic Decrement</i> | |
|---|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | Lentur | Torsi |
| Pola getar pada dek dominan | Rangka baja | 0,03 | 0,02 |
| | <i>Closed box girder</i> | 0,02 | 0,03 untuk bentang < 600 m |
| Pola getar pada menara dominan | Menara dengan kabel dan gelagar | 0,02 | 0,02 |
| | Menara berdiri sendiri | 0,01 | 0,01 |
| Pola getar pada ruji kabel dominan | | 0,002 | - |
| Pola getar pada kabel penggantung dominan | | 0,003 | - |

9.7 Stabilitas ruji kabel

Berdasarkan referensi pengalaman dari beberapa jembatan beruji kabel, nilai lebar ayunan dari vibrasi ruji kabel pada masa layan harus dibatasi dengan nilai $1/1700L$ yaitu L adalah panjang dari kabel. Untuk membatasi efek vibrasi pada kabel yang disebabkan oleh hujan, angin dan sebab lainnya maka alat peredam vibrasi digunakan pada *cable sleeve* dan permukaan terluar lapisan *HDPE*. Untuk menjamin kestabilan optimum ruji kabel maka akan digunakan *viscid shear damper* yang akan ditempatkan di antara kabel dan dek jembatan.

Berikut adalah bagan alir perencanaan ketahanan terhadap angin dinamik untuk jembatan beruji kabel pada Gambar 15 berikut.

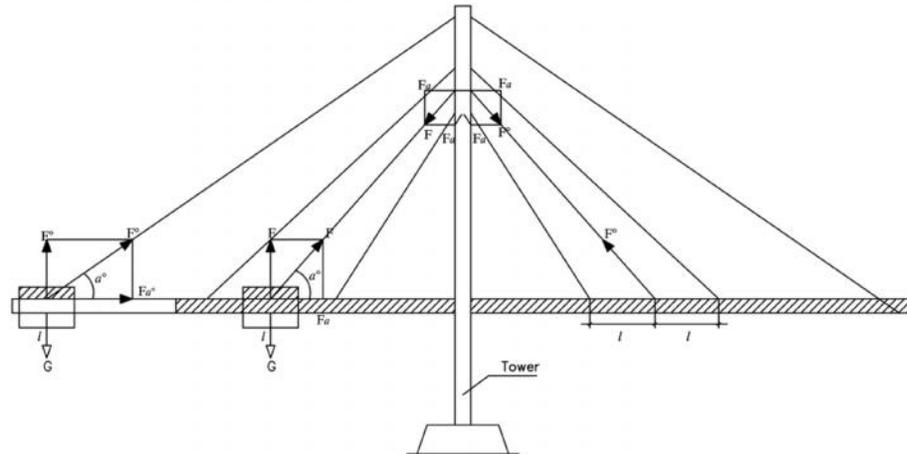


Gambar 15 - Bagan alir perencanaan ketahanan terhadap angin dinamik

10 Urutan perencanaan

10.1 Permodelan dan tahapan analisis

Analisis jembatan beruji kabel terdiri dari beberapa tahapan yang dilakukan dalam perhitungan 2D dan 3D yang memadai serta perhitungan statik dan dinamik. Skema pembebanan dari suatu struktur jembatan beruji kabel adalah seperti ditampilkan pada Gambar 16.



Gambar 16 - Skema pembebanan di atas lantai kendaraan yang diterima oleh kabel dan menara

- G adalah Berat konstruksi lantai kendaraan dan balok pendukungnya, Q_{DL} dan beban lalu lintas untuk bentang = jarak antara 2 kabel.
- F adalah Gaya kabel, di lantai kendaraan arahnya ke atas dan di menara arahnya ke bawah.
- Fz adalah $F \sin \alpha$, komponen gaya kabel arah vertikal yang akan mengimbangi beban G.
- Fz' adalah $F' \sin \alpha'$, juga harus mengimbangi G.
Karena $\alpha > \alpha'$ maka $F \sin \alpha \gg F' \sin \alpha'$
Karena $\sin \alpha > \sin \alpha'$, maka Fz' harus $> Fz$.
- Fx adalah Komponen gaya kabel arah horizontal.

Di menara, apabila $F_x \neq F_{x'}$, akan timbul momen lentur dan gaya lintang di menara.

Menara secara elastis ditahan oleh ruji kabel yang tidak selalu berimbang pada sisi tengah dan tepi, sehingga dapat menimbulkan deformasi arah horizontal pada menara.

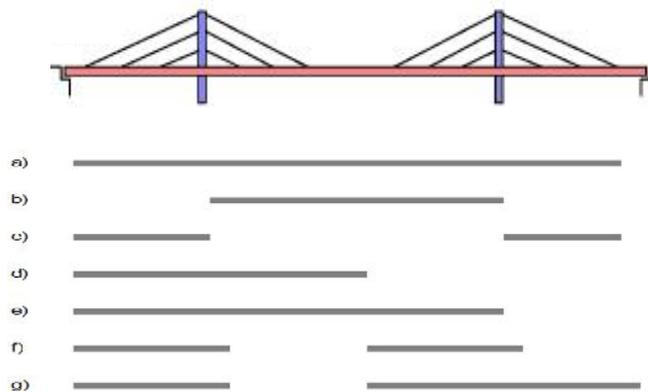
Ruji kabel yang memiliki kemiringan akan memberikan komponen F_x yang sifatnya menekan balok tepi pada lantai kendaraan. Akibat gaya tekan ini balok tepi akan mengalami perpendekan. Di samping itu ruji kabel sendiri akan mengalami perpanjangan karena gaya tarik di dalam kabel. Akibat akumulasi deformasi struktur yang cukup besar yang akan memperbesar momen dan deformasi orde kedua.

Perencanaan pendahuluan pada jembatan beruji kabel meliputi penentuan dimensi komponen-komponen jembatan, yaitu kabel, menara dan lantai kendaraan dengan cara-cara sederhana. Setelah itu akan dilakukan analisis struktur dengan berbagai kombinasi pembebanan dan proses ini akan dilakukan beberapa tahap kalau terdapat beberapa komponen struktur yang tidak memenuhi syarat.

Pada tahap selanjutnya, detail analisis jembatan beruji kabel akan dilakukan untuk memperoleh gaya-gaya dalam dan deformasi komponen-komponen jembatan. Di dalam langkah ini sudah diperhitungkan pengaruh deformasi orde kedua, sifat bahan yang non-linear, pengaruh jangka panjang (antara lain rangkai), retak pada penampang dan lain-lain. Untuk jembatan beruji kabel yang besar harus dilakukan analisis dinamis (stabilitas aerodinamik, tahanan terhadap gempa).

Untuk jembatan beruji kabel yang memiliki tiga bentangan, kombinasi beban hidup mengikuti tujuh konfigurasi utama berikut (Gambar 17):

- a. beban hidup penuh pada bentang utama dan pinggir;
- b. beban hidup pada bentang utama;
- c. beban hidup pada bentang pinggir;
- d. beban hidup pada salah satu bentang pinggir dan setengah bentang utama;
- e. beban hidup pada salah satu bentang pinggir dan bentang utama penuh;
- f. beban hidup pada salah satu bentang pinggir dan setengah bentang utama sebelahnya;
- g. beban hidup pada kedua bentang pinggir dan setengah bentang utama sebelahnya.



Gambar 17 - Konfigurasi beban hidup

10.2 Analisis 2-D

Analisis 2D digunakan untuk menentukan gaya-gaya pratekan pada kabel untuk mendukung berat sendiri jembatan, beban lalu lintas rencana serta peralatan konstruksi selama pelaksanaan.

Pada tahapan analisis 2D ini, profil kabel (gaya pratekan pada kabel) ditentukan berdasarkan berat sendiri dan beban tambahan sedemikian sehingga lantai jembatan tidak mengalami sag (diukur dari kondisi awal analisis) dan menara jembatan tidak mengalami tegangan berlebihan dengan cara menjaga agar besarnya perpindahan pada puncak menara pada kondisi dengan beban lalu lintas berbeda tidak terlalu besar perbedaannya dengan pada saat beban lantai bekerja.

Untuk mendapatkan kondisi tersebut di atas, maka gaya-gaya pratekan pada masing-masing kabel harus ditentukan secara iterasi agar didapat kondisi yang optimum.

Dalam perencanaan jembatan beruji kabel, proses pemberian gaya pratekn pada kabel dilakukan dalam 2 tahap:

a) Tahap 1

Menara dikekang dalam arah horizontal, dan setiap kabel pada bentang tengah diberi gaya tarik sehingga lendutan pada gelagar jembatan menjadi = 0.

b) Tahap 2

Kekangan horisontal pada menara dilepaskan, dan setiap kabel yang terletak di bentang tepi diberi gaya tarik untuk memperbaiki dimensi gelagar dan menara

Proses pemberian gaya tarik di kabel pada kedua tahap di atas memerlukan beberapa kali iterasi sehingga diperoleh deformasi gelagar jembatan sesuai yang diharapkan. Mengingat tingkat kompleksitas dari jembatan beruji kabel, permodelan dan analisis struktur perlu menggunakan bantuan *software* komputer.

10.3 Analisis 3-D

Analisis 3D digunakan untuk mendapatkan *response*/perilaku struktur jembatan yang lengkap akibat konfigurasi beban lalu lintas serta beban beban lain seperti angin dan gempa. Model 3D juga digunakan untuk melakukan analisis dinamik jembatan.

10.4 Analisis tahapan pelaksanaan

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.

Pada kasus jembatan sistem beruji kabel, pada tahap akhir dari pembebanan (beban konstruksi), perpindahan dari puncak menara harus sekecil mungkin dan masih dalam toleransi. Demikian pula dengan lendutan pada lantai jembatan. Sebagai syarat, bahwa *displacement* dari lantai pada posisi ruji kabel (*stay support*) akibat beban konstruksi bekerja harus sekecil mungkin. Dengan dicapainya lendutan pada posisi kabel yang kecil, bidang momen dari lantai jembatan menjadi optimum dan bahkan dapat dicapai kondisi momen positif hampir sama dengan momen negatif pada setiap peralihan antar tumpuan ruji kabel. Untuk mendapatkan kondisi tersebut di atas dapat dilakukan dengan mengaplikasikan gaya pratekan (gaya axial) pada beruji kabel. Dengan cara demikian, setiap tahapan pelaksanaan konstruksi jembatan besarnya gaya pratekan dapat ditentukan. Pada analisis struktur jembatan ruji kabel, metode konstruksi akan menentukan tahapan analisis. Tahapan atau langkah-langkah dalam pembangunan jembatan beruji kabel yang mencerminkan tahapan tahapan yang harus dianalisis.

Mengingat tingkat kompleksitas dari jembatan beruji kabel, permodelan dan analisis struktur perlu menggunakan bantuan *software* komputer. *Software* yang digunakan dalam permodelan dan analisis harus memiliki kemampuan untuk :

- a. Memodelkan elemen kabel
- b. Memodelkan pengaruh non linear seperti *creep* dan *shrinkage*
- b. Memodelkan tahapan konstruksi (*construction stage analysis*)

11 Pra rencana jembatan beruji kabel

11.1 Pra dimensi kabel

11.1.1 Tipe kipas

Dengan mengabaikan pengaruh kelengkungan kabel, gaya tarik pada kabel ke i $T_{sc,i}$ ditentukan sebagai berikut

$$T_{sc,i} \approx \left(g + p + \frac{P}{30d} \right) \frac{\}i + \}i+1}{2 * \sin W_i} + \chi_{cb} A_{sc,i} \frac{a_i}{\sin W_i \cos W_i} \quad (3)$$

Luas penampang ruji kabel ditentukan berdasarkan persamaan berikut

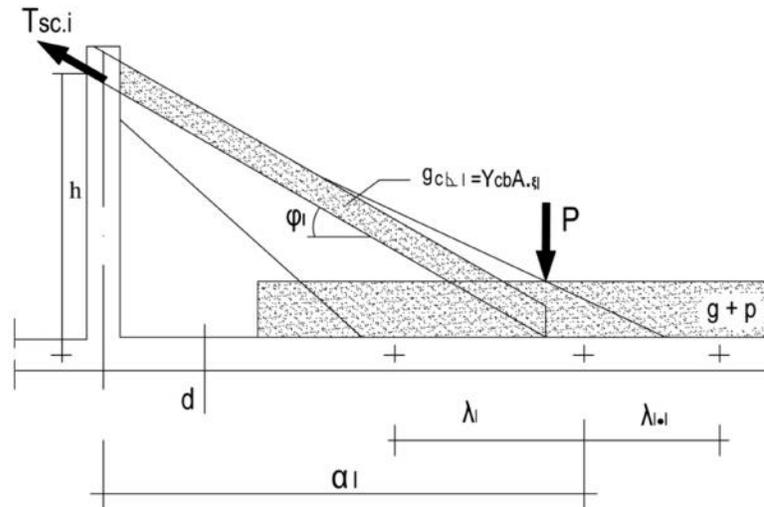
$$T_{sc,i} = A_{sc,i} f_{cdb}$$

sehingga

$$A_{sc,i} \cong \frac{\left(g + p + \frac{P}{30d} \right) (\}i + \}i+1) \cos W_i}{2(f_{cdb} \sin W_i \cos W_i - \chi_{cb} a_i)} \quad (4)$$

Keterangan :

| | | |
|-------------|--------|---|
| $T_{sc,i}$ | adalah | gaya tarik pada ruji kabel ke i |
| g | adalah | beban merata mati |
| p | adalah | beban merata hidup |
| d | adalah | tinggi gelagar jembatan |
| P | adalah | beban terpusat |
| $\}i$ | adalah | jarak antar kabel |
| W_i | adalah | susut kabel ke i terhadap bidang horizontal |
| χ_{cb} | adalah | berat jenis ruji kabel |
| $A_{sc,i}$ | adalah | luas penampang kabel ke i |
| f_{cdb} | adalah | tegangan ijin pada kabel |
| h | adalah | tinggi menara dari elevasi gelagar |
| A_{ac} | adalah | luas penampang kabel angkur |

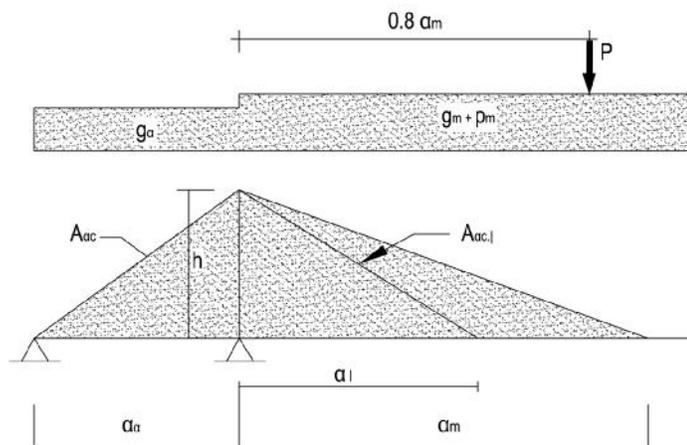


Gambar 18 - Notasi gaya pada kabel jembatan beruji kabel

Gaya tarik terbesar akan terjadi pada kabel yang terhubung langsung dengan angkur sebagaimana pada Gambar 18. Pra dimensi kebutuhan luas kabel angkur adalah sebagai berikut:

$$A_{ac} \cong \frac{\frac{1}{2}(g+p)a_m^2 - \frac{1}{2}g_a a_a^2 + 0.8 * P a_m + \frac{1}{2} x_{cb} \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_{sc,i} a_i^2}{\cos w_i} \right)}{h f_{cbd} \cos w_{ac}} \quad (5)$$

Berikut adalah notasi gaya pada kabel angkur seperti ditunjukkan pada Gambar 19 berikut:



Gambar 19 - Notasi gaya pada kabel angkur

11.1.2 Tipe harpa

Untuk setiap kabel kecuali kabel paling atas, preliminari penampang kabel dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$A_{sc,i} \cong \frac{\left(g + p + \frac{P}{30d}\right)(\}i + \}i+1)\cos w_i}{2(f_{cbd} \sin w_i \cos w_i - x_{cb} a_1)} \quad (6)$$

Preliminary dari kabel paling atas ditentukan berdasarkan karakteristik jembatan yang digunakan.

- a. Jembatan dengan dengan gelagar kaku (Gambar 20).

Gaya tarik pada kabel paling atas ditentukan sebagai berikut:

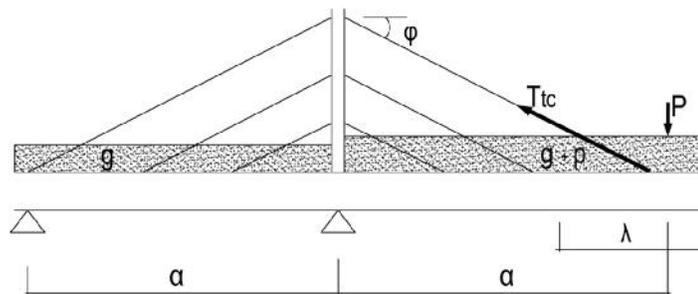
$$T_{sc,i} \approx \frac{(g + p)\} + \frac{1}{4} p \cdot a + P}{\sin w} + x_{cb} A_{tc} \frac{a}{\sin w \cos w} \quad (7)$$

Luas penampang kabel ditentuk berdasarkan persamaan berikut:

$$T_{tc} = A_{tc} f_{cdb} \quad (8)$$

sehingga

$$A_{sc,i} \cong \frac{(g + p)\} + \frac{1}{4} p \cdot a + P}{f_{cbd} \sin w \cos w - x_{cb} a} \cos w \quad (9)$$



Gambar 20 - Kasus gelagar kaku

- b. Jembatan dengan menara kaku (Gambar 21).

Gaya tarik pada kabel paling atas ditentukan sebagai berikut:

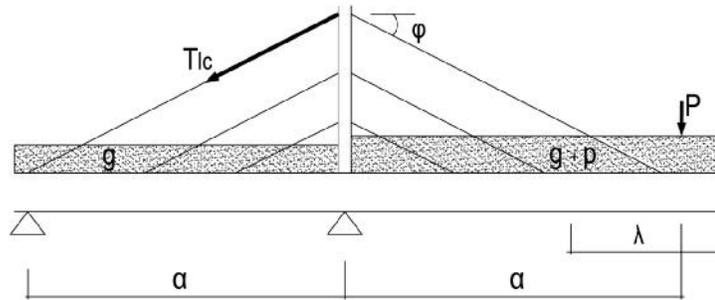
$$T_{sc,i} \approx \frac{(g + p) \cdot a + \frac{1}{2} p \cdot a + P}{\sin W} + x_{cb} A_{tc} \frac{a}{\sin W \cos W} \quad (10)$$

Luas penampang kabel ditentuk berdasarkan persamaan berikut:

$$T_{tc} = A_{tc} f_{cdb} \quad (11)$$

sehingga

$$A_{sc,i} \cong \frac{(g + p) \cdot a + \frac{1}{2} p \cdot a + P}{f_{cbd} \sin W \cos W - x_{cb} a} \cos W \quad (12)$$



Gambar 21 - Kasus menara kaku

11.2 Pra rencana dimensi menara

11.2.1 Tipe kipas/fan

Gaya maksimum yang bekerja di puncak menara (Gambar 22) adalah sebagai berikut:

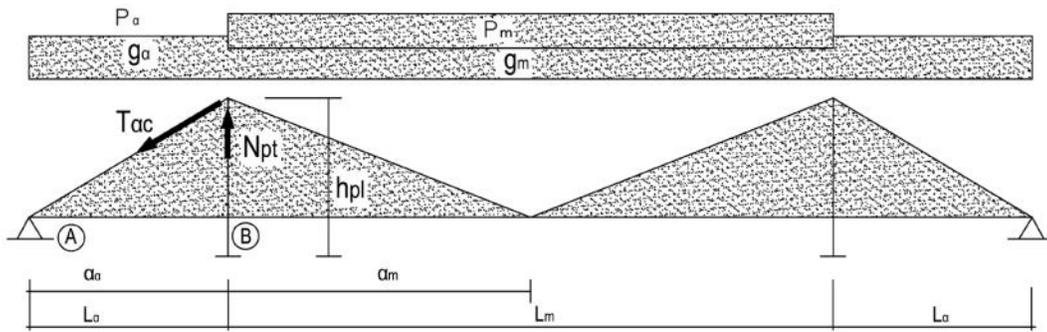
$$N_{pt} = \frac{1}{2}(g_a + p_a) a_a + \frac{1}{2}(g_m + p_m) \left(2 + \frac{a_m}{a_a} \right) a_m + \frac{2}{3} Q_{Fa} + Q_{Fm} \left(1 + \frac{a_m}{3a_a} \right) + \frac{1}{2} Q_a \quad (13)$$

Keterangan :

Q_{Fa} adalah kuantitas dari kabel di bentang tepi untuk jembatan tipe kipas/fan

Q_{Fm} adalah kuantitas dari kabel di bentang tengah untuk jembatan tipe kipas/fan

Q_a adalah kuantitas dari kabel angkut



Gambar 22 - Gaya di puncak menara jembatan beruji kabel tipe harpa

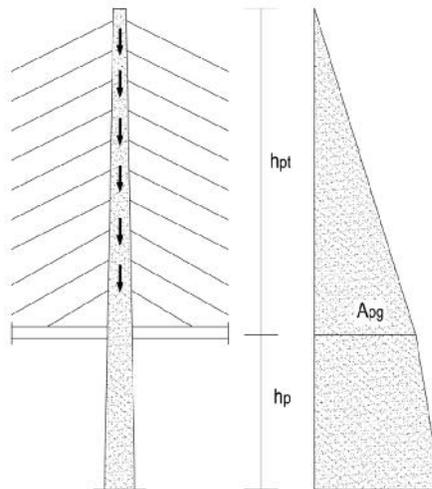
11.2.2 Tipe harpa

Gaya maksimum yang bekerja di puncak menara (Gambar 23) adalah sebagai berikut:

$$N_{pt} = \frac{1}{2}(g + p)a_m \frac{a_m + a_a}{a_a} + \frac{a_m + 2a_a}{2a_a} Q_{Hm} + \frac{1}{2} Q_{Ha} + Q_{pt} \quad (14)$$

Keterangan :

- Q_{Ha} adalah kuantitas dari kabel di bentang tepi untuk jembatan tipe harpa
- Q_{Hm} adalah kuantitas dari kabel di bentang tengah untuk jembatan tipe harpa
- Q_{pt} adalah kuantitas dari kabel paling atas



Gambar 23 - Variasi dimensi menara jembatan beruji kabel tipe harpa

12 Pendekatan desain dinamis

12.1 Metode pendekatan untuk menghitung frekuensi alamiah

Untuk mendapatkan nilai frekuensi lentur dan torsi yang akurat diperlukan analisis dinamik. Metode elemen hingga dan metode umum lainnya dapat digunakan.

Salah satu metode pendekatan untuk mendapatkan nilai frekuensi, adalah:

a) Frekuensi lentur untuk gelagar pelat dan gelagar boks

$$f_B = \frac{K^2}{2fL^2} \sqrt{\frac{EI_b g}{w}} \quad (15)$$

Keterangan :

- L adalah panjang bentang dari jembatan;
- E adalah Modulus elastisitas;
- g adalah percepatan gravitasi (m/s^2);
- I_b adalah Momen inersia dari penampang jembatan di tengah bentang;
- m adalah berat jembatan per satuan panjang di tengah bentang;
- f_B adalah frekuensi alamiah lentur.

Jika nilai $\sqrt{\frac{I_b}{w}}$ pada tumpuan melebihi dua kali nilai pada tengah bentang atau jika kurang dari 80 % nilai di tengah bentang, maka rumus di atas tidak akurat dan hanya dapat digunakan sebagai perkiraan kasar saja

K adalah faktor yang ditentukan berdasarkan pengaturan bentang dengan ketentuan pada Tabel 12 dan Gambar 24:

Tabel 12 - Faktor K

| | |
|---|--|
| Bentang Tunggal dengan Perletakan sederhana | K = |
| Bentang Tunggal dengan Penyangga kantilever | K=3.9 |
| Bentang Tunggal dengan jepitan | K = 4.7 |
| 2 Bentang Menerus | Gunakan Gambar 23 yaitu L_1 adalah panjang bentang lebih kecil |
| 3 Bentang Menerus | Gunakan Gambar 23 yaitu $L > L_1 > L_2$ |

b) Frekuensi Torsi

- Jembatan Pelat Girder
Untuk jembatan pelat girder, nilai frekuensi alamiah dasar untuk torsi dapat diasumsikan sama dengan nilai frekuensi alamiah dasar lentur.

$$f_T = f_B \quad (16)$$

- Jembatan Gelagar Boks

Untuk jembatan gelagar boks, nilai frekuensi alamiah dasar untuk torsi dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$f_T = f_B \sqrt{P_1(P_2 + P_3)} \quad (17)$$

Keterangan:

$$P_1 = \frac{wb}{gI_p} \quad (18)$$

$$P_2 = \frac{\sum r_j^2 I_j}{b^2 I_p} \quad (19)$$

$$P_3 = \frac{L^2 \sum J_j}{2K^2 b^2 I_b (1 + \nu)} \quad (20)$$

Keterangan :

b adalah lebar dek jembatan total

I_p adalah Momen Inersia Polar dari penampang jembatan di tengah bentang

ν adalah Rasio Poisson

r_j adalah Jarak dari center line masing masing box girder ke center line jembatan

I_j adalah Momen Inersia Lentur masing masing box girder di tengah bentang dengan memasukkan pelat lantai jembatan di atasnya

J_j adalah Konstanta Torsi dari masing masing box girder di tengah bentang

E adalah Modulus Young

$$I_p = \frac{w_D b^2}{12g} + \sum \left(I_{pj} + \frac{w_j r_j^2}{g} \right) \quad (21)$$

w_D adalah Berat dari penampang dek jembatan saja di tengah bentang per satuan panjang

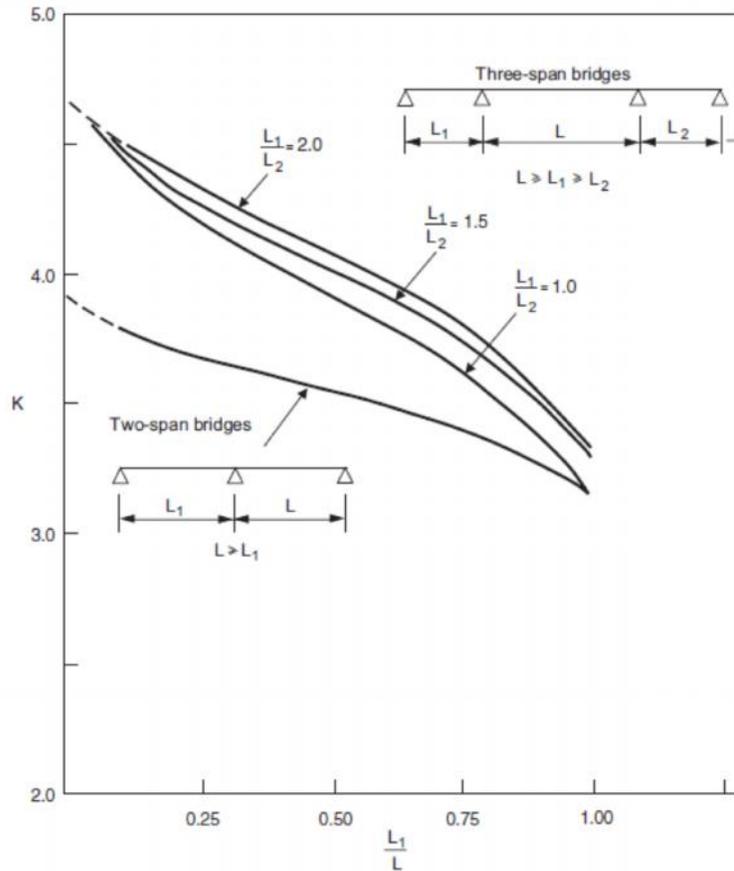
I_{pj} adalah Momen Inersia Polar masing masing box girder di tengah bentang

w_j adalah Berat dari box girder tanpa dek jembatan di tengah bentang per satuan panjang

$$J_j = \frac{4A_j^2}{\oint \frac{ds}{t}} \quad (22)$$

A_j adalah Luas penampang box tertutup di tengah bentang

$\oint \frac{ds}{t}$ adalah integrasi sepanjang perimeter box girder dari rasio antara panjang terhadap tebal untuk setiap segmen dinding dari box girder



Gambar 24 - Penentuan nilai K

12.2 Rumus eksperimental frekuensi alamiah struktur berdasarkan nilai lendutan statik akibat berat sendiri

Frekuensi lentur dan torsi berdasarkan lendutan berat sendiri/tetap di tengah bentang utama dari hasil perhitungan statis diperkirakan dengan rumus eksperimental sebagai berikut :

$$f_b = \frac{1.1}{2f} \sqrt{\frac{g}{u_{maks}}} \quad (23)$$

$$f_t = \frac{b_s}{2r} f_b \quad (24)$$

Keterangan :

- f_b adalah frekuensi lentur dasar (Hz)
- f_t adalah frekuensi torsi dasar (Hz)
- u_{maks} adalah lendutan dalam arah vertikal di tengah bentang utama (L) akibat berat sendiri/tetap dalam meter
- g adalah gravitasi = 9,81 m/detik²

b_s adalah jarak melintang antar bidang kabel

$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ adalah jari-jari girasi dari gelagar lantai = (momen inersia)/luas

12.3 Rumus eksperimental frekuensi alamiah struktur jembatan beruji kabel

Pada persamaan f_t terlihat bahwa semakin lendutan statik kaibta berat sendiri/tetap, maka akan makin kaku jembatan sehingga semakin besar frekuensi. Pada kasus jembatan beruji kabel, ruji kabel direncanakan untuk memikul berat sendiri tersebut sedemikian rupa sehingga lendutan yang terjadi sama dengan nol. Karena itu persamaan f_t di atas tidak bisa digunakan.

Public Work Reseach Institute of Japan (PWRI) mengeluarkan persamaan hasil eksperimental untuk menghitung frekuensi alamiah dasar jembatan beruji kabel sebagai berikut

$$f_b = 33.8 \cdot L^{-0.763} \quad (25)$$

$$f_t = 17.5 \cdot L^{-0.453} \quad (26)$$

$$h = 10.0005 + 0.0148 \cdot f_b \quad (27)$$

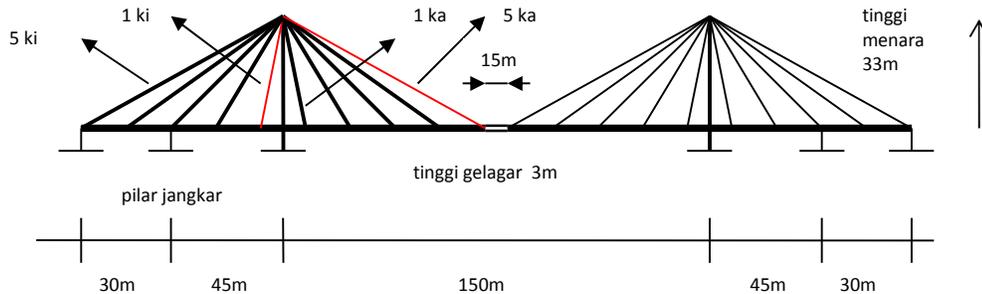
Keterangan :

L adalah bentang jembatan dalam utama dalam meter

h adalah redaman struktural berdasarkan f_b dalam %

Lampiran A (informatif)

A.1. Contoh kasus: Pra dimensi ruji kabel



Gambar A. 1 - Konfigurasi jembatan beruji kabel

Diketahui :

- Jarak antar kabel di bentang utama = 12,5 meter
- Jarak antar ruji kabel di bentang tepi = 15 m
- Berat sendiri gelagar = g
 $g = 75,5 \text{ kN/m} + (\text{pelat pengaku/diafragma/baut } 30 \% \times 75,5 = 2,2 \text{ kN/m}) + \text{lapis aspal } 7 \text{ kN/m} = 104,5 \text{ kN/m}$
- Beban hidup merata = q = 52,5 kN/m
- Beban terpusat P = 225 kN
- Berat volume ruji kabel = 7800 kg/m³
- Tegangan izin kabel = 1670 / 3 = 556 N/mm²

Untuk jembatan beruji kabel dengan *lay-out* kabel tipe kipas/*fan*, pra dimensi kabel di bentang utama dilakukan dengan menggunakan persamaan 4, $A_{sc,i}$ di bawah ini.

$$A_{sc,i} \cong \frac{\left(g + p + \frac{P}{30d} \right) (\} _i + \} _{i+1}) \cos W_i}{2(f_{cbd} \sin W_i \cos W_i - X_{cb} a_1)} \quad (4)$$

Keterangan:

- g adalah beban merata mati = 104,5 kN/m
p adalah beban merata hidup = 52,5 kN/m
d adalah tinggi gelagar jembatan = 3 m
P adalah beban terpusat = 225 kN
 $\} _i$ adalah jarak antar kabel = 12,5 m
 W_i adalah susut kabel ke i terhadap bidang horizontal = 27,83 derajat
 X_{cb} adalah berat volume ruji kabel = 7800 kg/m³

f_{cbd} adalah tegangan ijin pada kabel = $1860 \times 0,45 = 837 \text{ N/mm}^2$

h adalah tinggi menara dari elevasi gelagar = 33 m

Kebutuhan luas ruji kabel adalah sebagai berikut

$$A_{sc,i} \cong \frac{\left(104.5 + 52.5 + \frac{225}{30 \cdot 3}\right)(12.5 + 25) \cdot \cos 27.83}{2(5560 \cdot \sin 27.83 \cdot \cos 27.83 - 7.8 \cdot 65)} = \frac{15.95 \cdot 33.16}{2(2296 - 487.5)} = 0.146 \text{ m}^2 =$$

kebutuhan jumlah *strand* diameter 0.5 inchi

$$n = \frac{0.146}{0.00987} = 14.7 = 15 \cdot \text{buah}$$

Dengan persamaan di atas, pra dimensi ruji kabel selengkapnya adalah sebagai berikut:

| No | Bentang Tengah (kebutuhan jumlah <i>strand</i> dia. 0.5 “) | | Bentang Tepi (kebutuhan jumlah <i>strand</i> dia. 0.5 “) | |
|----|--|----|--|----|
| | 1 ka | 5 | 1 ki | 6 |
| 2 | 2 ka | 5 | 2 ki | 7 |
| 3 | 3 ka | 7 | 3 ki | 9 |
| 4 | 4 ka | 8 | 4 ki | 12 |
| 5 | 5 ka | 15 | 5 ki | 8 |

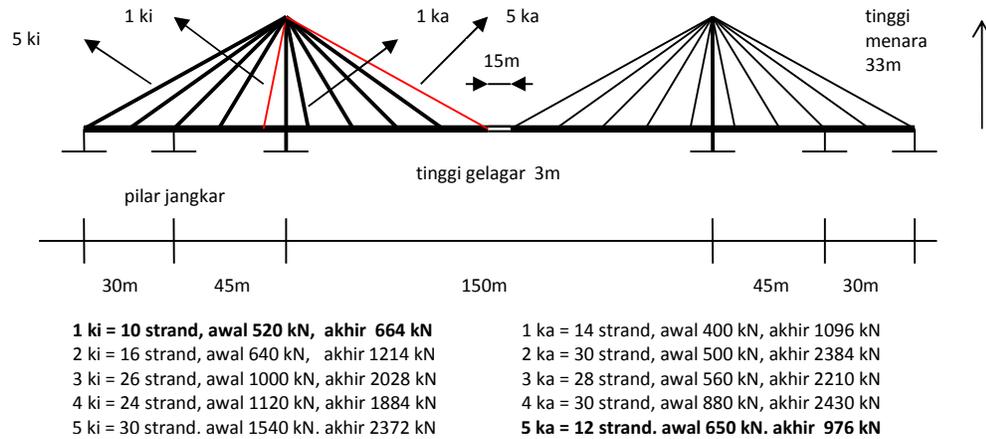
Catatan: ka : kanan, ki : kiri

A.2. Contoh kasus: Gaya aktual awal dan gaya akhir pada jembatan beruji kabel

Jembatan beruji kabel merupakan sistem dengan redundan tinggi. Lintasan gaya terutama ditentukan oleh kekakuan relatif elemen pemikul beban, yaitu ruji kabel, menara dan gelagar lantai. Dimensi akhir ruji kabel ditentukan melalui proses perhitungan uji-coba dari dimensi gelagar lantai terhadap menara dan terhadap gaya awal dan gaya akhir kabel agar keseimbangan struktur terjamin pada tiap tahap pelaksanaan sampai jembatan berfungsi.

Contoh berikut adalah jembatan dengan tipikal bentang 300 m (Gambar 25) dengan karakteristik gelagar kaku (tinggi boks baja 3 m = $1/50 L$), serta dengan pilar angkur untuk menjaga stabilitas dan mengurangi lendutan bentang utama. Pilar angkur digunakan untuk menjaga stabilitas bagi bentang yang panjang

Untuk bentang yang lebih pendek yaitu 250 m (62,5 m+125 m + 62,5 m), jembatan masih cukup stabil tanpa pilar angkur.



Gambar A. 2 - Contoh aktual gaya awal vs gaya akhir kabel stay keadaan batas layan, urutan penarikan dari 1-5 sesuai pelaksanaan bentang utama secara kantilever, kabel 5 ka dan 1 ki mudah melepas

A.3. Contoh kasus : Frekuensi alamiah dasar jembatan beruji kabel

Diketahui dari hasil analisis lendutan teoritis pada prototipe jembatan *Bailey* modifikasi kabel dengan panjang bentang utama $L = 33,55$ m adalah $u_{maks} = 0,05$ m di tengah bentang utama.

Perkirakan frekuensi alamiah dasar dan redaman dari jembatan *Bailey* modifikasi kabel tersebut.



Gambar A. 3 - Pengujian beban-getar prototipe jembatan *Bailey* modifikasi kabel (1997)

Dengan menggunakan persamaan experimental berdasarkan lendutan berat sendiri/tetap di tengah bentang utama dari hasil perhitungan statis, frekuensi alamiah dasar pada jembatan dapat diperkirakan sebagai berikut menggunakan persamaan 23:

$$f_b = \frac{1.1}{2f} \sqrt{\frac{g}{u_{maks}}} \quad (23)$$

$$f_b = \frac{1.1}{2f} \sqrt{\frac{9.81}{0.05}} = 2,5 \cdot \text{Hz}$$

Dengan menggunakan persamaan 25, 26, dan 27 dari Public Work Reseach Institue of Japan (PWRI) yang merupakan hasil experimental untuk menghitung frekuensi alamiah dasar jembatan beruji kabel didapat:

$$f_b = 33.8 \cdot L^{-0.763}$$

$$f_b = 33.8 \cdot 33.5^{-0.763} = 2.3 \cdot \text{Hz}$$

$$f_t = 17.5 \cdot L^{-0.453}$$

$$f_t = 17.5 \cdot 33.5^{-0.453} = 3.56 \cdot \text{Hz}$$

$$h = 10.0005 + 0.0148 \cdot f_b$$

$$h = 10.0005 + 0.0148 \cdot 2.3 = 0.0345$$

Hasil uji getar memberikan informasi bahwa

- frekuensi alamiah dasar lentur = 3,3 Hz;
- redaman struktur = 3,45% – 3,5%.

A.4. Contoh kasus : Kerentanan jembatan terhadap angin dinamik

Periksa tingkat kerentanan jembatan pada contoh kasus 14.3 di atas terhadap bahaya angin dinamik, jika diketahui kecepatan angin rata-rata adalah 30 m/s.

Tingkat kerentanan jembatan terhadap beban dinamik angin dinyatakan dengan parameter P_b , pada persamaan 2 yaitu:

$$P_b = \left(\frac{\phi b^2}{m} \right) \left(\frac{16V^2}{bL f_B^2} \right) \quad (2)$$

Keterangan :

- ϕ adalah kerapatan udara (kg/m^3) = 1.225 kg/m^3
- b adalah lebar total dek jembatan = 3,9 m
- m adalah berat jembatan per satuan panjang = 15950 kg/m
- V_b adalah kecepatan angin rata-rata dalam periode 1 jam = 30 m/s
- L adalah panjang bentang maksimum yang relevan dari jembatan = 33,5 m
- f_B adalah frekuensi alamiah lentur = 2,3 Hz

$$P_b = \left(\frac{1.225 \cdot 3.9^2}{15950} \right) \left(\frac{16 \cdot 30^2}{3.9 \cdot 33.5 \cdot 2.3^2} \right) = 0,012$$

Dari kriteria pada Tabel 9, maka dapat disimpulkan bahwa pengaruh angin dinamik pada jembatan tersebut tidak signifikan.

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 |
| Gatot Sukmara, ST | Pusat Litbang Jalan dan Jembatan |
| Anton Surviyanto, ST | Pusat Litbang Jalan dan Jembatan |

Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 23 April 2015

**MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT,**



M. Basuki Hadimuljono
M. BASUKI HADIMULJONO