



PROYEK AKHIR TERAPAN - RC146599

**PENGARUH JARAK KABEL PENGGANTUNG TERHADAP
DESAIN ELEMEN KABEL JEMBATAN *CABLE-STAYED*
(STUDI KASUS: JEMBATAN SURAMADU)**

MUHAMMAD KADRI ZAMAD
NRP. 3115 040 635

Dosen Pembimbing I
Ir. Chomaedi, CES., Geo.
NIP. 19550319 198403 1 001

Dosen Pembimbing II
Ir. Ibnu Pudji Rahardjo, MS.
NIP. 19600105 198603 1 003

JURUSAN DIPLOMA IV TEKNIK SIPIL - LANJUT JENJANG
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



FINAL PROJECT - RC146599

**THE INFLUENCE OF VARIATION SPACED STAY CABLE
IN CABLE-STAYED BRIDGE (CASE STUDY: SURAMADU
BRIDGE)**

MUHAMMAD KADRI ZAMAD
NRP. 3115 040 635

Supervisor I
Ir. Chomaedi, CES., Geo.
NIP. 19550319 198403 1 001

Supervisor II
Ir. Ibnu Pudji Rahardjo, MS.
NIP. 19600105 198603 1 003

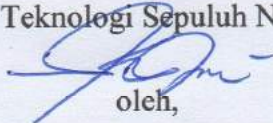
DEPARTEMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017

**PENGARUH JARAK KABEL PENGGANTUNG
TERHADAP DESAIN ELEMEN KABEL
JEMBATAN *CABLE-STAYED*
(STUDI KASUS: JEMBATAN SURAMADU)**

PROYEK AKHIR TERAPAN

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains Terapan
pada

Program Studi Diploma IV Lanjut Jenjang Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember



oleh,

MUHAMMAD KADRI ZAMAD

NRP. 3115040635

Disetujui oleh Pembimbing Proyek Akhir Terapan

1. Ir. Chomaedi, CES., Geo.
2. Ir. Ibnu Pudji Rahardjo, MS.



25 JAN 2017

**SURABAYA
JANUARI, 2017**

PENGARUH JARAK KABEL PENGGANTUNG TERHADAP DESAIN ELEMEN KABEL JEMBATAN CABLE-STAYED (STUDI KASUS: JEMBATAN SURAMADU)

Nama : Muhammad Kadri Zamad
NRP : 3115040635
Jurusan : DIV-LJ Teknik Sipil FTSP-ITS
Pembimbing : Ir. Chomaedhi, CES., Geo.
Ir. Ibnu Pudji Rahardjo, MS.

Abstrak

Salah satu masalah fundamental pada Jembatan Cable-Stayed adalah penentuan jarak kabel penggantungnya. Hal ini dapat dilihat dari bagaimana pengaruh penentuan jarak kabel penggantung terhadap kinerja struktural, metode konstruksi dan biaya.

Analisis struktur jembatan cable-stayed dengan membandingkan pengaruh jarak kabel penggantung dimana studi kasus dilakukan pada jembatan Suramadu terdiri dari analisis statik dan dinamik (modal analysis) dengan bantuan perangkat lunak Midas Civil 2011. Secara khusus analisis statik dilakukan untuk mengetahui gaya-gaya dalam pada elemen-elemen utama (gelagar, kabel dan pylon) jembatan cable-stayed, sedangkan analisis secara dinamik dilakukan untuk mengetahui seberapa besar tingkat kestabilan struktur terhadap masing-masing jarak kabel penggantung. Jarak kabel penggantung yang ditinjau yaitu 9,0 m, 12,0 m, 13,0 m, 14,0 m dan 15,0 m.

Beberapa hasil penting dari studi ini yaitu pertama adalah distribusi gaya-gaya dalam akan semakin seragam pada jarak kabel penggantung yang kecil dan juga akan meningkatkan kestabilan struktur. Kedua adalah volume kebutuhan kabel pada jarak kabel penggantung juga kecil, hal ini juga karena distribusi gaya dalam yang seragam karena tegangan kabel yang terjadi pun relatif lebih seragam. Berdasarkan volume kebutuhan kabel, dapat ditarik kesimpulan bahwa jarak kabel penggantung yang optimum adalah 10,0 – 11,0 m.

Kata Kunci: Kinerja Struktural, Analisis Statik, Midas Civil, Jembatan Beruji Kabel, Jarak Kabel Penggantung, Analisis Dinamik

... And He (Allah) has cast into the earth firmly set mountains, lest it shift with you, and (made) rivers and roads, that you may be guided
- QS. An Nahl : 16/15

THE INFLUENCE OF VARIATION SPACED STAY CABLE IN CABLE-STAYED BRIDGE (CASE STUDY: SURAMADU BRIDGE)

Name : Muhammad Kadri Zamad
NRP : 3115040635
Departement : Civil Engineering
Supervisor : Ir. Chomaedhi, CES., Geo.
Ir. Ibnu Pudji Rahardjo, MS.

Abstract

One of the cable-stayed bridge fundamental problems are the determination of spacing stayed cable. This can be observed in the influence of determination of spacing stayed cable on structural performance, method of construction and cost estimation.

The structural analysis of cable-stayed bridge with variation of spacing stayed cable consist of static and dynamic (modal) analysis was carried out in MIDAS Civil 2011 software. Static analysis is performed to determination internal force such as deck, cables, and pylon of cable-stayed bridge. Then, the dynamic analysis is performed to determination structural dynamic stability characteristics toward each one the spacing stayed cable. In this final project different spacing of stayed cable has been taken to study; spaces are 9,0m, 12,0m, 13,0m, 14,0m and 15,0m.

Some significant results of this study: the first is the distribution of internal forces will be more uniform at a distance of stayed cable are small and will also increase the structural stability. The second is the volume needs of cable on the stayed cable length too short, it is also because the distribution of forces in uniform due to stress cables that occurred was relatively uniform. Based on the volume needs of cable, it can be inferred that the optimum spacing stayed cable is 10,0-11,0 m.

Keywords: Structural Performance, Static Analysis, MIDAS Civil, Cable-Stayed Bridge, Spacing Stayed Cable, Dynamic Analysis

Engineering: Organizing Reason Fundamentals
Through Logic into the best Constrained Solution
– Prof. Ir. M. Sahari Besari, M.Sc., Ph.D (2003)

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkat rahmat dan anugerah-Nya yang telah memberikan kesehatan jasmani dan rohani sehingga Penulis dapat menyelesaikan sebuah karya tulis untuk Proyek Akhir Terapan yang berjudul “Pengaruh Jarak Kabel Penggantung terhadap Desain Elemen Kabel Jembatan *Cable-Stayed* (Studi Kasus : Jembatan Suramadu)”. Saat disyukuri, teringat bahwa itu semua adalah berkat peran serta banyak pihak yang membantu langsung maupun tidak langsung sehingga bukan karena usah sendiri saja. Untuk itu tidak berlebihan kiranya dalam kesempatan ini Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- Ir. Chomaedi, CES., Geo. dan Ir. Ibnu Pudji Rahardjo, MS. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, pengarahan, dukungan moril dan materil.
- Jajaran dosen Program Diploma IV Lanjut Jenjang Teknik Sipil FTSP ITS yang telah membimbing penulis selama proses pembelajaran.
- Kepada Ibunda tercinta, Hj. Tenri, S.Pd.SD, yang memberikan perhatian, doa serta semangat yang tak henti-hentinya membuat Penulis terbantu untuk dapat lebih ringan dalam mengaktualisasikan diri.
- Kepada adik kandungku, Mutahhara Zamad, Vikri Hardiansya dan Nur Ahmad Hidayat, semoga kita dapat lebih menjadi kebanggaan orang tua.
- Puput Ristanty yang selalu mengisi waktu secara positif.

Kepada mereka semua, teman, rekan, kenalan, dan saudara-saudara yang lain, yang tidak sempat disebutkan satu persatu, tidak ada yang dapat Penulis berikan sebagai balasan yang setimpal, kecuali hanya doa, semoga Allah SWT memberi berkat dan perlindungan-Nya, diberi-Nya umur panjang, kesejahteraan lahir dan batin, dan dipenih oleh rasa syukur di hatinya selama kehidupan di dunia.

Akhirnya, meskipun telah diupayakan sungguh-sungguh agar tidak ada kesalahan, baik sengaja maupun tidak disengaja dalam Proyek Akhir Terapan ini, tetapi apabila masih dijumpai, itu adalah kealpaan. Untuk itu dimohonkan maaf yang sebesar-besarnya

Surabaya – Ngagel Wasana V
Penulis,

Muhammad Kadri Zamad
<http://muhkadriz.wordpress.com>

To Engineer is Human
– Henry Petroski (1985)

DAFTAR ISI

HALAMANAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Jembatan <i>Cable-Stayed</i>	5
2.2 Komponen Utama Jembatan <i>Cable-Stayed</i>	7
2.2.1 Menara.....	8
2.2.2 Sistem Lantai.....	10
2.2.3 Sistem Kabel.....	13
2.3 Kabel sebagai Elemen Struktural.....	16
2.4 Efek Non-Linier pada Kabel.....	21
2.5 Jarak Antar Kabel Penggantung.....	25
2.6 Analisis Statik Jembatan <i>Cable-Stayed</i>	28
2.7 Frekuensi Alami dan Modus Getar.....	40
2.8 Perangkat Lunak <i>Midas Civil</i>	43
2.8.1 Perhitungan Gaya Kabel dengan <i>Midas Civil</i>	44
2.8.2 Tahap Analisis Gaya Kabel dengan <i>Midas Civil</i>	45
2.9 Sistem Pengangkur.....	46
2.10 Pembebanan Jembatan <i>Cable-Stayed</i>	50
2.10.1 Kondisi Beban Layan.....	50

2.10.2 Kondisi Beban Batas	51
2.11 Keadaan Batas Jembatan <i>Cable-Stayed</i>	53
BAB III METODOLOGI	55
3.1 Data Penelitian.....	55
3.2 Geometri Jembatan Suramadu.....	55
3.3 Material dan Dimensi Penampang.....	57
3.4 Analisa Struktur Jembatan Suramadu.....	61
3.5 Pemodelan Jembatan Suramadu	65
3.5.1 Pemodelan Elemen Kabel	67
3.5.2 Pemodelan Gelagar	67
3.5.3 Pemodelan <i>Pylon</i>	68
3.5.4 Pemodelan Beban	70
3.5.5 Penentuan Kondisi Batas	72
3.6 Deformasi Struktur	73
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	75
4.1 Studi Parametrik	75
4.2 Analisa Statik.....	76
4.2.1 Pembebanan.....	78
4.2.2 Gaya Kabel Awal.....	78
4.2.3 Variasi Gaya-Gaya Dalam Gelagar	83
4.2.4 Variasi Deformasi Struktur	86
4.2.5 Variasi Gaya-Gaya Dalam <i>Pylon</i>	87
4.3 Analisis Modal.....	89
4.4 Pembahasan	90
4.4.1 Pengaruh Jarak Kabel terhadap Gaya Kabel	92
4.4.2 Perbandingan Momen Lentur Gelagar	106
4.4.3 Perbandingan Momen Lentur <i>Pylon</i>	107
4.4.4 Perbandingan Frekuensi Alami dan Modus Getar	109
4.4.5 Perbandingan Kebutuhan Kabel	109
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	113
5.1 Kesimpulan.....	113
5.2 Saran	115
DAFTAR PUSTAKA	117
DAFTAR LAMPIRAN	

- Lampiran 1 : Geometri Jembatan Suramadu
- Lampiran 2 : Data Kabel Jembatan Suramadu
- Lampiran 3 : Perhitungan Gaya Kabel Manual
- Lampiran 4 : *Mode Shape* setiap Variabel
- Lampiran 5 : Contoh Analisis Struktur Jembatan *Cable-Stayed*

BIOGRAFI PENULIS

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	: Komponen utama jembatan <i> cable-stayed</i>	7
Gambar 2.2	: Aliran gaya pada jembatan <i> cable-stayed</i>	7
Gambar 2.3	: Bentuk dasar <i> pylon</i> jembatan <i> cable-stayed</i>	8
Gambar 2.4	: <i> Pylon</i> jembatan suramadu	9
Gambar 2.5	: Gaya dan aliran gaya pada <i> pylon</i> tipe berlian	9
Gambar 2.6	: Sistem lantai jembatan suramadu	12
Gambar 2.7	: Detail penampang gelagar jembatan suramadu.....	12
Gambar 2.8	: Ilustrasi sistem kabel jembatan <i> cable-stayed</i>	13
Gambar 2.9	: Tataan kabel arah transversal	14
Gambar 2.10	: Tataan longitudinal tipe memancar	15
Gambar 2.11	: Tataan longitudinal tipe sejajar	15
Gambar 2.12	: Tataan longitudinal tipe kipas	16
Gambar 2.13	: Tataan longitudinal tipe <i> star</i>	16
Gambar 2.14	: Jenis kabel <i> spiral strand</i> dengan <i> seven-wired strand</i> . ..	17
Gambar 2.15	: Potongan melintang kabel jenis <i> locked coil strand</i>	18
Gambar 2.16	: Berbagai macam jenis kabel <i> parallel-wire strand</i>	19
Gambar 2.17	: Jenis kabel jembatan suramadu	19
Gambar 2.18	: Tipikal kurva tegangan-regangan kabel.....	20
Gambar 2.19	: Perilaku kabel yang dipasang miring pada tumpuan..	23
Gambar 2.20	: Kurva parabola	23
Gambar 2.21	: Deformasi kabel akibat berat sendiri.....	24
Gambar 2.22	: Kecenderungan kabel mengalami efek <i> sag</i> akibat berat sendiri.....	25
Gambar 2.23	: Perbandingan gaya kabel berdasarkan metode perhitungan	27
Gambar 2.24	: Analisa statik jembatan <i> cable-stayed</i> dengan metodologi balok diatas tumpuan elastis	28
Gambar 2.25	: Analisa statik dengan metode matriks fleksibilitas struktur.....	29
Gambar 2.26	: Distribusi luasan kebutuhan kabel.....	31
Gambar 2.27	: Distribusi gaya kabel dengan beberapa kasus pembebanan	32

Gambar 2.28 : Deformasi gelagar dan gaya-gaya dalam jembatan cable-stayed.....	33
Gambar 2.29 : Deformasi dan momen lentur gelagar dengan optimum <i>post-tensioning</i> kabel	35
Gambar 2.30 : Perilaku kolom pada <i>pylon</i>	36
Gambar 2.31 : Gaya aksial tekan maksimum <i>pylon</i> berdasarkan tinggi <i>pylon</i>	37
Gambar 2.32 : Gaya aksial tekan dan momen lentur maksimum gelagar berdasarkan tinggi <i>pylon</i>	38
Gambar 2.33 : Momen lentur dan gaya aksial <i>pylon</i> pada jembatan <i>cable-stayed</i> berdasarkan variasi bentuk <i>pylon</i>	39
Gambar 2.34 : Sistem struktur dengan <i>n</i> derajat kebebasan	43
Gambar 2.35 : Alternatif Pengangkuran pada menara.....	46
Gambar 2.36 : Pengangkuran kabel pada <i>pylon</i> jembatan suramadu .	47
Gambar 2.37 : Bentuk <i>jacking</i> untuk pengangkuran pada <i>pylon</i> jembatan suramadu	47
Gambar 2.38 : Angkur baja pada <i>shaft</i> <i>pylon</i> jembatan suramadu.....	48
Gambar 2.39 : Lokasi angkur pada dek jembatan	48
Gambar 2.40 : Pengangkuran kabel pada dek jembatan suramadu berupa angkur mati	49
Gambar 2.41 : Detail pengangkuran kabel pada dek jembatan Suramadu	49
Gambar 2.42 : Angkur baja pada dek jembatan Suramadu.....	49
Gambar 2.43 : Konfigurasi beban hidup	52
Gambar 2.44 : Bagan alir perencanaan pembebanan jembatan.....	52
Gambar 2.45 : Karakteristik jembatan <i>cable-stayed</i>	54
Gambar 3.1 : Dokumentasi jembatan suramadu.....	56
Gambar 3.2 : Jembatan Suramadu	57
Gambar 3.3 : Dimensi <i>pylon</i>	60
Gambar 3.4 : Bagan alir analisis struktur jembatan <i>cable-stayed</i>	61
Gambar 3.5 : Bagan alir perencanaan jembatan <i>cable-stayed</i>	62
Gambar 3.6 : Bagan alir untuk studi Proyek Akhir Terapan.....	64
Gambar 3.7 : Tahap pemodelan dalam Midas Civil	66
Gambar 3.8 : Kotak dialog pendefinisian kabel	67

Gambar 3.9	: Kotak dialog pendefinisian komponen gelagar	68
Gambar 3.10	: Kotak dialog pendefinisian komponen <i>pylon</i>	69
Gambar 3.11	: Pembebanan truk “ <i>T</i> ”	72
Gambar 4.1	: Notasi jarak kabel penggantung	76
Gambar 4.2	: Variasi pemodelan struktur jembatan <i>2D</i>	76
Gambar 4.3	: Variasi gaya-gaya dalam gelagar	84
Gambar 4.4	: Deformasi vertikal pada gelagar terhadap jarak antar kabel penggantung	86
Gambar 4.5	: Gaya-gaya dalam <i>pylon</i> terhadap jarak antar kabel penggantung	87
Gambar 4.6	: Kombinasi beban hidup	90
Gambar 4.7	: Gaya aksial awal kabel perhitungan manual dan <i>Midas Civil</i>	92
Gambar 4.8	: Perbandingan momen lentur maksimum pada gelagar vs jarak kabel penggantung terhadap kombinasi beban layan (<i>service</i>)	106
Gambar 4.9	: Perbandingan momen lentur maksimum pada gelagar vs jarak kabel penggantung terhadap kombinasi beban batas (<i>ultimate</i>)	107
Gambar 4.10	: Perbandingan momen lentur maksimum pada <i>pylon</i> vs jarak kabel penggantung terhadap kombinasi beban layan (<i>service</i>)	108
Gambar 4.11	: Perbandingan momen lentur maksimum pada <i>pylon</i> vs jarak kabel penggantung terhadap kombinasi beban batas (<i>ultimate</i>)	109
Gambar 4.12	: Perbandingan rasio modulus lentur dan torsi	111
Gambar 4.13	: Perbandingan volume kabel terhadap jumlah kabel ...	112

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	: Jembatan <i>cabl</i> <i>e-stayed</i> di Indoensia	6
Tabel 2.2	: Perbandingan kabel baja konvensional dan baja struktural	17
Tabel 3.1	: Properti material kabel jembatan Suramadu	58
Tabel 3.2	: Properti material gelagar jembatan Suramadu	58
Tabel 3.3	: Dimensi gelagar jembatan Suramadu	59
Tabel 3.4	: Properti material <i>pylon</i> jembatan Suramadu	59
Tabel 3.5	: Klasifikasi beban	70
Tabel 3.6	: Beban mati tambahan	71
Tabel 3.7	: Kondisi batas jembatan suramadu	72
Tabel 4.1	: Rangkuman studi parametrik dan modifikasi struktur	75
Tabel 4.2	: Gaya kabel awal VRB1	78
Tabel 4.3	: Gaya kabel awal VRB2	80
Tabel 4.4	: Gaya kabel awal VRB3	81
Tabel 4.5	: Gaya kabel awal VRB4	82
Tabel 4.6	: Gaya kabel awal VRB5	82
Tabel 4.7	: Frekuensi alami struktur berdasarkan jarak kabel penggantung	89
Tabel 4.8	: Gaya kabel VRB1 kondisi layan	95
Tabel 4.9	: Gaya kabel VRB1 kondisi ultimit	96
Tabel 4.10	: Gaya kabel VRB2 kondisi layan	97
Tabel 4.11	: Gaya kabel VRB2 kondisi ultimit	99
Tabel 4.12	: Gaya kabel VRB3 kondisi layan	100
Tabel 4.13	: Gaya kabel VRB3 kondisi ultimit	101
Tabel 4.14	: Gaya kabel VRB4 kondisi layan	102
Tabel 4.15	: Gaya kabel VRB4 kondisi ultimit	103
Tabel 4.16	: Gaya kabel VRB5 kondisi layan	104
Tabel 4.17	: Gaya kabel VRB5 kondisi ultimit	105
Tabel 4.18	: Perbandingan frekuensi lentur dan torsi setiap variabel	110
Tabel 4.19	: Perbandingan volume kabel terhadap jarak kabel	111

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jarak kabel penggantung pada jembatan beruji kabel (*cable-stayed*) termasuk salah satu masalah fundamental. Hal ini terkait dengan fungsi utama kabel yang menyalurkan beban yang terjadi dari gelagar hingga ke menara (*pylon*). Selain hal tersebut, jarak kabel penggantung juga akan mempengaruhi kinerja jembatan dan biaya.

Prinsip kerja utama kabel pada jembatan tipe beruji kabel adalah berdasarkan prinsip gaya aksial tarik. Pada tahapan konstruksi, tegangan pada struktur akibat beban mati dipikul oleh gaya aksial tarik pada kabel, sehingga ketika tahapan akhir pelaksanaan, adanya beban mati tambahan misalnya trotoar, median jalan, beban dinamis lalu lintas dan lain sebagainya memberikan tambahan pengaruh tegangan. Indikasi ini pula menjadikan geometrik penempatan kabel pada arah longitudinal menjadi faktor penting. Hal ini bisa dilihat dari bagaimana berkurangnya gaya tarik pada salah satu kabel yang kemudian merambat pada kabel lainnya sehingga pengaruhnya terhadap stabilitas struktur jembatan secara keseluruhan. Selain itu pokok-pokok perencanaan jembatan beruji kabel seperti, durabilitas, pemeriksaan dan pemeliharaan, ekonomis, estetika, kemudahan pelaksanaan, kelelahan logam (*fatigue*), stabilitas aerodinamis, dan dampak lingkungan juga perlu menjadi bahan pertimbangan.

Pemilihan elemen-elemen utama (gelagar, kabel, dan menara) sangat variatif, tergantung kebutuhan akan fungsi yang diinginkan. Sebagai contoh, gelagar dipilih berdasarkan ketersediaan bahan, biaya konstruksi dan metode pelaksanaannya. Contoh lainnya adalah pemilihan jenis kabel yang umumnya terdiri dari *parallel wires cables* dan *parallel strand cables*. Sedangkan untuk pemilihan penempatan kabel, umumnya dipilih alternatif *single plane* dan *double plane* untuk jumlah bidangnya.

Penentuan jarak antara kabel penggantung pada jembatan *cable-stayed* memerlukan pertimbangan tersendiri. Kabel dengan jarak yang pendek akan berimplikasi pada gelagar yang digunakan akan relatif berukuran kecil (langsing). Sebaliknya, jarak kabel yang panjang akan menghasilkan gelagar lebih besar dan tentunya akan menerima momen lentur yang besar. Sebab itu, studi tentang pengaruh jarak kabel penggantung terhadap stabilitas jembatan beruji kabel perlu dilakukan yang harapannya dapat digunakan sebagai rujukan dalam mendesain jembatan beruji kabel khususnya pada penentuan jarak antar kabel penggantung.

1.2 Rumusan Masalah

Masalah penentuan jarak antar kabel penggantung pada konstruksi jembatan beruji kabel akan dicari solusinya dengan membandingkan beberapa variasi jarak antar ruji kabel terhadap jarak kabel eksisting yaitu 12 m, dimana studi kasus yang dilakukan yaitu Jembatan Suramadu. Upaya yang dilakukan adalah dengan mencari gaya-gaya dalam pada kabel, gelagar dan pylon sebagai elemen utama jembatan *cable-stayed*, perpindahannya serta parameter stabilitas lainnya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah:

- a. Mengetahui besarnya gaya yang terjadi pada struktur kabel berdasarkan hasil perbandingan variasi jarak penempatan kabel penggantung.
- b. Membandingkan variasi jarak penempatan kabel penggantung untuk mengetahui perilaku struktur jembatan *cable-stayed*.
- c. Mengetahui kinerja struktur yang baik berdasarkan jarak penempatan kabel penggantung.

1.4 Batasan Masalah

Ruang lingkup pada Tugas Akhir ini dibatasi pada beberapa hal-hal berikut:

- a. Studi kasus pada Tugas Akhir ini dilakukan pada Jembatan Suramadu dan dibatasi hanya pada struktur atas jembatan *cable-stayed* dengan konfigurasi bentang 192 m + 434 m + 192 m.
- b. Perangkat lunak yang digunakan dalam analisis ini adalah MIDAS Civil.
- c. Properti penampang dan ketentuan geometri lainnya yang digunakan sesuai data perencanaan dari *Consortium of China Contractors*.
- d. Jarak antara kabel penggantung pada menara (*pylon*) digunakan sesuai data perencanaan dari *Consortium of China Contractors* yaitu 3,0 m.
- e. Variabel jarak antara kabel penggantung pada gelagar yang akan digunakan sebagai bahan perbandingan adalah 9,0 m, 12,0 m, 13,0 m, 14,0 m, dan 15,0 m.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisa dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

a. Studi Literatur

Tahapan yang pertama dilakukan oleh penulis adalah mempelajari dan memahami konstruksi jembatan *cable-stayed* seperti teori-teori dasar dari struktur jembatan, perilakunya ketika menerima beban, tahapan-tahapn konstruksi jembatan *cable-stayed* dan lain sebagainya.

b. Pengumpulan Data

Pada tahap ini penulis mengumpulkan data-data yang dibutuhkan untuk menunjang analisis. Adapun data yang diperoleh penulis adalah geometri struktur jembatan suramadu, jenis kabel, dimensi kabel dan gelagar, dan sebagainya.

c. Pemodelan Struktur Jembatan

Pemodelan struktur jembatan menggunakan perangkat lunak komputer yang tentu sebelumnya membaca manual dari perangkat lunak tersebut.

d. Simulasi

Agar dapat bernilai, hasil dari pemodelan struktur tadi kemudian diberikan data yang merupakan ketentuan-ketentuan untuk analisa struktur seperti beban dan koefisien lainnya.

e. Pembahasan dan Kesimpulan

Untuk tahap ini dipaparkan hasil dari simulasi yang dilakukan dan disertai pembahasan-pembahasan terkait hasil dari analisis sehingga diperoleh kesimpulan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan secara sistematis dasar teori terkait jembatan *cable-stayed* serta memaparkan konsep yang kemudian menjadi landasan pikiran dalam analisis.

2.1 Jembatan *Cable-Stayed*

Jembatan umumnya dibuat dengan alasan mengatasi halangan/rintangan yang melintas pada sebuah jaringan jalan. Berdasarkan bentangnya, jembatan diklasifikasikan menjadi jembatan bentang pendek dan jembatan bentang panjang. Contoh jembatan bentang pendek, misalnya jembatan dengan konstruksi rangka batang, jembatan beton bertulang, jembatan pejalan kaki, dan sebagainya. Bentang jembatan ini umumnya berkisar 40 m-125 m. Untuk bentang jembatan bentang panjang lebih besar dari 125 m. Jembatan gantung (*suspension bridge*) dan jembatan *cable-stayed* (*cable-stayed bridge*) adalah dua tipe jembatan bentang panjang. Jembatan *cable-stayed* adalah jenis jembatan bentang panjang yang hingga saat ini populer di dunia konstruksi jembatan. Umumnya jembatan ini dipilih karena nilai ketangguhan secara strukturalnya relatif lebih baik, juga pertimbangan aspek estetis yang menarik. Perkembangan jembatan jenis ini di Indonesia sendiri cukup banyak (lihat Tabel 2.1), karena dilihat dari sisi geografis negara Indonesia adalah negara kepulauan dimana setiap pulau dipertimbangkan perlu prasarana (jembatan) sebagai akses antar pulau ke pulau maupun daerah ke daerah.

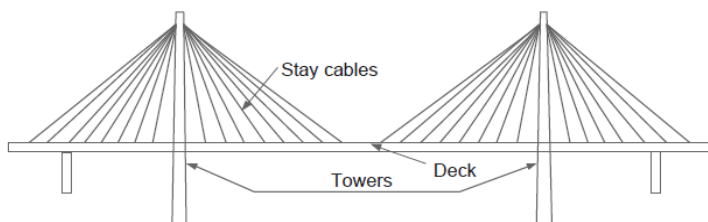
Jembatan *cable-stayed* adalah jembatan dengan sistem struktur statis tak tentu berderajat tinggi, di mana gaya-gaya dalam yang bekerja dipengaruhi bersama oleh kekakuan komponen penunjang utama jembatan, yaitu sistem lantai kendaraan (pelat, balok memanjang, dan balok melintang) bersama-sama dengan kabel penggantung dan menara utamanya (RSNI T-03-2005). Interaksi antara ketiga elemen tersebut akan memengaruhi kinerja maupun aliran gaya yang terjadi pada jembatan. Menurut Irpan (2011) keberhasilan penggunaan sistem *cable-stayed* dicapai dengan ditemukannya baja berkekuatan tinggi dan tipe gelagar *orthotropic*, juga kemajuan teknik las.

Tabel 2.1 Jembatan *Cable-stayed* di Indonesia (Chen & Duan, 2013)

Nama Jembatan	Lokasi	Panjang bentang utama (m)	Panjang Total (m)	Tahun Pembangunan
Tengku Fisabilillah	Kep. Riau	350	642	1998
Pasupati	Jawa Barat	106	2282	2005
Grand Wisata Overpass	Jawa Barat	81	81	2007
Siak Indrapura	Riau	200	1196	2007
Suramadu	Jawa Timur	434	5438	2009
Melak	Kalimantan Barat	340	680	2015
Galalapoka	Maluku	150	1065	2015
Sukarno	Sulawesi Utara	120	622	2015
Siak IV	Riau	156	699	<i>construction</i>

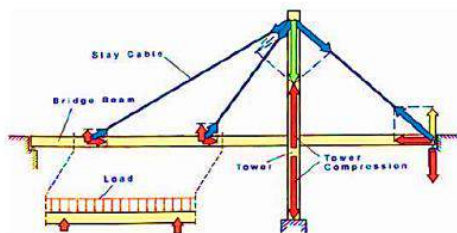
2.2 Komponen Utama Jembatan *Cable-Stayed*

Jembatan *cable-stayed* terdiri dari tiga elemen utama yaitu *pylon* atau menara, sistem lantai, dan ruji kabel (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Komponen utama jembatan *cable-stayed* (Xu, 2013)

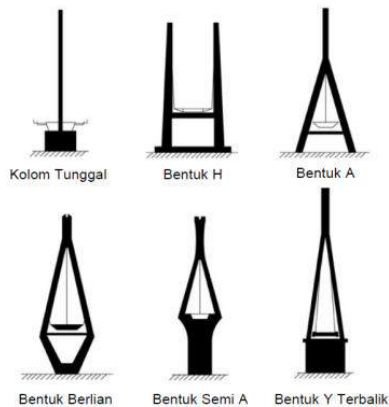
Beban yang bekerja pada sistem lantai didukung oleh ruji kabel (*cable-stayed*) yang terhubung langsung pada gelagar kemudian beban tersebut diteruskan kepada menara (Gambar 2.2). Untuk menahan beban mati jembatan, kabel penggantung merupakan penunjang utama, yang tingkah lakunya (akibat beban mati) banyak ditentukan oleh cara pelaksanaan jembatan (RSNI T-03-2005). Akibat beban yang bekerja, kabel akan menerima gaya aksial tarik, untuk menara sebagian menerima gaya aksial tekan.



Gambar 2.2 Aliran gaya pada jembatan *cable-stayed* (Svennson, 2012)

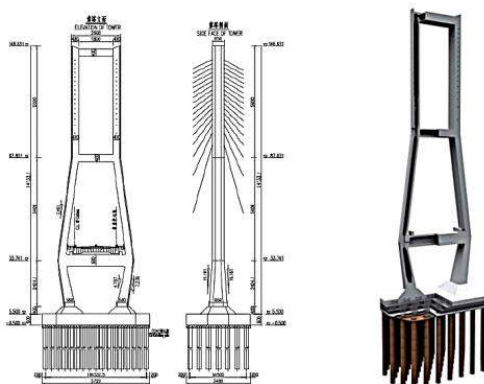
2.2.1 Menara

Menara jembatan *cabl-stayed* menahan tekanan tinggi kerana memikul hampir semua berat sendiri /tetap dan beban hidup yang berada pada struktur (PTJBK, 2015). Beban yang bekerja tersebut kemudian disalurkan ke bangunan bawah hingga pondasi. Umumnya dimensi menara langsing, karena itu stabilitas menjadi penting. Pemilihan bentuk menara sangat dipengaruhi oleh konfigurasi kabel, estetika, dan kebutuhan perencanaan serta pertimbangan biaya (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Beberapa bentuk menara disajikan pada Gambar 2.3. Menurut Svensson (2012) bentuk menara H, Berlian (*diamond*), Semi A, dan bentuk Y terbalik digunakan untuk tatanan kabel ganda (*two cable plane*). Sedangkan bentuk kolom tunggal dan bentuk A digunakan untuk tatanan kabel tunggal (*one cable plane*).

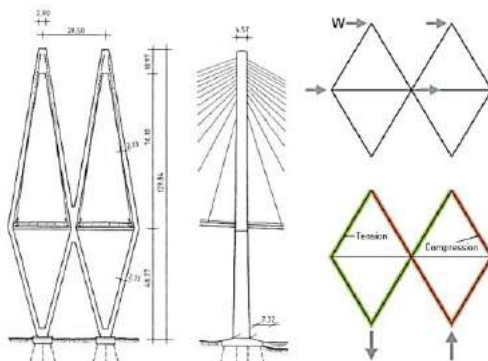


Gambar 2.3 Bentuk dasar *pylon* jembatan *cabl-stayed*
(PTJBK, 2015)

Bentuk menara jembatan suramadu adalah bentuk berlian (Gambar 2.4). Pemilihan bentuk ini cukup menarik, dari segi kekakuannya, bentuk ini cukup kaku (Gambar 2.5) dan kebutuhan lebar menara dapat diperkecil sesuai kebutuhan jaringan jalan.



Gambar 2.4 Menara Jembatan Suramadu (CCC, 2005)



Gambar 2.5 Gaya dan aliran gaya pada *pylon* tipe berlian (Svennson, 2012)

Menara direncanakan dengan ketinggian tertentu. Hal yang menjadi aspek penting dalam perencanaan tinggi menara adalah tipe sistem kabel, jumlah kabel, dan perbandingan estetika dalam tinggi menara dan panjang bentang, untuk itu direkomendasikan perbandingan antara bentang terpanjang dan tinggi menara antara 0,19 – 0,25 (Podolny, 1976 dalam Supriyadi dan Muntohar, 2014). Penambahan tinggi sebuah menara secara prinsip akan mengurangi momen lentur dan aksial tekan pada gelagar dan menambah kekakuan struktur jembatan, namun efeknya akan menambah jumlah (kuantitas) ruji kabel. Troitsky (1988) memberikan usulan formula dalam menentukan tinggi menara (persamaan 2.1) dalam perencanaan struktur jembatan cable-stayed.

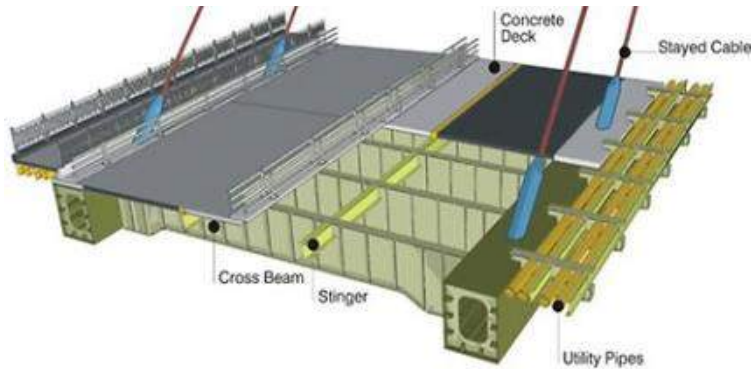
$$H = n \times a \times \tan 25^\circ \quad (2.1)$$

Dengan n dan a masing-masing jumlah kabel dan panjang panel. Berdasarkan formula tersebut, dapat dilihat bahwa tinggi menara adalah merupakan fungsi dari panjang panel.

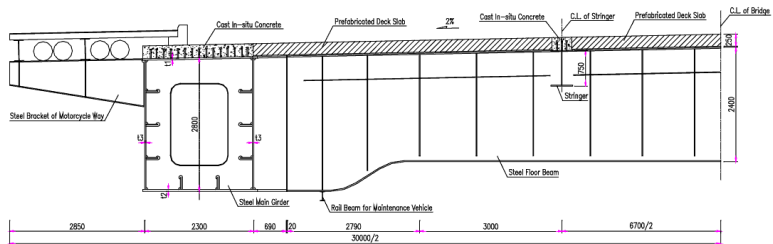
2.2.2 Sistem Lantai

Sistem lantai dapat menambah atau meningkatkan kinerja kekakuan jembatan *cable-stayed*. Dalam desain sistem lantai, sebagai pertimbangan, sebaiknya untuk mengurangi beban mati dan tahanan terhadap aliran udara vertikal (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Untuk jembatan kabel seperti jembatan *cabel-stayed* dan jembatan suspensi, material struktur atas dapat terbuat dari beton, baja, dan komposit (Hidayat, 2011).

Gelagar atau dek biasanya berupa beton dengan berat yang relatif lebih ringan, dek *orthotropic*, atau baja berongga yang sebagian di isi dengan beton (komposit baja-beton) (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Pada sistem lantai atau dek ini, pengaruh kembang-susut material baja atau beton perlu diperhatikan dengan seksama. Kembang-susut yang tidak terkontrol dapat menyebabkan penambahan tegangan pada struktur dek (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Aspek penting lainnya dari gelagar atau dek jembatan adalah kekakuan torsional. Kekakuan torsional yang baik akan menyebabkan kestabilan yang lebih baik dari jembatan terhadap beban dinamik angin (Hidayat, 2011). Susunan dek yang tersusun dari gelagar pelat (*plate girder*) tidak memiliki kekakuan torsional yang besar sehingga tidak dapat digunakan untuk jembatan yang bentangnya panjang dan lebar jembatan yang direncanakan hanya menggunakan satu bidang kabel penggantung (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Dek jembatan yang menggunakan satu atau susunan *box* akan memiliki kekakuan torsi yang sangat besar sehingga cocok untuk jembatan yang mengalami torsi yang sangat besar (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Pada studi kasus ini, jembatan Suramdu menggunakan *Double Box Girder* baja komposit (Gambar 2.6 dan 2.7) yang akan memberikan kekakuan torsi yang lebih baik selain kemudahan pelaksanaan pekerjaan (Hidayat, 2011).



Gambar 2.6 Sistem lantai jembatan Suramadu (CCC, 2005)

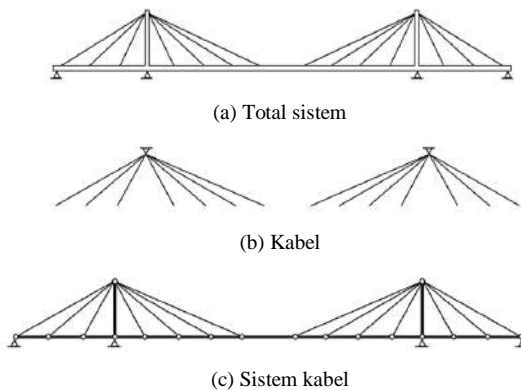


Gambar 2.7 Detail penampang gelagar jembatan Suramadu
(CCC, 2005)

Perilaku gelagar sebagai bagian yang terintegral dari sebuah jembatan *cabl-stayed* mirip dengan perilaku gelagar menerus di atas perletakan elastis (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Akan tetapi selama tahap awal dan pra-penegangan kabel akibat beban mati, dukungan kabel dapat dianggap sebagai perletakan tetap (Supriyadi dan Muntohar, 2014).

2.2.3 Sistem Kabel

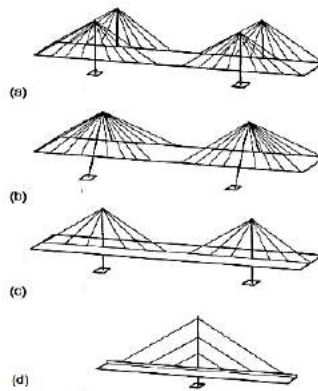
Kabel digunakan untuk menopang sistem lantai (gelagar) di antara dua tumpuan dan memindahkan beban tersebut ke menara (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Sistem kabel (Gambar 2.8) terdiri dari kabel struktural, segmen-segmen dari gelagar, dan *pylon*.



Gambar 2.8 Ilustrasi sistem kabel jembatan *cable-stayed*
 (Gimsing & Georgakis, 2012)

Sistem kabel ini bisa di sederhanakan dengan meninjau kabel sebagai sebuah tatanan transversal dan tatanan longitudinal. Tatanan transversal atau tatanan melintang dapat menggunakan tiga alternatif yaitu satu bidang (*single plane*), dua bidang (*two lateral plane*), dan tiga atau lebih bidang (Gambar 2.9). Kabel satu bidang digunakan untuk jembatan dengan lebar yang relatif kecil serta jumlah lajur lalu lintas yang genap (PTJJK, 2015), sedangkan untuk dua bidang digunakan pada jembatan dengan lebar lajur lalu lintas cukup besar, contohnya jembatan suramadu,

jembatan merah putih (jembatan Galapoka), dan lain sebagainya. Jembatan *cabl-stayed* dengan jumlah bidang kabel tiga atau lebih, biasanya digunakan untuk jembatan dengan yang sangat lebar (PTJBK, 2015). Penggunaan kabel penggantung tiga bidang sampai saat ini masih berupa inovasi dan baru sampai pada tahap desain (Podolny et. all, 1998).



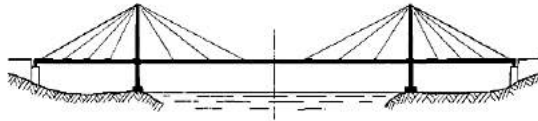
Gambar 2.9 Tatanan kabel arah transversal (PTJBK, 2015)

Selain penataan pada arah transversal, penataan juga dilakukan pada arah melintang (longitudinal). Tatanan longitudinal yang umumnya dikenal adalah tipe sejajar (*harp*), tipe kipas (*fan*), tipe *radiating*, dan tipe bintang (*Star*). Penjelasan masing-masing bentuk tatanan longitudinal tersebut akan diuraikan sebagai berikut (Supriyadi dan Muntohar, 2014).

a. Tipe memancar (*radiating*)

Merupakan sebuah susunan dimana kabel dipusatkan pada ujung atas menar dan disebar sepanjang bentang dan gelagar (Gambar 2.10). Kelebihan tipe ini adalah kemiringan rata-rata kabel cukup besar

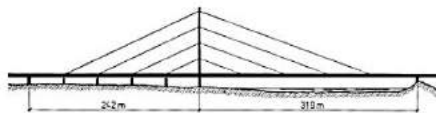
sehingga komponen gaya horizontal tidak terlalu besar kabel yang terkumpul di atas kepala (*top*) menara menyulitkan dalam perencanaan dan pendetailan sambungan.



Gambar 2.10 Tatanan longitudinal tipe memancar
(Gimsing & Georgakis, 2012)

b. Tipe sejajar (*harp*)

Terdiri atas kabel-kabel penggantung yang dipasang sejajar dan disambungkan ke menara dengan ketinggian yang berbeda-beda satu terhadap yang lainnya (Gambar 2.11). Susunan kabel yang sejajar memberikan efek estetika yang sangat indah namun terjadi lentur yang besar pada menara.



Gambar 2.11 Tatanan longitudinal tipe sejajar
(Gimsing & Georgakis, 2012)

c. Tipe kipas (*fan*)

Merupakan solusi tengah Antara tipe *radiating* dengan tipe *harp*. Kabel disebar pada bagian atas menara dan pada dek sepanjang

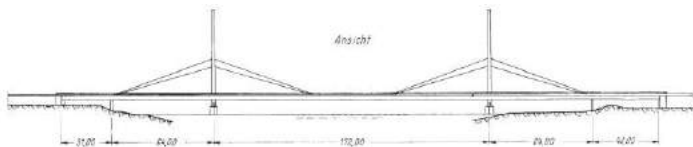
bentang, menghasilkan kabel tidak sejajar (Gambar 2.12). Penyebaran kabel pada menara akan memudahkan pende-tailan tulangan.



Gambar 2.12 Tatanan longitudinal tipe kipas
(Gimsing & Georgakis, 2012)

d. Tipe bintang (*star*)

Memiliki bentuk yang berlawanan dengan tipe *radiating* dimana kabel terpusat pada gelagar. Bentuk ini memberikan efek estetika yang baik namun menyulitkan pendetailan sambungan pada gelagar. Dukungan antara dua tumpuan tetap, jembatan hanya ada pada pertemuan kabel sehingga momen lentur yang akan terjadi menjadi lebih besar.



Gambar 2.13 Tatanan longitudinal tipe *star*
(Gimsing & Georgakis, 2012)

2.3 Kabel sebagai Elemen Struktural

Kabel sebagai salah satu elemen utama jembatan *cable-stayed* harus memiliki keamanan terhadap kegagalan fatig (*fatigue*) serta ancaman korosi (laju karat). Beban fatig pada jembatan terjadi karena adanya beban

transien yang bekerja. Pemilihan penggunaan tipe kabel tergantung pada property mekanikal yang dibutuhkan (modulus elastisitas, kekuatan tarik ultimit, durabilitas, dll) disamping pertimbangan ekonomis.

a) *Spiral Strand*

Kabel jenis terdiri dari beberapa kawat berbentuk lingkaran (bulat) yang diberikan puntiran sedemikian rupa agar tercipta homogenitas dalam memikul gaya (Gambar 2.14). Puntiran tersebut disesuaikan dengan kebutuhan diameter yang diperlukan.



Gambar 2.14 Jenis kabel *spiral strand* dengan *seven-wire strand*
(Gimsing & Georgakis, 2012)

Gimsing dan Georgakis (2012) memberikan perbandingan antara kabel baja dan baja struktural berdasarkan nilai tipikalnya seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan kabel baja konvensional dan baja struktural
(Gimsing dan Georgakis, 2012)

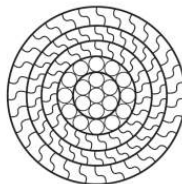
	Kabel baja konvensional		Baja struktural	
	Unit	(5 atau 7 mm kawat)	Mild	High strength
Yield stress (=2% proof stress)	MPa	1180	240	690
Tensile Strength	Mpa	1570	370	790

Tabel 2.2 Lanjutan

	Kabel baja konvensional		Baja struktural	
	Unit	(5 atau 7 mm kawat)	Mild	High strength
Strain at breaking	%	4	24	
Modulus of elasticity	Gpa	205	210	210
Typical chemical composition	C	0,80%	0,20%	0,15%
	Si	0,20%	0,30%	0,25%
	Mn	0,60%		0,80%
	Cu	0,05%	0,20%	0,30%
	Ni	0,05%		0,80%
	Cr	0,05%	0,30%	0,50%
	P	0,03%	0,04%	0,03%
	S	0,02%	0,04%	0,03%

b) *Locked Coil Strand*

Berbeda dengan *Spiral Strand*, kabel jenis ini memiliki inti kawat (*wire core*) dan terdiri dari beberapa lapisan (*layer*). Kawat inti diuntai sedemikian rupa sehingga dengan cara kerja melapiskan inti kawat hingga mencapai diameter yang dibutuhkan.



Gambar 2.15 Potongan melintang kabel jenis *locked coil strand*

(Gimsing & Georgakis, 2012)

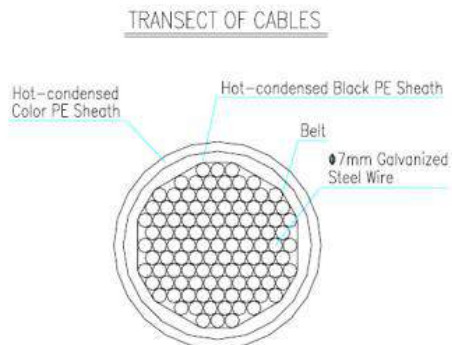
c) *Parallel-Wire Strand*

Parallel-Wire Strand terdiri dari beberapa kawat bulat galvanis berdiameter 5 mm hingga 7 mm berbentuk *hexagonal*, dengan suatu *helix* panjang. Kawat tersebut dibungkus oleh lapisan *high density polyethylene (HDP) tube*.



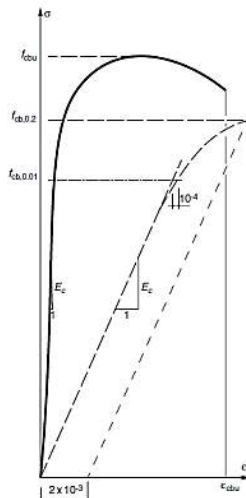
Gambar 2.16 Berbagai macam jenis kabel *Parallel-Wire Strand*
(Gimsing & Georgakis, 2012)

Pada studi kasus ini (jembatan Suramadu) tipe kabel yang digunakan adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Jenis kabel jembatan Suramadu (CCC, 2005)

Diagram tegangan regangan pada tipikal kabel diberikan oleh Gimsing dan Georgakis (2012) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18. Adanya garis plateuplastis yang menunjukkan bahwa regangan plastis tersebut cukup untuk mendapatkan sebuah redistribusi lokal gaya antar kabel akibat kurang sempurnanya pelaksanaan dan pengurangan tegangan puncak akibat beban permanen. Hal ini adalah bentuk antisipasi dari kesalahan manusia sebagai pekerjaanya (*human error*). Beberapa properti mekanikal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan kabel diantaranya adalah modulus elastisitas (E_c), 0,2% tegangan handal (*proof stress*, $f_{cb,0,2}$), batas proporsional tegangan (*limit of proportionality* (0,01% *strees*, $f_{cb,0,01}$), kekuatan tarik batas (f_{cbu}), dan perpanjangan total saat putus (ϵ_{cbu}) (Gimsing dan Georgakis, 2012).



Gambar 2.18 Tipikal kurva tegangan-regangan kabel
(Gimsing & Georgakis, 2012)

2.4 Efek Non-Linier pada Kabel

Efek non-linier pada kabel terjadi ketika beban yang didukung bertambah dan *sag* pada kabel berkurang sehingga panjang *chord* kabel akan bertambah (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Untuk menyederhanakan hal tersebut maka pada kabel dapat dilakukan penempatan komponen yang linier. Untuk menempatkan kabel sebagai komponen yang linier maka modulus kabel harus diidealisasikan (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Pada struktur kabel (*wire rope*), kabel tidak hanya mengalami efek non-linier akibat adanya *sag* namun juga karena gaya aksial (tarik) yang cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan geometri kabel disebabkan karena adanya perubahan tegangan kabel. Menurut Ernest (dalam Troitsky, 1988) mengenai masalah *sag* bahwa tegangan konstan pada elemen kabel dapat dijabarkan dengan persamaan berikut.

$$E_i = \frac{E_e}{1 + [(\gamma L)^2 / 12 \sigma^2] E_e} \quad (2.2)$$

dimana,

E_i : modulus elastisitas idealisasi

E_e : modulus elastisitas kabel

γ : berat jenis kabel

σ : tegangan ijin kabel

l : jarak antara dukungan kabel

L : panjang aktual kabel

Modulus elastisitas idealisasi ini diperoleh dari penurunan rumus dengan memperhatikan Gambar 2.19 yang pada ujung bawah diberi perletakan sendi dan pada ujung atas diberi perletakan bergerak (*roll*). Akibat gaya

F , kabel akan mengambil bentuk seperti rantai yang digantung (*catenary*), dimana $L > 1$ dan L adalah panjang kabel antara dua dukungan (Troitsky, 1988). Jika F menjadi sangat besar (*infinite*), kabel akan menjadi lurus (Supriyadi dan Muntohar, 2014). Akibat gaya F maka ujung C akan ke posisi C_1 dengan besar perpindahannya dijabarkan oleh Troitsky (1988) sebagai berikut.

$$\Delta l = L - l \quad (2.3)$$

karena peningkatan beban maka :

$$F_1 = F + \Delta F \quad (2.4)$$

Jarak perpindahan ujung C adalah :

$$\Delta \Delta l = \Delta l - \Delta l_1 \quad (2.5)$$

dengan pertambahannya :

$$\varepsilon_f = \Delta \Delta l / l \quad (2.6)$$

Selanjutnya, modulus elastisitas yang diperoleh diberikan sebagai berikut:

$$E_f = \sigma / \varepsilon_f \quad (2.7)$$

Akibat beban aksial kabel akan mengalami *elastic stretch* :

$$\varepsilon_f = \sigma / E_e \quad (2.8)$$

Modulus elastisitas ideal atau equivalen kabel E_i tergantung E_f yang berhubungan dengan *sag* dan E_e yang berhubungan dengan elastisitas atau :

$$E_i = \frac{\sigma}{\varepsilon_f + \varepsilon_e} \quad (2.9)$$

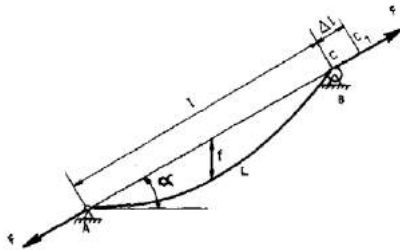
dimana,

$$\varepsilon_f = \sigma / E_f \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_e = \sigma/E_c \quad (2.11)$$

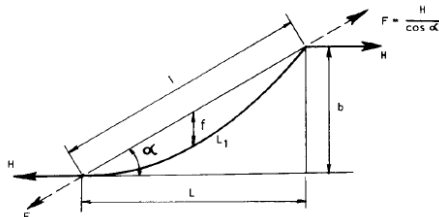
nilai-nilai dari persamaan 2.10 dan 2.11 disubstitusi ke persamaan 2.9 maka diperoleh :

$$E_i = \frac{E_f E_c}{E_f + E_c} \quad (2.12)$$



Gambar 2.19 Perilaku kabel yang dipasang miring pada tumpuan sederhana (Troitsky, 1988)

Lendutan (*sag*) atau yang di notasikan f pada Gambar 2.19 diketahui besarnya dengan melihat kurva *catenary* pada Gambar 2.20. Kurva tersebut dapat diperkirakan dengan meninjau panjang kurva parabola dibawah ini. Kurva ini menjadi penting karena akan menentukan gaya prategang pada kabel.



Gambar 2.20 Kurva parabola (Troitsky, 1988)

Jika kabel menerima beban merata sepanjang bentangnya atau akibat berat sendirinya (Gambar 2.21) maka besarnya gaya horizontal dapat dihitung sebagai berikut.

$$H = \frac{wa^2 \cos \alpha}{8s} \quad (2.13)$$

Gaya vertikal u dan d :

$$V_{u,d} = H \tan \alpha \pm \frac{1}{2} w c \quad (2.14)$$

Berat sendiri kabel :

$$w = \gamma A \quad (2.15)$$

Panjang tak teregang kabel :

$$L_u = c (1 + (8s^2/3a^2)) \quad (2.16)$$

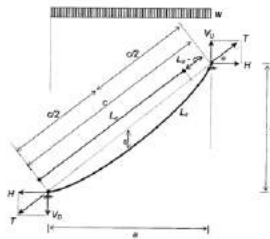
Pertambahan regangan kabel :

$$\Delta L = \frac{Hc}{EA} \left(1 + \frac{16s^2}{3a^2}\right) \quad (2.17)$$

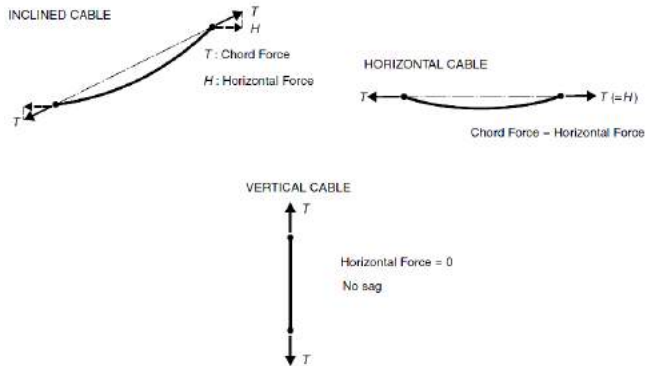
Panjang kabel akibat adanya *sag* :

$$L_c = L_u + \Delta L \quad (2.18)$$

Berbagai kecenderungan efek non-linier *sag* pada kabel disajikan pada Gambar 2.22 sebagai ilustrasi kemungkinan terjadinya *sag* pada kabel akibat berat sendirinya.



Gambar 2.21 Deformasi kabel akibat berat sendiri



Gambar 2.22 Kecenderungan kabel mengalami efek *sag* akibat berat sendiri (Gimsing & Georgakis, 2012)

2.5 Jarak Antar Kabel Penggantung

Jarak antar kabel (panel) adalah fungsi dari tinggi dari menara yang di formulasikan sebagai berikut (Troitsky, 1988):

$$h = na \tan 25^\circ = 0,465na \quad (2.19)$$

untuk tiga kabel yang berada pada bentang samping,

$$h = 0,465 \times 3a = 1,4a \quad (2.20)$$

sedangkan untuk empat kabel,

$$h = 0,465 \times 4a = 1,86a \quad (2.21)$$

dimana,

h : tinggi menara

na : proyeksi panjang horizontal kabel

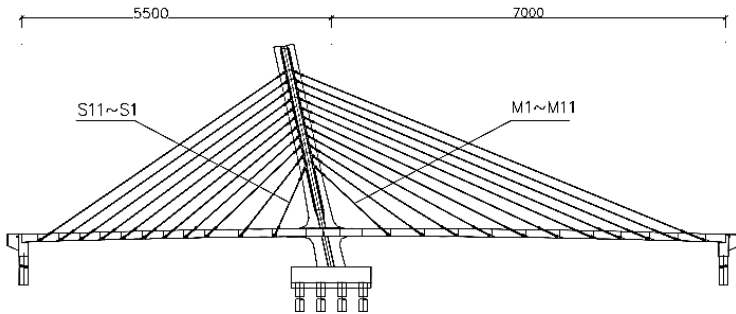
a : panjang panel

Panel yang berada pada bentang tengah (*middle panel*) selalunya lebih panjang dibandingkan dengan panel sisanya (*remaining panels*) yang nilainya dapat diambil sebesar $1,3a$. Sebagai bahan acuan, jarak kabel optimum dapat diambil sebagai berikut (Troitsky, 1988):

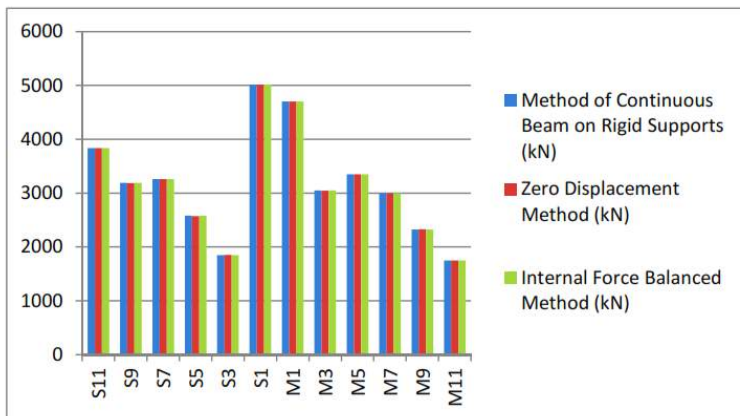
- a) Untuk bentang utama yang berada antara 137-150 m, direkomendasikan menggunakan jarak antara panel sebesar 19,8 m.
- b) Untuk bentang utama yang lebih kecil dari poin a, direkomendasikan menggunakan jarak antara panel sebesar 15,2-16,8 m.
- c) Untuk bentang utama lebih besar dari 168 m, sebaiknya menggunakan jarak antara kabel sebesar 30,5 m.

Panel pada bentang tengah memiliki performa yang berbeda dari pada panel lainnya, karena panel pada bentang tengah tidak menerima tegangan aksial tekan komponen horizontal dari gaya kabel, dan oleh karena itu lebih baiknya sedikit lebih panjang.

Jarak antar kabel penggantung pada jembatan *cable-stayed* mempunyai pengaruh besar pada gaya aksial yang dipikul oleh kabel. Banyak metode yang dapat digunakan untuk menghitung gaya aksial pada kabel seperti metode balok menerus dengan tumpuan kaku, metode *zero displacement*, *internal force balance method* dan lain sebagainya (Xun Wu dan Baolei Li, 2015). Namun walaupun metode perhitungannya berbeda tapi *output* dari perhitungan tersebut tidak jauh berbeda (Gambar 2.23).



a. Jembatan yang dihitung

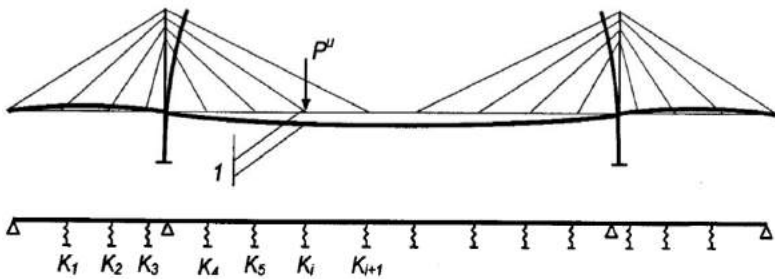


b. Hasil perhitungan gaya aksial

Gambar 2.23 Perbandingan gaya berdasarkan metode perhitungan
(Wu & Li, 2015)

2.6 Analisis Statik Jembatan *Cable-Stayed*

Tahap pendahuluan dalam analisis jembatan *cable-stayed* adalah dengan menggunakan metode analisis statik. Pada tahap ini, analisis statik bertujuan untuk menentukan dimensi awal penampang komponen utama seperti gelagar, *pylon*, dan kabel. Pada tahap analisis statik ini juga belum memperhitungkan efek non-linier atau pengaruh sekunder jangka panjang yang bisa sangat signifikan terjadi pada jembatan *cable-stayed*. Setelah tahap analisis statik tahap pendahuluan, juga dilakukan analisis statik tahap lanjutan untuk mengetahui karakteristik yang lebih lengkap pengaruh efek orde kedua. Terdapat setidaknya dua metode sederhana dalam analisis statik struktur jembatan *cable-stayed*. Pertama, analogi balok diatas tumpuan elastis seperti terlihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.24 Analisa statik jembatan *cable-stayed* dengan metode analogi balok diatas tumpuan elastis

Metode analisis dengan analogi balok diatas tumpuan elastis ini relatif sederhana. Anggapannya adalah bahwa setiap titik angkat pada kabel

digantikan menjadi sebuah pegas elastik yang besarnya dapat dihitung dengan membagi lendutan yang terjadi akibat beban terpusat ultimit P_i^u pada setiap titik angkat pada kabel. Besarnya konstanta pegas (K) tiap kabel adalah:

$$K = \frac{P_i^u}{\delta} \quad (2.22)$$

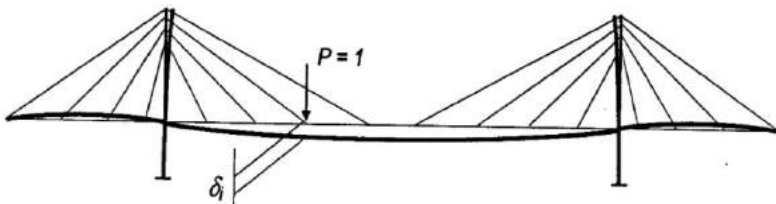
Besarnya gaya kabel (N) dihitung dengan:

$$N = \frac{K \Delta}{\sin \alpha} \quad (2.23)$$

Adanya pemendekan kabel (ΔL) agar struktur tetap pada konfigurasinya dihitung dengan:

$$\Delta L = \frac{NL}{AE} \quad (2.24)$$

Metode yang kedua adalah matriks fleksibilitas struktur. Metode ini memiliki anggapan bahwa jika suatu titik angkat kabel diberi beban, maka deformasi gelagar pada titik angkat tersebut akan memengaruhi deformasi gelagar pada titik angkat kabel lainnya. Besarnya pengaruh dari hal tersebut dapat diketahui dengan cara mengidentifikasi deformasi gelagar akibat beban titik satu satuan pada masing-masing titik angkat kabel seperti tersajikan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.25 Analisa statik dengan metode matriks fleksibilitas struktur

Deformasi gelagar akibat beban titik satu satuan ini sering disebut juga matriks fleksibilitas $[f]$. Invers matriks fleksibilitas akan diperoleh matriks kekakuan $[K]$. Berdasarkan Gambar 2.25 diatas gaya titik angkat $\{V_i\}$ dan gaya aksial $\{T_i\}$ pada masing-masing kabel dapat dihitung dengan rumus elastik sebagai berikut:

$$V_i = [f]^{-1} \Delta \quad (2.25)$$

$$N = \frac{V}{\sin \alpha} \quad (2.26)$$

Pemendekan kabel yang diperlukan adalah:

$$\Delta L = \frac{NL}{AE} \quad (2.27)$$

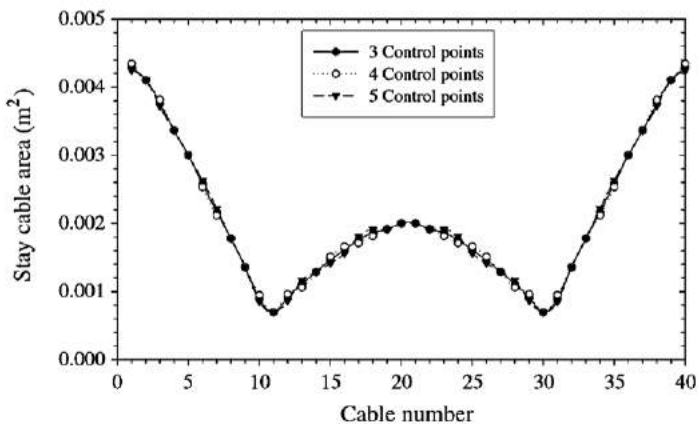
Dari uraian diatas dapat dilihat perbedaan analisis jembatan *cable-stayed* dengan jembatan tipe lain atau jembatan konvensional. Pengaruh dari beban permanen tidak bisa langsung diperhitungkan tetapi perlu dilakukan proses iterasi.

a. Analisis Kabel

Terdapat dua pertimbangan analisis kabel dalam analisis statik jembatan *cable-stayed* antara lain analisis gaya kabel akibat beban permanen dan analisis gaya kabel akibat beban pada kondisi layan.

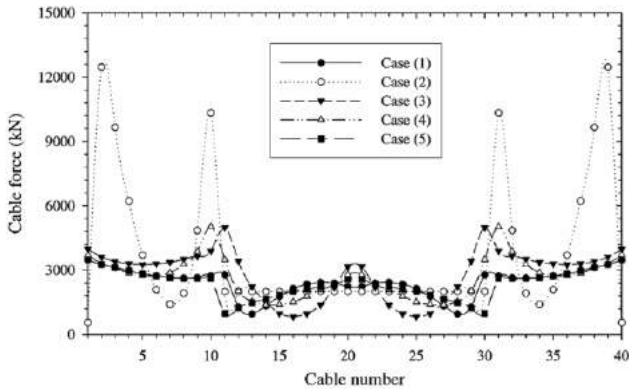
Apabila beban permanen bekerja pada sistem kabel pasif tanpa gaya pratekan, maka gaya kabel akan terlalu rendah (Walther et. al, 1999). Fenomena tersebut dapat dijelaskan oleh teori energi regangan, bahwa sebagian energi akan diserap oleh deformasi gelagar dan *pylon*. Bila deformasi gelagar dan *pylon* dapat dicegah, maka energi tersebut akan dikembalikan pada kabel.

Penelitian yang dilakukan oleh Hassan (2013) yang menerapkan reduksi terhadap beberapa variabel utama untuk mengetahui tingkat performa dan efisiensi pada prosedur optimasi dengan memberikan kontrol poin yang menghasilkan distribusi luasan kebutuhan kabel seperti ditunjukkan pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26 Distribusi luasan kebutuhan kabel (Hassan, 2013)

Berdasarkan gambar diatas dapat dilihat bahwa luas kebutuhan kabel terluar dari *pylon* sangat besar dibandingkan dengan kabel terdekat *pylon*. Dampaknya adalah dibutuhkan *pylon* yang memiliki tingkat kekakuan yang tinggi (Hassan, 2013). Juga dalam penelitian sebelumnya (Hassan et. al, 2012) telah memberikan sejumlah parameter untuk menentukan besarnya gaya aksial kabel dengan pemberian batasan (kekangan) pada nodal. Distribusi gaya aksial yang dimaksud dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



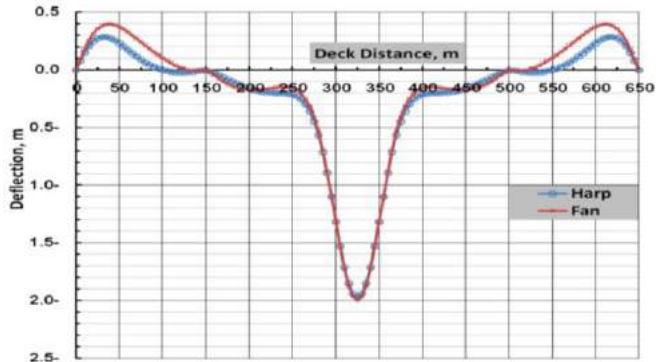
Gambar 2.27 Distribusi gaya kabel dengan beberapa kasus pembebanan (Hassan et. al., 2012)

b. Analisis Gelagar

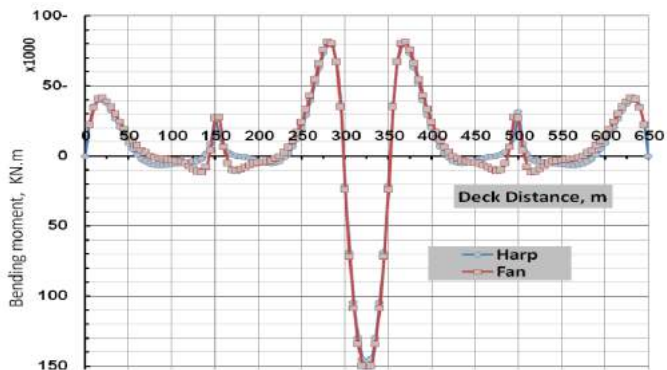
Fungsi utama gelagar pada jembatan *cabl-stayed* adalah menyalurkan beban-beban yang terjadi berupa berat sendiri gelagar, beban mati tambahan, beban lalu lintas dan beban-beban lainnya yang kemungkinan ada pada jembatan. Dalam menopang beban, gelagar akan mengalami fluktuasi beban akibat beban lalu lintas yang setiap waktu berubah-ubah. Implikasi dari permasalahan ini adalah dibutuhkannya gelagar yang kaku (*rigid*). Untuk mengatasi hal ini dimensi gelagar harus ditingkatkan, utamanya pada dimensi tinggi gelagar. Hasilnya adalah gelagar akan tidak ekonomis lagi, selain itu dalam masa konstruksi akan memerlukan peralatan yang banyak.

Deformasi maksimum pada gelagar justru terjadi pada pertemuan gelagar dan *pylon* jika gelagar memang ditopang sepenuhnya oleh

kabel (Shehata et. al., 2012 dan Hassan et. al., 2012). Ilustrasi mengenai deformasi maksimum yang terjadi pada gelagar dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

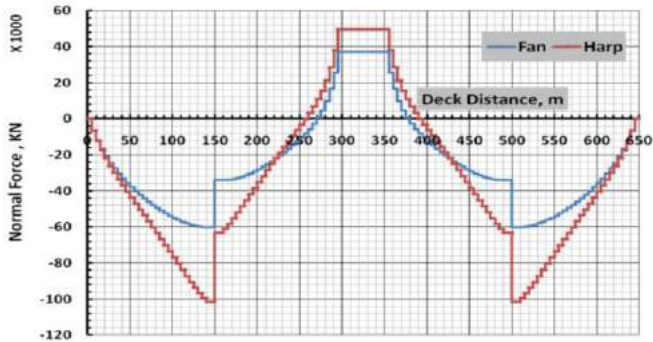


a. Deformasi gelagar jembatan *cable-stayed*



b. Momen lentur gelagar jembatan *cable-stayed*

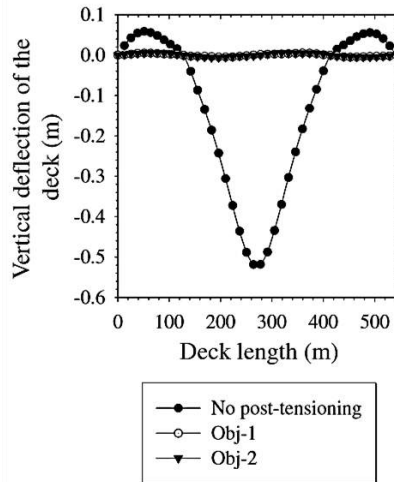
Gambar 2.28 Deformasi gelagar dan gaya-gaya dalam jembatan *cable-stayed* (Abdel Raheem et. al., 2012)



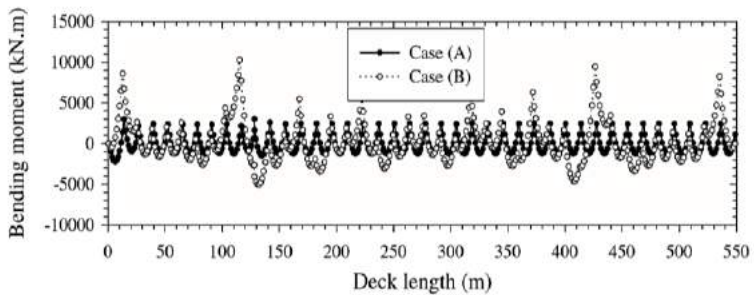
c. Gaya normal gelagar jembatan cable-stayed

Gambar 2.28 Deformasi gelagar dan gaya-gaya dalam jembatan *cable-stayed* (Abdel Raheem et. al., 2012) - lanjutan

Permasalahan diatas dapat diatasi dengan analisis penentuan gaya kabel optimum untuk mengurangi deformasi pada gelagar sehingga gaya-gaya dalamnya pun terdistribusi merata. Tekniknya adalah dengan menentukan nilai optimum gaya kabel pada setiap titik angkat kabel (Hassan et. al., 2012). Secara praktis dengan anggapan bahwa susunan kabel yang menyebar seperti memikul dengan dengan beberapa bentang yang kecil, sehingga dengan bentang tersebut setiap elemen gelagar akan mengalami deformasi yang kecil pula. Anggapan seperti ini memiliki keuntungan dalam melakukan pendetailan sambungan (*connection*) antara gelagar dengan gaya-gaya yang terdistribusi merata. Ilustrasi dari hasil proses optimum *post-tensioning* kabel disajikan pada gambar dibawah ini yang dimana hasilnya berupa deformasi vertikal gelagar, momen lentur gelagar.



- a. Deformasi gelagar jembatan *cabl*-stayed dengan optimum *post-tensioning* kabel

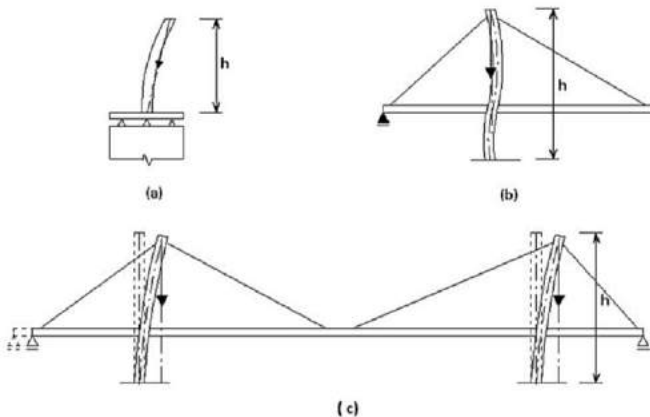


- b. Momen lentur gelagar jembatan *cabl*-stayed dengan optimum *post-tensioning* kabel

Gambar 2.29 Deformasi dan momen lentur gelagar dengan optimum *post-tensioning* kabel (Hassan et. al., 2012)

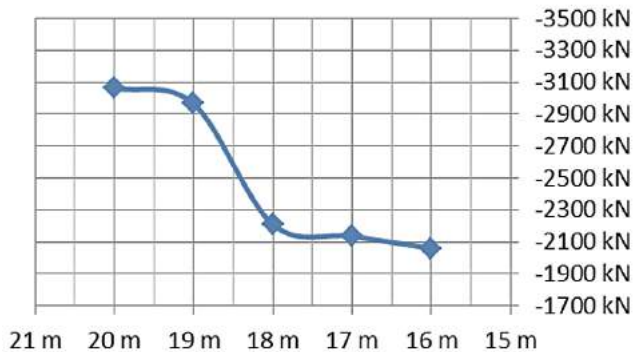
c. Analisis Pylon

Pylon atau menara dalam analisis struktur berperilaku seperti layaknya kolom (lihat Gambar 2.40). Sebab itu terdapat beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan *pylon*. Pertama, karena *pylon* merupakan elemen yang menerima gaya aksial tekan dan momen akibat pengaruh gaya kabel penggantung maka akan cenderung mengalami tekuk (*buckling*). Kasus seperti ini dapat diatasi dengan pemilihan dimensi *pylon* dan geometrik penampang *pylon* yang optimal dengan mempertimbangkan kemampuannya dalam kondisi layan (*service*) dan kondisi batas (*ultimate*). Kedua pertimbangan geometris dan *layout* yang kemungkinan asimetris perlu memperhitungkan kapasitas torsi. Ketiga yaitu *pylon* sebaiknya di desain sebagai kolom yang menerima gaya vertikal kabel dan sebagai kantilever akibat ketidakseimbangan gaya horizontal kabel.



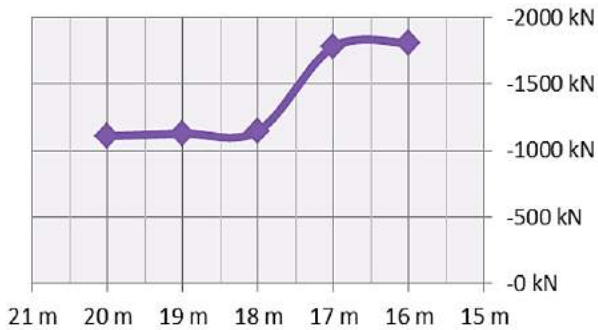
Gambar 2.30 Perilaku kolom pada *pylon*

Penggunaan material beton pada *pylon* mempunyai dasar yang kuat mengingat *pylon* akan mengalami gaya aksial tekan yang dominan. Penelitian terkait pengaruh gaya aksial tekan *pylon* terhadap beberapa variasi ketinggian *pylon* dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

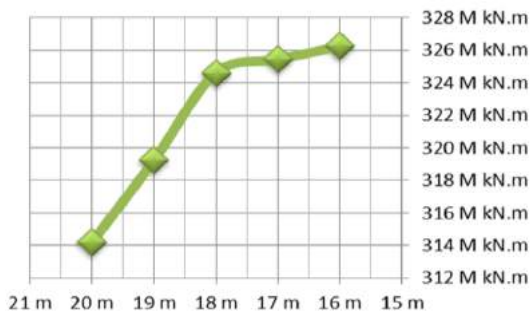


Gambar 2.31 Gaya aksial tekan maksimum *pylon* berdasarkan tinggi *pylon* (Parmar dan Parikh, 2015)

Berdasarkan gambar diatas dapat dilihat bahwa pengaruh ketinggian (*layout*) sebuah *pylon* mempengaruhi efek gaya aksial tekan yang terjadi. Hasil dari penelitian mengenai variasi ketinggian *pylon* yaitu ketinggian *pylon* berbanding lurus dengan gaya gaya aksial tekan yang dihasilkan. Artinya semakin tinggi sebuah *pylon* akan menambah besarnya (*increase*) gaya aksial tekan pada *pylon*, namun akan mengurangi (*decrease*) gaya aksial dan momen lentur pada gelagar. Untuk melihat fenomena ini dapat merujuk pada Gambar 2.32 butir a dan b (Parmar dan Parikh, 2015).



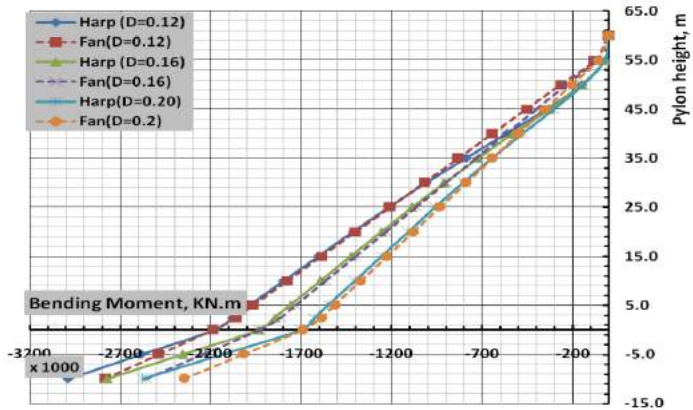
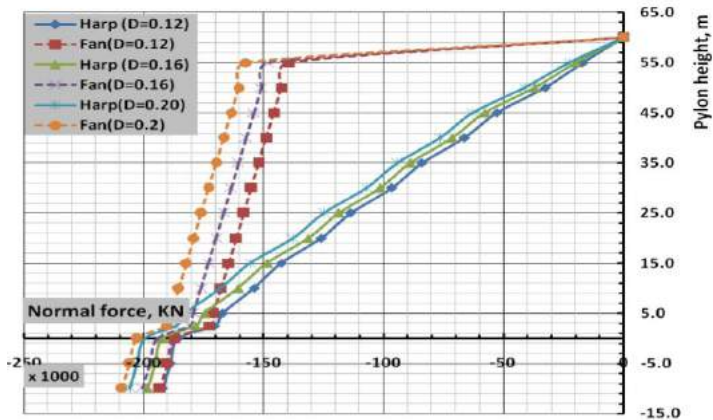
a. Gaya aksial tekan pada gelagar



b. Momen lentur pada gelagar

Gambar 2.32 Gaya aksial tekan dan momen lentur maksimum gelagar berdasarkan tinggi *pylon* (Parmar & Parikh, 2015)

Selain penelitian mengenai pengaruh variasi tinggi *pylon*, terdapat pula penelitian yang membahas mengenai pengaruh dari bentuk atau geometrik sebuah *pylon* (Shehata et. al, 2012). Pengaruh dari bentuk *pylon* terhadap momen lentur dan gaya aksial pada *pylon* disajikan masing-masing pada gambar dibawah ini.

a. Momen lentur *pylon*b. Gaya aksial *pylon*

Gambar 2.33 Momen lentur dan gaya aksial *pylon* pada jembatan *cable-stayed* berdasarkan variasi bentuk *pylon*
(Abdel Raheem et. al, 2012)

2.7 Frekuensi Alami dan Modus Getar

Frekuensi alamiah adalah frekuensi yang terjadi pada saat suatu sistem beresilasi tanpa adanya redaman. Terdapat dua jenis frekuensi alamiah, yaitu frekuensi alamiah teredam (*damped natural frequency*), dan frekuensi alamiah tak teredam (*undamped natural frequency*). Nilai dari frekuensi alamiah teredam pada umumnya lebih kecil dibandingkan frekuensi alamiah tak teredam, karena terdapat nilai rasio redaman yang membuat terjadi pengurangan nilai frekuensi sudutnya. Rumus umum untuk frekuensi alami:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2.28)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.29)$$

dimana,

f_n : Frekuensi alamiah (Hz)

ω_n : Putaran sudut alamiah (rad/s)

k : Kekakuan struktur

m : Massa struktur

Untuk frekuensi alamiah teredam, karena terdapat nilai redaman maka nilai redaman tersebut dihitung dengan:

$$\delta = \ln \left(\frac{u_i}{u_{i+1}} \right) \quad (2.30)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (2.31)$$

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.32)$$

$$f_D = \frac{\omega_D}{2\pi} \quad (2.33)$$

dimana,

f_D : Frekuensi alamiah teredam (Hz)

ω_n : Putaran sudut teredam (rad/s)

δ : *Logaritmik decrement*

ζ : Rasio redaman

Beberapa metode juga digunakan dalam analisa frekuensi alami dan modulus getar pada struktur yaitu sebagai berikut.

a. Metode Determinan

Persamaan gerak suatu sistem struktur teredam dengan n derajat kebebasan yang berosilasi bebas dan modulus getaran pada tingkat j adalah:

$$MV + KV = 0 \quad (2.34)$$

$$V = \hat{V}_j \sin(\omega_j t + \phi_j) \quad (2.35)$$

Dimana \hat{V} adalah deformasi modulus, ω_j adalah frekuensi sirkular, ϕ_j adalah fase, dan K adalah matriks kekakuan, substitusi persamaan 2.34 dalam persamaan 2.35 diperoleh:

$$\phi_j \hat{V}_j \sin(\omega_j t + \phi_j) + K \hat{V}_j \sin(\omega_j t + \phi_j) = 0 \quad (2.36)$$

Dengan membagi $\sin(\omega_j t + \phi_j)$ dan kalikan dengan rasio F/ω_j^2 , maka persamaan 2.37 menjadi:

$$\left(\frac{FK}{\omega_j^2} - FM \right) \hat{V} \quad (2.37)$$

F adalah matriks fleksibilitas. Dari hubungan identitas matriks $FK=1$ diperoleh:

$$\left(\frac{1}{\omega_j^2} - FM \right) \hat{V} \quad (2.38)$$

Agar persamaan 2.38 mempunyai solusi, maka:

$$\det|K - \omega_j^2| = 0 \quad (2.39)$$

atau

$$\det| \frac{1}{\omega_j^2} - FM | = 0 \quad (2.40)$$

Kedua persamaan diatas dikenal sebagai persamaan karakteristik suatu sistem yang dinyatakan dalam matriks kekakuan dan matriks fleksibilitas.

b. Metode Rayleigh

Metode Rayleigh menggunakan prinsip konservasi energi, sangat berguna dalam studi pendekatan suatu sistem dengan derajat kebebasan tinggi. Pada kasus getaran tak teredam, nilai ω diperoleh dari konservasi energi gerak dan potensial.

Pada kasus suatu sistem dengan satu derajat kebebasan, maka:

$$E_p = \frac{pv(t)}{2} \quad (2.41)$$

$$E_c = \frac{mv^2 t}{2} = \frac{mv^2}{2} \omega^2 \cos^2 \omega t \quad (2.42)$$

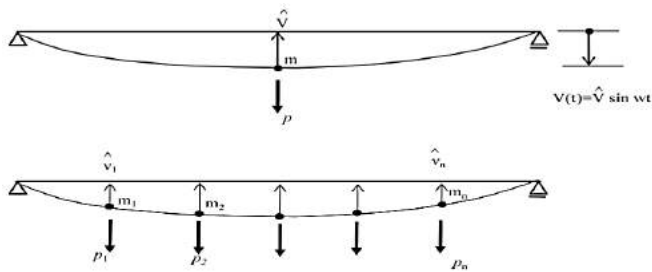
$$E_{p \text{ maks}} = \frac{p\hat{v}}{2} = E_{c \text{ maks}} = \frac{m\hat{v}^2}{2} \omega^2 \quad (2.43)$$

Sehingga,

$$\omega^2 = \frac{p\hat{v}}{m\hat{v}^2} \quad (2.44)$$

Persamaan 2.44 dapat dilegalisir untuk sistem dengan n derajat kebebasan:

$$\omega^2 = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \hat{v}_i}{\sum_{i=1}^n m_i \hat{v}_i} \quad (2.45)$$



Gambar 2.34 Sistem struktur dengan n derajat kebebasan
(Walther et. al., 1999)

2.8 Perangkat Lunak *Midas Civil*

Program *Midas Civil* merupakan program yang dirancang untuk menganalisa struktur dan mendesain struktur jembatan. Program ini dikhususkan pada perencanaan struktur yang termasuk didalamnya analisis dan cara mengoptimalkan suatu desain secara khusus pada struktur jembatan. Program ini dikembangkan dari bahasa pemrograman Visual C++ dan dapat bekerja secara cepat dan mudah untuk dipelajari. Setiap fungsi dari program ini telah diverifikasi berdasarkan teori dan hasil dari program – program sejenisnya.

2.8.1 Perhitungan Gaya Kabel dengan *Midas Civil*

Berdasarkan referensi pada manual analisa program *Midas*, cara program *Midas* menentukan besarnya gaya dalam kabel yaitu dengan menggunakan prinsip pertidaksamaan (*inequality*) struktur. Berikut adalah prosedur analisa menentukan gaya kabel:

- Menerapkan virtual (*unit*) load dalam bentuk *pre-tension* pada setiap kabel. Jumlah *unit load* yang dibuat sama dengan jumlah dari gaya dalam yang tidak diketahui didalam kabel;
- Melakukan analisa statis untuk desain pembebanan, yang merupakan beban merata;
- Rumus pertidaksamaan (*inequality*) menggunakan syarat batas:

$$\delta_{A1}T_1 + \delta_{A2}T_2 + \delta_{A3}T_3 + \delta_{AD} \leq \delta_{AI} \quad (2.46)$$

$$\delta_{B1}T_1 + \delta_{B2}T_2 + \delta_{B3}T_3 + \delta_{BD} \geq 0 \quad (2.47)$$

$$\delta_{C1}T_1 + \delta_{C2}T_2 + \delta_{C3}T_3 + \delta_{CD} \geq 0 \quad (2.48)$$

$$T_i \geq 0 \quad (i = 1,2,3) \quad (2.49)$$

dimana,

δ_{Ai} : Perpindahan dalam arah lateral pada titik A akibat pembebanan *pre-tension* pada arah T_i

δ_{Bi} : Perpindahan dalam arah lateral pada titik B akibat pembebanan *pre-tension* pada arah T_i

δ_{Ci} : Perpindahan dalam arah lateral pada titik C akibat pembebanan *pre-tension* pada arah T_i

δ_{AD} : Perpindahan dalam arah lateral pada titik A akibat pembebanan desain

δ_{BD} : Perpindahan dalam arah lateral pada titik B akibat pembebanan desain

δ_{CD} : Perpindahan dalam arah lateral pada titik C akibat beban desain

δ_A : Perpindahan dalam arah lateral pada titik A akibat beban desain dan gaya kabel

T_i : Gaya kabel ke- i yang tidak diketahui

- d. Dengan menggunakan teknik optimasi, solusi untuk pertidaksamaan dapat diselesaikan. Jumlah solusi dari gaya yang tidak diketahui yang ada, tergantung dari syarat batas dari pertidaksamaan. *Midas* menentukan solusi dari pertidaksamaan, dengan menggunakan variabel yang meminimalkan objek fungsi yang diberikan. *Midas* memperbolehkan untuk memilih jumlah dari nilai absolut, jumlah dari kuadrat dan maksimum nilai absolut dari variabel untuk fungsi objek. Faktor berat dapat dimasukkan sebagai variabel spesifik untuk kontrol.

2.8.2 Tahap Analisis Gaya Kabel dengan *Midas Civil*

Untuk melakukan analisa gaya kabel pada program *Midas Civil*, berikut ini adalah tahapan – tahapan yang dilakukan didalam program:

- a. Menentukan jenis material yang akan digunakan pada model.
- b. Menentukan dimensi dan bentuk dari penampang yang digunakan.
- c. Menentukan panjang kabel yang akan didesain.
- d. Menentukan jumlah nodal yang akan digunakan.
- e. Menggambarakan elemen kabel pada nodal yang dibuat.
- f. Menentukan *boundary condition* untuk perletakan elemen.
- g. Melakukan analisa dinamis yaitu *Eigenvalue Analysis*.

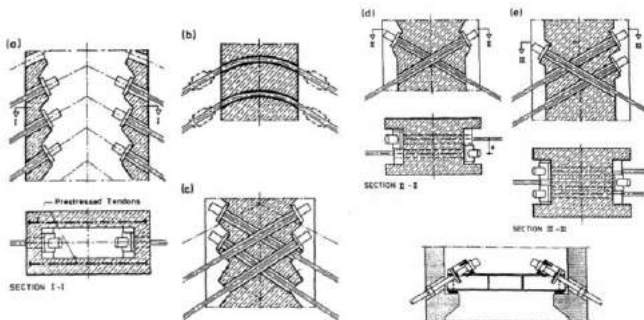
- h. Memberikan asumsi initial force (gaya dalam) kabel pada setiap elemen
- i. Melakukan *Run Analysis* program.

2.9 Sistem Pengangkuran

Sistem pengangkuran pada jembatan *cable-stayed* berdasarkan Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel (Kementrian PUPR, 2015) adalah sebagai berikut.

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. Beberapa alternatif pengangkuran pada menara sebagaimana disajikan pada Gambar 2.35.



Gambar 2.35 Alternatif pengangkuran pada menara

Penarikan atau *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

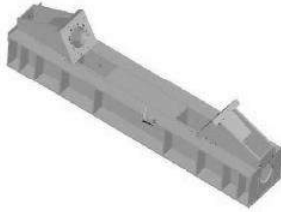
kepala menara saja. Pada jembatan *cabl* – *stayed* kecil/ sederhana, angkur hidup ditempatkan di gelagar agar lebih praktis dalam pelaksanaan penarikan kabel. Dibawah ini disajikan dokumentasi pengangkuran jembatan Suramadu.



Gambar 2.36 Pengangkuran kabel pada *pylon* jembatan Suramadu
(www.wiryanto.net)



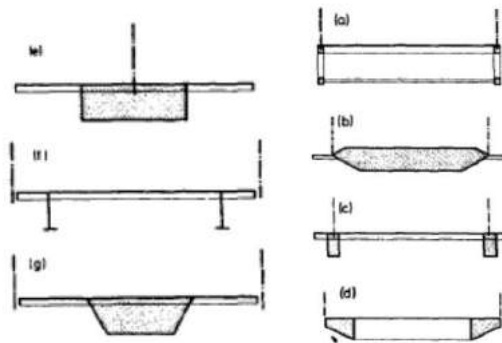
Gambar 2.37 Bentuk *jacking* untuk pengangkuran pada *pylon* jembatan Suramadu (www.wiryanto.net)



Gambar 2.38 Angkur baja pada *shaft pylon* jembatan suramadu
(CCC,2005)

b) Pengangkuran pada dek jembatan

Dalam perencanaan umum jembatan *cable-stayed* sangat penting untuk memperhatikan aliran dari gaya-gaya. Pada kasus tertentu, kabel dapat diangkurkan langsung ke element utama dari dek jembatan, sedangkan pada kasus yang lain, ankur diletakkan di luar elemen utama sehingga perlu *bracket* khusus untuk menyalurkan gaya ke elemen utama dek jembatan. Berikut adalah lokasi ankur pada dek jembatan (Gambar 2.39).



Gambar 2.39 Lokasi ankur pada dek jembatan

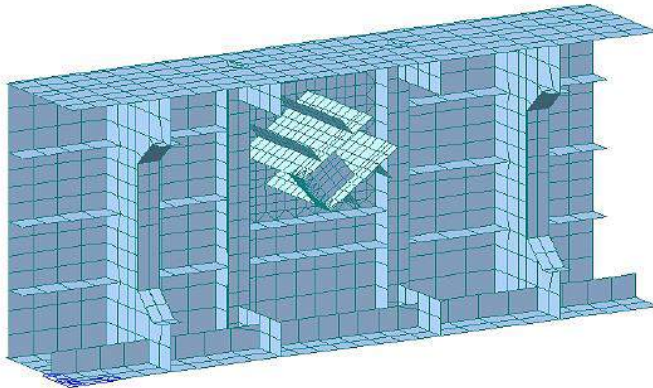
Dibawah ini disajikan dokumentasi proses pengangkutan jembatan Suramadu pada saat masa konstruksi dilakukan.



Gambar 2.40 Pengangkutan kabel pada dek jembatan Suramadu berupa angkur mati (www.wiryanto.net)



Gambar 2.41 Detail pengangkutan kabel pada dek jembatan Suramadu (www.wiryanto.net)



Gambar 2.42 Angkur baja pada dek jembatan Suramadu (CCC, 2005)

2.10 Pembebanan Jembatan *Cable-Stayed*

Untuk mengetahui kinerja suatu jembatan, maka pembebanan dilakukan dua tahap kondisi pembebanan, pembebanan dengan kondisi beban layan (*serviceability limit state*, SLS) dan kondisi beban batas (*ultimate limit state*, ULS).

2.10.1 Kondisi Beban Layan

Kondisi beban layan direncanakan untuk mengetahui *performance* sebuah jembatan dalam menerima beban yang jika beban tersebut menghasilkan reaksi jembatan seperti adanya lendutan, getaran (*vibration*), dan adanya retak (*crack*) yang mengisyaratkan bahwa jembatan belum memenuhi kriteria layan yang baik. Beban permanen pada tinjauan kondisi layan dianggap sebagai beban aktual yang telah memperhitungkan material dan metode pelaksanaan. Kesesuaian antara perhitungan dan praktek,

khususnya dalam lendutan gelagar dan kekuatan kabel, tergantung pada tingkat akurasi berat sendiri dan beban-beban permanen (lapisan permukaan, kerb, dan lani sebagainya). Adapun parameter kondisi batas layan yang umum digunakan adalah sebagai berikut (Dewobroto, 2015).

- a) Lendutan atau *drift* elastis yang berlebihan
- b) Struktur yang bergetar melebihi ambang tertentu
- c) Lendutan permanen.

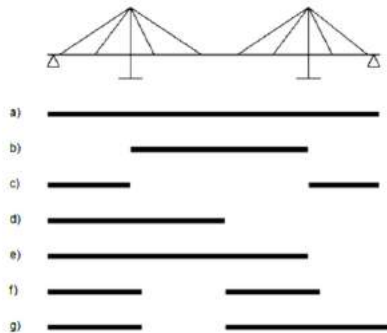
2.10.2 Kondisi Beban Batas

Kondisi beban batas dicapai apabila respon jembatan yang disebabkan oleh aksi-aksi batas (*ultimate actions*) menyebabkan struktur jembatan menjadi tidak aman. Indikator pencapaian sebuah kondisi batas dapat diketahui dengan meninjau kerusakan bagian jembatan, keruntuhan bagian jembatan, dan kehilangan stabilitas sebuah jembatan. Kondisi batas menunjukkan kemampuan batas struktur agar bias digunakan. Adapun parameter kondisi beban batas yang umum digunakan adalah sebagai berikut (Dewobroto, 2015).

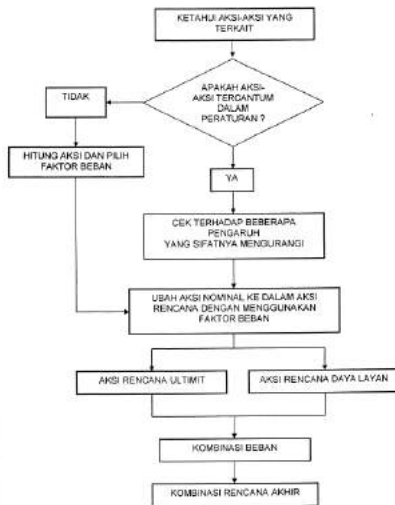
- a) Terjadinya leleh baja sampai terbentuknya sendi plastis, dan mekanisme plastisnya, ketidak-stabilan elemen dan struktur.
- b) Tekuk torsi lateral, tekuk lokal
- c) Fraktur tarik atau adanya retak akibat fatig
- d) Deformasi yang berlebihan
- e) *Alternating plasticity*

Konfigurasi beban hidup yang dapat digunakan pada analisa jembatan *cable-stayed* disajikan pada Gambar 2.43. Hal ini dilakukan agar dapat

diketahui respon struktur yang maksimum. Sedangkan bagan alir perencanaan jembatan disajikan pada Gambar 2.44.



Gambar 2.43 Konfigurasi beban hidup (PTJJK, 2011)



Gambar 2.44 Bagan alir perencanaan pembebanan jembatan (RSNI T-02-2005)

Hal yang menjadi prinsip dalam pembebanan adalah menentukan beban yang jelas dan pasti itu tidak mudah. Karena itu jika melihat bagan alir diatas (Gambar 2.44) hal yang pertama harus dilakukan adalah identifikasi beban. Beban tetap adalah lebih pasti dari pada beban sementara. Beban tetap itu sendiri terdiri dari dua unsur, beban mati dan beban hidup (Dewobroto, 2015).

2.11 Keadaan Batas Jembatan *Cable-Stayed*

Menurut buku Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel (Kementrian PUPR, 2015), interaksi antara kabel, gelagar lantai, dan menara dalam kinerja struktural secara keseluruhan dipengaruhi oleh tiga keadaan batas berikut:

a) Gelagar lantai sangat kaku

Jembatan *cable-stayed* dengan gelagar lantai sangat kaku yang memiliki jumlah kabel terbatas sebagai perletakan elastic dimana tidak mungkin dibangun pilar sebagaimana disajikan pada Gambar 2.45 (a). Karakteristik jembatan serupa dengan sistem jembatan *ekstra-doesed*. Menara yang digunakan relative langsing dan tidak perlu tinggi karena hanya memikul momen lentur kecil.

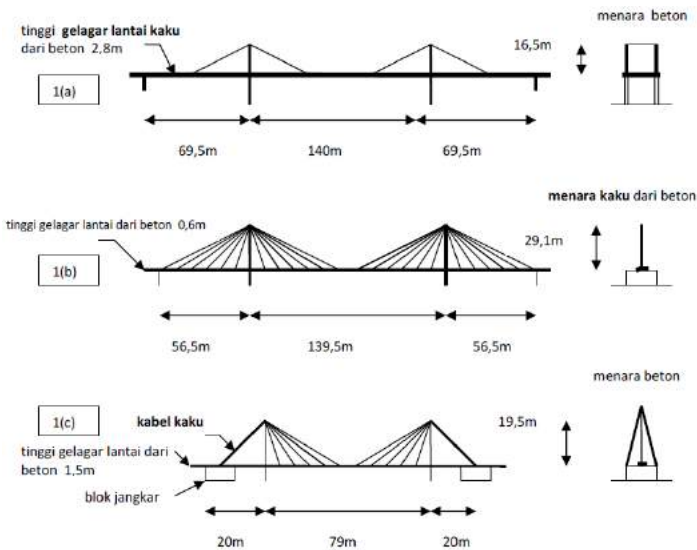
b) Menara sangat kaku

Jembatan *cable-stayed* dengan menara sangat kaku memiliki karakteristik dimana menara yang sangat kaku tersebut akan memikul momen arah memanjang sebagaimana disajikan pada Gambar 2.45 (b). Gelagar lantai

jembatan relatif langsing dengan jarak kabel yang berdekatan. Gelagar tersebut terutama memikul momen dalam arah melintang.

c) Kabel sangat kaku

Jembatan *cable-stayed* dengan kabel yang sangat kaku menggunakan ruji sebagai elemen stabilitas struktural sebagaimana disajikan pada Gambar 2.45. Bentang samping umumnya dibuat lebih pendek dari setengah bentang utama agar kabel ankur tidak kehilangan gaya tarik, dan sering digunakan blok ankur/pilar ankur. Blok atau pilar ankur mengurangi lendutan bentang utama sehingga dimensi gelagar lantai dapat direduksi, dan digunakan untuk memperoleh stabilitas bentang yang panjang. Dengan demikian menara dan gelagar menjadi relatif langsing.



Gambar 2.45 Karakteristik jembatan *Cable-Stayed* (PTJBK, 2015)

BAB III

METODOLOGI

3.1 Data Penelitian

Data yang digunakan pada proyek akhir terapan ini berupa data primer dan data sekunder. Data primer meliputi data-data teknis berupa *layout* jembatan, panjang dan lebar jembatan, serta properti material dan dimensi elemen utama seperti kabel, gelagar, dan *pylon*. Sedangkan data sekunder yang dimaksud adalah data dari berbagai sumber buku, jurnal, proyek akhir terapan ataupun tesis, dan internet yang tentunya membahas jembatan suramadu atau sekurang-kurangnya membahas mengenai jembatan *cable-stayed*.

3.2 Geometri Jembatan Suramadu

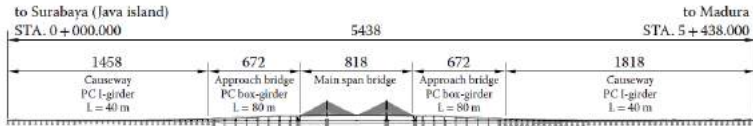
Jembatan suramadu memiliki panjang total 5438 m yang terdiri dari tiga bagian yaitu jalan layang (*causeway*), jembatan penghubung (*approach bridge*), dan jembatan utama (*main bridge*). Jembatan layang terdiri dari 36 bentang sepanjang 1458 m pada sisi Surabaya dan 45 bentang sepanjang 1818 m pada sisi Madura. Jembatan penghubung yang menghubungkan jembatan utama dengan jalan layang terdiri dari dua bagian dengan panjang masing-masing 672 m. Sementara itu Jembatan utama terdiri dari tiga bagian yaitu dua bentang samping sepanjang 192 m dan satu bentang utama sepanjang 434 m (Gambar 3.2).

Bentang utama sepanjang 434 meter direncanakan untuk mengakomodasi dan menyediakan *clearance* horizontal sebesar 400 m dan *clearance* vertikal 35 meter bagi alur pelayaran (Suangga dan Subagyo, 2008).

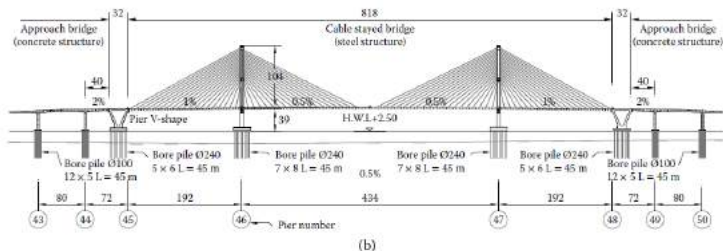


Gambar 3.1 Dokumentasi jembatan Suramadu
(www.datajembatan.com)

Historis jembatan suramadu ini telah dikemukakan sejak tahun 1986 oleh Prof. Dr. Ir. Sedyatmo, namu baru terealisasi pada tahun 2003.



(a) Jembatan Suramadu dalam skala penuh



(b) Jembatan utama dengan sistem *Cable-stayed*

Gambar 3.2 Jembatan Suramadu

(Vaza et. al, 2013 dalam Chen dan duan 2013)

3.3 Material dan Dimensi Penampang

Propertis material dan dimensi penampang yang digunakan pada jembatan suramadu adalah sebagai berikut :

a) Kabel

Jembatan Suramadu memiliki 17 buah kabel untuk masing-masing bentang samping dan bentang tengahnya. Pada kedua bentang samping diberikan notasi SC01 – SC17 sedangkan untuk bentang

tengah diberikan notasi MC01 – MC17. Properti material kabel disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Properti material kabel jembatan Suramadu (CCC, 2005)

Uraian	Notasi	Nilai	Unit
Jenis Kabel	f_{pk}	1670	MPa
Modulus Elastisitas	E_c	$2,05 \times 10^5$	MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	ν	0,3	-
Koefisien muai panjang	-	$1,20 \times 10^{-5}$	(1/°C)
Berat jenis	γ_c	84,0	kN/m

b) Gelagar

Seperti yang diuraikan pada Bab sebelumnya, gelagar jembatan Suramadu menggunakan *Double Steel Box Girder* dengan properti material disajikan pada Tabel 3.2 dan dimensi gelagar disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.2 Properti material gelagar jembatan Suramadu (CCC, 2005)

Uraian	Notasi	Nilai	Unit
Kode baja	Q345C	-	-
Modulus Elastisitas	E_s	$2,1 \times 10^5$	MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	ν	0,3	-
Koefisien muai panjang	-	$1,20 \times 10^{-5}$	(1/°C)
Berat jenis	γ_s	78,5	kN/m

Tabel 3.3 Dimensi gelagar jembatan Suramadu (CCC, 2005)

Kategori Penampang	Notasi	Ketebalan Sayap Atas (mm)	Ketebalan Sayap Bawah (mm)	Ketebalan Badan (mm)
1	SB0 → SB1	32	50	32
	MB0 → MB1			
2	SB2 → SB14	32	40	28
	MB2 → MB14			
3	SB15	32	40	28
4	SB16	32	40	28
5	MB15 → MB18	32	32	24

c) *Pylon*

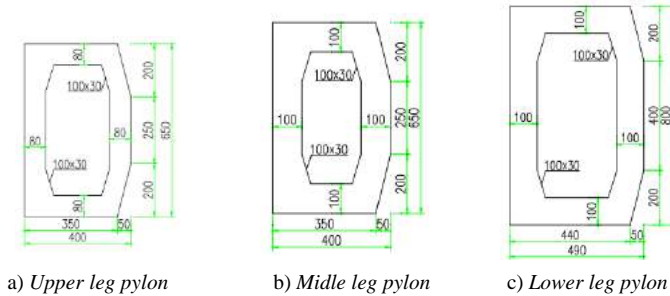
Jembatan Suramadu terdiri dari 2 buah *pylon* kembar dengan tinggi 141,331 m. Berdasarkan data yang diperoleh, *pylon* tersebut terbagi dalam tiga lengan. Lengan atas (*upper*), lengan tengah (*middle*), dan lengan bawah (*lower*) sehingga masing-masing lengan memiliki dimensi yang berbeda (Gambar 3.3). Adapun propertis material dan dimensi penampang jembatan dapat dilihat masing-masing pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Properti material *pylon* jembatan Suramadu (CCC, 2005)

Uraian	Notasi	Nilai	Unit
Kode beton	C50	-	-
Modulus Elastisitas	E_c	$3,45 \times 10^4$	MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	ν	0,2	-

Tabel 3.4 Lanjutan

Uraian	Notasi	Nilai	Unit
Kode beton	C50	-	-
Modulus Elastisitas	E_c	$3,45 \times 10^4$	MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	ν	0,2	-
Koefisien muai panjang	-	$1,0 \times 10^{-5}$	($1/^\circ\text{C}$)
Berat jenis	γ_c	25,0	kN/m
Standar tegangan aksial tekan dan lentur	-	32,4	MPa
Standar tegangan aksial tarik	f_{uk}	2,65	MPa

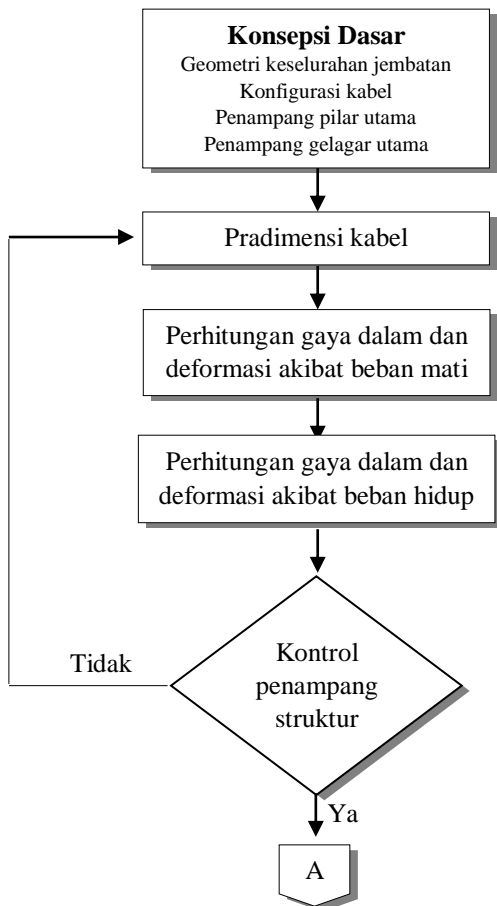
**Gambar 3.3** Dimensi pylon (CCC, 2005)

d) Pelat

Dimensi pelat pada jembatan suramadu masing-masing 250 mm untuk tebal pelat beton pracetak dan 270 mm untuk tebal pelat beton cor di tempat.

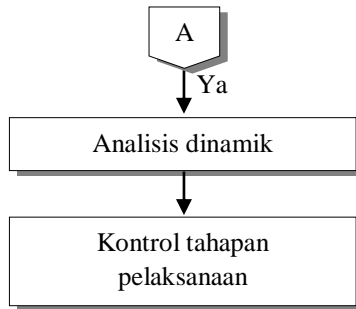
3.4 Analisis Struktur Jembatan Suramadu

Tahapan analisis struktur jembatan dengan sistem *cable-stayed* pada umumnya dapat digambarkan dalam bagan alir dibawah ini.



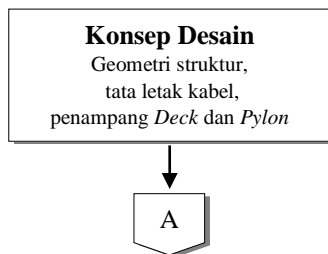
Gambar 3.4 Bagan alir analisis struktur jembatan *cable-stayed*

(Supartono, 1996)



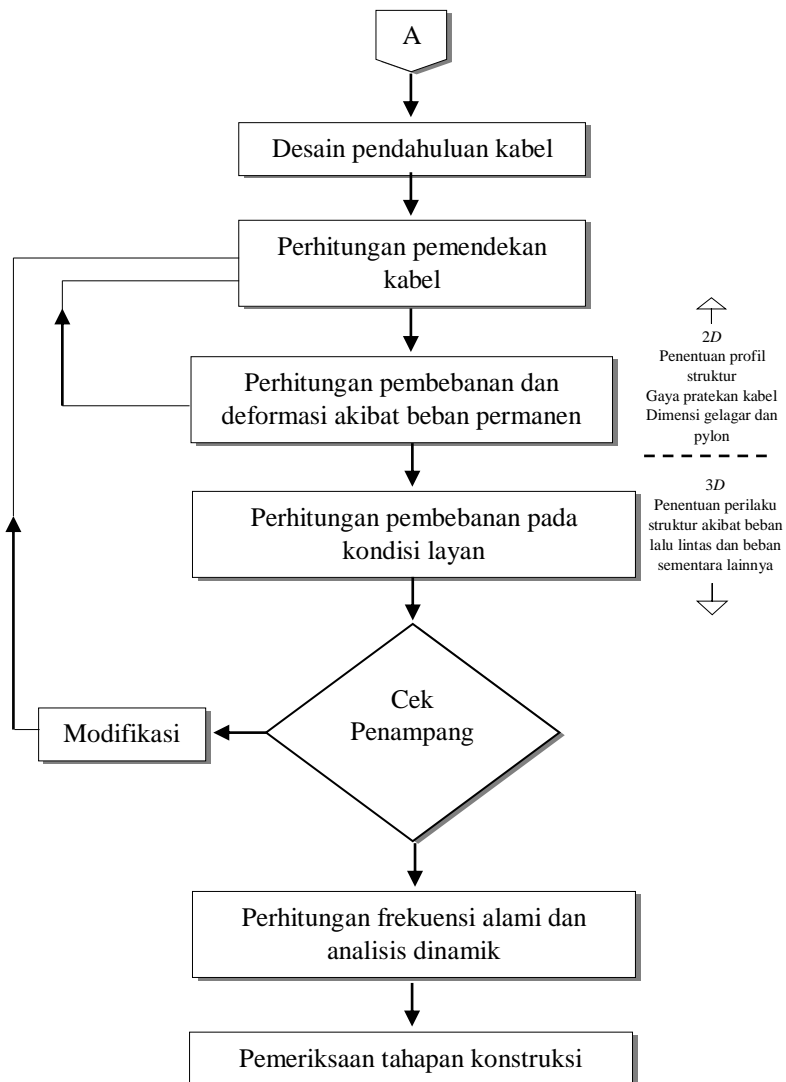
Gambar 3.4 Lanjutan

Analisis struktur jembatan suramadu dibagi dalam tiga tahap. Tahap pertama adalah analisis struktur dua dimensi (2D) untuk menentukan gaya tarik awal (*initial pretension*). Gaya tarik awal dihitung dengan metode *unknown load factor* yang terdapat pada fasilitas perangkat lunak yang digunakan. Sementara itu Walther et. al (1999) juga memberikan saran dalam merencanakan jembatan dengan sistem *cable-stayed* yang disajikan dalam bagan alir sebagai berikut:



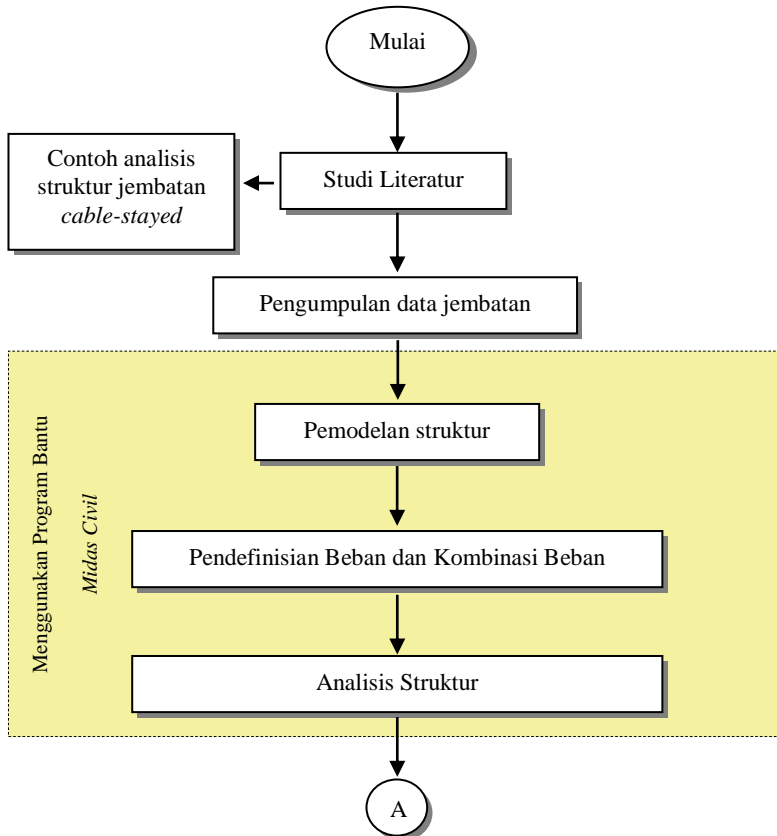
Gambar 3.5 Bagan alir perencanaan jembatan *cable-stayed*

(Walther et. al., 1999)

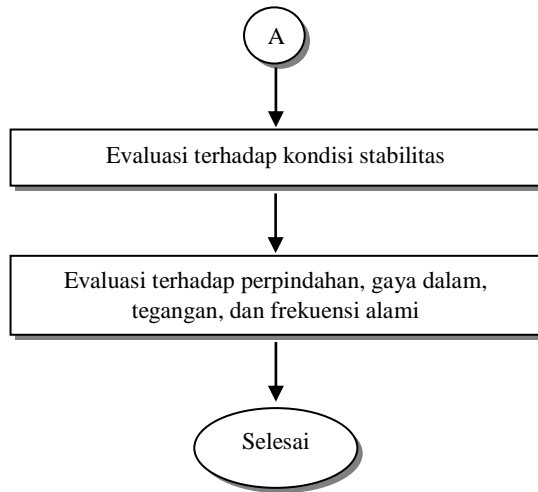


Gambar 3.5 Lanjutan

Berdasarkan dua opsi yang ditawarkan pada perencanaan jembatan *cable-stayed* diatas, maka penulis juga merumuskan bagaimana alur kerja (metodologi) dalam studi ini. Berikut ini adalah bagan alir yang menggambarkan prosedur dan tahapan kerja dalam proyek akhir terapan ini:



Gambar 3.6 Bagan alir untuk studi Proyek akhir terapan



Gambar 3.6 Lanjutan

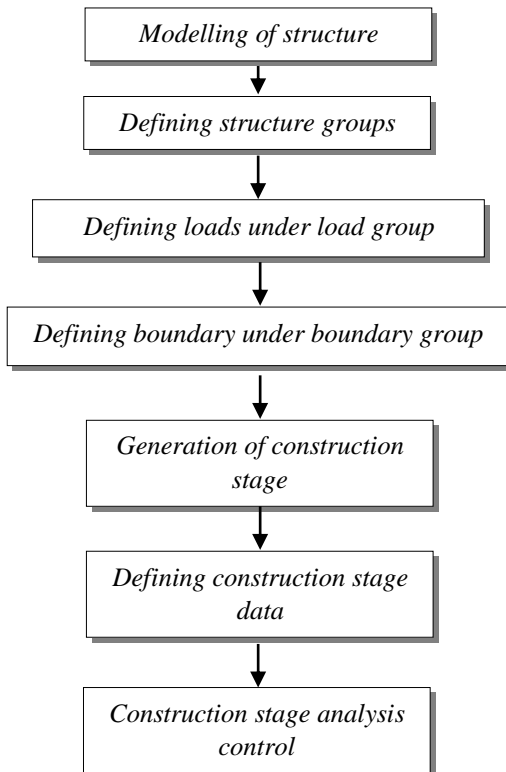
3.5 Pemodelan Jembatan Suramadu

Pemodelan struktur jembatan suramadu menggunakan program bantu (*software*) *Midas Civil* 2011. Program bantu ini dipilih dengan pertimbangan yaitu pertama, sejak awal proses perencanaan struktur menggunakan *Midas Civil* (CCC, 2005) dan yang kedua adalah program bantu *Midas Civil* dikhususkan untuk analisis jembatan yang tentunya dibuat *user friendly*.

Pemodelan jembatan suramadu menggunakan program *Midas Civil* 2011 dilakukan melalui banyak tahapan. Secara general, pertama-tama dengan mendefinisikan material, penampang yang digunakan (termasuk kabel, gelagar, dan *pylon*), geometrik struktur jembatan, pendefinisian kondisi

batas, identifikasi beban dan pendefinisian beban, analisis konstruksi, dan lain sebagainya.

Dalam proses pemodelan ini, secara keseluruhan dibutuhkan ketelitian tinggi agar hasil yang diharapkan dapat maksimal. Beberapa proses yang utama dalam pemodelan ini akan diuraikan sebagai berikut sesuai karakteristiknya masing-masing:

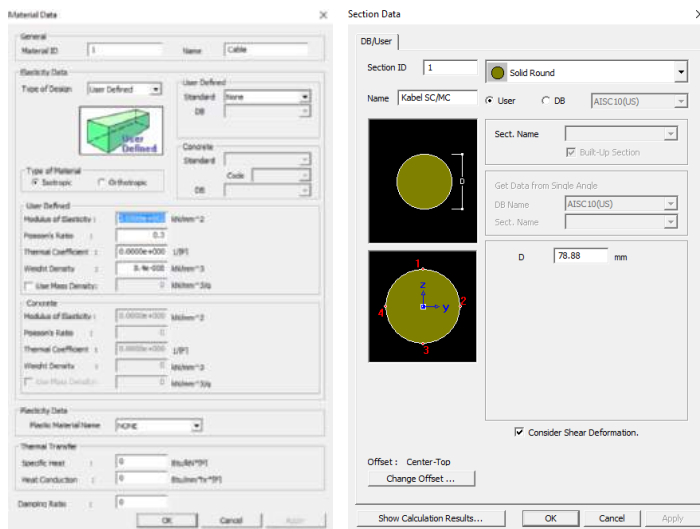


Gambar 3.7 Tahap pemodelan dalam *Midas Civil*

(*Midas Analysis Reference*, 2011)

3.5.1 Pemodelan Elemen Kabel

Pemodelan kabel menggunakan penampang *Solid Round*, dilanjutkan dengan memasukkan besarnya diameter *strand* masing kabel atau dengan opsi lain menggunakan jumlah luasan setiap kabel (lihat Tabel 3.2). Pada jembatan suramadu, jumlah luasan setiap kabel berbeda-beda maka dalam pendefinisian dilakukan berulang sesuai data dari CCC (2005). Gambar 3.8 tersaji menu kotak dialog pendefinisian kabel jembatan Suramadu.

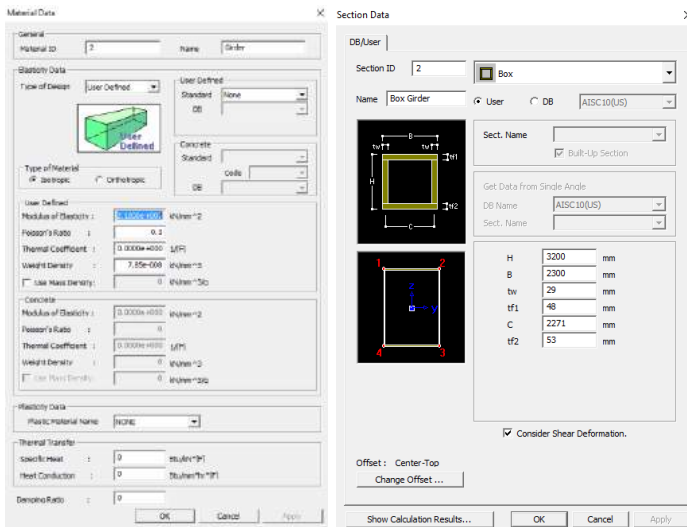


Gambar 3.8 Kotak dialog pendefinisian kabel

3.5.2 Pemodelan Gelagar

Pemodelan gelagar secara umum tidak berbeda dengan pemodelan kabel, namun pada gelagar terdapat beberapa komponen yang menjadi satu kesatuan yaitu *box girder*, balok melintang (*cross girder*), balok

memanjang (*stringer*), balok melintang trotoar, dan balok memanjang trotoar. Untuk *box girder* didefinisikan menggunakan penampang jenis *box*, sedangkan balok melintang, balok memanjang, balok melintang trotoar, dan balok memanjang trotoar menggunakan penampang jenis *I-section*. Gambar 3.9 tersaji menu kotak dialog pendefinisian komponen gelagar.

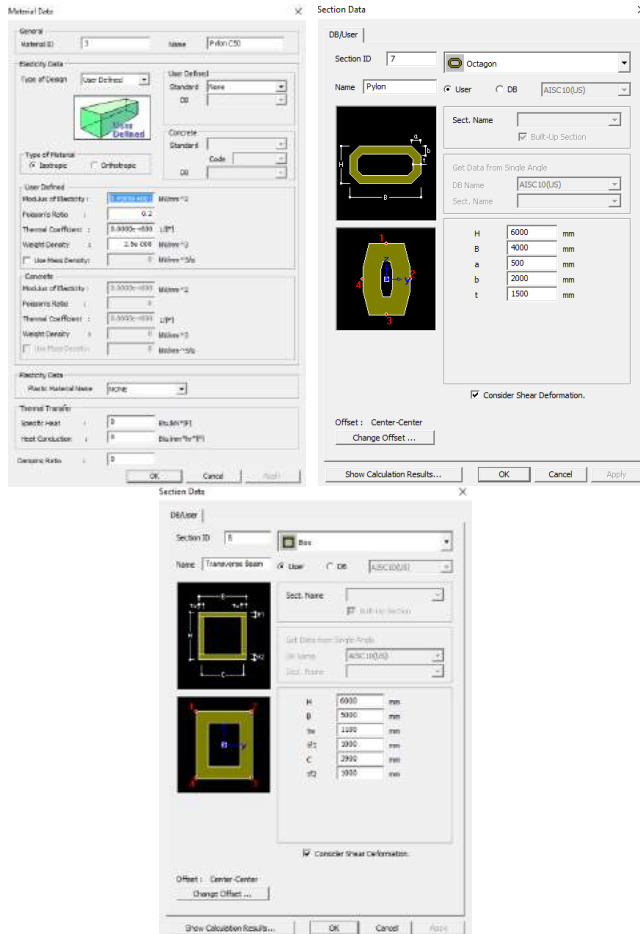


Gambar 3.9 Kotak dialog pendefinisian komponen gelagar

3.5.3 Pemodelan *Pylon*

Anatomi *pylon* jembatan suramadu memiliki karakteristik yang unik. Untuk menghubungkan lengan *pylon*, terdapat tiga buah balok pengikat. Lengan *pylon* tersebut memiliki dimensi yang berbeda pada setiap elevasi. Lengan *pylon* tersebut dibagi menjadi lengan atas, tengah, dan

bawah. Pemodelan setiap lengan *pylon* menggunakan jenis penampang *octagon*, sedangkan untuk balok pengikat menggunakan jenis penampang *box*.



Gambar 3.10 Kotak dialog pendefinisian komponen *pylon*

3.5.4 Pemodelan Beban

Pemodelan beban dilakukan setelah seluruh proses pemodelan struktur telah dilakukan. Data pembebanan yang digunakan dalam analisis ini disajikan dalam Tabel 3.5 dibawah ini :

Tabel 3.5 Klasifikasi Beban (CCC, 2005)

No.	Aksi Permanen	Aksi Variabel	Aksi Aksidental
1	<i>Self-weight of structure (including superimposed dead load)</i>	<i>Vehicle load</i>	<i>Collision force of ship or drifter</i>
2	<i>Prestressing force</i>	<i>Vehicle impact force</i>	<i>Collision force of vehicle</i>
3	<i>Concrete shrinkage and creep</i>	<i>Soil lateral pressure caused by vehicle</i>	<i>Seismic action</i>
4	<i>Water floatage force</i>	<i>Pedestrian load (including motorcycle)</i>	<i>Dynamic rupture force of stay cable)</i>
5	<i>Foundation</i>	<i>Vehicle braking force</i>	
6		<i>Wind load</i>	
7		<i>Water pressure</i>	
8		<i>Temperature effect</i>	
9		<i>Bearing frictional resistance</i>	
10		<i>Static rupture force of stay cable</i>	
11		<i>Replacement of stay cable</i>	

Berdasarkan data tersebut beban yang digunakan dalam analisis disesuaikan dengan kebutuhan analisis yang ingin dicapai.

a) Berat sendiri elemen struktural

Berat sendiri elemen struktural terdiri berat sistem lantai, berat sistem kabel, dan berat elemen *pylon*.

b) Beban mati tambahan

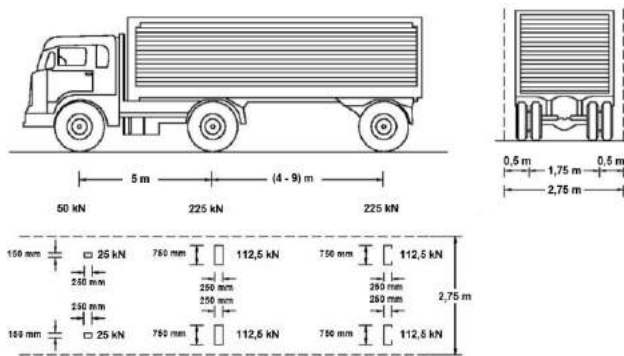
Beban mati tambahan disajikan pada table di bawah ini.

Tabel 3.6 Beban mati tambahan (CCC, 2005)

No.	Jenis Beban	Berat (kN/m)
1	<i>Asphaltum concrete paving on carriage way</i>	35,88
2	<i>Asphaltum concrete paving on motorcycle way</i>	7,01
3	<i>Outer side balustrades of motorcycle way</i>	0,72
4	<i>Inner side balustrades of motorcycle way</i>	0,64
5	<i>Side parapets of carriageway</i>	1,16
6	<i>Central parapets of carriageway</i>	1,16
7	<i>Concrete base outer side balustrade of motorcycle way</i>	5
8	<i>Concrete base of parapets on main girder</i>	20,54
9	<i>Concrete base of central parapets of carriageway</i>	3,76
10	<i>Pipes of facilities at motorcycle way</i>	14
11	<i>Steel girders of motorcycle way</i>	15,14

c) Beban Hidup

Beban hidup yang termasuk dalam analisis ini adalah beban lalu lintas dan beban kendaraan. Beban lalu lintas terbagi dua yaitu beban terbagi rata (BTR) dan beban garis (BGT) sesuai SNI 1725:2016. Sedangkan beban kendaraan yang digunakan adalah beban truk “T” sebesar 500 kN untuk mengetahui pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan sesuai SNI 1725:2016 (lihat Gambar 3.11).



Gambar 3.11 Pembebanan truk “T” (SNI 1725-2016)

Intensitas BTR digunakan sebesar 100% untuk jalur lalu lintas yang berdekatan sepanjang 5,5 m dan lebar sisanya ditempatkan beban BTR dengan intensitas 50%.

3.5.5 Penentuan Kondisi Batas

Penentuan kondisi batas jembatan suramadu dilakukan sesuai data perencanaan CCC (2005) yang tersaji dalam tabel berikut:

Tabel 3.7 Kondisi batas jembatan Suramadu (CCC, 2005)

Jenis Kondisi Batas	Penempatan
<i>Vertical bearing</i>	Koneksi gelagar dan <i>V-pier</i>
<i>Transverse positive block</i>	Koneksi gelagar dan <i>pylon</i>
Jepit (<i>fixities</i>)	Pondasi jembatan
Sendi (<i>pinned</i>)	<i>V-pier</i>

Setiap pilar *V* (*V-pier*) yang berada pada samping kiri dan kanan jembatan utama terdapat *earthquake-resistance steel spherical bearings* yang berada tepat dibawah gelagar utama dengan pergerakan arah

longitudinal dan transversal. Kapasitas arah vertikal perletakan ini adalah 8000 kN, sedangkan kapasitas arah horizontal 6000 kN (CCC, 2005). Perletakan ini bergarak maksimum sepanjang jembatan sebesar 60 cm dengan maksimum rotasi 0,02 rad (CCC, 2005).

3.6 Deformasi Struktur

Beberapa batasan kekakuan jembatan *cabl-stayed* seperti yang disarankan pada Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel (Kementrian PUPR, 2015) adalah lendutan pada gelagar jembatan harus lebih kecil dari $\delta = L/400$ untuk penampang baja dan komposit dan $\delta = L/800$ untuk penampang beton. Sedangkan untuk *pylon*, deformasi horizontal harus lebih kecil dari $\delta = H/400$ untuk penampang baja serta $\delta = H/800$ untuk penampang beton.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Studi Parametrik

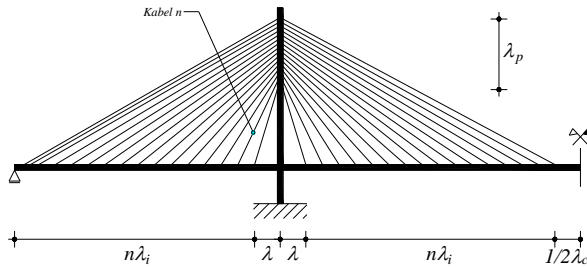
Studi parametrik yang digunakan dalam Tugas Akhir ini yaitu dengan mengubah jarak antara kabel penggantung pada jembatan Suramadu untuk mengetahui perilaku struktur terhadap modifikasi yang dilakukan. Terdapat lima buah kasus jarak kabel penggantung yang ditinjau yaitu 9 meter, 12 meter, 13 meter, 14 meter, dan 15 meter. Sedangkan kondisi *existing* pada jembatan suramadu, jarak kabel penggantung adalah 12 meter. Modifikasi geometrik yang dilakukan juga ditetapkan dengan tujuan agar perbandingan untuk kondisi *existing* tetap setara. Adapun modifikasi geometrik yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Jarak vertikal kabel pada *pylon* ditetapkan sebesar tiga meter, jarak ini sama dengan kondisi *existing*.
- b. Jarak kabel terdekat dengan *pylon* yang berada pada sisi kiri dan kanan diambil konstan dua kali jarak kabel sesuai kasus yang ditinjau.
- c. Panjang bentang *closure* ditetapkan sebesar 1,2 kali panjang jarak kabel sesuai kasus yang ditinjau.
- d. Dimensi dan Propertis material pada gelagar dan *pylon* ditetapkan sama.
- e. Dimensi penampang masing-masing kabel berubah disesuaikan dengan kapasitas tegangan kabel.

Tabel 4.1 Rangkuman studi parametrik dan modifikasi struktur

Kasus	Jarak Kabel	Jumlah kabel (n)	Jarak kabel terdekat <i>pylon</i> , λ	<i>Closure</i> , λ_c	Jarak vertikal kabel di <i>pylon</i> , λ_p
VRB 1	9,0	46	18,0	10,8	3,0
VRB 2	12,0	34	22,0	13,5	3,0
VRB 3	13,0	32	26,0	15,6	3,0
VRB 4	14,0	28	28,0	16,8	3,0
VRB 5	15,0	26	30,0	18	3,0

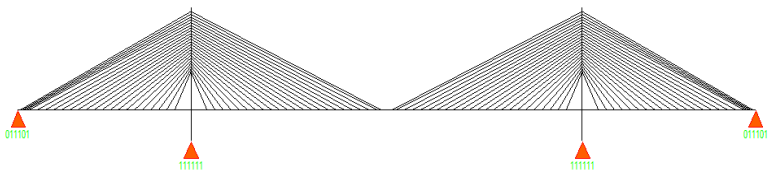
Keterangan: satuan m, kecuali disebutkan lain



Gambar 4.1 Notasi jarak kabel penggantung

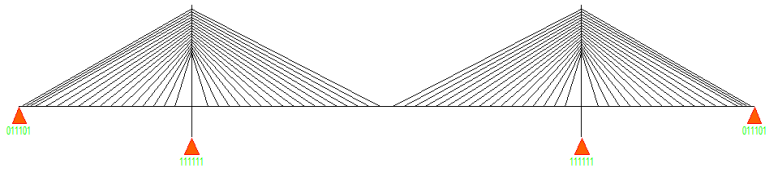
4.2 Analisa Statik

Perhitungan gaya aksial awal kabel (*initial cable force*) dilakukan dengan menggunakan metode analisa statik model dua dimensi (2D). Analisa statik dilakukan dengan memodelkan jembatan dalam kondisi pasif, artinya pengaruh akibat beban hidup ataupun beban hidup dinamis belum diperhitungkan. Hal ini dilakukan karena jembatan model *cable-stayed* adalah jembatan dengan derajat statis tak tentu yang tinggi, karena itu perhitungan perlu untuk disederhanakan. Model jembatan untuk analisa statik disajikan pada Gambar 4.2 dibawah ini.

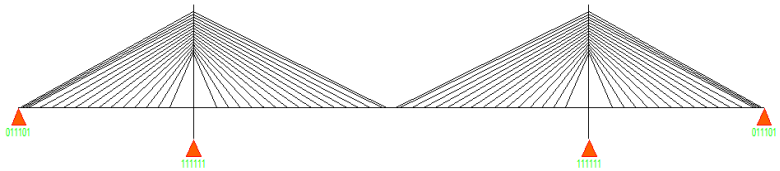


a. VRB 1

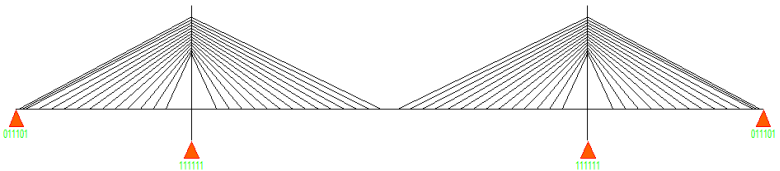
Gambar 4.2 Variasi pemodelan struktur jembatan 2D



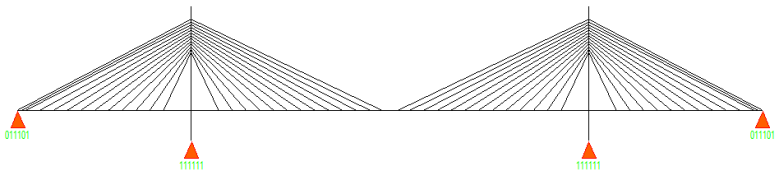
b. VRB 2



c. VRB 3



d. VRB 4



e. VRB 5

Gambar 4.2 Lanjutan

Kondisi batas yang digunakan pada analisa 2D adalah perletakan jepit pada *pylon* dan perletakan sendi pada *steel box girder* yang terdapat pada bentang tepi.

4.2.1 Pembebanan

Beban yang digunakan dalam analisa statik adalah beban dari berat sendiri struktur dan beban mati tambahan. Besarnya berat sendiri struktur secara otomatis dihitung oleh perangkat lunak Midas Civil 2011. Sedangkan besarnya beban mati tambahan yang digunakan adalah 148,5 kN/m yang bekerja sepanjang bentang jembatan.

4.2.2 Gaya Kabel Awal

Gaya aksial awal kabel (P) untuk masing-masing variasi jarak kabel penggantung dapat dilihat pada Tabel 5.2-5.7. Gaya aksial kabel ini masih dalam kategori gaya aksial awal kabel dari sistem jembatan *cabl-stayed* pasif. Gaya aksial kabel secara sederhana dapat ditentukan dari reaksi perletakan balok diatas banyak tumpuan. Namun dalam kasus ini, penentuan gaya aksial awal kabel dimodelkan dalam perangkat lunak Midas Civil dengan metode *unknown load factor*.

Tabel 4.2 Gaya kabel awal VRB 1

ID _{Kabel}	$\theta_{\text{inklinasi}} (^{\circ})$	P _{awal} (kN)	σ_{kabel} (MPa)	A _{kabel} (m ²)	Σ_{Strand} (bh)
SC 23	29,576	457,276	15005	0,003047	79
SC 22	29,270	729,014	22025	0,003310	86
SC 21	28,859	986,884	26865	0,003440	89
SC 20	28,434	1209,015	34415	0,003513	91
SC 19	28,095	1498,055	41885	0,003577	93
SC 18	28,563	2357,671	64240	0,003670	95
SC 17	29,079	2923,603	78965	0,003702	96
SC 16	29,649	3224,327	86795	0,003715	97
SC 15	30,283	3353,063	90155	0,003719	97
SC 14	30,992	3325,495	89455	0,003718	97
SC 13	31,789	3191,733	86005	0,003711	96

Tabel 4.2 Gaya kabel awal VRB 1 – lanjutan

ID_{Kabel}	$\theta_{\text{inklinasi}} (^{\circ})$	P_{awal} (kN)	σ_{kabel} (MPa)	A_{kabel} (m²)	ΣStrand (bh)
SC 12	32,692	3041,894	82135	0,003704	96
SC 11	33,723	2862,900	77515	0,003693	96
SC 10	34,910	2665,059	72410	0,003681	96
SC 09	36,291	2460,925	67145	0,003665	95
SC 08	37,915	2267,122	62145	0,003648	95
SC 07	39,848	2096,127	57730	0,003631	94
SC 06	42,183	1959,020	54180	0,003616	94
SC 05	45,048	1911,692	52935	0,003611	94
SC 04	48,629	2007,762	55375	0,003626	94
SC 03	53,182	2288,254	62530	0,003659	95
SC 02	59,087	2813,056	75910	0,003706	96
SC 01	66,848	3507,939	93495	0,003752	98
MC 01	66,846	3954,943	100300	0,003943	102
MC 02	59,087	3100,447	77550	0,003998	104
MC 03	53,182	2351,755	57815	0,004068	106
MC 04	48,629	2047,453	49790	0,004112	107
MC 05	45,048	2045,618	49710	0,004115	107
MC 06	42,183	2233,216	54590	0,004091	106
MC 07	39,848	2479,635	61015	0,004064	106
MC 08	37,915	2725,815	67440	0,004042	105
MC 09	36,291	2931,657	72820	0,004026	105
MC 10	34,910	3031,294	75445	0,004018	104
MC 11	33,723	3093,817	77100	0,004013	104
MC 12	32,692	3130,821	78095	0,004009	104
MC 13	31,789	3150,492	78635	0,004006	104
MC 14	30,992	3197,088	79875	0,004003	104
MC 15	30,283	3257,697	81475	0,003998	104
MC 16	29,649	3385,861	84825	0,003992	104
MC 17	29,079	3548,656	89080	0,003984	104
MC 18	28,563	3723,881	93655	0,003976	103
MC 19	28,095	3292,426	82465	0,003993	104
MC 20	27,667	2940,520	73340	0,004009	104
MC 21	27,276	4397,481	111200	0,003955	103
MC 22	26,916	3200,014	80115	0,003994	104
MC 23	26,973	2560,875	63490	0,004034	105

Tabel 4.3 Gaya kabel awal VRB2

ID_{Kabel}	$\theta_{\text{inklinasi}} (^{\circ})$	P_{awal} (kN)	σ_{kabel} (MPa)	A_{kabel} (m²)	ΣStrand (bh)
SC 17	29,609	550,915	17635	0,003124	81
SC 16	29,833	1216,910	34925	0,003484	91
SC 15	29,732	1834,328	50945	0,003601	94
SC 14	29,838	2562,888	69865	0,003668	95
SC 13	30,857	3582,765	96415	0,003716	97
SC 12	32,013	4078,043	109300	0,003731	97
SC 11	33,333	4179,914	112000	0,003732	97
SC 10	34,852	4007,750	107600	0,003725	97
SC 09	36,618	3721,653	100200	0,003714	97
SC 08	38,690	3362,374	90945	0,003697	96
SC 07	41,151	2985,069	81185	0,003677	96
SC 06	44,107	2640,350	72245	0,003655	95
SC 05	47,703	2400,191	65970	0,003638	95
SC 04	52,132	2348,592	64505	0,003641	95
SC 03	57,647	2578,521	70215	0,003672	95
SC 02	64,551	3198,459	85855	0,003725	97
SC 01	73,152	4030,799	106700	0,003778	98
MC 01	73,152	4443,407	113400	0,003918	102
MC 02	64,551	3282,779	82370	0,003985	104
MC 03	57,647	2663,984	65815	0,004048	105
MC 04	52,132	2564,079	62980	0,004071	106
MC 05	47,703	2772,741	68300	0,004060	106
MC 06	44,107	3110,550	77055	0,004037	105
MC 07	41,151	3445,601	85775	0,004017	104
MC 08	38,690	3683,381	91990	0,004004	104
MC 09	36,619	3845,356	96245	0,003995	104
MC 10	34,852	3964,442	99400	0,003988	104
MC 11	33,333	4068,864	102200	0,003981	103
MC 12	32,013	4168,895	104800	0,003978	103
MC 13	30,857	4295,361	108200	0,003970	103
MC 14	29,838	4444,443	112100	0,003965	103
MC 15	28,932	4650,844	117500	0,003958	103
MC 16	28,123	4881,516	123600	0,003949	103
MC 17	27,094	4871,829	123350	0,003950	103

Tabel 4.4 Gaya kabel awal VRB3

ID_{Kabel}	$\theta_{\text{inklinasi}} (^{\circ})$	P_{awal} (kN)	σ_{kabel} (MPa)	A_{kabel} (m²)	Σ_{Strand} (bh)
SC 16	28,791	401,238	13515	0,002969	77
SC 15	28,409	902,534	26505	0,003405	88
SC 14	28,078	1428,615	40135	0,003560	93
SC 13	27,734	1942,484	53450	0,003634	94
SC 12	28,743	3853,384	103200	0,003734	97
SC 11	29,896	4709,023	125450	0,003754	98
SC 10	31,225	4751,345	126600	0,003753	98
SC 09	32,772	4404,133	117600	0,003745	97
SC 08	34,592	4105,446	109950	0,003734	97
SC 07	36,760	3880,887	104200	0,003724	97
SC 06	39,378	3592,395	96750	0,003713	96
SC 05	42,586	3070,938	83240	0,003689	96
SC 04	46,581	2242,907	61705	0,003635	94
SC 03	51,635	1873,698	51990	0,003604	94
SC 02	58,114	3196,159	86050	0,003714	97
SC 01	66,463	7080,616	186450	0,003798	99
MC 01	66,463	7034,376	180200	0,003904	101
MC 02	58,114	3541,178	88815	0,003987	104
MC 03	51,635	2259,057	55225	0,004091	106
MC 04	46,581	2525,648	62060	0,004070	106
MC 05	42,586	3326,672	82860	0,004015	104
MC 06	39,378	3935,900	98720	0,003987	104
MC 07	36,760	4205,167	105800	0,003975	103
MC 08	34,592	4287,898	108000	0,003970	103
MC 09	32,772	4373,663	110300	0,003965	103
MC 10	31,225	4572,680	115500	0,003959	103
MC 11	29,896	4844,044	122650	0,003949	103
MC 12	28,743	5094,288	129200	0,003943	102
MC 13	27,734	5086,196	129100	0,003940	102
MC 14	26,844	4575,653	115900	0,003948	103
MC 15	26,054	3574,822	89905	0,003976	103
MC 16	26,228	3392,086	85135	0,003984	104

Tabel 4.5 Gaya kabel awal VRB4

ID_{Kabel}	$\theta_{\text{inklinasi}} (^{\circ})$	P_{awal} (kN)	σ_{kabel} (MPa)	A_{kabel} (m²)	Σ_{Strand} (bh)
SC 14	27,913	675,460	20685	0,003265	85
SC 13	27,688	1412,857	39815	0,003549	92
SC 12	27,412	2113,260	57985	0,003644	95
SC 11	28,546	4364,710	116600	0,003743	97
SC 10	29,854	5296,742	140800	0,003762	98
SC 09	31,380	5214,428	138800	0,003757	98
SC 08	33,180	4714,298	125900	0,003744	97
SC 07	35,331	4357,754	116700	0,003734	97
SC 06	37,936	4053,688	108900	0,003722	97
SC 05	41,143	3492,785	94360	0,003702	96
SC 04	45,159	2519,402	69085	0,003647	95
SC 03	50,274	1972,575	54780	0,003601	94
SC 02	56,885	3357,929	90490	0,003711	96
SC 01	65,482	7802,800	205400	0,003799	99
MC 01	65,482	8155,308	209100	0,003900	101
MC 02	56,885	3404,710	85025	0,004004	104
MC 03	50,274	2073,413	50190	0,004131	107
MC 04	45,159	2880,378	71090	0,004052	105
MC 05	41,143	4049,988	101500	0,003990	104
MC 06	37,936	4560,550	114800	0,003973	103
MC 07	35,331	4671,343	117800	0,003965	103
MC 08	33,180	4692,550	118400	0,003963	103
MC 09	31,380	4837,548	122300	0,003955	103
MC 10	29,854	5079,818	128650	0,003949	103
MC 11	28,546	5353,156	135800	0,003942	102
MC 12	27,412	5622,471	142900	0,003935	102
MC 13	26,422	5824,925	148200	0,003930	102
MC 14	25,699	5893,934	150100	0,003927	102

Tabel 4.6 Gaya kabel awal VRB 5

ID_{Kabel}	$\theta_{\text{inklinasi}} (^{\circ})$	P_{awal} (kN)	σ_{kabel} (MPa)	A_{kabel} (m²)	Σ_{Strand} (bh)
SC 13	27,558	206,169	8832	0,002334	61
SC 12	27,430	1176,956	34035	0,003458	90

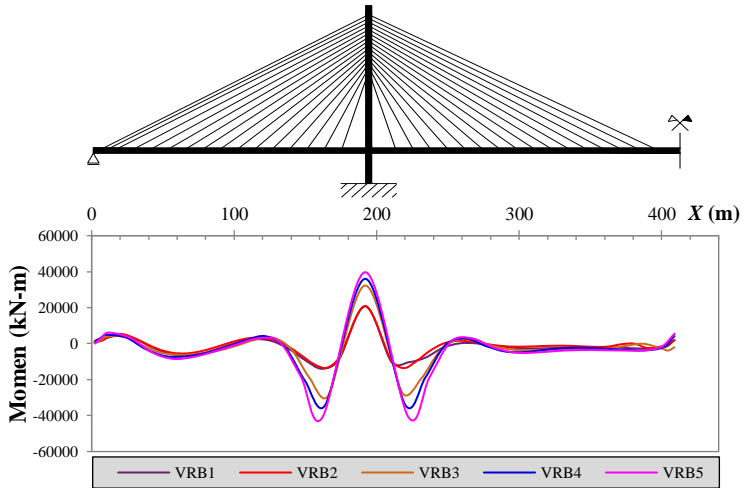
Tabel 4.6 Gaya kabel awal VRB5 – lanjutan

ID _{Kabel}	$\theta_{\text{inklinasi}} (^{\circ})$	P _{awal} (kN)	σ_{kabel} (MPa)	A _{kabel} (m ²)	Σ_{Strand} (bh)
SC 11	27,296	2149,991	59295	0,003626	94
SC 10	28,581	4762,853	127300	0,003741	97
SC 09	30,082	5764,229	153400	0,003758	98
SC 08	31,857	5548,083	147900	0,003751	97
SC 07	33,983	4877,874	130600	0,003735	97
SC 06	36,568	4408,387	118500	0,003720	97
SC 05	39,764	4002,075	108000	0,003706	96
SC 04	43,787	3180,697	86710	0,003668	95
SC 03	48,946	1871,388	52620	0,003556	92
SC 02	55,669	2867,948	78225	0,003666	95
SC 01	64,498	8956,485	235800	0,003798	99
MC 01	64,498	9130,220	234000	0,003902	101
MC 02	55,669	3269,979	81070	0,004034	105
MC 03	48,946	2097,701	50370	0,004165	108
MC 04	43,787	3371,849	83430	0,004042	105
MC 05	39,764	4578,124	114800	0,003988	104
MC 06	36,568	4978,506	125300	0,003973	103
MC 07	33,983	5036,445	126900	0,003969	103
MC 08	31,857	5169,512	130500	0,003961	103
MC 09	30,082	5419,288	137100	0,003953	103
MC 10	28,581	5722,693	145100	0,003944	102
MC 11	27,296	5995,817	152300	0,003937	102
MC 12	26,185	6168,525	156800	0,003934	102
MC 13	25,428	6196,902	157600	0,003932	102

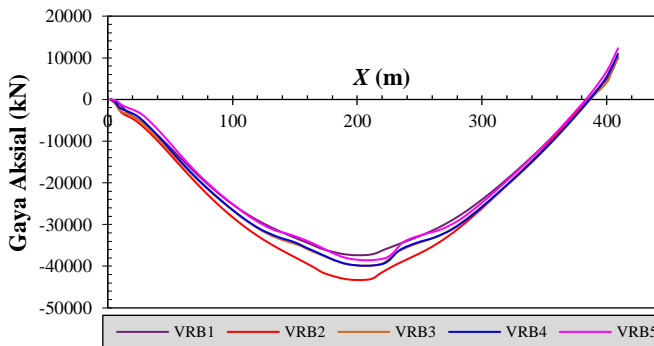
4.2.3 Variasi Gaya-Gaya Dalam Gelagar

Momen lentur pada gelagar bertambah cukup signifikan akibat peningkatan jarak antar kabel penggantung (lihat Gambar 4.3a). Momen lentur gelagar positif maksimum terjadi pada pertemuan antara *pylon* dan gelagar. Hal ini terjadi karena peningkatan jarak kabel pada daerah tersebut diambil sebesar dua kali jarak kabel penggantung (2λ). Momen

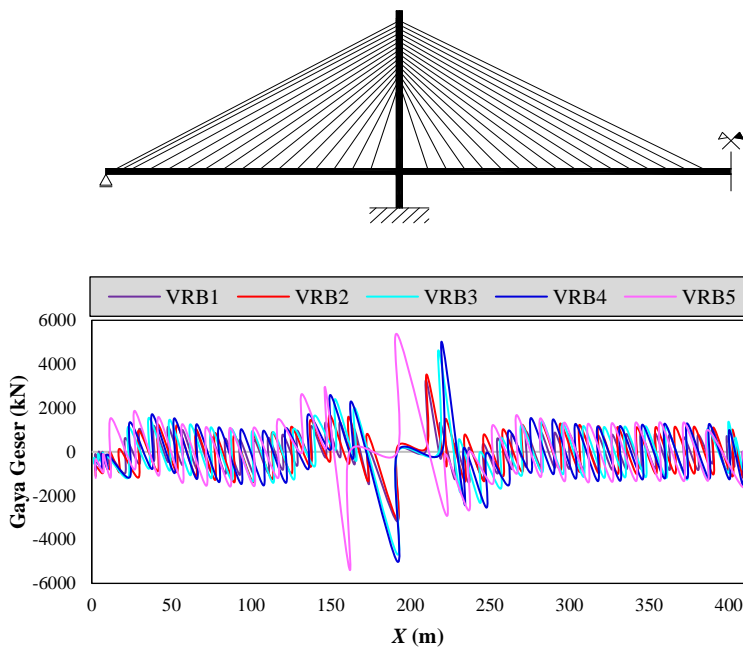
lentur juga mengalami peningkatan yang cukup signifikan pada daerah *enclosure*.



a) Perbandingan momen lentur gelagar terhadap jarak antar kabel penggantung



b) Perbandingan gaya normal gelagar terhadap jarak antar kabel penggantung



c) Perbandingan gaya geser gelagar terhadap jarak kabel penggantung

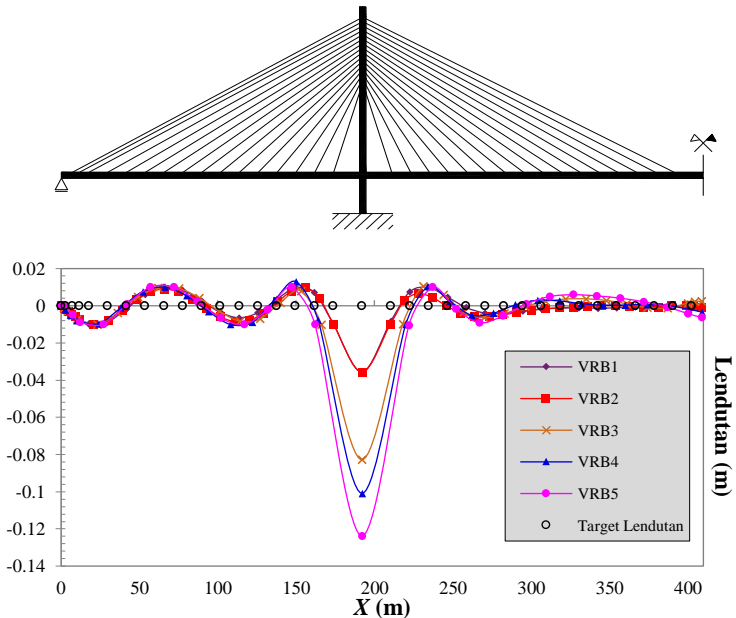
Gambar 4.3 Variasi gaya-gaya dalam gelagar

Gaya dalam normal (aksial) pada gelagar akibat beban permanen juga terjadi cukup besar pada pertemuan gelagar dan *pylon* terhadap variasi jarak kabel penggantung yang berdasarkan Gambar 4.3b mengalami gaya aksial tekan. Pada bagian *enclosure*, gelagar mengalami gaya aksial tarik. Jika diperhatikan hal diatas terjadi karena jarak kabel penggantung pada gelagar bentang tengah persebarannya relatif lebih merata untuk semua variabel. Besarnya gaya aksial tarik maksimum

untuk masing-masing variasi secara berturut adalah 10131,94 kN, 9851,46 kN, 10144,8 kN, 10932,11, dan 12277,44 kN.

4.2.4 Variasi Deformasi Struktur

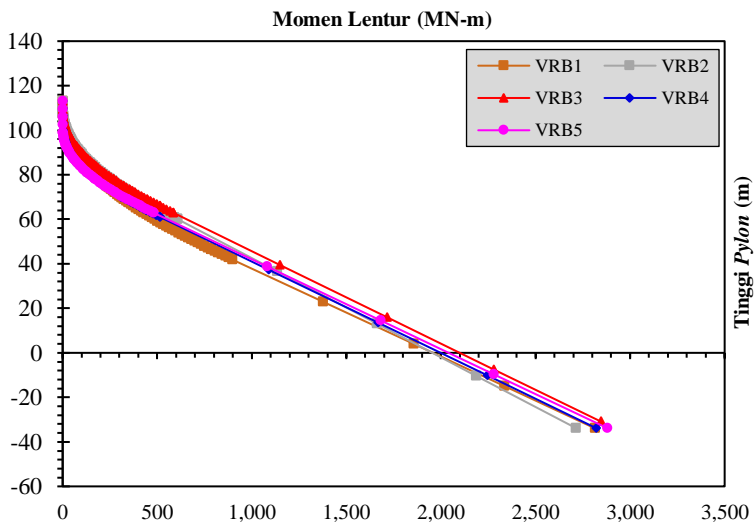
Deformasi struktur yang ditinjau adalah lendutan pada tengah bentang dan deformasi *pylon* pada bagian atas. Dari hasil analisis diperoleh lendutan terbesar pada pertemuan *pylon* dan gelagar (*box girder*) yaitu 0,13 m pada variabel VRB3. Deformasi struktur akibat beban permanen (berat sendiri dan beban mati tambahan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.4 Deformasi vertikal pada gelagar terhadap jarak antar kabel Penggantung

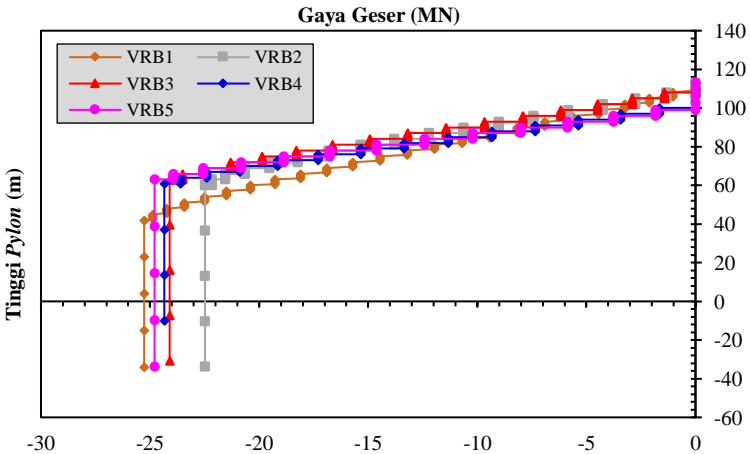
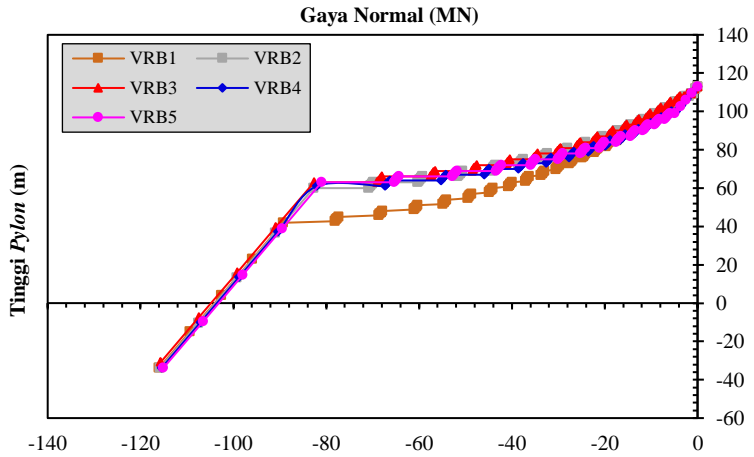
4.2.5 Variasi Gaya-Gaya Dalam Pylon

Momen lentur yang terjadi pada *pylon* relatif sangat besar karena adanya pengalihan beban dari setiap kabel. Mekanisme pengalihan beban yang terjadi yaitu berdasarkan komponen gaya setiap pasangan kabel pada titik yang tidak bersesuaian pada *pylon* diasumsikan menggunakan perletakan jepit. Jepit dipilih karena pada pelaksanaannya titik angkur pada kabel di *pylon* menggunakan sambungan yang monolit dan masif. Berikut ini disajikan grafik perbandingan momen lentur yang terjadi pada *pylon* berdasarkan variasi jarak kabel penggantung.



a) Momen lentur *pylon*

Gambar 4.5 Gaya-gaya dalam *pylon* terhadap jarak antar kabel penggantung



Gambar 4.5 Gaya-gaya dalam *pylon* terhadap jarak antar kabel penggantung - Lanjutan

4.3 Analisis Modal

Karakteristik dinamik yang diperoleh dari hasil analisa struktur dengan *Midas Civil* yang menggunakan teknik analisis *eigen value* yaitu pola getar (*mode shape*) dan frekuensi alami (*natural frequency*) yang masing-masing parameter tersebut ditentukan dari massa dan kekakuan struktur. Dibawah ini disajikan tabel hasil analisis frekuensi alami berdasarkan variasi jarak kabel penggantung.

Tabel 4.7 Frekuensi alami struktur berdasarkan jarak kabel penggantung

Pola Getar	Frekuensi alami struktur (Hz)				
	VRB1	VRB2	VRB3	VRB4	VRB5
1	0,0142455	0,0124470	0,0116571	0,0112126	0,0108287
2	0,0331700	0,0288925	0,0286624	0,0270111	0,0263320
3	0,0332826	0,0297532	0,0293515	0,0279810	0,0270885
4	0,0357417	0,0306087	0,0304085	0,0291139	0,0284254
5	0,0532547	0,0477914	0,0433926	0,0412385	0,0393160
6	0,0553335	0,0485061	0,0463854	0,0452913	0,0443864
7	0,0609592	0,0546950	0,0501039	0,0482835	0,0467342
8	0,0689294	0,0657956	0,0638716	0,0628727	0,0621258
9	0,0742340	0,0698899	0,0685767	0,0674767	0,0664314
10	0,0774004	0,0713179	0,0696685	0,0676884	0,0669234
11	0,1004371	0,0981661	0,0962553	0,0947976	0,0936068
12	0,1055060	0,0992148	0,0968664	0,0961684	0,0956457
13	0,1219817	0,1186513	0,1163753	0,1154871	0,1147187
14	0,1379601	0,1349089	0,1343261	0,1310736	0,1298877
15	0,1434092	0,1358640	0,1346380	0,1342473	0,1339731
16	0,1710982	0,1688333	0,1674319	0,1666656	0,1660608

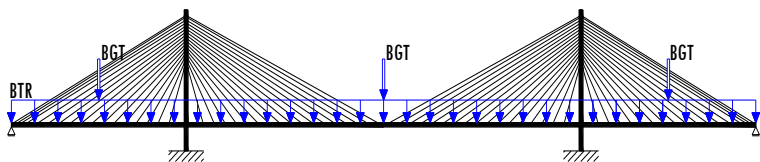
Tabel 4.7 Lanjutan

Pola Getar	Frekuensi alami struktur (Hz)				
	VRB1	VRB2	VRB3	VRB4	VRB5
17	0,1825519	0,1739966	0,1723877	0,1708305	0,1696302
18	0,1827100	0,1811678	0,1805417	0,1802806	0,1801258
19	0,2244337	0,2181274	0,2166746	0,2137030	0,2124291
20	0,2271489	0,2223047	0,2210786	0,2201170	0,2191222

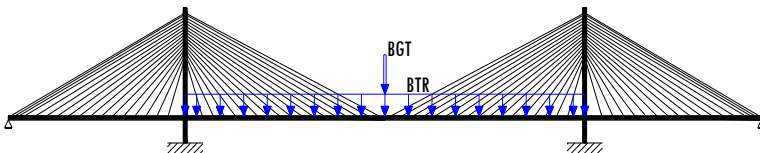
Berdasarkan grafik tabel diatas dapat diketahui bahwa semakin pendek jarak kabel pada arah longitudinal maka kekakuan struktur meningkat.

4.4 Pembahasan

Analisa statik digunakan untuk memahami bagaimana perilaku struktur jembatan *cable-stayed* menggunakan kombinasi beban hidup yang memiliki konfigurasi penempatan beban masing-masing seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini.

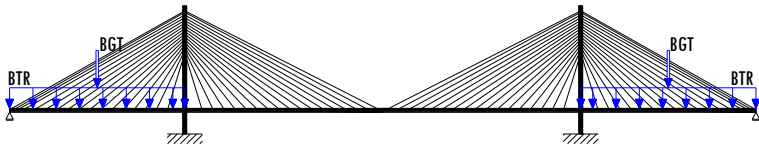


(a) Kombinasi beban 1 (LCB1)

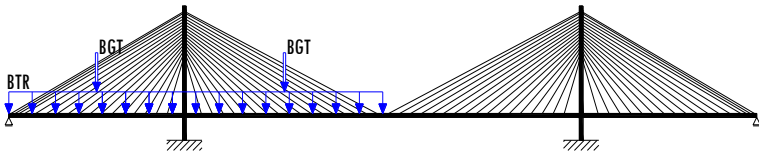


(b) Kombinasi beban 2 (LCB2)

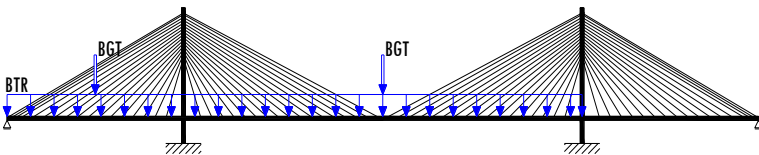
Gambar 4.6 Kombinasi beban hidup



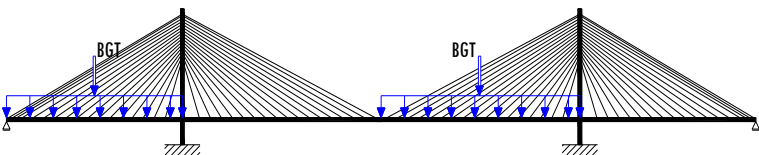
(c) Kombinasi beban 3 (LCB3)



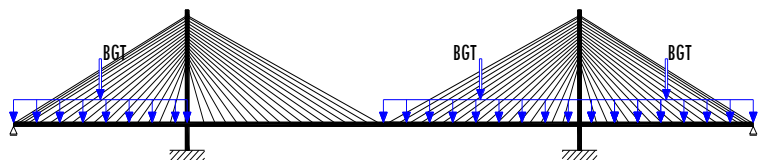
(d) Kombinasi beban 4 (LCB4)



(e) Kombinasi beban 5 (LCB5)



(f) Kombinasi beban 6 (LCB6)

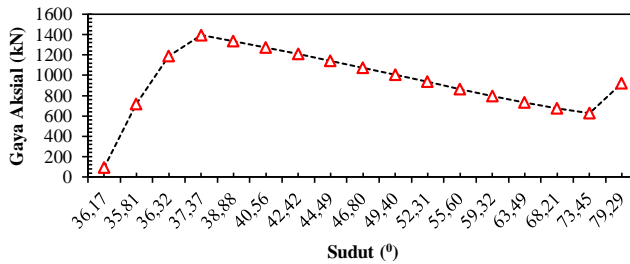


(g) Kombinasi beban 7 (LCB7)

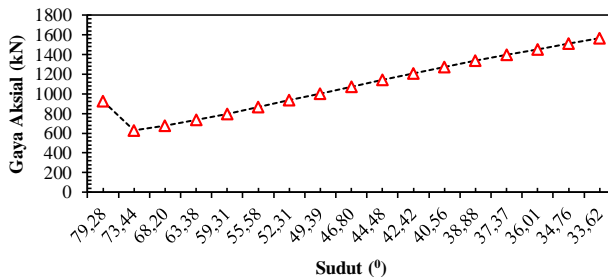
Gambar 4.6 Kombinasi beban hidup - lanjutan

4.4.1 Pengaruh Jarak Kabel terhadap Gaya Kabel

Evaluasi gaya aksial kabel terhadap variasi jarak kabel dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruhnya. Pada perhitungan manual yang ditinjau pada VRB2 untuk mengetahui gaya aksial kabel akibat berat sendiri perilakunya identik sama dengan hasil analisis perangkat lunak *Midas Civil*. Gaya aksial pada kabel terluar (*Side Cable*) untuk bentang tepi lebih kecil dibandingkan kabel terdekat *pylon* (Gambar 4.7a), hal ini juga terjadi pada hasil perhitungan dengan perangkat lunak *Midas Civil* (Gambar 4.7b).



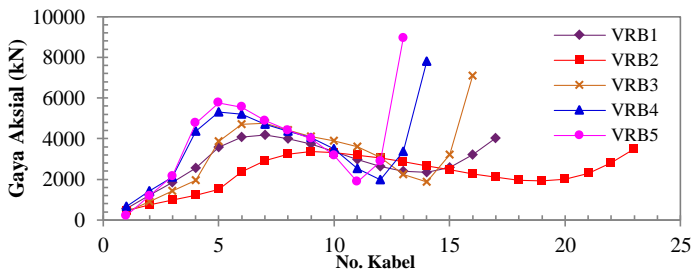
(a) Gaya aksial kabel perhitungan manual bentang tepi



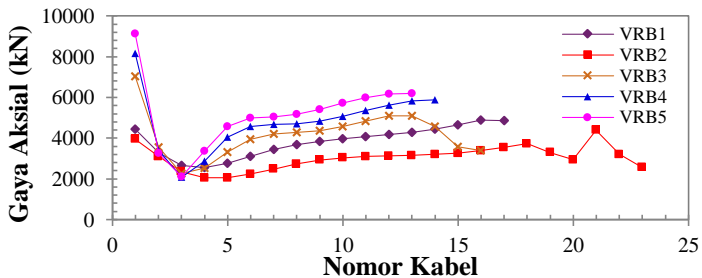
(b) Gaya aksial kabel perhitungan manual bentang tengah

Gambar 4.7 Gaya aksial awal kabel perhitungan manual dan *midas*

Civil



(c) Gaya aksial kabel perhitungan *Midas Civil* untuk setiap variabel bentang tepi



(d) Gaya aksial kabel perhitungan *Midas Civil* untuk setiap variabel bentang tengah

Gambar 4.7 Gaya aksial awal kabel perhitungan manual dan *midas Civil* - lanjutan

Berat kabel pada perhitungan manual adalah sebesar 148,8 kN/m dengan berat jenis kabel sebesar 78,50 kN/m³. Untuk perhitungan dengan perangkat lunak *Midas Civil*, gaya aksial VRB5 untuk kabel terdekat *pylon* bentang tepi adalah yang paling maksimum yaitu sebesar 8956,485 kN. Berdasarkan penentuan gaya aksial awal kabel dapat disimpulkan bahwa ada dua parameter penting sebagai pertimbangan yaitu jarak kabel dan sudut inklinasi dari kabel. Sudut inklinasi kabel

memberikan pengaruh yang sangat signifikan karena titik angkat pada kabel terjadi karena adanya sinus sudut kemiringan.

Sedangkan pada analisis $3D$ yang juga telah memperhitungkan beban permanen dan beban hidup yang bekerja, gaya aksial kabel relatif linear. Artinya peningkatan gaya kabel lebih sempurna dibandingkan pada saat penentuan gaya aksial awal kabel atau analisis $2D$ pendahuluan. Indikasi dari problem ini adalah pada analisis $2D$ diberi kekangan (*constraint*) agar deformasi yang terjadi tidak terlalu besar dan dapat ditentukan besar beban yang mampu dipikul oleh jembatan dalam kondisi pasif (*unknown load factor*).

Beban yang digunakan dalam analisis $3D$ masing-masing yaitu untuk beban lajur BTR (Beban Terbagi Merata) kondisi layan 47,467 kN/m dan kondisi ultimit 94,933 dengan faktor beban γ^{TD} 2,0, beban garis terpusat (BGT) kondisi layan dan kondisi ultimit adalah 49,00 kN/m, dan untuk beban truk "T" sesuai ketentuan pembebanan dalam SNI 1725-2016 dengan faktor beban dinamis (FBD) diambil sebesar 30% dan faktor beban γ^{STT} dan γ^{UTT} masing-masing 1,00 dan 2,00. Beban truk kemudian diaplikasikan sebagai beban truk berjalan dengan fasilitas *moving load* pada perangkat lunak *Midas Civil*. Dalam pendefinisian beban truk berjalan digunakan enam *lane* sesuai kondisi aktual jembatan Suramadu.

a. Gaya Kabel VRB1

Berikut ini disajikan gaya-gaya kabel pada VRB1 untuk kondisi layan dan kondisi ultimit.

Tabel 4.8 Gaya kabel VRB1 kondisi layan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
1	6306	8331	3026	5822	6672	4122	3756
2	6100	7898	3090	5678	6280	3765	3585
3	5900	7488	3144	5540	5882	3373	3392
4	5697	7094	3176	5397	5467	2933	3164
5	5519	6652	3303	5285	5102	2637	3053
6	5553	5786	4246	5422	5268	3768	4053
7	5599	5142	4990	5545	5427	4684	4856
8	5599	4665	5478	5597	5517	5314	5396
9	5569	4348	5748	5597	5552	5691	5709
10	5507	4155	5834	5550	5531	5851	5827
11	5409	4038	5773	5453	5455	5835	5788
12	5304	3988	5635	5342	5360	5720	5664
13	5177	3958	5438	5206	5234	5533	5475
14	5026	3917	5207	5045	5082	5305	5249
15	4849	3847	4956	4858	4904	5057	5003
16	4644	3733	4694	4645	4700	4803	4746
17	4403	3568	4419	4400	4466	4541	4478
18	4125	3348	4126	4118	4194	4258	4189
19	3842	3111	3844	3835	3906	3961	3897
20	3625	2933	3634	3621	3646	3662	3642
21	3681	3032	3675	3688	3572	3457	3565
22	4453	3862	4365	4483	4060	3632	4024
23	6613	6109	6300	6679	5766	4799	5646
24	7170	7069	6359	7102	8015	8364	7519
25	4703	4679	4003	4671	5094	4893	4502
26	3684	3690	3008	3674	3792	3238	3131
27	3538	3551	2842	3537	3517	2785	2806
28	3750	3759	3017	3751	3688	2875	2937
29	4063	4069	3289	4064	3998	3147	3211
30	4375	4377	3562	4377	4321	3445	3499
31	4657	4656	3808	4661	4613	3714	3758
32	4903	4900	4022	4913	4865	3938	3976
33	5093	5087	4181	5110	5055	4092	4129
34	5267	5258	4324	5295	5224	4216	4259
35	5433	5423	4460	5474	5381	4323	4375
36	5595	5582	4589	5647	5533	4419	4482

Tabel 4.8 Gaya kabel VRB1 kondisi layan - lanjutan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
37	5771	5755	4728	5829	5700	4534	4605
38	5946	5929	4864	6001	5874	4666	4738
39	6138	6120	5015	6176	6078	4851	4911
40	6319	6302	5155	6320	6292	5082	5109
41	6464	6449	5263	6400	6495	5354	5323
42	6237	6227	5008	6078	6359	5355	5233
43	5954	5952	4713	5668	6202	5416	5168
44	6459	6469	5230	6018	6868	6385	5977
45	5514	5543	4329	4898	6111	6015	5419
46	4968	5063	3761	4266	5532	5458	4894

Tabel 4.9 Gaya kabel VRB1 kondisi ultimit

ID KABEL	LCB1U	LCB2U	LCB3U	LCB4U	LCB5U	LCB6U	LCB7U
1	9764	6907	3205	8796	5248	5397	4665
2	9411	6503	3390	8566	4885	4740	4380
3	9072	6124	3559	8351	4518	4018	4055
4	8740	5767	3698	8141	4140	3213	3674
5	8437	5352	4007	7970	3802	2673	3507
6	8367	4417	5753	8104	3898	4796	5367
7	8397	3742	7179	8288	4027	6567	6911
8	8406	3269	8163	8401	4121	7836	8000
9	8388	2973	8744	8444	4176	8632	8667
10	8338	2816	8991	8422	4193	9025	8977
11	8230	2744	8959	8318	4162	9082	8989
12	8091	2730	8753	8167	4101	8923	8811
13	7907	2735	8430	7965	4011	8619	8504
14	7681	2731	8042	7718	3896	8237	8126
15	7410	2702	7624	7428	3760	7827	7717
16	7096	2637	7196	7098	3605	7415	7301
17	6732	2530	6763	6724	3429	7007	6881
18	6317	2381	6319	6303	3227	6582	6444
19	5894	2216	5897	5879	3010	6130	6003
20	5557	2086	5574	5550	2799	5632	5590
21	5616	2159	5604	5631	2699	5168	5385

Tabel 4.9 Gaya kabel VRB1 kondisi ultimit – lanjutan

ID KABEL	LCB1U	LCB2U	LCB3U	LCB4U	LCB5U	LCB6U	LCB7U
22	6718	2768	6543	6778	2966	5075	5861
23	9879	4435	9252	10010	4092	6250	7945
24	10668	5233	9046	10533	6179	6528	11366
25	7080	3516	5681	7017	3931	3731	6679
26	5655	2834	4304	5636	2935	4764	4548
27	5467	2746	4075	5466	2713	3961	4003
28	5782	2900	4317	5785	2829	4032	4156
29	6225	3119	4678	6229	3049	4394	4522
30	6668	3336	5043	6672	3280	4808	4916
31	7070	3534	5373	7079	3491	5184	5271
32	7425	3709	5663	7444	3675	5495	5570
33	7716	3852	5892	7752	3820	5714	5789
34	7988	3986	6104	8045	3951	5887	5973
35	8252	4115	6305	8333	4074	6031	6135
36	8512	4243	6499	8616	4193	6160	6286
37	8785	4377	6699	8901	4322	6312	6454
38	9054	4510	6890	9165	4455	6496	6640
39	9331	4648	7084	9407	4606	6757	6877
40	9581	4773	7252	9581	4763	7105	7161
41	9770	4870	7367	9641	4916	7550	7488
42	9547	4763	7089	9229	4895	7783	7539
43	9215	4605	6733	8643	4855	8138	7642
44	9604	4812	7146	8722	5211	9457	8640
45	8471	4264	6101	7239	4832	9473	8279
46	7796	3994	5382	6394	4462	8777	7649

b. Gaya Kabel VRB2

Berikut ini disajikan gaya-gaya kabel pada VRB2 untuk kondisi layan dan kondisi ultimit.

Tabel 4.10 Gaya kabel VRB2 kondisi layan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
1	6091	5095	4582	7585	8190	5561	5362

Tabel 4.10 Gaya kabel VRB2 kondisi layan – lanjutan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
2	5813	4701	4804	7354	7775	5462	5373
3	5551	4329	5012	7135	7368	5338	5365
4	5306	3919	5349	6950	7013	5380	5500
5	5103	3340	6118	6841	6841	6079	6157
6	4962	2928	6574	6707	6676	6508	6549
7	4827	2654	6715	6523	6482	6650	6663
8	4691	2490	6619	6305	6269	6570	6566
9	4538	2400	6374	6070	6047	6347	6333
10	4356	2335	6032	5805	5795	6025	6008
11	4139	2262	5638	5501	5503	5647	5630
12	3882	2157	5216	5150	5162	5233	5216
13	3598	2017	4790	4765	4780	4805	4791
14	3331	1873	4419	4408	4415	4414	4409
15	3234	1837	4286	4292	4265	4232	4258
16	3693	2187	4869	4954	4851	4737	4833
17	5255	3302	6792	7117	6902	6630	6827
18	5453	3668	6632	7381	7597	7296	7100
19	3733	2489	4320	4970	5077	4592	4495
20	3210	2123	3597	4230	4264	3657	3629
21	3290	2177	3681	4341	4344	3666	3666
22	3567	2369	4029	4734	4725	3995	4005
23	3878	2586	4421	5176	5158	4376	4391
24	4173	2791	4786	5598	5563	4720	4741
25	4444	2974	5102	5975	5915	4998	5032
26	4708	3148	5395	6336	6247	5247	5296
27	4976	3324	5682	6694	6583	5502	5564
28	5247	3503	5965	7043	6933	5795	5858
29	5505	3672	6225	7352	7289	6142	6182
30	5737	3823	6456	7596	7646	6573	6555
31	5893	3924	6611	7705	7956	7070	6946
32	5933	3952	6663	7631	8178	7612	7332
33	5795	3863	6555	7303	8227	8117	7634
34	5371	3564	6122	6554	7895	8343	7633

Tabel 4.11 Gaya kabel VRB2 kondisi ultimit

ID KABEL	LCB1U	LCB2U	LCB3U	LCB4U	LCB5U	LCB6U	LCB7U
1	6091	8290	5365	7585	6290	7323	6926
2	5813	7529	5862	7354	5902	7177	6999
3	5551	6814	6335	7135	5524	6986	7041
4	5306	6012	7047	6950	5187	7108	7347
5	5103	4864	8604	6841	5025	8527	8683
6	4962	4101	9638	6707	4921	9506	9588
7	4827	3639	10092	6523	4813	9962	9989
8	4691	3405	10088	6305	4695	9990	9982
9	4538	3304	9757	6070	4552	9702	9676
10	4356	3249	9220	5805	4373	9207	9173
11	4139	3178	8582	5501	4156	8601	8565
12	3882	3051	7907	5150	3899	7942	7908
13	3598	2865	7245	4765	3612	7275	7246
14	3331	2666	6679	4408	3335	6668	6659
15	3234	2616	6458	4292	3208	6350	6402
16	3693	3121	7230	4954	3597	6968	7159
17	5255	4760	9896	7117	5058	9572	9966
18	5453	5388	9371	7381	5650	10698	10305
19	3733	3730	6145	4970	3830	6689	6497
20	3210	3221	5144	4230	3239	5264	5207
21	3290	3299	5253	4341	3290	5222	5223
22	3567	3571	5723	4734	3558	5655	5674
23	3878	3878	6252	5176	3864	6164	6192
24	4173	4171	6750	5598	4152	6617	6660
25	4444	4442	7193	5975	4410	6985	7053
26	4708	4708	7612	6336	4658	7316	7414
27	4976	4980	8027	6694	4914	7668	7791
28	5247	5257	8433	7043	5185	8094	8219
29	5505	5521	8804	7352	5466	8639	8718
30	5737	5755	9131	7596	5755	9365	9328
31	5893	5909	9344	7705	6017	9426	9402
32	5933	5938	9396	7631	6213	9529	9574
33	5795	5777	9212	7303	6278	9133	9138
34	5371	5314	8616	6554	6081	9005	9038

c. Gaya Kabel VRB3

Berikut ini disajikan gaya-gaya kabel pada VRB3 untuk kondisi layan dan kondisi ultimit.

Tabel 4.12 Gaya kabel VRB3 kondisi layan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
1	7120	4395	4187	6643	7374	5324	5070
2	7017	4245	4329	6599	7142	5133	5008
3	6924	4082	4515	6570	6922	4985	4988
4	6844	3934	4699	6553	6707	4820	4957
5	7372	3715	6224	7221	7278	6243	6337
6	7561	3460	7147	7511	7508	7110	7163
7	7407	3175	7445	7417	7385	7389	7411
8	7089	2931	7340	7127	7089	7290	7289
9	6791	2782	7085	6833	6803	7052	7041
10	6493	2684	6735	6526	6509	6724	6707
11	6111	2562	6270	6130	6128	6279	6261
12	5546	2347	5634	5553	5562	5657	5640
13	4762	2008	4807	4762	4774	4830	4818
14	4280	1806	4296	4279	4275	4287	4292
15	5426	2410	5357	5430	5371	5244	5299
16	10462	4966	10119	10479	10307	9792	9947
17	10552	5256	9689	10531	10707	10022	9867
18	5527	2763	4843	5517	5583	4966	4910
19	4298	2153	3639	4294	4307	3661	3652
20	4698	2352	4000	4698	4690	3983	3991
21	5484	2743	4729	5491	5470	4691	4705
22	6154	3077	5339	6172	6133	5273	5294
23	6646	3322	5769	6678	6614	5664	5696
24	7046	3523	6102	7093	7002	5960	6003
25	7434	3718	6415	7487	7383	6258	6309
26	7832	3919	6732	7872	7787	6613	6658
27	8177	4093	6996	8174	8165	7006	7018
28	8371	4190	7120	8281	8425	7379	7325
29	8228	4116	6940	8005	8391	7586	7423
30	7574	3784	6306	7173	7888	7462	7148
31	6404	3188	5239	5801	6897	6972	6479

Tabel 4.12 Gaya kabel VRB3 kondisi layan – lanjutan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
32	6034	3017	4885	5368	6493	6614	6155

Tabel 4.13 Gaya kabel VRB3 kondisi ultimit

ID KABEL	LCB1U	LCB2U	LCB3U	LCB4U	LCB5U	LCB6U	LCB7U
1	5502	7172	5137	5025	5756	7411	6904
2	5377	6849	5377	4959	5502	6987	6737
3	5262	6500	5705	4908	5259	6645	6649
4	5158	6181	6025	4867	5021	6268	6542
5	5399	5458	8503	5248	5305	8540	8728
6	5521	4881	10215	5471	5468	10141	10247
7	5458	4402	10993	5468	5437	10881	10924
8	5287	4059	11076	5325	5287	10975	10975
9	5093	3867	10775	5135	5105	10709	10685
10	4863	3739	10212	4896	4880	10189	10156
11	4561	3575	9442	4581	4579	9459	9423
12	4145	3292	8466	4153	4162	8512	8478
13	3619	2873	7329	3619	3631	7376	7352
14	3316	2648	6663	3314	3311	6645	6656
15	4105	3500	8074	4109	4050	7847	7957
16	7540	7009	14394	7557	7385	13740	14050
17	7631	7590	13536	7610	7786	14201	13891
18	4171	4171	6974	4161	4227	7221	7108
19	3321	3329	5323	3317	3329	5366	5349
20	3572	3577	5746	3571	3564	5713	5728
21	4092	4094	6674	4099	4078	6597	6626
22	4562	4562	7495	4580	4541	7362	7404
23	4936	4935	8119	4969	4905	7910	7974
24	5258	5258	8628	5305	5214	8343	8430
25	5564	5567	9091	5617	5513	8777	8879
26	5860	5866	9519	5900	5815	9283	9371
27	6102	6111	9841	6099	6090	9862	9887
28	6227	6236	9952	6137	6281	10471	10363
29	6122	6127	9668	5898	6285	10960	10633
30	5686	5679	8836	5285	6000	11148	10521

Tabel 4.13 Gaya kabel VRB3 kondisi ultimit – lanjutan

ID KABEL	LCB1U	LCB2U	LCB3U	LCB4U	LCB5U	LCB6U	LCB7U
31	4916	4888	7502	4313	5408	10967	9982
32	4655	4654	7011	3989	5113	10469	9552

d. Gaya Kabel VRB4

Berikut ini disajikan gaya-gaya kabel pada VRB4 untuk kondisi layan dan kondisi ultimit.

Tabel 4.14 Gaya kabel VRB4 kondisi layan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
1	8722	5321	5556	8339	8868	6416	6271
2	8544	5067	5754	8222	8582	6312	6275
3	8373	4827	5941	8111	8295	6185	6263
4	8597	4395	7296	8460	8541	7394	7450
5	8450	3925	7985	8404	8418	7992	8025
6	7976	3456	8020	7984	7962	7982	7995
7	7433	3095	7706	7464	7433	7658	7658
8	7027	2902	7336	7061	7035	7300	7293
9	6642	2772	6885	6667	6654	6870	6858
10	6068	2563	6220	6081	6081	6225	6212
11	5190	2195	5272	5194	5201	5287	5276
12	4546	1926	4578	4546	4545	4578	4578
13	5684	2535	5623	5687	5646	5546	5584
14	11478	5472	11120	11492	11359	10868	10988
15	11719	5843	10834	11701	11840	11095	10975
16	5640	2821	4955	5632	5681	5046	5005
17	4435	2221	3771	4432	4440	3782	3778
18	5161	2582	4448	5164	5151	4423	4432
19	6170	3085	5391	6183	6150	5331	5350
20	6855	3428	6005	6884	6822	5899	5932
21	7360	3682	6433	7406	7312	6279	6327
22	7831	3920	6818	7886	7773	6643	6701
23	8341	4178	7235	8384	8291	7104	7153
24	8831	4426	7633	8827	8821	7659	7668

Tabel 4.14 Gaya kabel VRB4 kondisi layan – lanjutan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
25	9199	4609	7928	9102	9277	8263	8186
26	9339	4672	8036	9093	9558	8851	8632
27	9126	4552	7868	8685	9537	9305	8894
28	8552	4245	7416	7916	9146	9435	8840

Tabel 4.15 Gaya kabel VRB4 kondisi ultimit

ID KABEL	LCB1U	LCB2U	LCB3U	LCB4U	LCB5U	LCB6U	LCB7U
1	6640	8559	6948	6257	6786	8668	8377
2	6445	8035	7310	6123	6482	8426	8351
3	6260	7541	7657	5999	6183	8145	8301
4	6255	6447	9907	6118	6199	10105	10217
5	6138	5538	11345	6092	6105	11359	11424
6	5861	4798	11810	5869	5848	11734	11761
7	5538	4295	11622	5569	5538	11527	11527
8	5257	4034	11133	5291	5265	11061	11045
9	4953	3854	10391	4978	4964	10361	10338
10	4522	3581	9348	4535	4535	9359	9333
11	3928	3129	8019	3932	3939	8050	8028
12	3516	2823	7096	3515	3515	7095	7096
13	4300	3686	8479	4303	4263	8325	8400
14	8256	7721	15796	8270	8137	15293	15531
15	8418	8386	15065	8400	8538	15588	15347
16	4289	4291	7207	4280	4329	7390	7308
17	3451	3458	5573	3448	3455	5596	5587
18	3894	3897	6363	3897	3885	6312	6331
19	4552	4553	7546	4566	4533	7426	7465
20	5052	5053	8404	5082	5019	8192	8258
21	5456	5460	9057	5502	5408	8750	8846
22	5838	5848	9651	5893	5781	9300	9415
23	6232	6248	10252	6275	6182	9990	10089
24	6600	6621	10806	6597	6591	10857	10875
25	6872	6892	11202	6775	6950	11873	11718
26	6966	6972	11327	6720	7185	12956	12518
27	6790	6768	11063	6349	7201	13937	13116

Tabel 4.15 Gaya kabel VRB4 kondisi ultimit – layan

ID KABEL	LCB1U	LCB2U	LCB3U	LCB4U	LCB5U	LCB6U	LCB7U
28	6343	6282	10415	5708	6938	14452	13263

e. Gaya Kabel VRB5

Berikut ini disajikan gaya-gaya kabel pada VRB5 untuk kondisi layan dan kondisi ultimit.

Tabel 4.16 Gaya kabel VRB5 kondisi layan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
1	9135	5531	5954	8754	9274	6810	6672
2	8957	5234	6241	8645	9003	6812	6766
3	8818	4969	6542	8572	8764	6819	6872
4	9108	4562	7983	8989	9068	8090	8129
5	8916	4085	8602	8885	8892	8604	8628
6	8325	3589	8467	8343	8316	8421	8430
7	7669	3206	7979	7704	7670	7926	7926
8	7159	2989	7457	7191	7166	7421	7414
9	6635	2807	6844	6655	6645	6833	6823
10	5808	2476	5927	5816	5817	5934	5924
11	4749	2013	4802	4750	4751	4804	4802
12	5664	2519	5613	5665	5637	5560	5586
13	12707	6084	12334	12717	12612	12136	12230
14	12818	6396	11912	12801	12915	12124	12028
15	5729	2866	5044	5721	5759	5113	5083
16	4663	2334	3994	4662	4664	3996	3995
17	5714	2858	4987	5722	5702	4949	4961
18	6827	3414	6023	6850	6801	5939	5965
19	7551	3778	6663	7592	7509	6525	6567
20	8120	4065	7137	8173	8063	6963	7019
21	8709	4363	7624	8758	8654	7473	7527
22	9284	4654	8095	9294	9264	8082	8102
23	9736	4879	8460	9656	9799	8747	8684
24	9909	4959	8593	9681	10115	9366	9160
25	9660	4817	8387	9231	10065	9806	9401

Tabel 4.16 Gaya kabel VRB5 kondisi layan

ID KABEL	LCB1S	LCB2S	LCB3S	LCB4S	LCB5S	LCB6S	LCB7S
26	9024	4477	7878	8402	9612	9879	9291

Tabel 4.17 Gaya kabel VRB5 kondisi ultimit

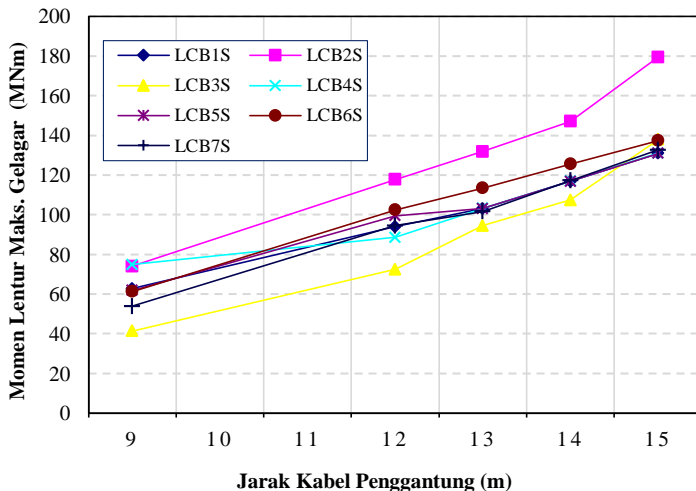
ID KABEL	LCB1U	LCB2U	LCB3U	LCB4U	LCB5U	LCB6U	LCB7U
1	6955	8881	7549	6574	7094	9261	8983
2	6744	8255	8056	6432	6790	9199	9107
3	6563	7683	8574	6317	6510	9128	9235
4	6592	6607	10933	6473	6552	11147	11226
5	6452	5706	12276	6421	6428	12280	12327
6	6108	4961	12500	6126	6099	12408	12427
7	5712	4455	12043	5747	5713	11939	11937
8	5347	4166	11288	5379	5354	11217	11203
9	4931	3910	10280	4951	4941	10256	10237
10	4337	3483	8914	4345	4347	8927	8907
11	3684	2962	7475	3685	3686	7479	7475
12	4351	3725	8602	4353	4325	8495	8548
13	9081	8543	17416	9091	8986	17020	17208
14	9173	9146	16533	9156	9269	16958	16765
15	4388	4392	7408	4381	4419	7546	7485
16	3627	3633	5916	3626	3628	5920	5917
17	4267	4270	7081	4275	4255	7004	7029
18	5010	5012	8413	5033	4984	8244	8296
19	5559	5563	9341	5600	5517	9065	9151
20	6022	6032	10079	6075	5965	9729	9842
21	6483	6501	10797	6532	6429	10494	10603
22	6918	6941	11458	6927	6897	11430	11471
23	7251	7274	11951	7171	7314	12524	12398
24	7372	7380	12111	7143	7578	13657	13245
25	7173	7148	11800	6744	7578	14639	13829
26	6687	6617	11082	6065	7275	15083	13907

Pada jembatan *cabl-stayed* besarnya peningkatan gaya kabel sebaiknya tidak terlalu besar agar pengangkutan kabel dapat lebih seragam.

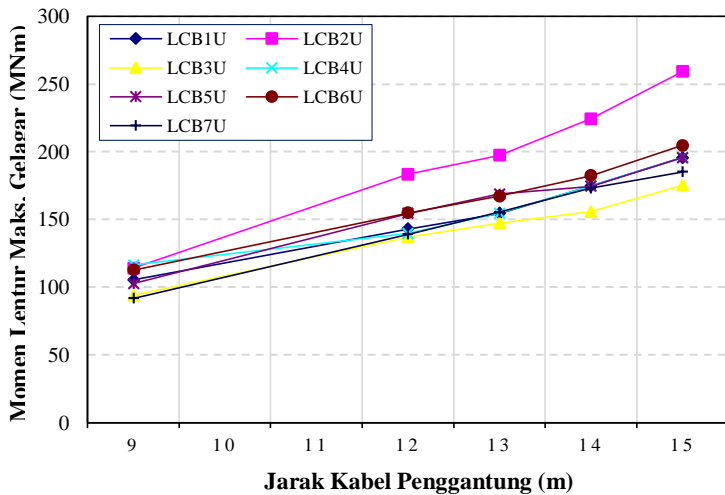
Keseragaman diperoleh dari penyebaran distribusi beban. Semakin seragam gaya kabel maka berarti penyebaran tegangan akan terdistribusi lebih baik.

4.4.2 Perbandingan Momen Lentur Gelagar

Perbandingan masing-masing momen lentur maksimum pada gelagar terhadap beban layan dan beban batas disajikan masing-masing pada Gambar 4.8 – 4.9. Berdasarkan hasil analisis yang diamati, momen lentur akan maksimum terjadi pada tiga titik utama yaitu, pada titik ujung bentang tepi, titik pertemuan *pylon* dan titik tengah bentang jembatan atau didaerah *enclosure*. Berikut ini disajikan grafik mengenai perbandingan besaran momen lentur maksimum yang diperoleh.



Gambar 4.8 Perbandingan momen lentur maksimum pada gelagar vs jarak kabel penggantung terhadap kombinasi beban layan (*service*)



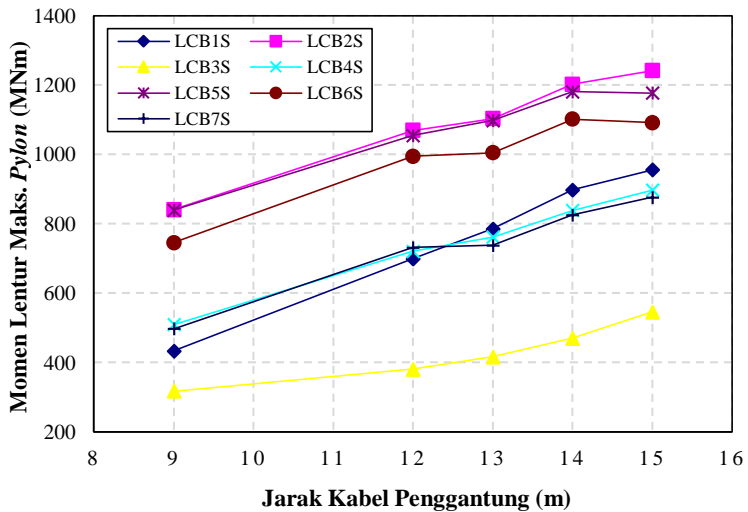
Gambar 4.9 Perbandingan momen lentur maksimum pada gelagar vs jarak kabel penggantung terhadap kombinasi beban batas (*ultimate*)

Berdasarkan gambar diatas dapat diketahui bahwa distribusi beban cukup memberikan pengaruh yang signifikan terhadap momen lentur yang terjadi. Distribusi beban untuk kombinasi LCB2 layan maupun ultimit dapat disimpulkan bahwa momen lentur bertambah cukup signifikan akibat peningkatkan jarak kabel. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jarak kabel memerlukan peningkatan kapasitas momen lentur penampang.

4.4.3 Perbandingan Momen Lentur *Pylon*

Pylon menerima momen lentur dari pengalihan beban dari kabel. Semakin besar momen lentur pada *pylon* maka kebutuhan pondasi cukup

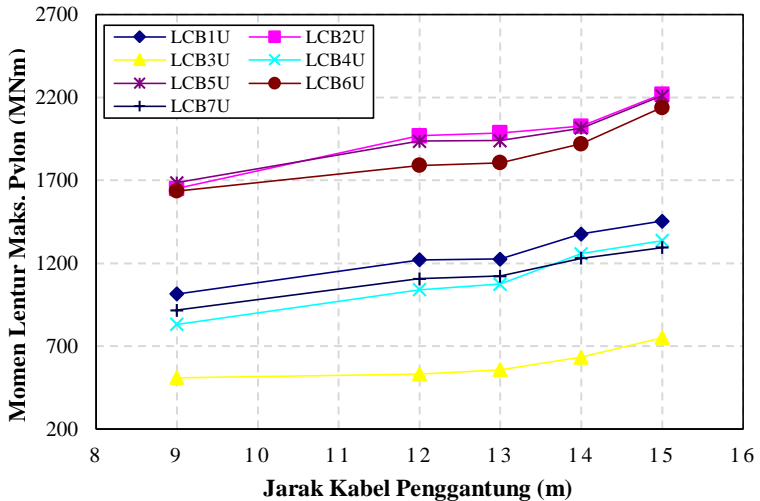
besar pula. Semakin besar momen lentur akan berpengaruh pada dimensi *pylon* yang tentunya juga akan berpengaruh pada biaya (*cost*). Selain itu momen lentur yang kecil juga membuat struktur akan rawan untuk berdeformasi, artinya struktur tidak cukup stabil. Besarnya momen lentur maksimum yang terjadi pada *pylon* untuk masing-masing variabel ditunjukkan pada Gambar 4.10-4.11 untuk masing-masing kombinasi beban yang layan dan ultimit.



Gambar 4.10 Perbandingan momen lentur maksimum pada *pylon* vs jarak kabel penggantung terhadap kombinasi beban layan (*service*)

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa pada kondisi beban layan, momen maksimum *pylon* terjadi pada pada kombinasi beban LCB2S. Kombinasi beban LCB2S memberikan momen maksimum untuk VRB5 sebesar 1241,295 MNm, sedangkan untuk VRB1 sebesar 841,027 MNm. Pada

kondisi beban batas kombinasi beban LCB2 juga memberikan pengaruh yang maksimum (lihat Gambar 4.11).



Gambar 4.11 Perbandingan momen lentur maksimum pada *pylon* vs jarak kabel penggantung terhadap kombinasi beban batas (*ultimate*)

4.4.4 Perbandingan Frekuensi Alami dan Modus Getar

Penentuan modus getaran dan frekuensi alami struktur diperoleh dari analisis modal terhadap variasi jarak kabel penggantung. Hal ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pada saat kondisi resonansi yang akan timbul pada struktur akibat adanya beban dinamik yang bekerja seperti angin dan gempa. Jika beban dinamik tersebut bekerja maka struktur akan mengalami vibrasi sesuai beban dinamik tersebut, karena struktur akan beresonansi apabila frekuensi alami struktur sama dengan frekuensi akibat beban dinamik.

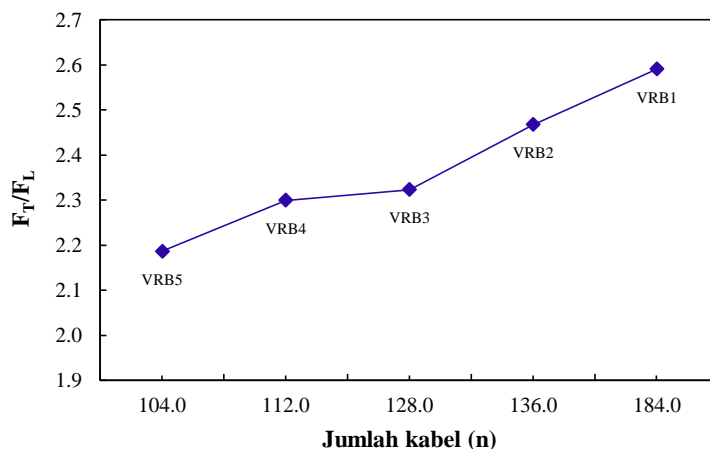
Analisis modal sangat penting untuk ditinjau dalam aspek perencanaan jembatan. Beban-beban dinamik seperti misalnya akibat angin sangat memberikan pengaruh. Runtuh jembatan Tacoma Narrow salah satu contohnya. Pada prinsipnya angin tidak dapat redam, beda dengan beban dinamik gempa. Dari hasil pengamatan Jembatan Suramadu memiliki dua pasang *Fluid Viscous Damper* (FVD) yang setiap pasangannya diletakkan masing-masing disetiap *pylon* dengan tujuan meredam beban dinamik gempa ataupun beban dinamik lalu lintas yang berlebihan.

Analisis modal pada Proyek Akhir Terapan ini difokuskan untuk meneliti modus getaran yang terjadi. Modus getaran yang penting untuk ditinjau adalah modus getar lentur dan modus getar torsi. Nilai frekuensi dari kedua modus getar ini sebaiknya tidak berdekatan agar struktur tidak bervibrasi dalam lentur dan torsi secara bersamaan.

Analisis modal yang dilakukan tentunya hanya valid digunakan sebagai studi pendahuluan saja. Untuk struktur aktual mutlak untuk dilakukan pengujian-pengujian menyangkut ketahanan dinamik struktur, seperti pengujian *wind-tunnel*. Hasil analisis modal terhadap setiap variabel jarak kabel penggantung disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Perbandingan frekuensi lentur dan torsi setiap variabel

Jarak Kabel (m)	Jumlah Kabel (n)	Lentur (F_L)	Torsi (F_T)	Rasio (F_T/F_L)
9,0	184	0,053	0,138	2,590
12,0	136	0,055	0,135	2,467
13,0	128	0,050	0,112	2,323
14,0	112	0,041	0,095	2,299
15,0	104	0,028	0,062	2,186



Gambar 4.12 Perbandingan rasio modulus lentur dan torsi

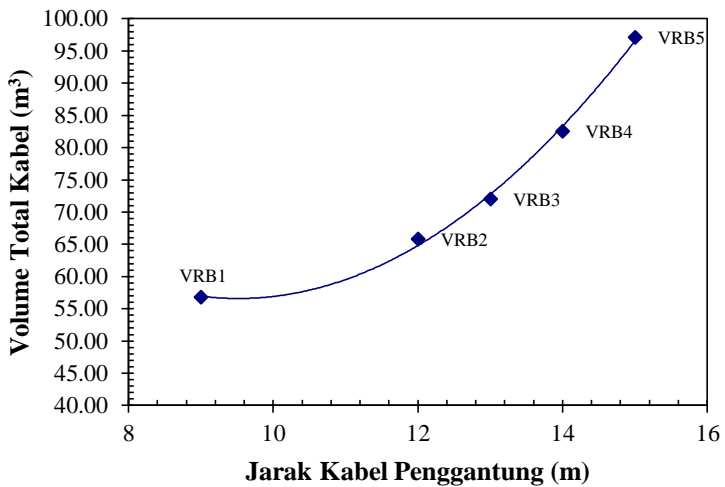
4.4.5 Variasi Kebutuhan Kabel

Berdasarkan hasil dari sub sub-bab 4.2.2 diperoleh jumlah kebutuhan *strand* yang hasilnya kemudian dianalisis lagi untuk memperoleh luas kabel. Dari hasil luas kabel kemudian dihitung volume kabel dengan masing-masing panjang kabel. Nilai hasil perhitungan volume kabel untuk masing-masing variabel disajikan pada Tabel 4.19 dibawah ini.

Tabel 4.19 Perbandingan volume kabel terhadap jarak kabel

Kasus	Jarak Kabel (m)	Jumlah Kabel (bh)	Volume Kabel (m ³)
VRB1	9,0	184	56,785
VRB2	12,0	136	65,828
VRB3	13,0	128	72,048
VRB4	14,0	112	82,555
VRB5	15,0	104	97,136

Dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa semakin dekat jarak kabel penggantung maka kebutuhan volume kabel akan semakin kecil. Volume kabel kecil disebabkan karena distribusi gaya kabel relatif kecil jika jumlah kabel semakin banyak. Pengaruh dari volume kabel terhadap jarak kabel penggantung dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.13 Perbandingan volume kabel terhadap jarak kabel penggantung

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Jembatan *cable-stayed* memiliki banyak variasi-variasi sistem pemikul beban untuk menjadi bahan pertimbangan. Dalam studi ini telah dilakukan analisis mengenai pengaruh perubahan parameter jarak kabel penggantung terhadap desain elemen kabel, dimana terdapat lima variabel pembanding jarak kabel penggantung yaitu 9,0 m, 12,0 m, 13,0 m, 14,0 m dan 15,0 m. Pemilihan objek studi kasus dalam analisis ini adalah jembatan Suramadu dengan total panjang bentang jembatan utama (jembatan *cable-stayed*) adalah 818 m.

Beberapa kesimpulan yang diperoleh dari hasil pengamatan dalam analisis ini adalah sebagai berikut:

a) *Pylon*

Pylon sebagai elemen yang perilakunya identik dengan kolom relatif tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan parameter jarak kabel penggantung. Rata-rata perubahan yang didapatkan dari hasil analisis ini dapat dilihat pada sub sub-bab 4.4.3. Pengaruh signifikan terjadi pada detailing pengangkutan kabel pada *pylon* terhadap jarak kabel penggantung yang berdekatan. Hal ini bisa dilihat dari besaran jumlah kabel pada jarak kabel yang berdekatan. Namun dengan jarak kabel yang berdekatan dimana gaya kabelnya kecil maka akan memberikan momen lentur

yang juga kecil. Hal ini memberikan keuntungan terhadap dimensi angkur.

b) Kabel

Jarak kabel penggantung yang relatif kecil akan menghasilkan gaya kabel yang kecil dan hal ini tentunya akan mengurangi dimensi kebutuhan kabel. Dengan jarak kabel penggantung yang relatif kecil juga akan memberikan pengaruh pada sistem pengankuran. Kebutuhan sistem pengankuran yang masif dan kompleks diperoleh dari jarak kabel penggantung yang besar sebab gaya kabel juga besar. Hal ini penting karena titik angkur pada *pylon* dan gelagar menjadi sumber transfer beban, maka dibutuhkan sistem pengankuran yang baik agar beban-beban dapat terdistribusi secara seragam (*uniform*).

Berdasarkan volume kebutuhan kabel, dapat ditarik kesimpulan bahwa jarak kabel penggantung yang optimum adalah 10,0 – 11,0 m sesuai objek studi kasus yang dilakukan.

c) Gelagar

Pengaruh jarak kabel-penggantung terhadap gelagar terutama terjadi pada pengurangan gaya-gaya dalam dan momen lentur. Dengan pengurangan-pengurangan tersebut akan didapatkan dimensi gelagar yang optimal.

Struktur jembatan *cable-stayed* dengan jarak kabel-penggantung yang relatif kecil akan menghasilkan kehandalan aerodinamik yang baik. Berdasarkan hasil analisis untuk masing-masing jarak kabel penggantung, diperoleh nilai dari rasio frekuensi alami lentur (F_L) dan torsi (F_T) terbesar pada jarak kabel penggantung 9,0 m sebesar 2,590. Tentunya

analisis yang teoritis seperti ini hanya valid sebagai studi pendahuluan saja. Sedangkan untuk mengetahui kehandalan struktur yang aktual mutlak harus dilakukan pengujian-pengujian aerodinamik seperti *wind tunnel test* apalagi menyangkut struktur jembatan khusus seperti jembatan Suramadu.

5.2 Saran

Perlu dipahami bahwa desain jembatan dengan sistem *cable-stayed* memiliki tingkat kesulitan yang relatif tinggi. Banyak faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan, sedangkan penulis hanya melakukan sebagai kecil dari banyak aspek penting untuk dipertimbangkan dalam desain. Sebab itu beberapa saran yang penulis tawarkan agar dapat dikembangkan lebih lanjut antara lain mengenai permasalahan-permasalahan dinamika struktur. Permasalahan dinamika struktur, khususnya jembatan *cable-stayed* sangat unik sebagai contoh masalah-masalah seperti pertimbangan mengenai pengaruh beban-beban angin dan suhu pada tahapan konstruksi untuk melihat seberapa besar pengaruhnya pada proses pelaksanaan konstruksi. Karena jembatan *cable-stayed* yang derajat fleksibilitas (*flexibility*) yang tinggi perlu dilakukan analisis-analisis khusus. Jika dalam desain tidak dilakukan secara cermat, suatu fenomena ketidakstabilan aeroelastik yang berbahaya dapat saja terjadi. Dengan metode analitik maupun komputasi, kecepatan angin kritis yang menimbulkan ketidakstabilan aeroelastik cukup sulit untuk diprediksi, sampai saat ini analisis eksperimental di terowongan angin masih tetap menjadi andalan terbaik. Dari berbagai analisis eksperimental, analisis dengan model penuh adalah salah satu metoda yang paling dekat dengan

sebenarnya. Hampir semua komponen struktur disertakan dalam pemodelan, begitu pula interaksi dinamik antar komponen struktur dapat diamati. Interaksi aeroelastik atau interaksi karena adanya hubungan antara gaya terpaan angin atau aerodinamika dan gerakan struktur jembatan pada jembatan bentang panjang yang selalu terjadi. Fenomena seperti hubungan aeroelastik yang relatif sering terjadi seperti kibaran (*flutter*) dan getaran induksi pusaran (*vortex induced vibration* atau *VIV*). Kibaran terjadi sebab struktur tidak lagi mampu meredam energi dari angin yang menghantamnya. Baik kibaran maupun getaran induksi putaran ke dua-duanya dapat menghancurkan jembatan. Perbedaannya yaitu kibaran terjadi pada kecepatan angin yang tinggi, sedangkan getaran induksi pusaran menghancurkan jembatan dengan tiupan yang biasa saja. Karena itu jembatan bentang panjang menetapkan standar kecepatan kritis kibaran yang tinggi sekali. Penetapan kibaran ini menyangkut pada saat konstruksi pekerjaan & pada saat ketika jembatan beroperasi (masa layanan). Sedangkan proses pelaksanaan konstruksi pun juga dapat meninjau waktu tunda (*delay*) saat proses *erection* dengan menggunakan metode konstruksi kantilever seimbang (*balanced cantilever method*).

DAFTAR PUSTAKA

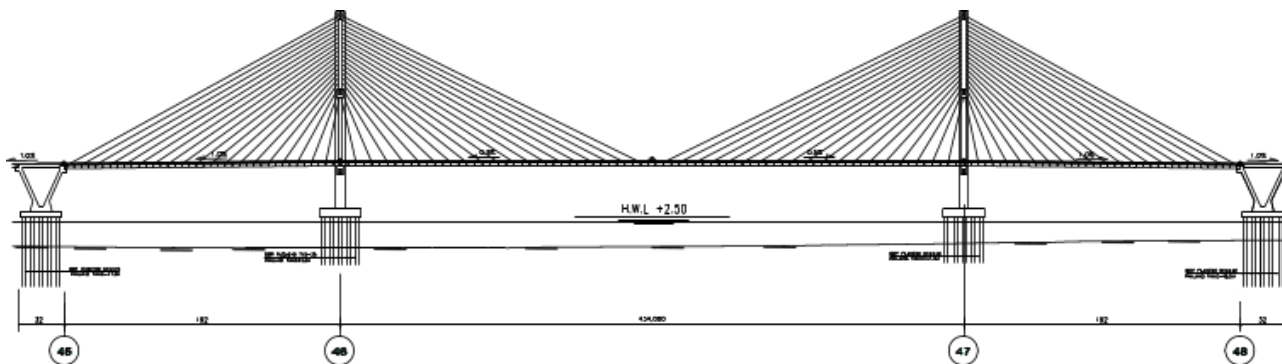
- Abdel Raheem, S. E., Shafy, Y. A., Abdel Seed, F. K., & Ahmed, H. H. (2013). Parametric Study on Nonlinear Stati Analysis of Cable Stayed Bridges. *Journal of Engineering Science, Assiut University*, 1-20.
- Badan Standarisasi Nasional. (2005). *RSNI T-03-2005 - Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan*. Bandung: BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 1725:2016 - Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: BSN.
- Chen, W.-F., & Duan, L. (2013). *Handbook of International Bridge Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Consortium of Chinese Contarctors. (2005). *Indonesian Suramadu Bridge-Detailed Design of Main Bridge*. China: China Road & Bridge Corporation.
- Consortium of Chinese Contractors. (2004). *Presentation of Shop Drawing Design of Suramadu Bridge (Vol. 1)*. China: China Road & Bridge Corporation.
- Dewobroto, W. (2009, Maret 14). *Suramadu dan Mahasiswaku*. Dipetik Agustus 10, 2016, dari The works of Wiryanto Dewobroto: <https://wiryanto.net/2009/03/14/suramadu-dan-mahasiswaku/>
- Dewobroto, W. (2015). *Struktur Baja – Perilaku, Desain, Analisis AISC 2010*. Tangerang: Lumina Press.
- Gimsing, N. J., & Georgakis, C. T. (2012). *Cable Supported Bridges-Concept and Design* (Third ed.). United Kingdom: John Willey & Sons, Ltd.

- Hassan, M. M. (2013). Optimization of Stay Cable in Cable-Stayed Bridges using Finite Element, Genetic Algorithm, and B-Spline Combined Technique. *Engineering Structure*, 643-654.
- Hassan, M. M., Nassef, A. O., & El Damatty, A. A. (2012). Determination of Optimum Post-Tensioning Cable Forces of Cable-Stayed Bridges. *Engineering Structure*, 248-259.
- Hidayat, I. (2011). *Analisa Konstruksi Jembatan Cable-Stayed Menggunakan Metode Kantilever (Studi Kasus Jembatan Suramadu)*. Universitas Indonesia, Fakultas Teknik. Depok: Program Magister Teknik Sipil.
- MIDAS Civil Analysis Reference. (2006). *Analysis for Civil Structure*. MIDAS Information Technology Co. Ltd.
- Parmar, V., & Parikh, K. B. (2015). Effect of Pylon Height on Cable-Stayed Bridge. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 188-190.
- Podolny, W., & Scalzi, J. B. (1986). *Construction and Design of Cable-Stayed Bridges* (Second ed.). Virginia: John Willey & Sons.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (PUSJATAN). (2011). *Perencanaan Teknis Jembatan Cable-Stayed*. Bandung: Badan Penelitian dan Pengembangan-Kementerian Pekerjaan Umum.
- Supriyadi, B., & Muntohar, A. S. (2014). *Jembatan* (Kelima ed.). Yogyakarta: Beta Offset.
- Svensson, H. (2012). *Cable-Stayed Bridges: 40 Years of Experience World Wide*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Troitsky, M. S. (1988). *Cable-stayed Bridges: Theory and Design*. London: BSP Professional Books.

- Wei, L., Cheng, H., & Li, J. (2012). Modal Analysis of a Cable-Stayed Bridge. *Procedia Engineering*, 481-486.
- Wu, X., & Li, B. (2015). Estimation and Optimization of Cable Force in Completion State of Cable-stayed Bridge. *Applied Mechanics and Materials*, 763-766.
- Xu, Y.-L. (2013). *Wind Effect on Cable-Supported Bridges*. Singapore: John Willey & Son Singapore Pte. Ltd.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 1: Geometri Jembatan Suramadu (*Cable-Stayed Bridge/Main Bridge*)



No	Uraian	Desain
1	Panjang Total Jembatan	5 438 m
2	Lebar Jembatan	2 x 15.0 m
3	Lajur Kendaraan	2 x 2 x 3.50 m
4	Lajur Lambat/Darurat	2 x 2.25 m
5	Lajur Sepeda Motor	2 x 2.75 m
6	Kelandaian Maksimum	3 %
7	Jalan Pendekat sisi Surabaya	4.35 km
8	Jalan Pendekat sisi Madura	11.50 km

Cause Way (1.822,25 m + 1.457,75 m)

Sisi Madura	40,25+44@40,5 m
Sisi Surabaya	40,25+35@40,5 m

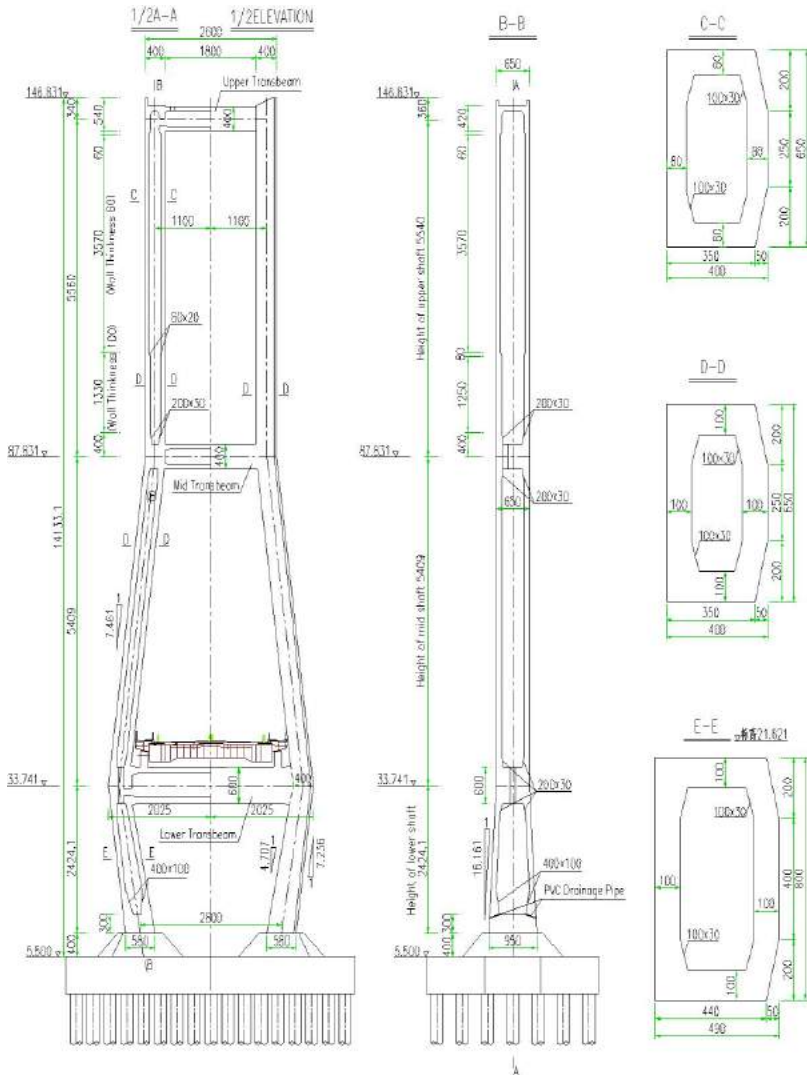
Approach Bridge (670 m + 670 m)

Sisi Madura	40m + 7@80m + 70m
Sisi Surabaya	40m + 7@80m + 70m

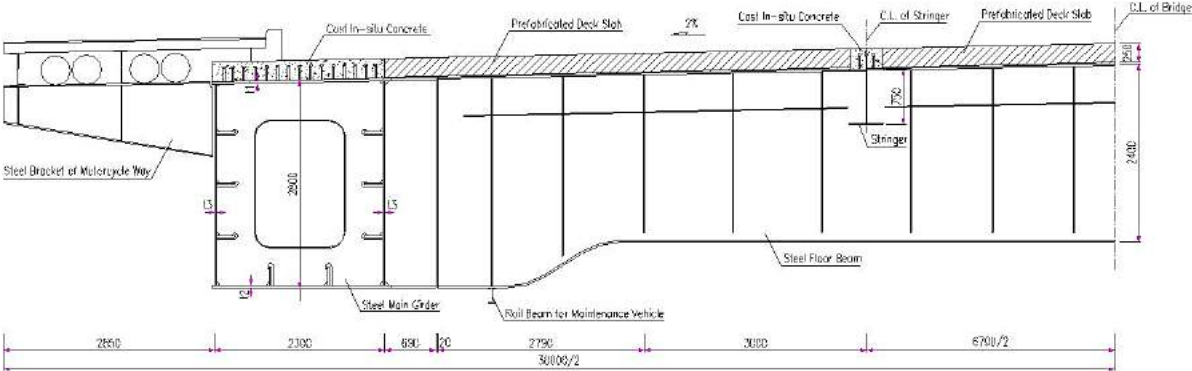
Main Bridge (818 m)

Bagian Tengah	192m + 434m + 192m
---------------	--------------------

1 Lampiran 1: Geometri Jembatan Suramadu (Pylon)



Lampiran 1: Geometri Jembatan Suramadu (Cross Section of Deck)

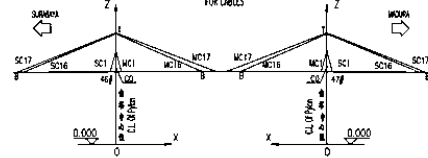


Lampiran 2: Data Kabel Jembatan Suramadu

主桥斜拉索参数表(一)
PARAMETER TABLE FOR CABLE OF MAIN BRIDGE (1)

桥索编号 Cable No.	桥索长度 Span Length (m)	桥索截面 Section Area (mm ²)	桥索截面 当完成时 When Finished (mm ²)	上、下锚点坐标(m) Theoretical coordinate of anchor point				桥索几何性质 Geometric Properties of Stay Cable							桥索重量 Unit Weight (kg/m)	桥索重量 Weight of Stay Cable		
				桥索 Order	桥索 Pylon	桥索长度 Linear Distance between anchor points LD (m)	桥索长度 Elastic Extension ΔL (m)	桥索长度 Announcement due to Sagging ΔL1 (m)	桥索长度 Length of Anchoring Cup of Anchoring L1 (mm)	桥索长度 Length of Anchoring Cup of Anchoring L2 (mm)	桥索厚度 Thickness of Rod (mm)	桥索重量 Single Weight (kg)	桥索 Number	桥索 Total Weight (kg)				
																桥索 Order	桥索 Pylon	桥索长度 Linear Distance between anchor points LD (m)
SC17	313	12043.7	5603.8	-191.750	35.455	-1.315	140.118	217.409	0.409	0.0107	795	630	190	217.868	94.56	20610.5	4	82442.0
SC18	313	12043.7	5417.3	-191.250	34.545	-1.317	137.924	216.343	0.470	0.0114	795	630	190	218.925	94.58	20512.1	4	82048.5
SC19	283	10891.1	4992.3	-184.985	36.560	-1.220	135.729	208.808	0.463	0.0100	730	590	170	209.205	65.50	17934.8	4	71578.4
SC14	283	10891.1	4997.8	-174.788	34.942	-1.311	133.511	198.814	0.441	0.0095	730	590	170	199.133	65.50	17023.0	4	68999.8
SC13	241	9274.8	4144.0	-183.788	37.062	-1.304	131.280	187.007	0.404	0.0072	685	545	170	187.431	72.61	15853.6	4	54602.5
SC12	241	9274.8	4129.7	-156.787	37.132	-1.203	129.040	175.495	0.378	0.0058	685	545	170	178.009	72.61	12814.7	4	51258.8
SC11	211	8120.2	3814.6	-138.787	37.202	-1.282	126.806	164.120	0.372	0.0042	630	525	150	164.584	63.74	10491.2	4	41964.8
SC10	211	8120.2	3884.2	-128.787	37.322	-1.314	124.528	152.784	0.336	0.0035	630	525	150	153.285	63.74	9771.0	4	39033.8
SC9	211	8120.2	4355.2	-114.787	37.442	-1.322	122.253	141.831	0.371	0.0019	630	525	150	142.895	63.74	9057.7	4	36230.7
SC8	187	7196.6	3922.2	-102.786	37.462	-1.397	119.907	130.645	0.345	0.0013	580	485	150	131.878	56.49	7495.0	4	29823.1
SC7	187	7196.6	3986.4	-80.788	37.782	-1.402	117.569	119.670	0.390	0.0011	580	485	150	120.168	56.49	6788.3	4	27153.0
SC6	187	7196.6	3912.6	-78.787	37.852	-1.626	115.011	109.683	0.336	0.0010	580	485	150	109.528	56.49	6193.2	4	24772.0
SC5	143	6733.0	2962.4	-68.787	37.922	-1.644	113.558	99.928	0.322	0.0006	555	455	120	93.519	49.24	4990.6	4	19602.4
SC4	143	6733.0	2671.7	-54.784	37.992	-1.784	109.872	89.236	0.484	0.0004	550	455	120	83.746	49.24	4420.3	4	17681.4
SC3	127	4987.5	2288.5	-42.785	38.062	-1.788	107.032	80.199	0.382	0.0002	520	425	120	63.696	36.37	3296.1	4	12384.3
SC2	127	4987.5	2362.4	-30.785	38.132	-2.068	103.812	71.460	0.363	0.0001	520	425	120	71.985	37.27	2761.8	4	11047.4
SC1	211	8150.2	3653.7	-18.785	38.252	-1.995	99.348	63.347	0.345	0.0000	630	525	150	64.034	63.74	4281.8	4	18327.1
CP	183	6733.0	3013.5	0.000	38.450	0.000	89.951	51.108	0.319	0.0000	550	455	120	51.703	49.24	2946.8	4	10184.0

斜拉索坐标示意图
SCHEMATIC OPENS OF COORDINATE SYSTEM FOR CABLES



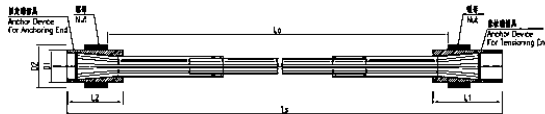
- 注:
- 桥索坐标原点:
Lo = 桥索长度
Lx = 桥索长度在 X 轴上的投影
Ly = 桥索长度在 Y 轴上的投影
 - 桥索长度 L = Lx² + Ly² 的平方根
 - 桥索长度 L = Lx² + Ly² 的平方根
 - 桥索长度 L = Lx² + Ly² 的平方根
 - 桥索长度 L = Lx² + Ly² 的平方根
 - 桥索长度 L = Lx² + Ly² 的平方根
 - 桥索长度 L = Lx² + Ly² 的平方根

Lampiran 2: Data Kabel Jembatan Suramadu

主桥斜拉索参数表(二)
PARAMETER TABLE FOR CABLE OF MAIN BRIDGE (2)

索编号 Cable No.	索段号 Span No.	截面面积 Section Area (mm ²)	成缆力 Cable Force When Construction Finished (kN)	J. 下部结构坐标 (m) Theoretical coordinate of anchor point				斜拉索几何特性 Geometric Properties of Stay Cable						索段重量 Unit Weight (kg/m)	斜拉索重量 Weight of Stay Cable			
				X轴		Y轴		索段长度 Linear Distance between anchor points (m)	弹性伸长量 Elastic Elongation due to Sagging (mm)	索段调整量 Adjustment due to Sagging (mm)	斜拉索长度 Length of Anchoring Cup of Temporary End (L1 (mm))	成缆长度 Length of Anchoring Cup of Anchoring End (L2 (mm))	索段直径 Diameter of Cable (mm)		索段重量 Weight of Cable (kg)	索段数量 Number	总重量 Total Weight (kg)	
				X0	X1	Y0	Y1											
M01	211	8120.2	3821.2	18.615	38.828	1.955	99.392	82.987	0.144	0.0000	630	525	150	63.676	63.74	4059.0	4	16235.8
M02	127	4887.5	2276.9	30.615	38.746	2.064	103.682	78.891	0.160	0.0001	520	425	120	71.410	38.37	2739.8	4	10959.2
M03	127	4887.5	2276.9	42.614	38.977	1.875	107.042	79.384	0.180	0.0002	570	425	120	79.880	38.37	3064.8	4	12259.1
M04	163	6273.0	2637.8	54.512	39.079	1.739	109.942	88.262	0.180	0.0004	550	465	120	88.787	49.24	4372.6	4	17490.4
M05	163	6273.0	2637.8	66.511	39.233	1.680	112.572	97.925	0.222	0.0008	550	455	120	95.418	49.24	4846.4	4	18385.8
M05	187	7186.6	2757.1	78.470	39.360	1.642	115.031	107.876	0.220	0.0010	580	485	150	108.478	56.49	6125.5	4	24502.8
M07	187	7186.6	2757.1	90.259	39.518	1.536	117.675	118.376	0.264	0.0013	580	485	150	118.892	56.49	6716.6	4	26568.5
M08	187	7186.6	2658.2	102.809	39.588	1.410	119.832	129.273	0.319	0.0015	680	485	150	129.534	56.49	7329.1	4	29316.4
M09	211	8120.2	4129.5	114.807	39.570	1.223	122.248	140.193	0.343	0.0021	830	525	150	140.684	63.74	8967.7	4	35879.9
M010	211	8120.2	4129.5	126.807	39.654	1.325	124.544	151.285	0.377	0.0027	830	525	150	151.248	63.74	9673.8	4	38697.8
M011	211	8120.2	4191.9	138.806	39.090	1.292	128.822	162.564	0.406	0.0034	850	525	150	162.883	63.74	10369.8	4	41589.2
M012	241	9274.8	4478.4	150.805	39.798	1.314	129.052	173.862	0.407	0.0043	865	545	170	174.368	72.81	12685.1	4	50780.2
M013	241	9274.8	4400.2	162.804	39.876	1.214	131.297	185.324	0.425	0.0063	865	545	170	185.801	72.81	13527.8	4	54110.3
M014	283	10891.1	4783.8	174.803	39.911	1.300	133.579	196.893	0.418	0.0091	730	590	170	197.435	85.50	16878.8	4	67919.1
M015	283	10891.1	4696.5	186.802	40.005	1.333	135.753	208.483	0.454	0.0115	730	590	170	209.811	85.50	17863.5	4	71477.9
M016	283	10891.1	5244.7	198.801	40.121	1.344	137.975	220.156	0.513	0.0110	730	590	170	220.586	85.50	18851.4	4	75438.3
M017	283	10891.1	5641.8	210.800	40.139	1.363	140.194	231.870	0.581	0.0112	730	590	170	232.252	85.50	19956.5	4	79425.8

斜拉索长度示意图
SCHEMATIC DRAWING OF CABLE LENGTH



- NOTES:
- In the parameter table.
 - Linear distance between centres of supporting plates in pylon and main girder.
 - Banking length of stay cables.
 $L_2 = L_0 - \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \Delta L_4 + \Delta L_5 + \Delta L_6 + \Delta L_7 + \Delta L_8 + \Delta L_9 + \Delta L_{10}$ (Temperature elongation not included).
 - Linear distance between anchor points, elastic elongation, adjustment due to sagging in the parameter table are indicated corresponding to the construction finished stay to determine the banking length of stay cable.
 - In the coordinate system of stay cables, X is in the direction along the bridge (Positive to the mid span), and Z is in vertical direction (Positive upward). Original point of coordinate system is at center line of pylon at elevation 0.000.
 - Parameters of stay cables with the same numberings in transverse direction and for 46# and 47# pylons are the same.
 - L1 and L2 are parameters of anchoring point when construction completed.
 - Total weight of stay cables of the whole bridge is 1367.97 t.
 - There are totally 3 sheets for the drawings.

Lampiran 3: Perhitungan Gaya Kabel Manual

Referensi

Schlaich, M.2001.*Erection of Cabl-Stayed Bridge Having Composite Decks with Precast Concrete Slabs*. ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 5.

1. Berat Kabel (qMS)

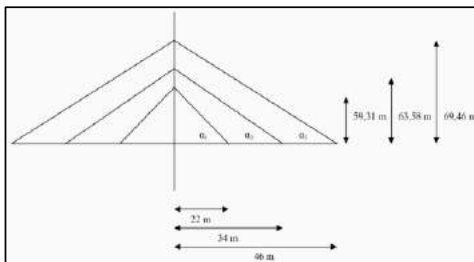
$$A_c = 1.895 \text{ m}^2$$

$$\gamma_c = 78.50 \text{ kN/m}^3$$

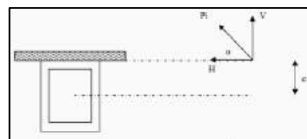
$$qMS = 148.8 \text{ kN/m}$$

2. Geometri Jembatan (VRB2)

a. Geometri Jembatan



b. Jarak c.g. Box Girder terhadap Composite Deck Section



c. Formulasi Perhitungan (M. Schlaich, 2001)

$$P_i = \frac{w \cdot l^2}{6 \cdot \left(\sin \alpha \cdot \frac{1}{2} + \cos \alpha \cdot e \right)}$$

3. Perhitungan Gaya Kabel

a. Bentang Tengah

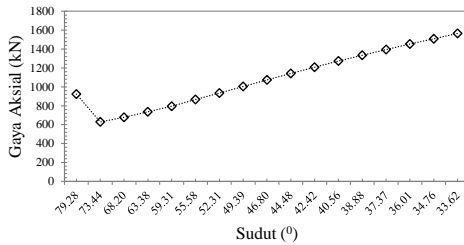
ID Kabel	λ	e	α	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$\cos \alpha \times e$	Gaya Kabel	P_i
MC1	18.82	1.4	79.28	0.983	0.186	0.26	923.774	923.774
MC2	30.82	1.4	73.44	0.959	0.285	0.40	1552.588	628.814
MC3	42.81	1.4	68.20	0.928	0.371	0.52	2228.837	676.249
MC4	54.81	1.4	63.38	0.894	0.448	0.63	2965.218	736.381
MC5	66.81	1.4	59.31	0.860	0.51	0.71	3760.055	794.837
MC6	78.81	1.4	55.58	0.825	0.565	0.79	4625.799	865.743
MC7	90.81	1.4	52.31	0.791	0.611	0.86	5559.492	933.694
MC8	102.81	1.4	49.39	0.759	0.651	0.91	6563.389	1003.897
MC9	114.81	1.4	46.80	0.729	0.685	0.96	7637.196	1073.807
MC10	126.81	1.4	44.48	0.701	0.713	1.00	8778.688	1141.492
MC11	138.81	1.4	42.42	0.675	0.738	1.03	9986.572	1207.883
MC12	150.81	1.4	40.56	0.650	0.76	1.06	11260.032	1273.460
MC13	162.81	1.4	38.88	0.628	0.778	1.09	12595.053	1335.021
MC14	174.81	1.4	37.37	0.607	0.795	1.11	13990.033	1394.980
MC15	186.81	1.4	36.01	0.588	0.809	1.13	15442.700	1452.667
MC16	198.81	1.4	34.76	0.570	0.822	1.15	16950.919	1508.219
MC17	210.81	1.4	33.62	0.554	0.833	1.17	18516.623	1565.704

b. Bentang Tepi

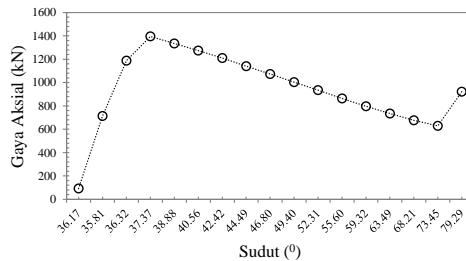
ID Kabel	λ	e	α	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$\cos \alpha \times e$	Gaya Kabel	P_i
SC17	192 m	1.4 m	36.17	0.590	0.807	1.13	15798.836	92.058
SC16	191 m	1.4 m	35.81	0.585	0.811	1.14	15890.894	714.435
SC15	185 m	1.4 m	36.32	0.592	0.806	1.13	15176.459	1187.754
SC14	175 m	1.4 m	37.37	0.607	0.795	1.11	13988.705	1395.058
SC13	163 m	1.4 m	38.88	0.628	0.778	1.09	12593.647	1335.146
SC12	151 m	1.4 m	40.56	0.650	0.76	1.06	11258.501	1273.493
SC11	139 m	1.4 m	42.42	0.675	0.738	1.03	9985.008	1209.949
SC10	127 m	1.4 m	44.49	0.701	0.713	1.00	8775.059	1140.179
SC9	115 m	1.4 m	46.80	0.729	0.684	0.96	7634.880	1073.118
SC8	103 m	1.4 m	49.40	0.759	0.651	0.91	6561.762	1003.687
SC7	90.8 m	1.4 m	52.31	0.791	0.611	0.86	5558.075	935.416
SC6	78.8 m	1.4 m	55.60	0.825	0.565	0.79	4622.659	864.267
SC5	66.8 m	1.4 m	59.32	0.860	0.51	0.71	3758.392	797.168
SC4	54.8 m	1.4 m	63.49	0.895	0.446	0.62	2961.225	734.023
SC3	42.8 m	1.4 m	68.21	0.929	0.371	0.52	2227.202	676.207
SC2	30.8 m	1.4 m	73.45	0.959	0.285	0.40	1550.995	628.742
SC1	18.8 m	1.4 m	79.29	0.983	0.186	0.26	922.253	922.253

4. Grafik Perbandingan Gaya Kabel

Variasi Gaya Kabel Bentang Tengah

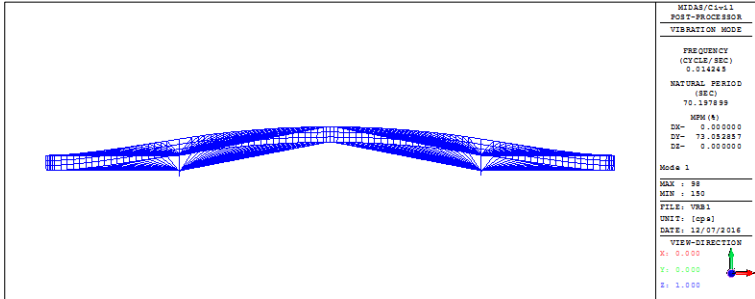


Variasi Gaya Kabel Bentang Tepi

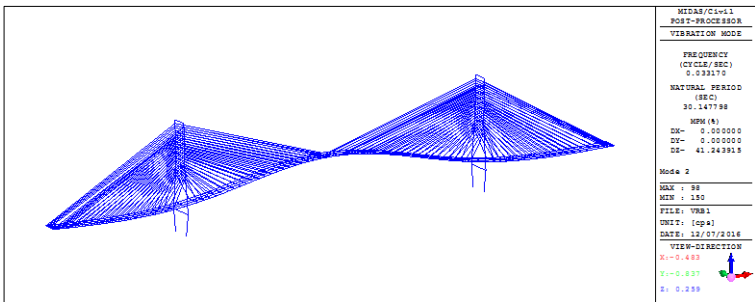


Lampiran 4: Mode Shape setiap Variabel

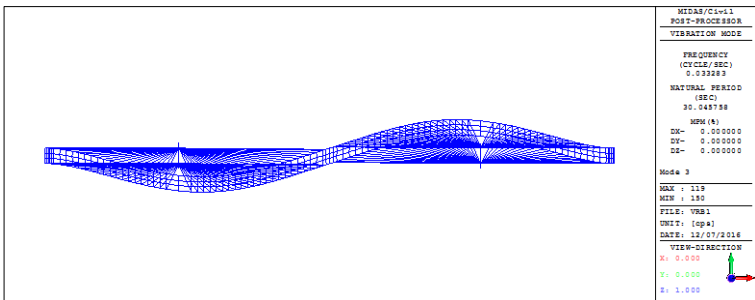
A. VRB1



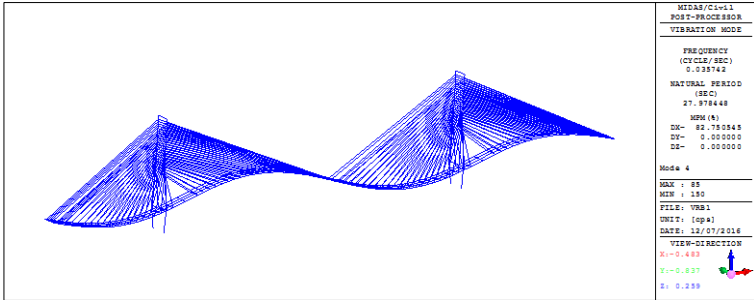
a) Mode 1 ($f=0,014$)



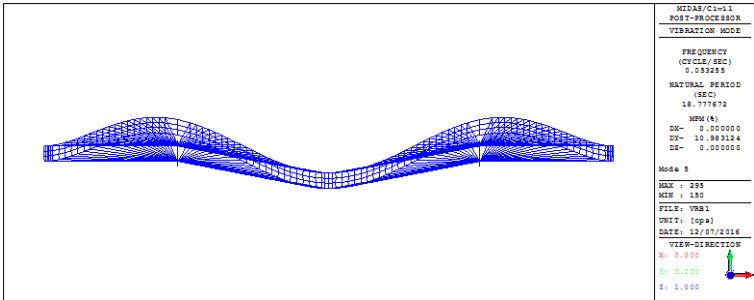
b) Mode 2 ($f=0,033$)



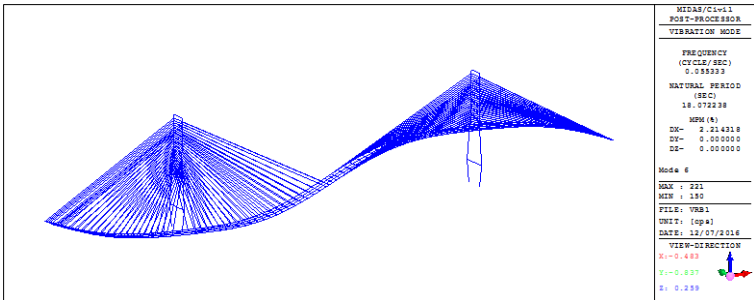
c) Mode 3 ($f=0,033$)



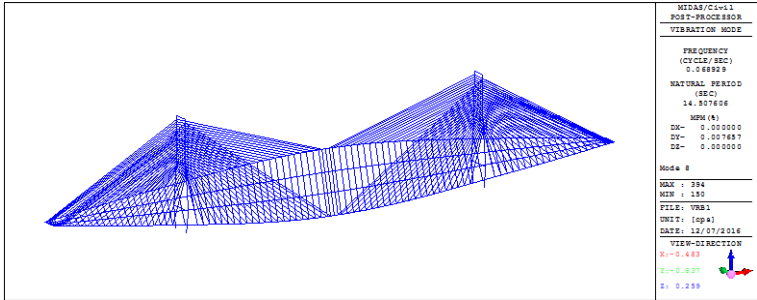
d) Mode 4 ($f=0,036$)



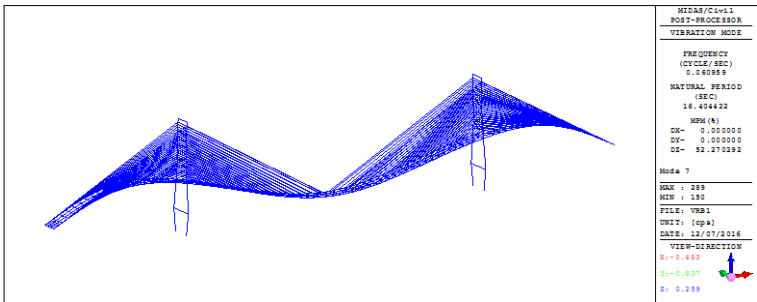
e) Mode 5 ($f=0,053$)



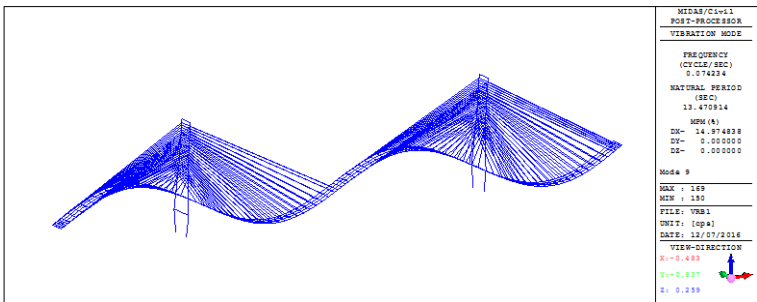
f) Mode 6 ($f=0,055$)



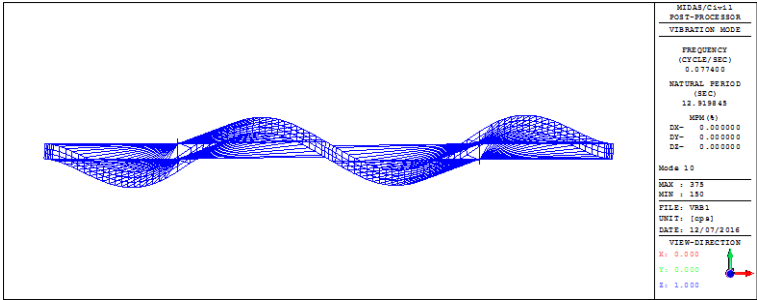
g) Mode 7 ($f=0,0609$)



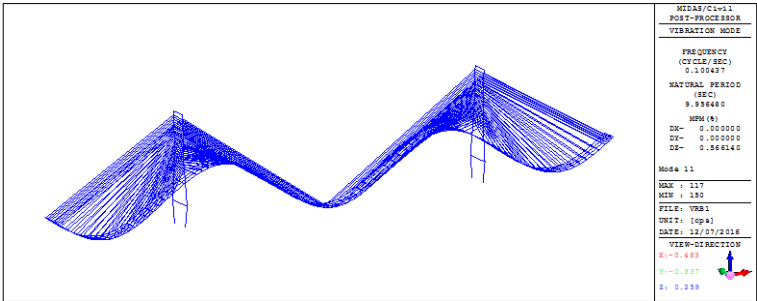
h) Mode 8 ($f=0,0689$)



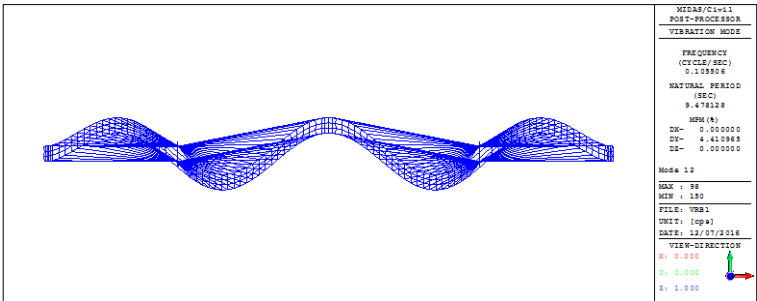
i) Mode 9 ($f=0,0742$)



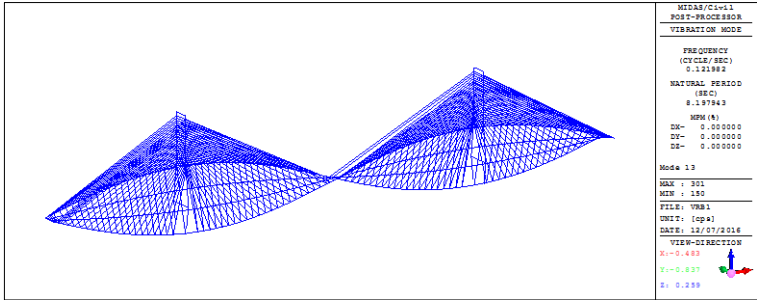
j) Mode 10 ($f=0,0774$)



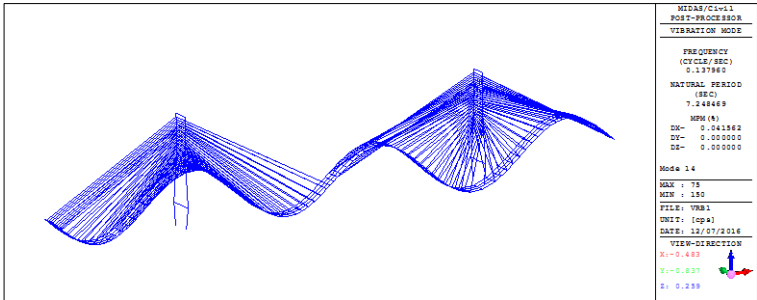
k) Mode 11 ($f=0,1004$)



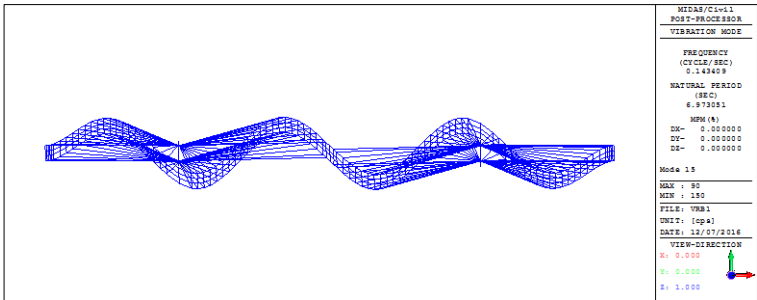
l) Mode 12 ($f=0,1055$)



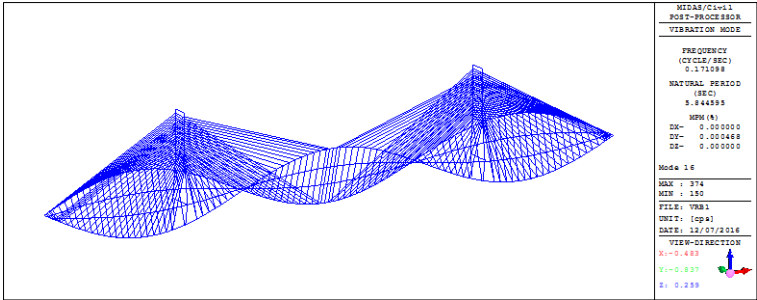
m) Mode 13 ($f=0,122$)



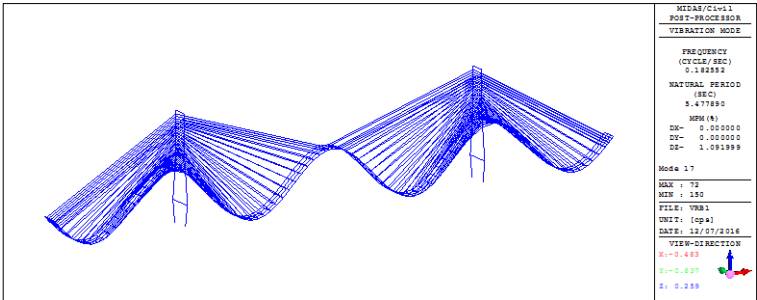
n) Mode 14 ($f=0,138$)



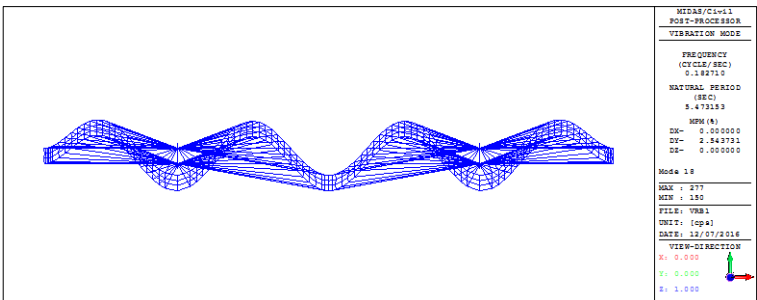
o) Mode 15 ($f=0,1434$)



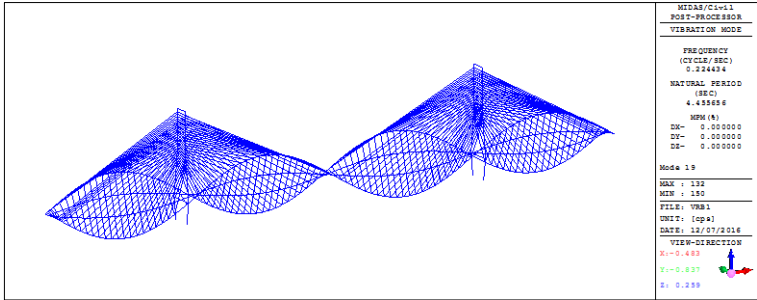
p) Mode 16 ($f=0,172$)



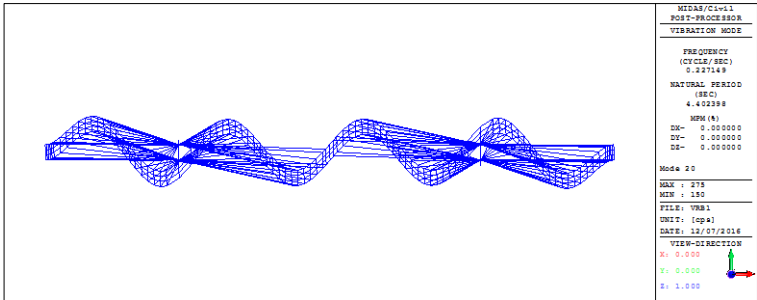
q) Mode 17 ($f=0,183$)



r) Mode 18 ($f=0,183$)

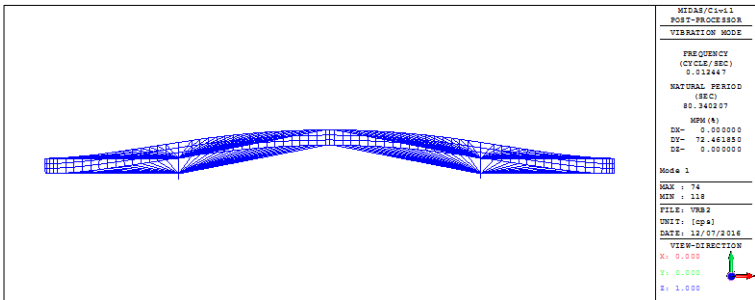


s) Mode 19 ($f=0,224$)

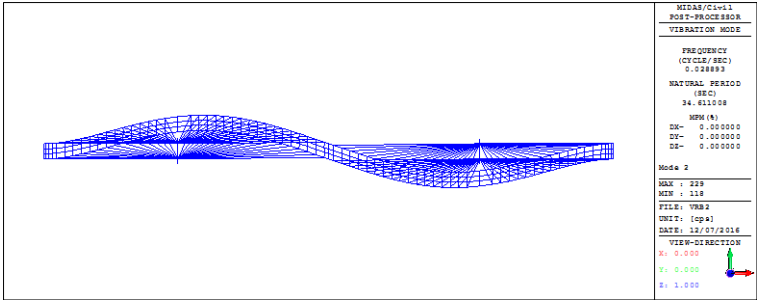


t) Mode 20 ($f=0,227$)

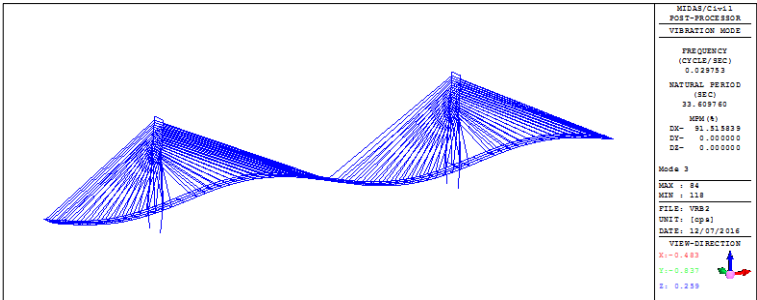
B. VRB2



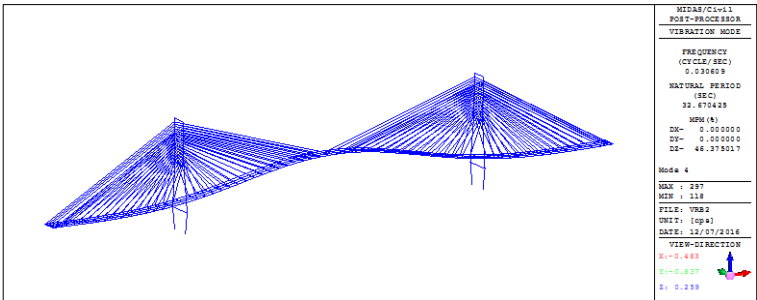
a) Mode 1 ($f=0,012$)



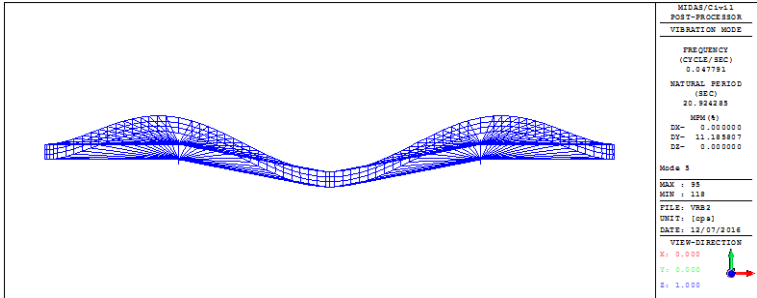
b) Mode 2 ($f=0,0288$)



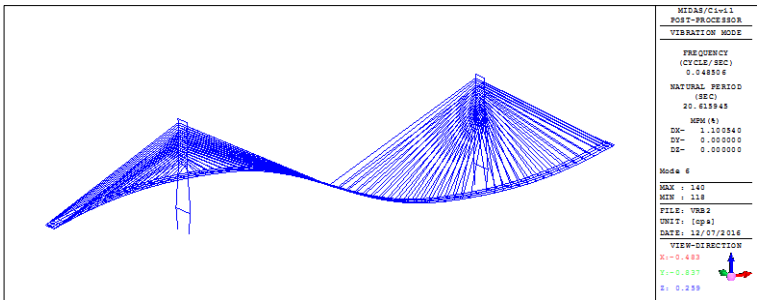
c) Mode 3 ($f=0,0297$)



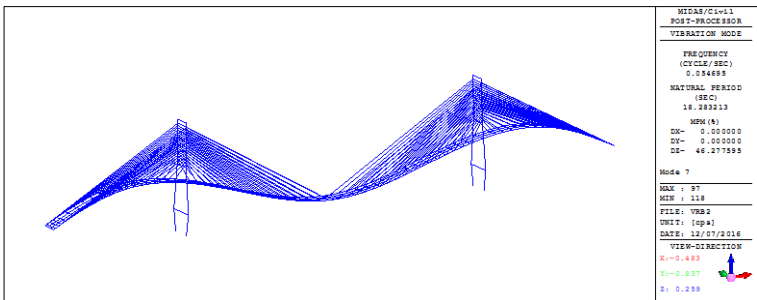
d) Mode 4 ($f=0,0306$)



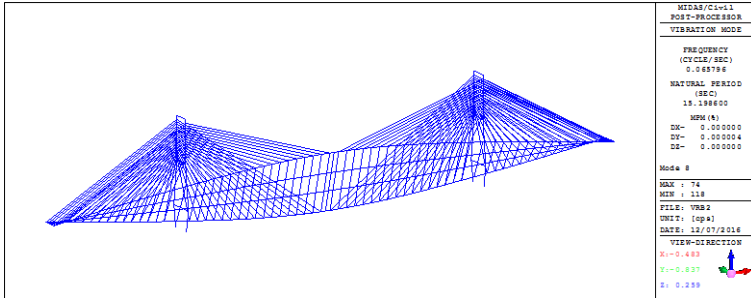
e) Mode 5 ($f=0,0478$)



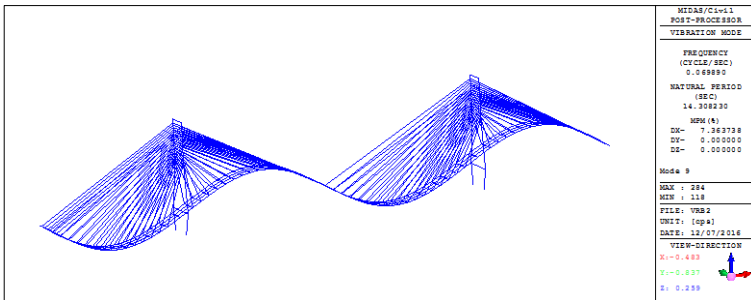
f) Mode 6 ($f=0,0485$)



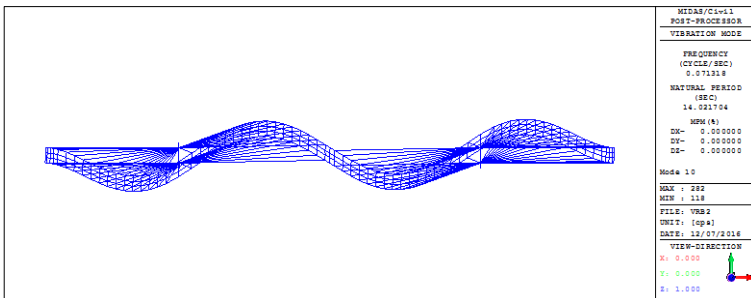
g) Mode 7 ($f=0,0547$)



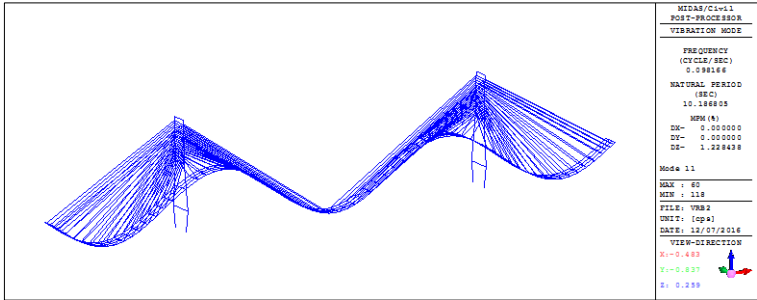
h) Mode 8 ($f=0,0658$)



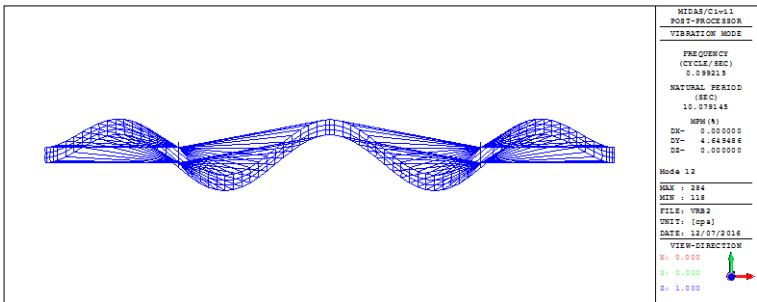
i) Mode 9 ($f=0,07$)



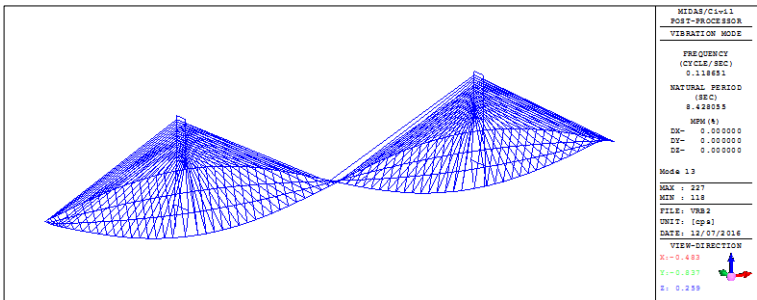
j) Mode 10 ($f=0,0713$)



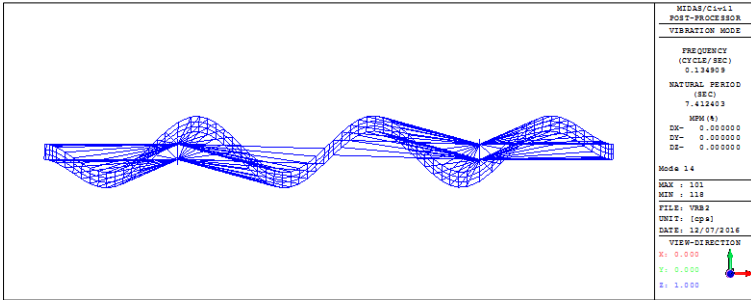
k) Mode 11 ($f=0,0982$)



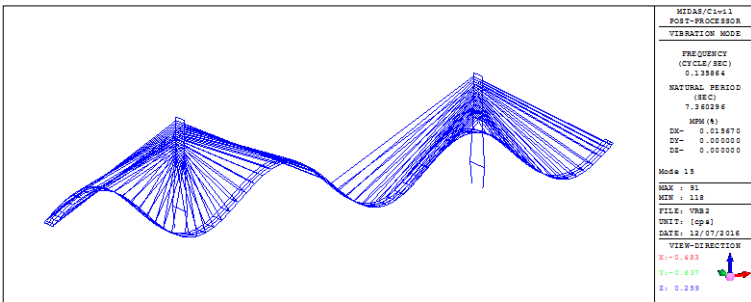
l) Mode 12 ($f=0,0992$)



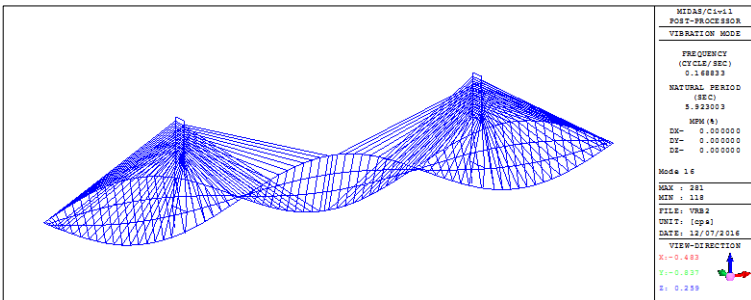
m) Mode 13 ($f=0,119$)



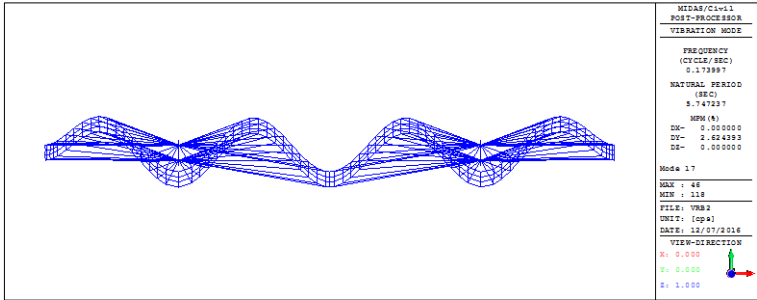
n) Mode 14 ($f=0,135$)



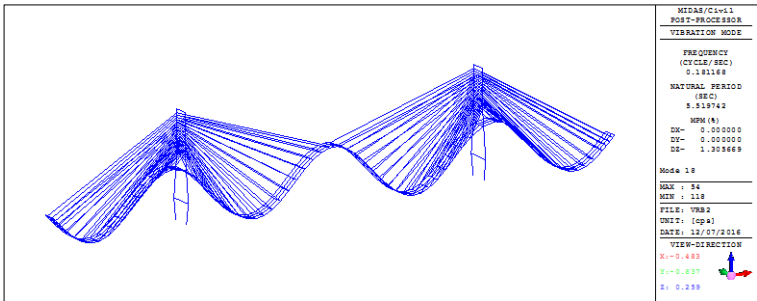
o) Mode 15 ($f=0,136$)



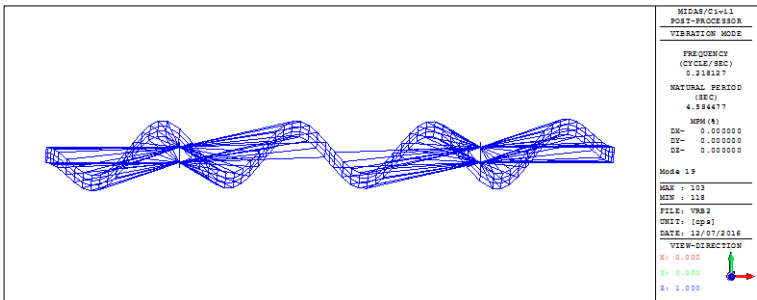
p) Mode 16 ($f=0,149$)



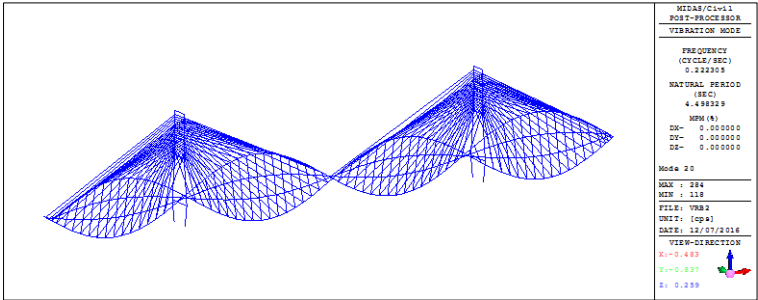
q) Mode 17 ($f=0,174$)



r) Mode 18 ($f=0,1811$)

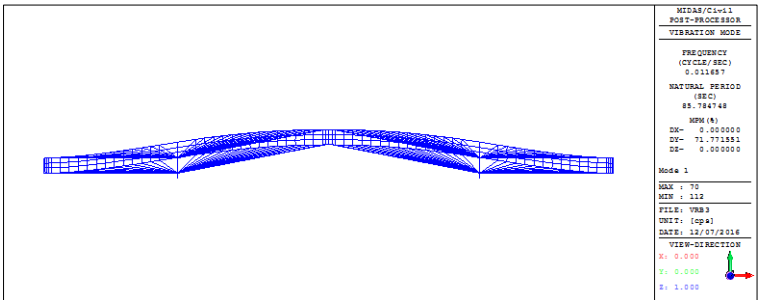


s) Mode 19 ($f=0,218$)

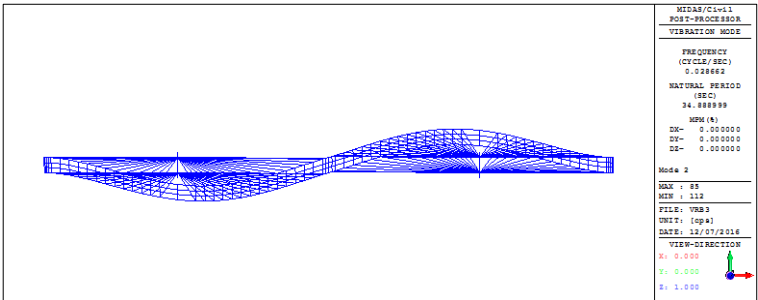


t) Mode 20 ($f=0,222$)

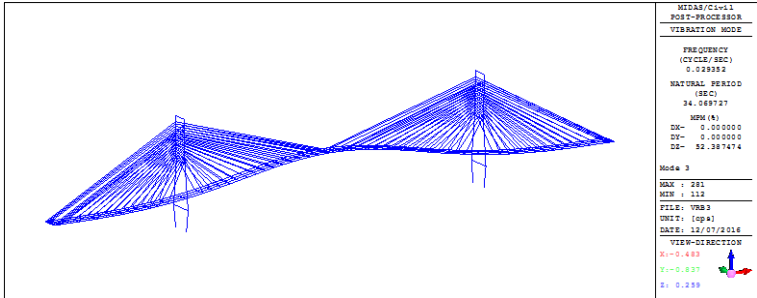
C. VRB3



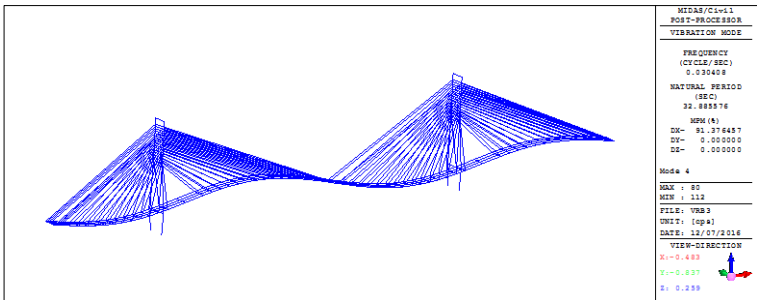
a) Mode 1 ($f=0,0117$)



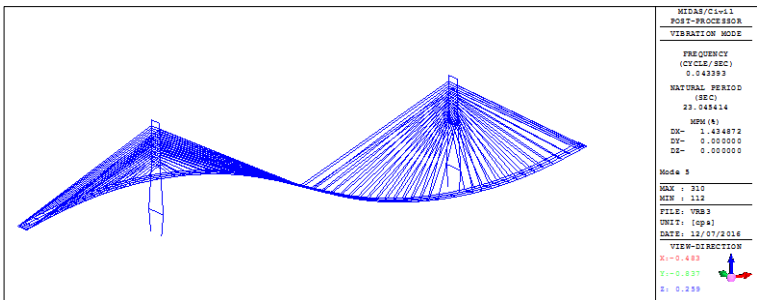
b) Mode 2 ($f=0,0287$)



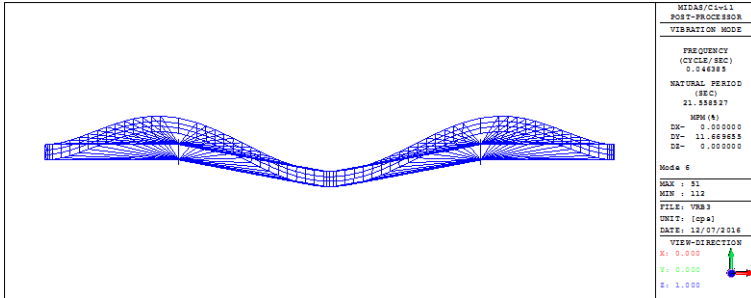
c) Mode 3 ($f=0,0293$)



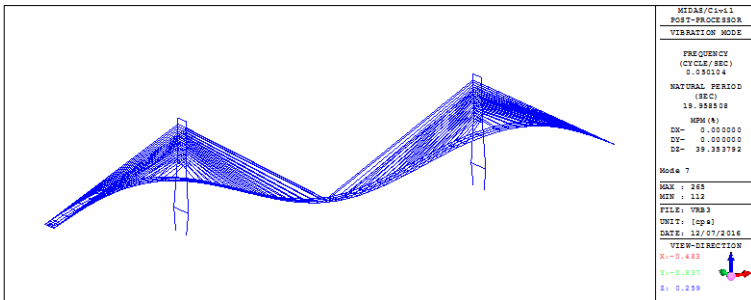
d) Mode 4 ($f=0,0304$)



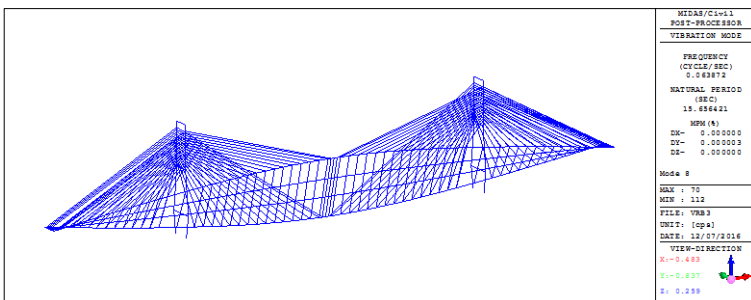
e) Mode 5 ($f=0,0434$)



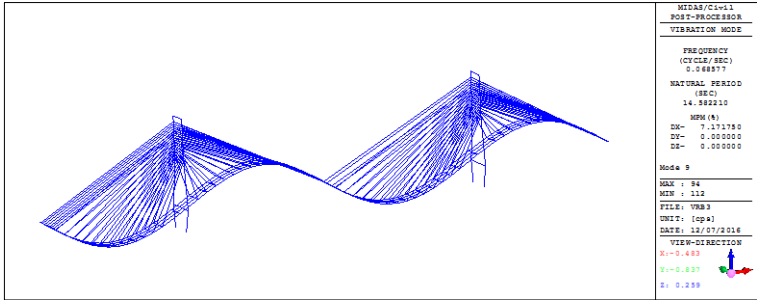
f) Mode 6 ($f=0,0464$)



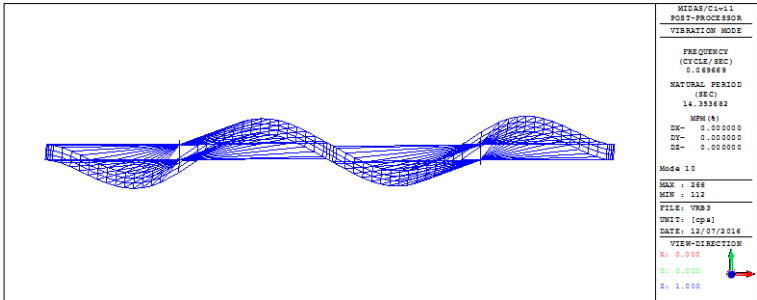
g) Mode 7 ($f=0,0501$)



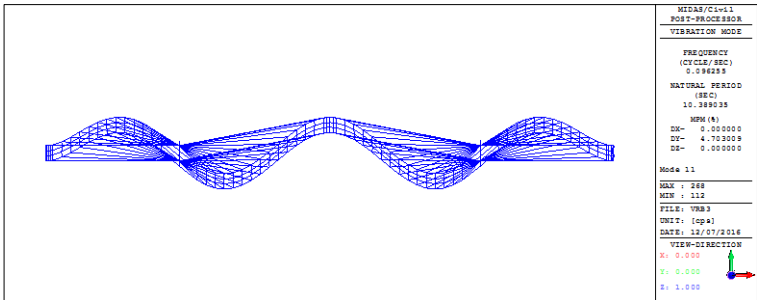
h) Mode 8 ($f=0,0639$)



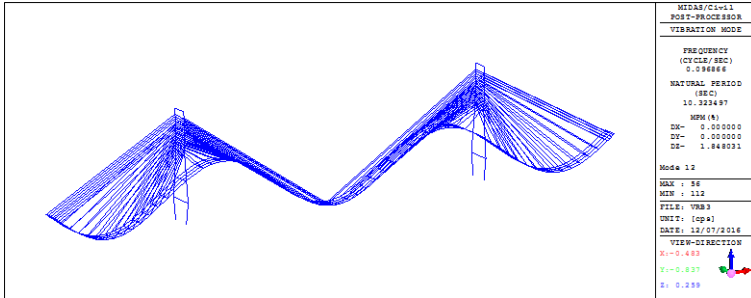
i) Mode 9 ($f=0,0697$)



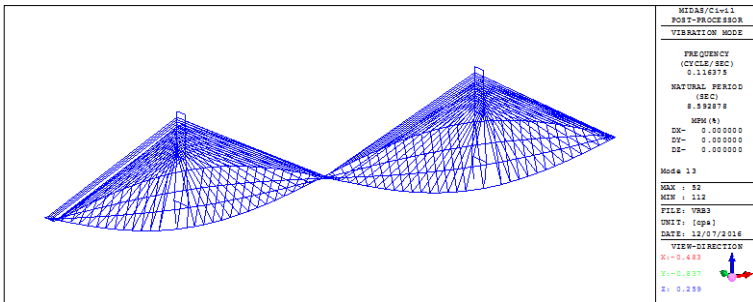
j) Mode 10 ($f=0,0697$)



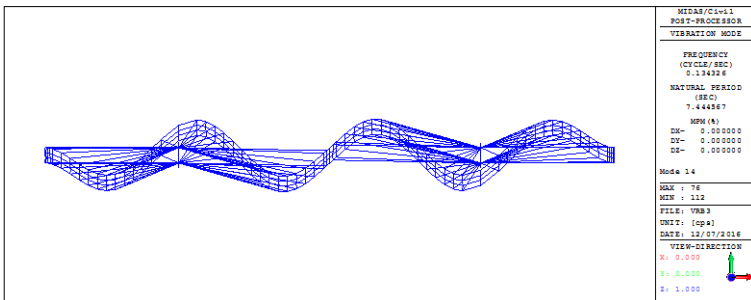
k) Mode 11 ($f=0,0963$)



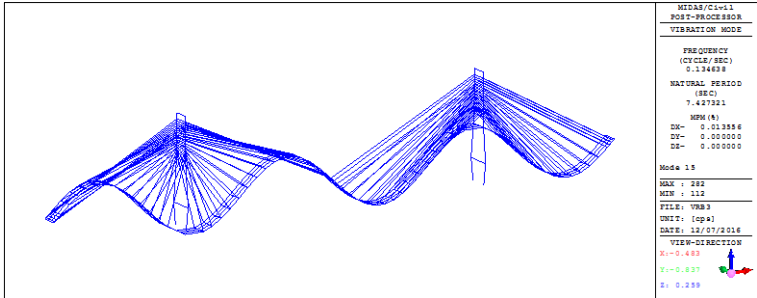
l) Mode 12 ($f=0,0968$)



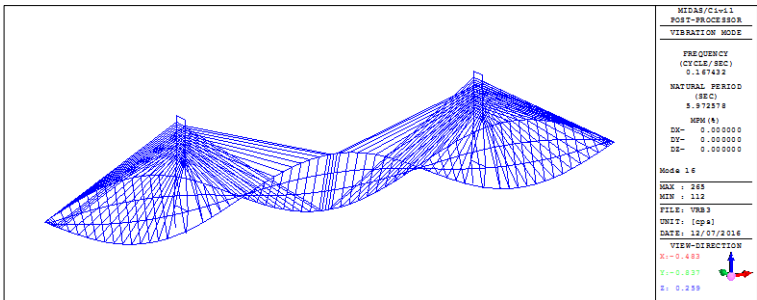
m) Mode 13 ($f=0,1164$)



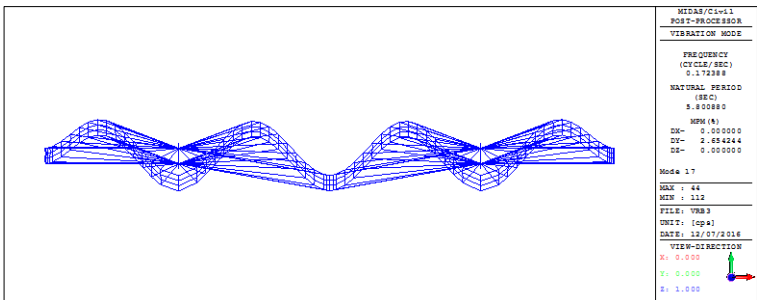
n) Mode 14 ($f=0,1343$)



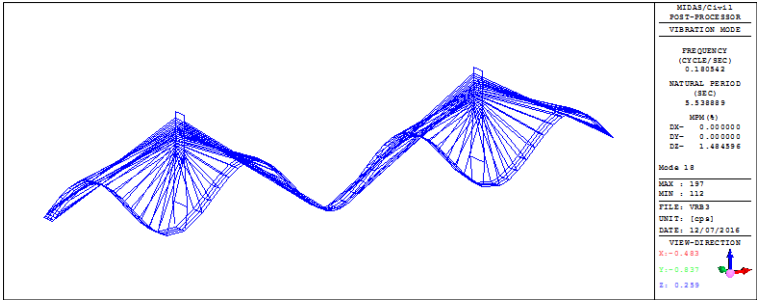
o) Mode 15 ($f=0,1346$)



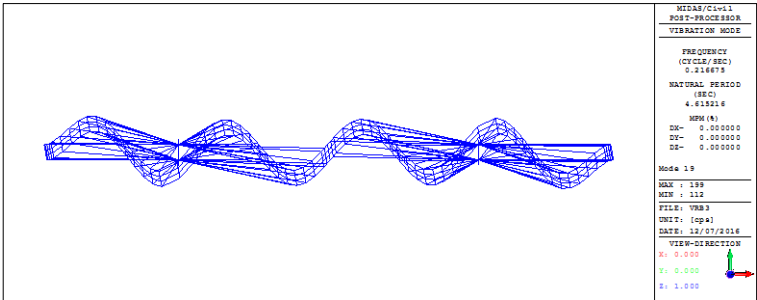
p) Mode 16 ($f=0,1674$)



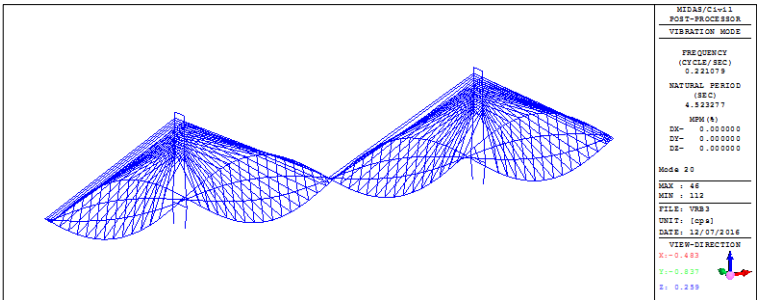
q) Mode 17 ($f=0,1724$)



r) Mode 18 ($f=0,18705$)

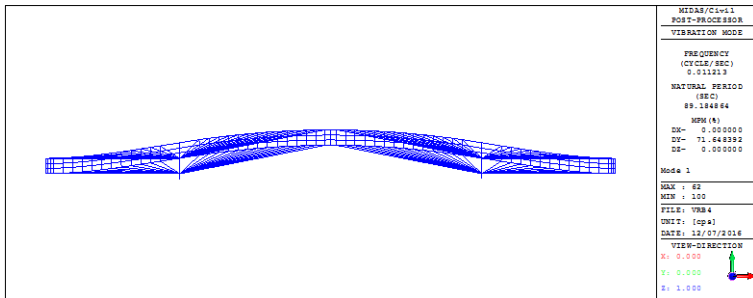


s) Mode 19 ($f=0,2167$)

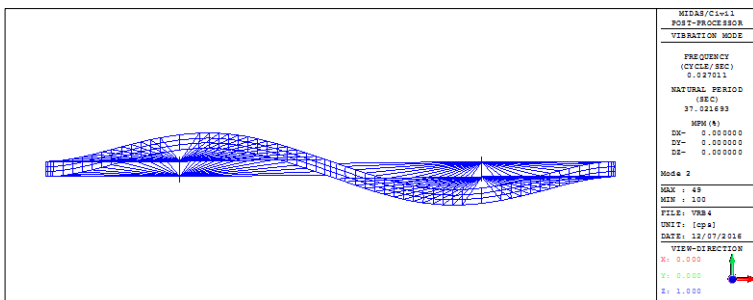


t) Mode 20 ($f=0,2211$)

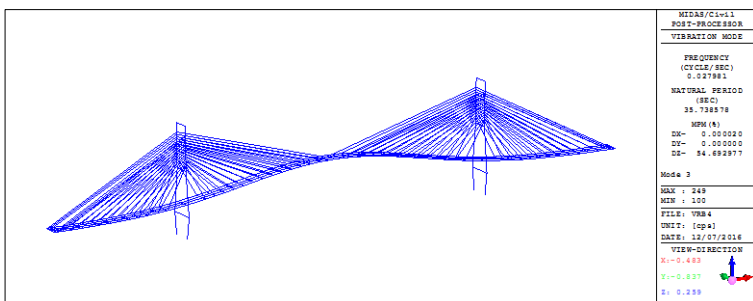
D. VRB4



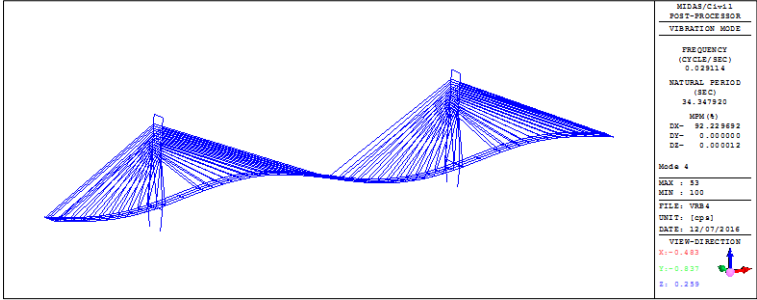
a) Mode 1 ($f=0,0112$)



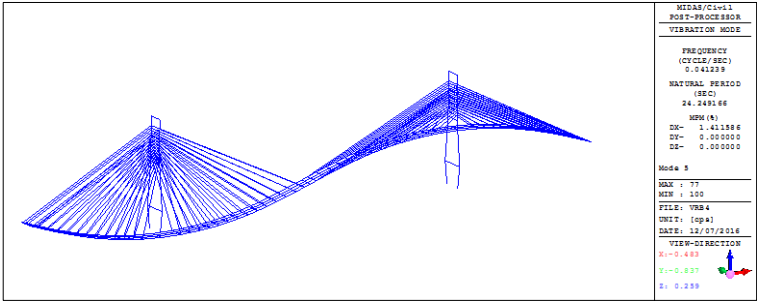
b) Mode 2 ($f=0,027$)



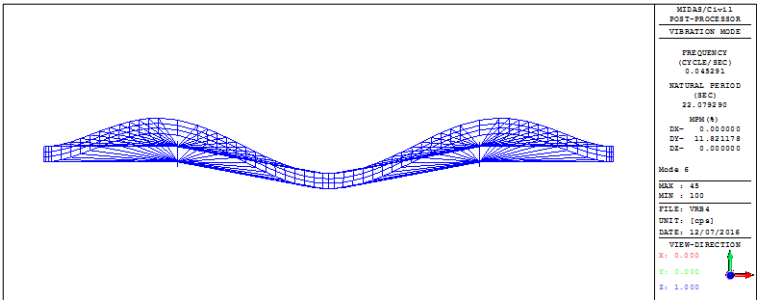
c) Mode 3 ($f=0,028$)



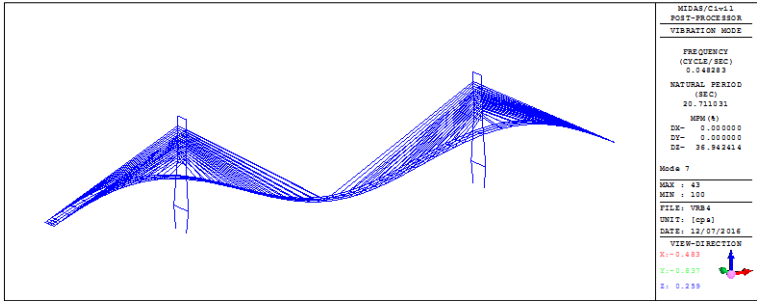
d) Mode 4 ($f=0,0291$)



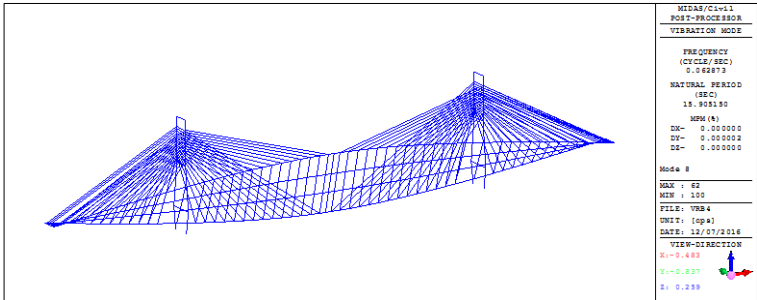
e) Mode 5 ($f=0,041$)



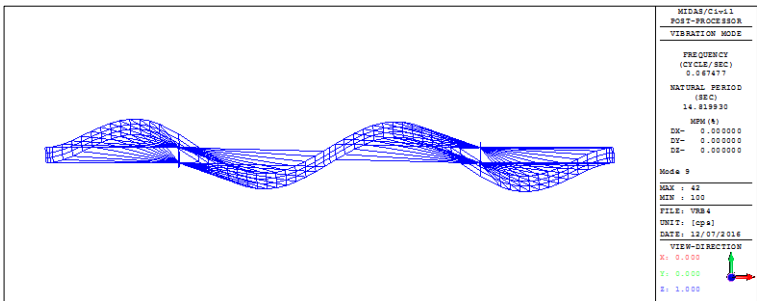
f) Mode 6 ($f=0,0453$)



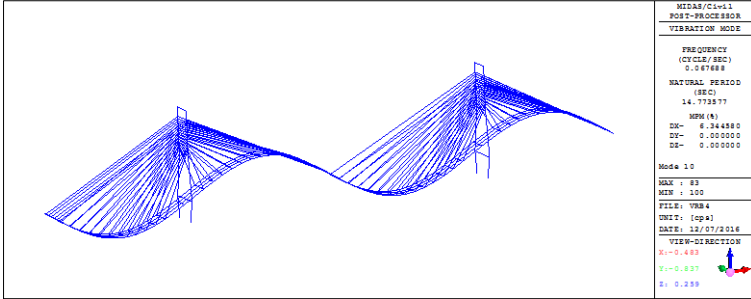
g) Mode 7 ($f=0,0483$)



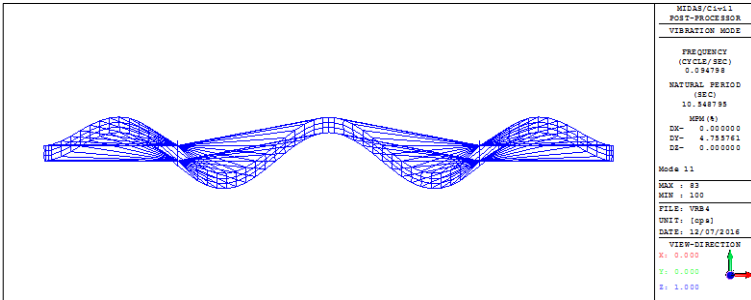
h) Mode 8 ($f=0,0629$)



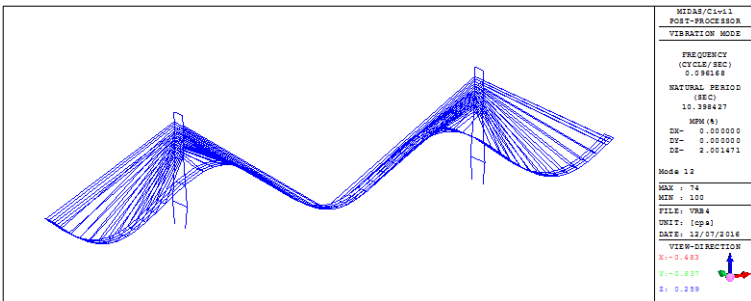
i) Mode 9 ($f=0,0677$)



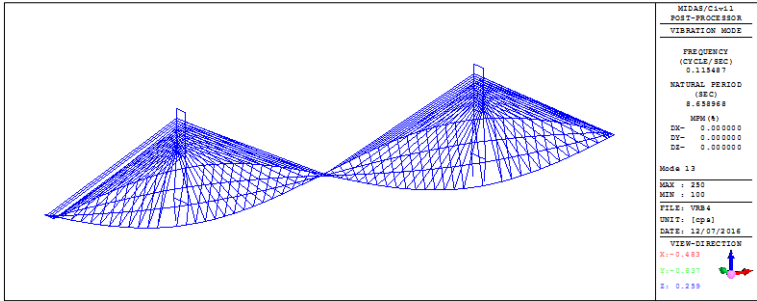
j) Mode 10 ($f=0,0677$)



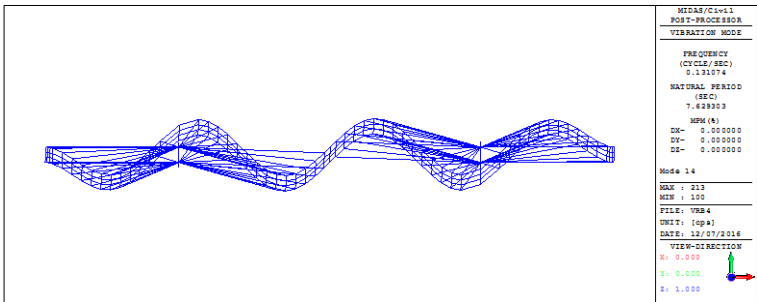
k) Mode 11 ($f=0,095$)



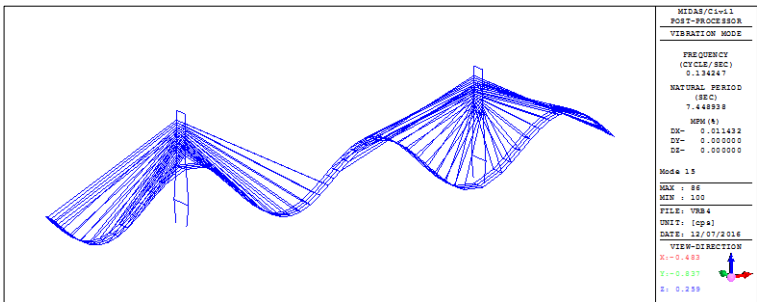
l) Mode 12 ($f=0,0961$)



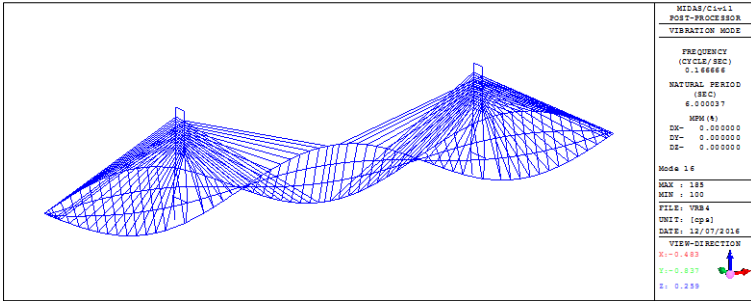
m) Mode 13 ($f=0,116$)



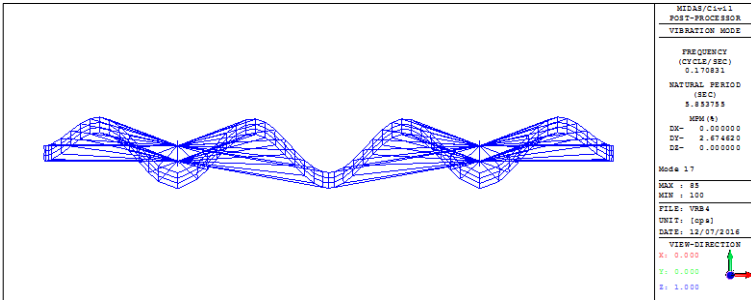
n) Mode 14 ($f=0,131$)



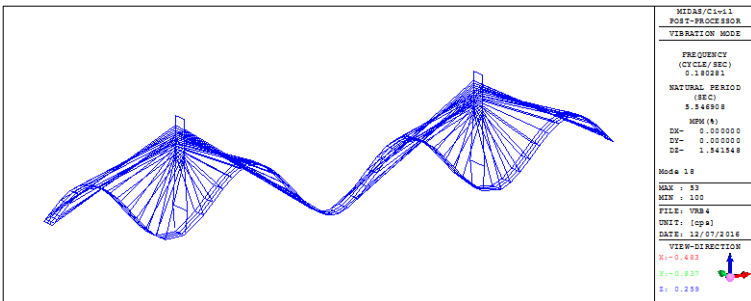
o) Mode 15 ($f=0,135$)



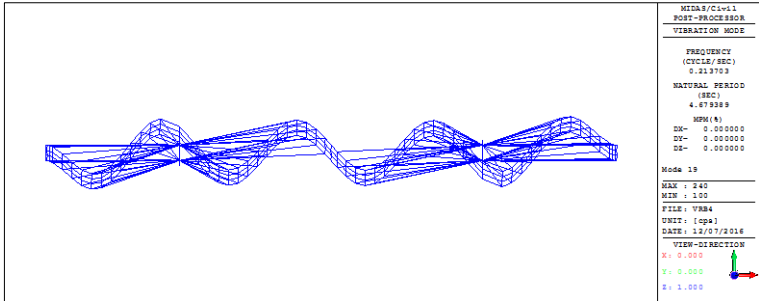
p) Mode 16 ($f=0,167$)



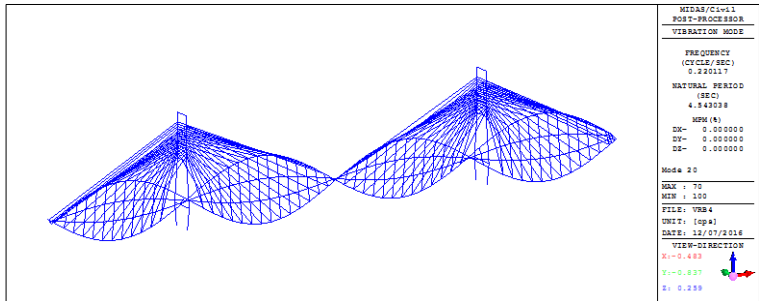
q) Mode 17 ($f=0,171$)



r) Mode 18 ($f=0,18$)

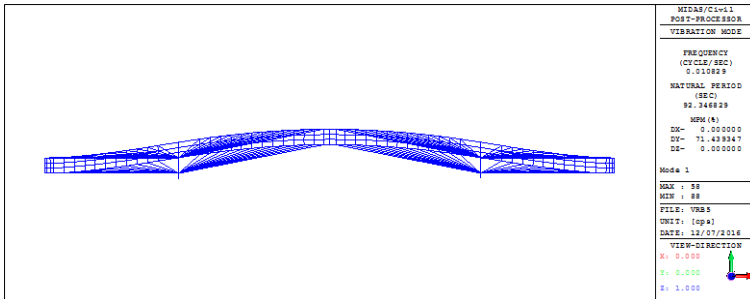


s) Mode 19 ($f=0,214$)

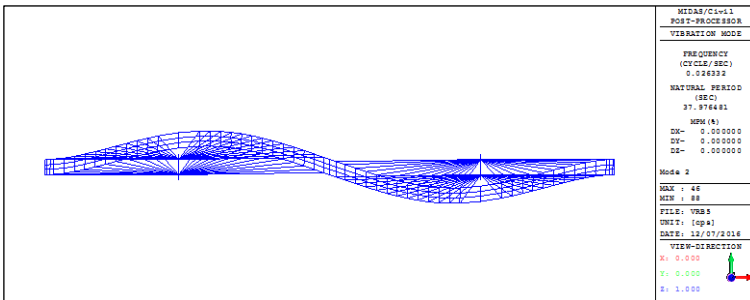


t) Mode 20 ($f=0,220$)

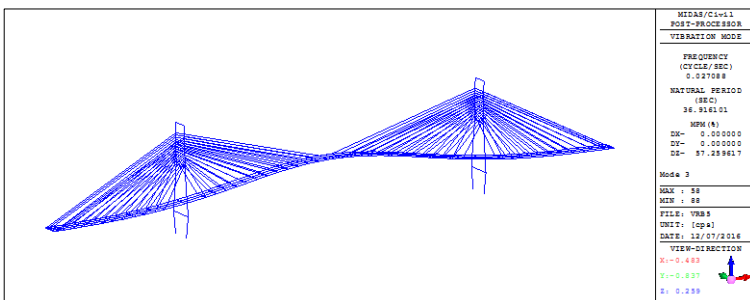
E) VRB5



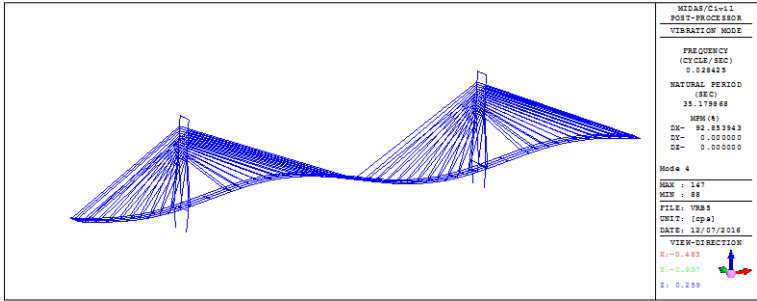
a) Mode 1 ($f=0,011$)



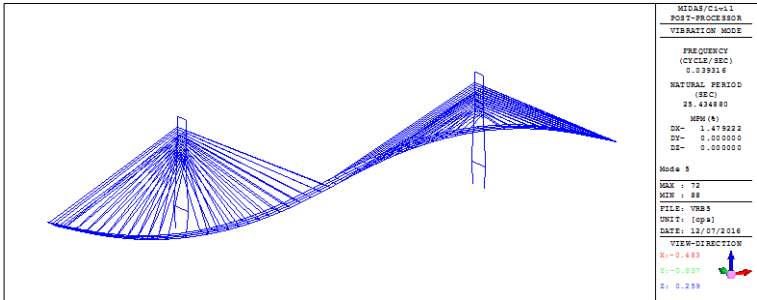
b) Mode 2 ($f=0,026$)



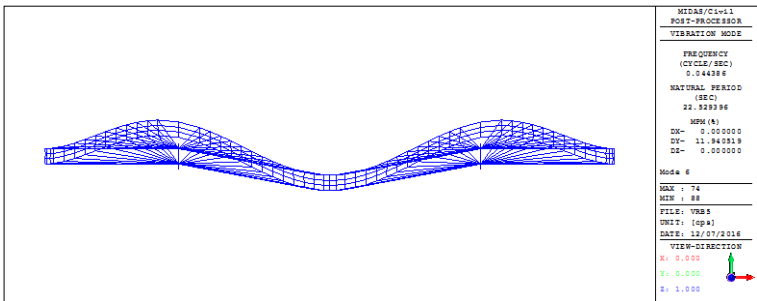
c) Mode 3 ($f=0,0271$)



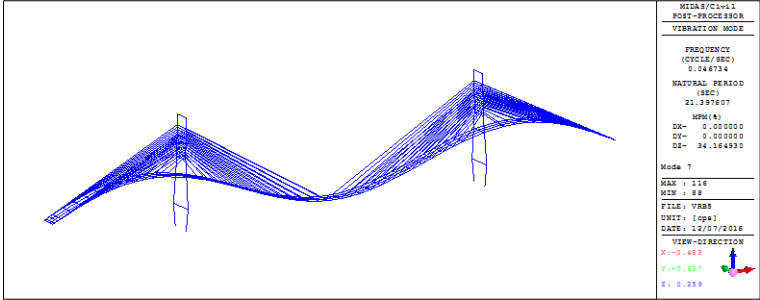
d) Mode 4 ($f=0,028$)



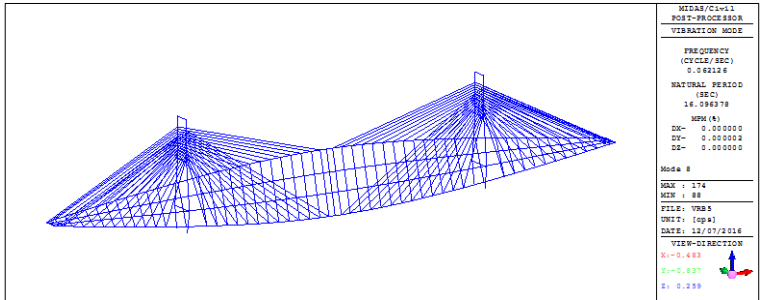
e) Mode 5 ($f=0,0393$)



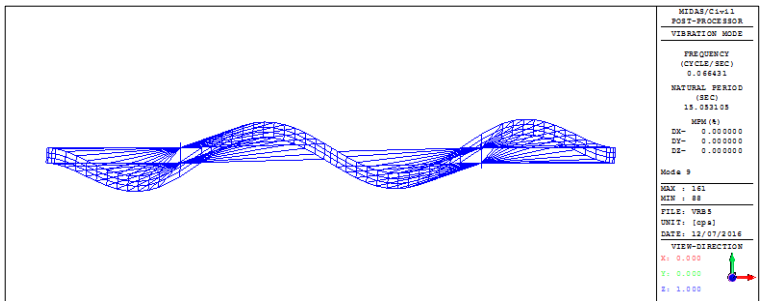
f) Mode 6 ($f=0,044$)



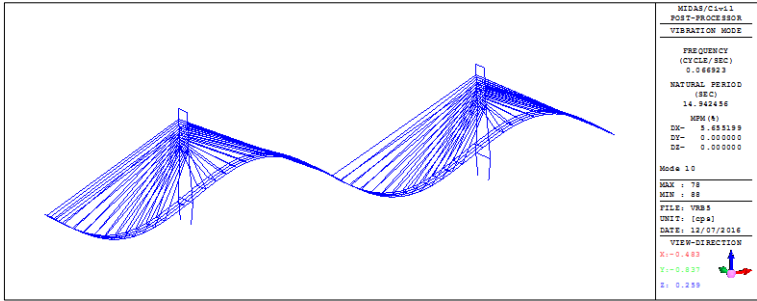
g) Mode 7 ($f=0,0467$)



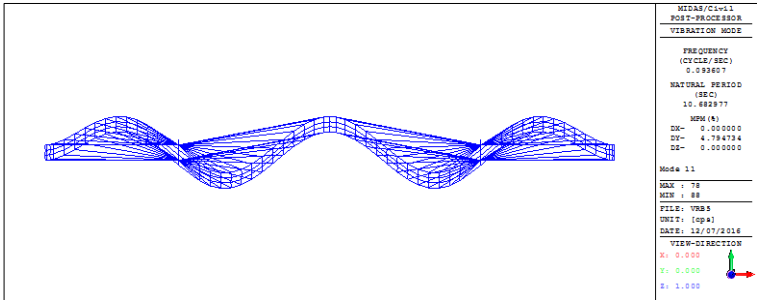
h) Mode 8 ($f=0,0621$)



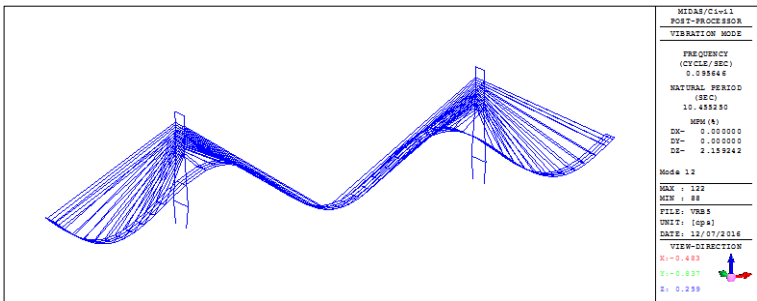
i) Mode 9 ($f=0,0664$)



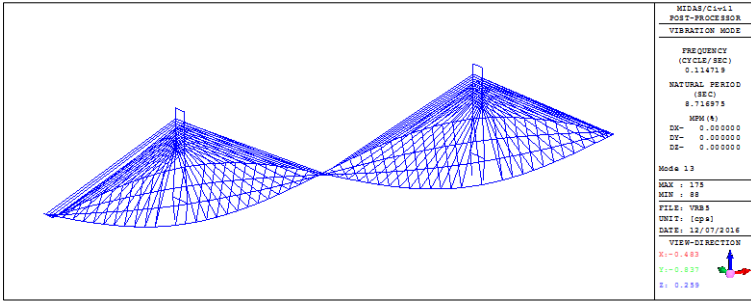
j) Mode 10 ($f=0,0669$)



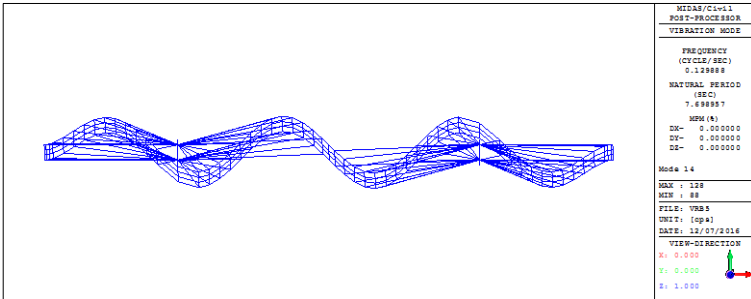
k) Mode 11 ($f=0,0936$)



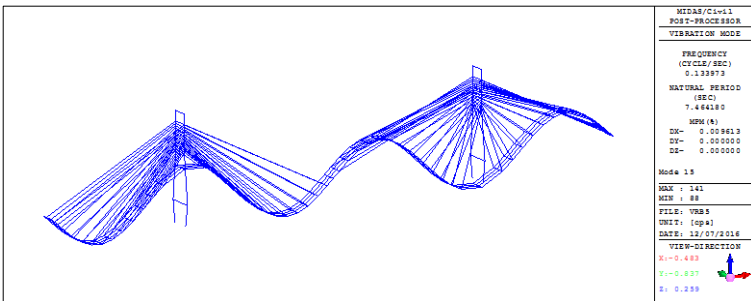
l) Mode 12 ($f=0,0956$)



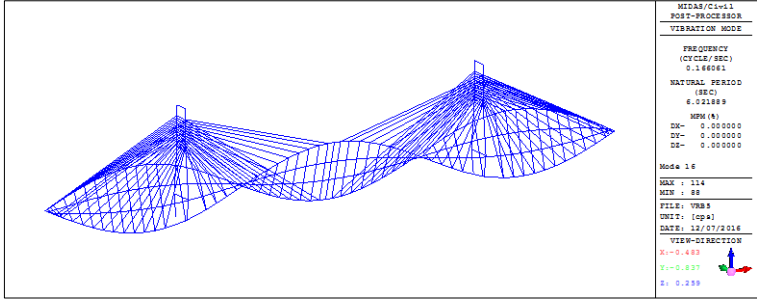
m) Mode 13 ($f=0,1147$)



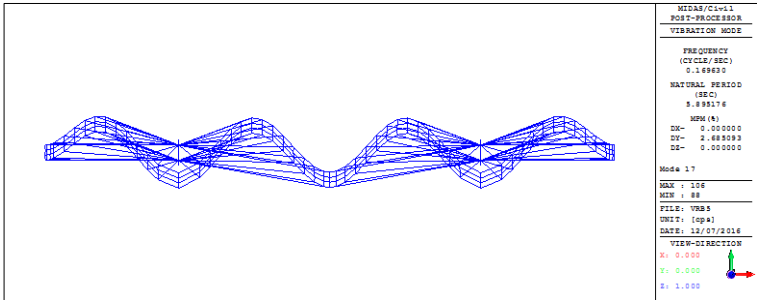
n) Mode 14 ($f=0,1230$)



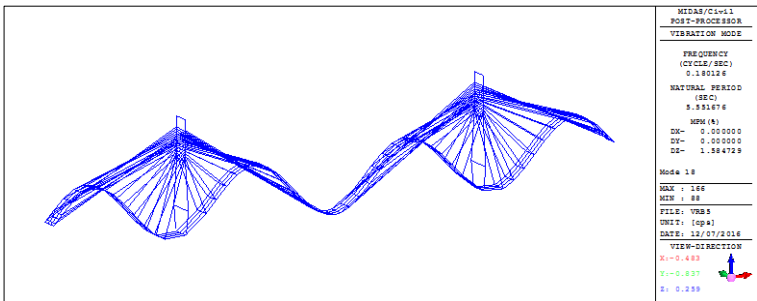
o) Mode 15 ($f=0,134$)



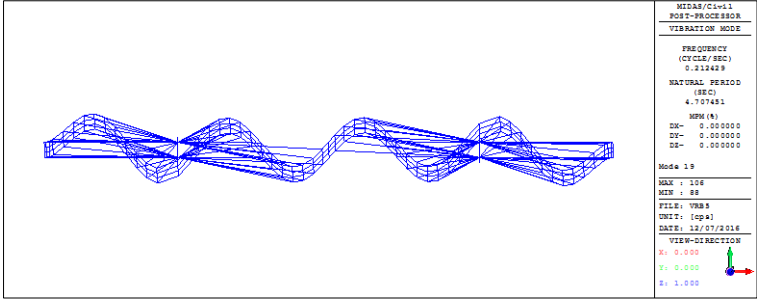
p) Mode 16 ($f=0,166$)



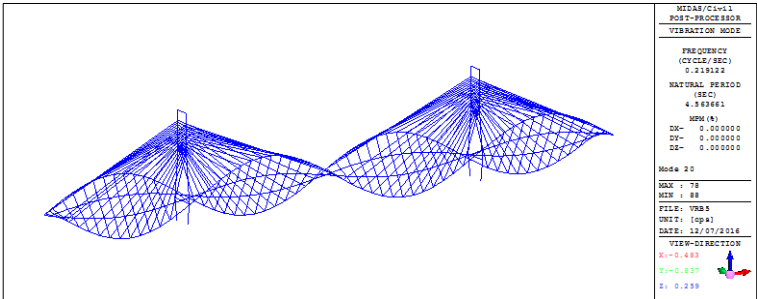
q) Mode 17 ($f=0,170$)



r) Mode 18 ($f=0,180$)



s) Mode 19 ($f=0,212$)



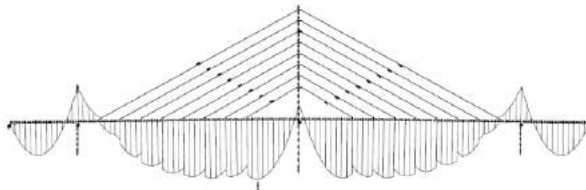
t) Mode 20 ($f=0,219$)

Lampiran 5 : Contoh Analisis Struktur Jembatan *Cable-Stayed*

A. Umum

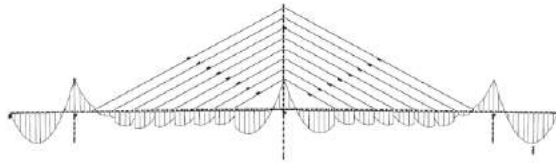
Analisis struktur jembatan *cable-stayed* banyak memiliki metode perhitungan. Metode perhitungan yang umumnya dikenal misalnya dengan metode optimasi, *zero displacement method*, dan metode keseimbangan gaya atau *force equilibrium method*. Masing-masing metode tersebut memiliki keunggulan dan kelemahan dalam hal asumsi-asumsi dasar perhitungan. Untuk perangkat lunak *MIDAS Civil* sendiri menggunakan metode optimasi sebagai solusi dalam perhitungan gaya awal kabel (*initial cable force*), distribusi momen lentur, dan deformasi vertikal maupun horizontal struktur.

Dalam perangkat lunak *MIDAS Civil*, metode optimasi untuk masing-masing variable (gaya kabel, momen lentur, deformasi) dikenal dengan nama *Unknown Load Factor*. Sedangkan untuk perangkat lunak semacamnya juga dikenal seperti dalam *SAP2000* dengan *Load Optimizer*, *RM Bridge V8i* dengan *AddCon-Method*, sedangkan pada *LARSA 4D* pengguna (*user*) harus mendefinisikan *constraints* atau batasan-batasan pada variabel yang ditinjau. Prinsip dasar pada semua perangkat lunak yang disebutkan diatas adalah sama, namun pengguna yang akan menentukan alur kerjanya. Dibawah ini disajikan gambar mengenai perbandingan momen lentur dengan dan tanpa *constraint*.



a. Momen Lentur tanpa batasan distribusi momen

Gambar 1. Perbandingan momen lentur tanpa dan dengan batasan disistribusi momen (Bruer, Pircher, & Bokan, 1999)



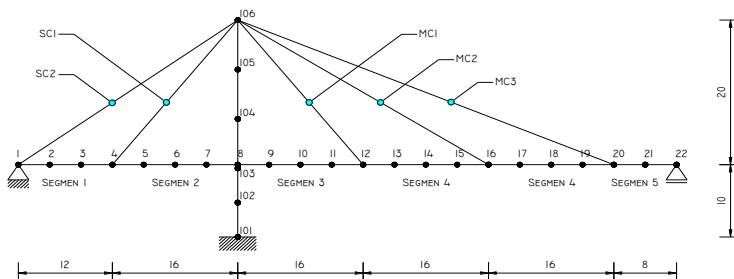
b. Momen lentur dengan batasan distribusi momen

Gambar 1. Perbandingan momen lentur tanpa dan dengan batasan disitribusi momen (Bruer, Pircher, & Bokan, 1999) – lanjutan

B. Deskripsi Model Jembatan

Sistem struktur jembatan *cable-stayed* yang akan digunakan sebagai contoh analisis disajikan pada Gambar 2 dibawah ini. Model jembatan tersebut dipilih dengan pertimbangan bahwa model strukturalnya sederhana dan cukup representatif untuk melihat bagaimana kinerja dari sistem strukturalnya. Jembatan model ini adalah adopsi dari karya Svenja Mueller-Haagen (2005) dalam tesisnya. Adopsi tidak secara signifikan disamakan, atau dengan kata lain bukan adopsi identik, namun beberapa parameter yang digunakan tetap sama seperti yang disajikan pada Tabel 1 sampai 3.

Jembatan untuk contoh analisis ini terdapat 33 panel pada gelagar yang masing-masing panjang adalah 4 meter, sedangkan untuk *pylon* dibagi dengan lima elemen yang masing-masing elemennya panjangnya 2x4,75 m dan 3x6,83 m terhitung dari bawah *pylon*.



Gambar 2. Model jembatan contoh

Sistem perletakan untuk jembatan diatas (Gambar 2) digunakan jenis sendi untuk perletakan ujung bentang samping kiri atau pada nodal 1, untuk nodal 200 digunakan perletakan jenis jepit kaku dan untuk perletakan ujung bentang samping kanan digunakan rol. Hubungan antara gelagar dan *pylon* menggunakan sistem perletakan vertikal kaku, dimana pada nodal 202 memiliki sistem satu *degree of freedom* (DOF) pada arah vertikal. Gelagar jembatan diasumsikan menggunakan gelagar balok T (*T-Beam*).

Tabel 1. Data material model jembatan

Item	Modulus Elastistas (kN/m^2)	Poisson's Rasio	f_{ck} 28 hari (kN/m^2)
Gelagar	$3,3282 \times 10^7$	0,2	35,000
Pylon	$3,3282 \times 10^7$	0,2	35,000
Kabel	$2,1000 \times 10^8$	0,3	-

Tabel 2. Propertis penampang model jembatan

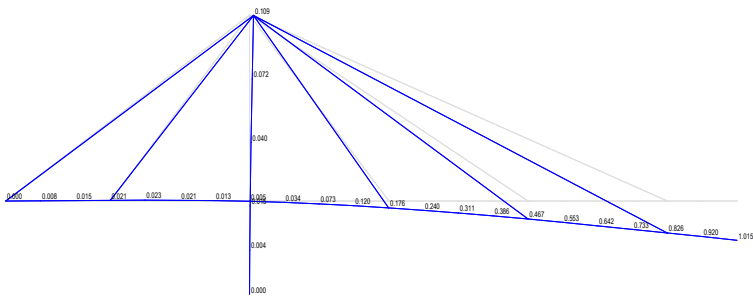
Item	Luas Penampang Melintang (m^2)	Momen Inersia (m^4)	Panjang perimeter (m)
Gelagar	4,35	0,92	25,00
Pylon	1	2,76	10,00
Kabel 1	0,0208	-	-
Kabel 2-5	0,0062	-	-

Tabel 3. Data pembebanan model jembatan

Item	Nilai-Beban
Berat sendiri struktural	25,00 kN/m ³
Beban mati tambahan	10,0 kN/m
<i>Initial cable pretension</i>	1,0 kN (untuk <i>unknown load factor</i>)
<i>Crane Derek</i>	750 kN
Beban per Segmen	Beban vertikal: $A \times 25$ kN/m $\times L_{\text{segmen}}$ Momen eksentris: $A \times 25$ kN/m $\times L_{\text{segmen}}^2 / 2$
<i>Unit support movement</i>	1,0 mm

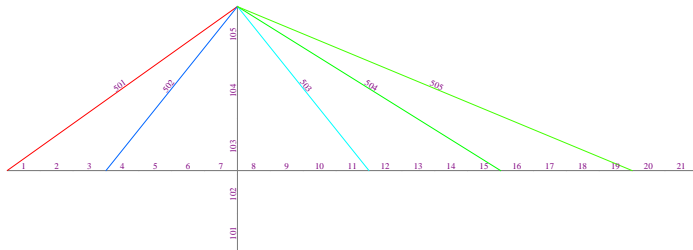
C. Analisis Akhir Tahap Konstruksi (*Final Stage*)

Tahap pertama dalam analisis ini adalah menganalisis jembatan *cable-stayed* pada akhir tahap konstruksi atau *final stage*. Tujuannya adalah untuk mengetahui bagaimana respon struktur ketika akhir tahapan konstruksi. Pada akhir tahapan konstruksi beban-beban yang diperhitungkan berupa beban mati akibat berat sendiri struktur, beban mati tambahan, gaya kabel dalam satu unit *pretension*. Akibat beban ini struktur akan mengalami deformasi dalam arah vertikal (z) pada gelagar dan deformasi dalam arah horizontal (x) pada *pylon*. Gambar 3 memperlihatkan deformasi struktur yang terjadi.

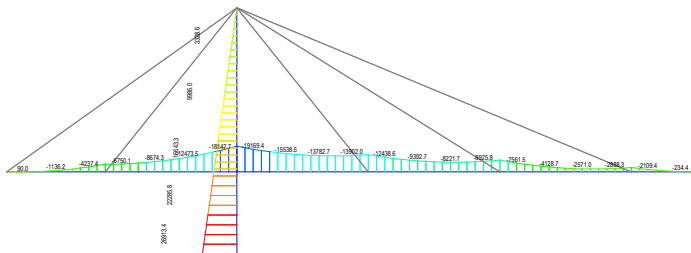


Gambar 3. Deformasi struktur (m)

Deformasi struktur dalam arah vertikal terbesar terjadi pada nodal 22 sebesar -1.015 m. Sedangkan untuk deformasi struktur dalam arah horizontal terbesar terjadi pada nodal 106 (puncak *pylon*) sebesar 0,109 m. Secara keseluruhan pada setiap titik angkat kabel juga mengalami deformasi dalam arah vertikal yang secara berturut-turut dari kabel SC 2 – MC 3 yaitu 0,000 m, 0,021 m, 0,175 m, 0,457 m dan 0,825 m. Untuk gaya kabel dan momen lentur gelagar disajikan pada Gambar 4 dibawah ini.



a. Gaya kabel (unit *pretension*, kN)



b. Momen lentur gelagar (kNm)

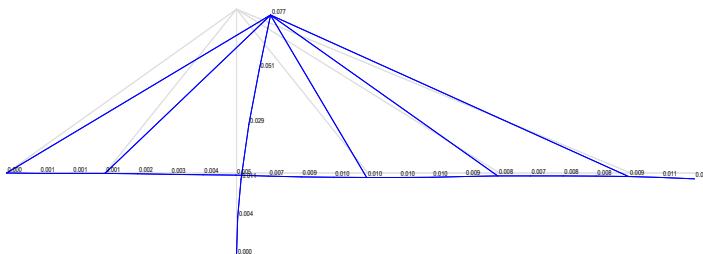
Gambar 4. Gaya kabel dan momen lentur gelagar

Gaya kabel dan momen lentur serta terjadinya deformasi seperti terlihat pada gambar diatas menunjukkan perilaku jembatan *cable-stayed* dalam kondisi pasif, belum ada gaya *pretension* pada kabel. Berdasarkan gambar diatas, momen lentur gelagar maksimum terjadi pada pertemuan antara gelagar dan *pylon* yaitu sebesar -191694,40 kNm dan momen lentur *pylon* maksimum terjadi pada kaki *pylon* sebesar 26913,40 kNm. Kebutuhan gaya *pretension* pada kabel akan diberikan sesuai kebutuhan kabel dalam memikul beban-beban yang terdapat pada gelagar (beban mati tambahan) dan beban mati dari berat sendiri struktur. Dalam penentuan gaya kabel ini digunakan beberapa metode (*unknown load factor*) yang nantinya kemudian dibandingkan yang mana lebih baik

berdasarkan variable tingkat deformasi dan distribusi momen lentur. Adapun metode yang dimaksud dijabarkan sebagai berikut.

a) Metode Batasan Deformasi pada Semua Nodal

Metode yang pertama untuk menentukan kebutuhan gaya kabel adalah dengan memberikan batasan deformasi pada semua nodal atau titik sambung (*joint*) gelagar. Batasan deformasi yang diberikan sebesar 0,01 pada *upper bound* dan -0,01 pada *lower bound* pada nodal 1 – 22. Deformasi dari hasil analisis metode ini disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Deformasi struktur dengan metode batasan deformasi pada semua nodal (m)

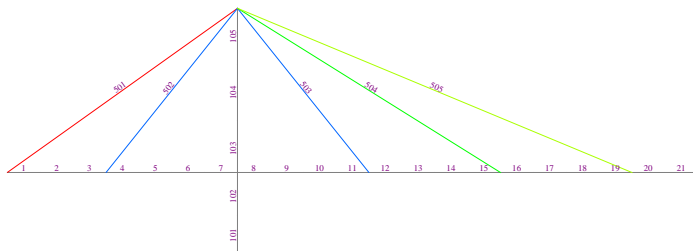
Deformasi pada nodal 22 dalam arah vertikal sebesar -0,014 m yang sebelumnya sebesar -1,015 m dimana perbedaannya sekitar 98,62%. Sedangkan untuk deformasi titik puncak *pylon* (nodal 106) sebesar 0,077 m yang sebelumnya sebesar 0,109 m atau perbedaannya sekitar 29,36%. Perbedaan deformasi pada titik puncak *pylon* tidak begitu signifikan sebab batasan deformasi horizontal tidak diberikan, untuk itu akan dicoba dengan memberikan batasan deformasi juga pada titik puncak *pylon* sebagaimana dijabarkan pada metode kedua.

Gaya kabel yang diperoleh dari metode ini penyebarannya mirip dengan kondisi jembatan *cable-stayed* pasif (lihat gambar 4a). Umumnya pada jembatan *cable-stayed*, gaya kabel meningkat secara linier dari kabel

terdekat *pylon* menuju kabel terjauh dari *pylon*. Berdasarkan hasil analisis dalam metode ini, nilai gaya kabel dapat dilihat Tabel 4 dan secara visual kontur gaya kabel disajikan pada Gambar 6.

Tabel 4. Gaya kabel dengan metode batasan deformasi pada semua nodal

Kabel	SC02 (kN)	SC01 (kN)	MC01 (kN)	MC02 (kN)	MC03 (kN)
Gaya Kabel	8705.79	3455.87	2781.51	3928.07	5350.48



Gambar 6. Gaya kabel dengan metode batasan deformasi pada semua nodal

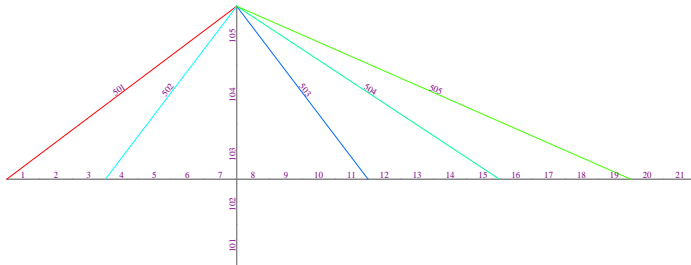
Distribusi momen lentur pada gelagar berdasarkan metode ini relatif seragam. Momen lentur positif dan negatif hampir sama pada setiap titik angkat kabel. Momen lentur maksimum terjadi pada nodal 20 atau titik angkat kabel MC03 yaitu -2109,4 kNm. Untuk pertemuan gelagar dan *pylon* diperoleh momen lentur sebesar -1401,1 kNm yang sebelumnya sebesar -191694,40 kNm atau perbedaannya sebesar 99,27% yang sangat signifikan. Momen lentur pada kaki *pylon* dari hasil analisis metode ini sebesar 18911,6 kNm yang sebelumnya sebesar 26913,40 kNm dengan perbedaan sebesar 29,73%. Distribusi momen lentur gelagar dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

yang tanpa batasan deformasi adalah 0,109 m (lihat Gambar atau perbedaannya sekitar 84,40%.

Gaya kabel yang diperoleh dari hasil analisis tidak jauh berbeda dari hasil analisis sebelumnya (metode pada sub sub-bab (a)). Berdasarkan hasil perhitungan untuk metode ini, gaya akan disajikan pada tabel dibawah ini dan secara visual kontur gaya kabel disajikan pada Gambar 9.

Tabel 5. Gaya kabel dengan metode batasan deformasi pada beberapa nodal

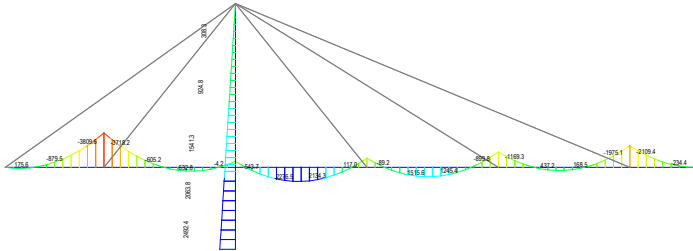
Kabel	SC02 (kN)	SC01 (kN)	MC01 (kN)	MC02 (kN)	MC03 (kN)
Gaya Kabel	8664.67	3538.29	2752.35	3988.27	5325.83



Gambar 9. Gaya kabel dengan metode batasan deformasi pada beberapa nodal

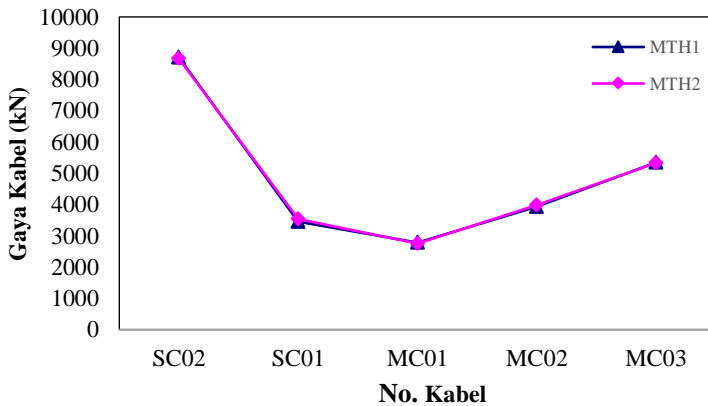
Distribusi momen lentur pada metode ini berbeda dari hasil perhitungan dari yang sebelumnya. Jika pada hasil perhitungan sebelumnya distribusi momen lentur relatif merata (momen lentur positif dan negatif sama), namun untuk hasil perhitungan ini tidak terdistribusi merata (lihat Gambar 10). Momen lentur maksimum justru terjadi pada titik angkat kabel SC01. Nilai momen lentur maksimum ini sebesar -3809,6 kNm. Nilai momen lentur maksimum kedua terjadi pada titik angkat kabel MC03 yaitu sebesar -2109,4 kNm. Hal ini terjadi karena kekangan

hanya diberikan pada beberapa nodal saja. Namun momen lentur yang terjadi pada kaki *pylon* relatif lebih kecil dari hasil perhitungan sub sub-bab (a) yaitu sebesar 2492,4 kNm (momen positif).



Gambar 10. Momen lentur gelagar dengan metode batasan deformasi pada beberapa nodal

Berdasarkan hasil perhitungan dengan dua metode diatas maka dapat dibandingkan masing-masing gaya kabel yang terjadi. Hasil perbandingan diatas disajikan pada gambar dibawah ini.

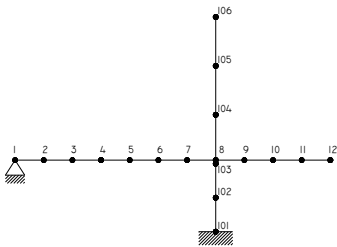


Gambar 11. Perbandingan gaya kabel

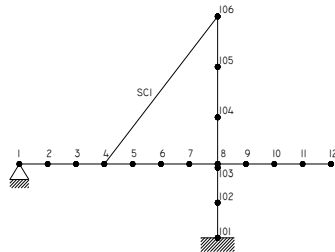
D. Analisis Konstruksi Bertahap

Metode analisis konstruksi bertahap yang digunakan dalam contoh analisis struktur jembatan *cable-stayed* ini adalah *forward assemblage analysis*. Adapun langkah-langkah pekerjaan konstruksi yang ditinjau terdiri dari 13 langkah. Hasil dari analisis konstruksi bertahap ini akan diperoleh gaya kabel, momen lentur gelagar pada setiap tahapan konstruksi serta lendutan gelagar. Adapun tahapan konstruksi yang ditinjau adalah sebagai berikut:

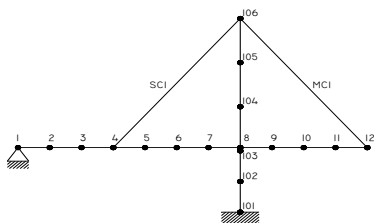
a) konstruksi *pylon* dan pemasangan gelagar segmen 1-3



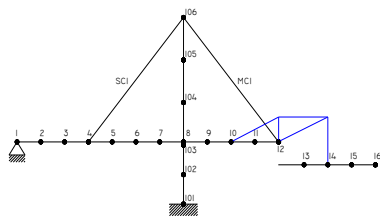
b) Instalasi kabel SC01



c) instalasi kabel MC01

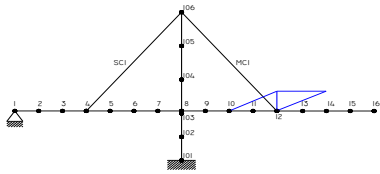


d) Pengangkatan gelagar segmen 4 dengan *derrick crane*

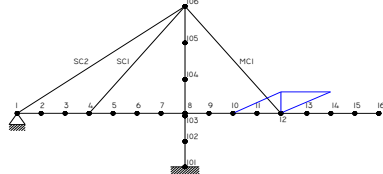


Gambar 12. Tahapan konstruksi

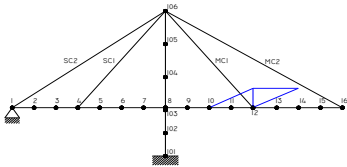
e) Pemasangan gelagar segmen 4



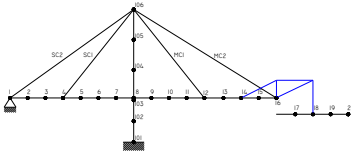
f) Instalasi kabel SC02



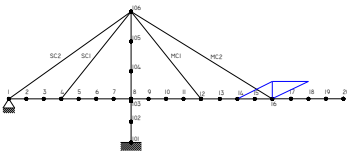
g) Instalasi kabel MC02



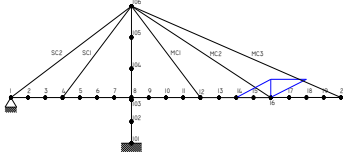
h) Pengangkatan gelagar segmen 5 dengan derrick crane



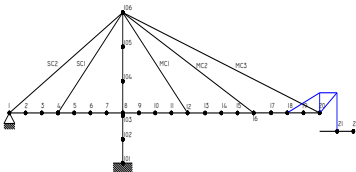
i) Pemasangan gelagar segmen 5



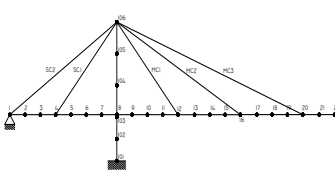
j) Instalasi kabel MC03



k) Pengangkatan gelagar segmen 6 dengan derrick crane

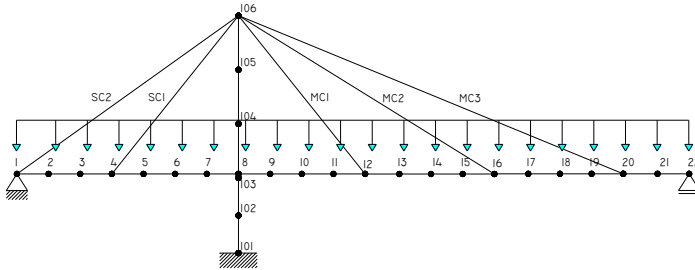


l) Pemasangan gelagar segmen 6



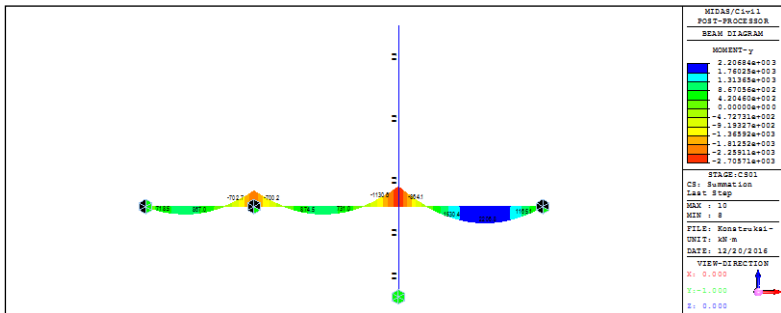
Gambar 12. Tahapan konstruksi – lanjutan

m) konstruksi perletakan bentang utama dan penambahan beban mati tambahan



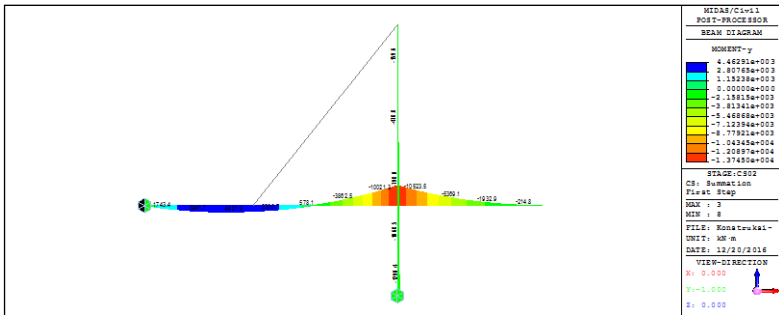
Gambar 12. Tahapan konstruksi – lanjutan

Berdasarkan tahapan konstruksi diatas kemudian setiap tahapan di analisis menggunakan perangkat lunak *Midas Civil*. Adapun hasil momen lentur, gaya tarik kabel, dan deformasi gelagar dari analisis berdasarkan tahapan konstruksi diatas disajikan masing-masing pada Gambar 13, Gambar 14 dan Gambar 15.

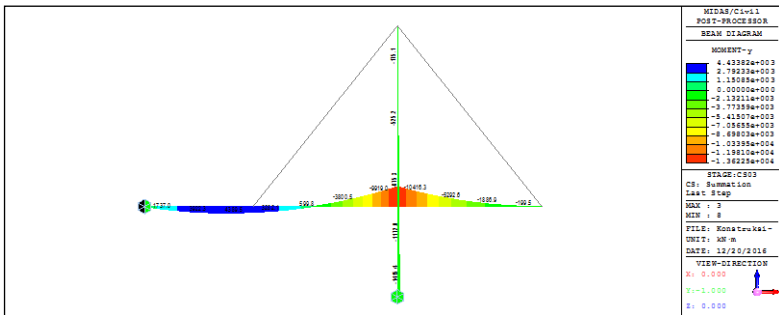


a) Momen lentur tahapan konstruksi 1

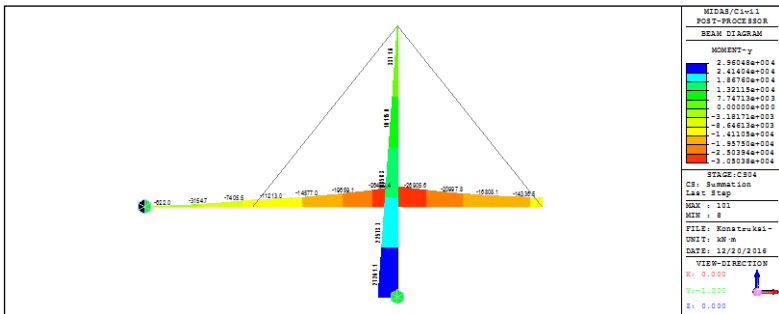
Gambar 13. Momen lentur tahapan konstruksi



b) Momen lentur tahap konstruksi 2

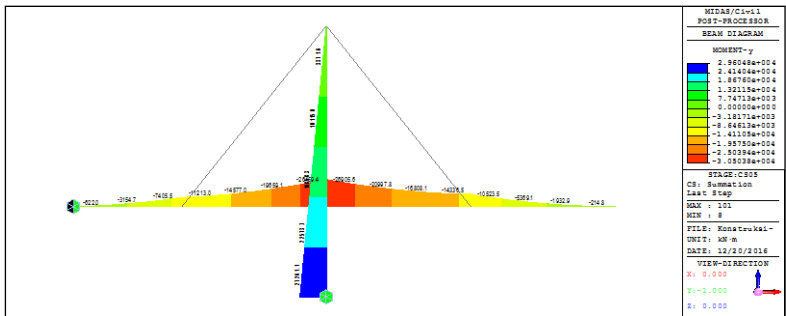


d) Momen lentur tahap konstruksi 3

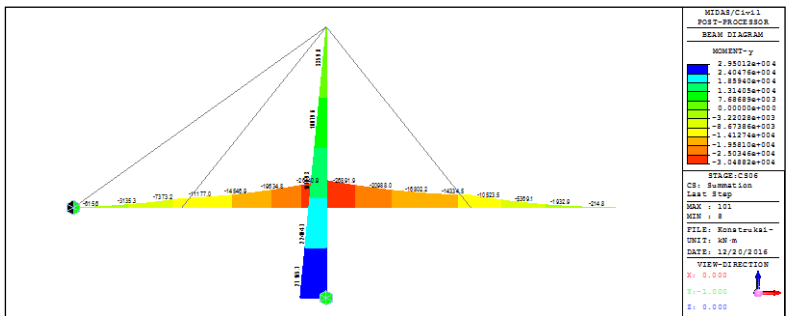


e) Momen lentur tahap konstruksi 4

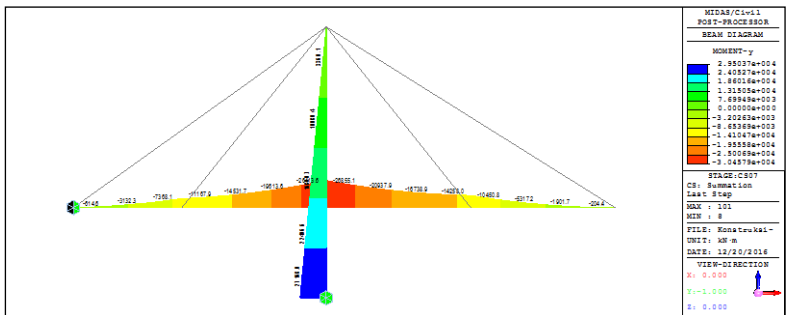
Gambar 13. Momen lentur tahap konstruksi – lanjutan



f) Momen lentur tahapan konstruksi 5

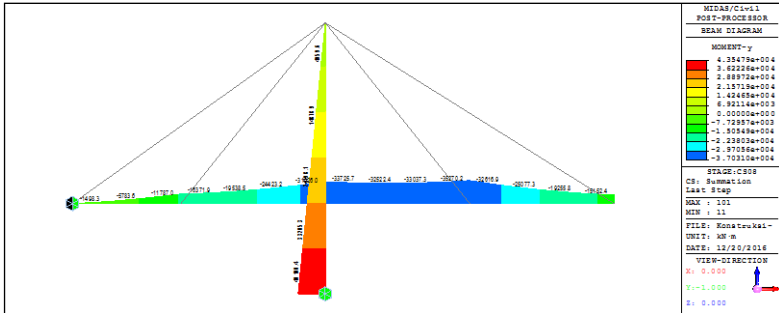


g) Momen lentur tahapan konstruksi 6

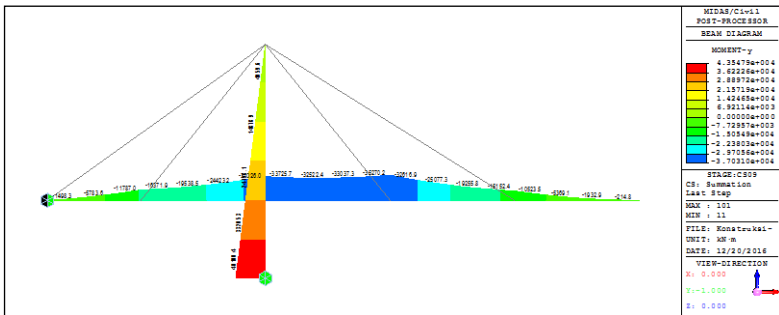


h) Momen lentur tahapan konstruksi 7

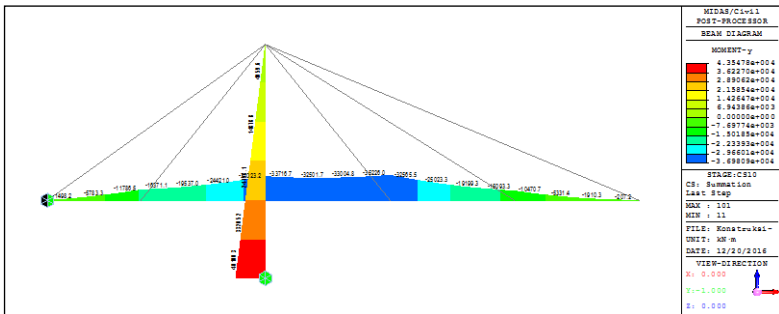
Gambar 13. Momen lentur tahapan konstruksi – lanjutan



i) Momen lentur tahapan konstruksi 8

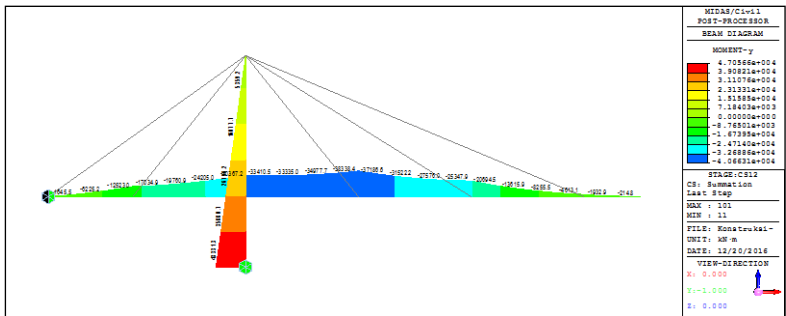


j) Momen lentur tahapan konstruksi 9

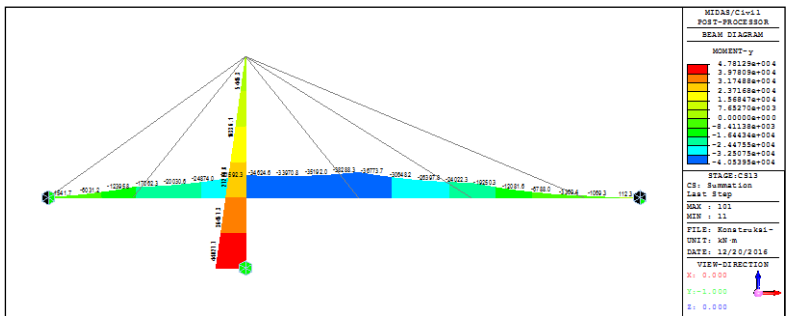


k) Momen lentur tahapan konstruksi 10

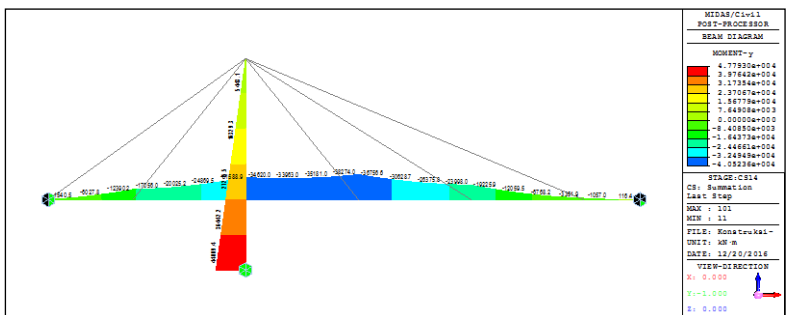
Gambar 13. Momen lentur tahapan konstruksi – lanjutan



l) Momen lentur tahapan konstruksi 11



m) Momen lentur tahapan konstruksi 12

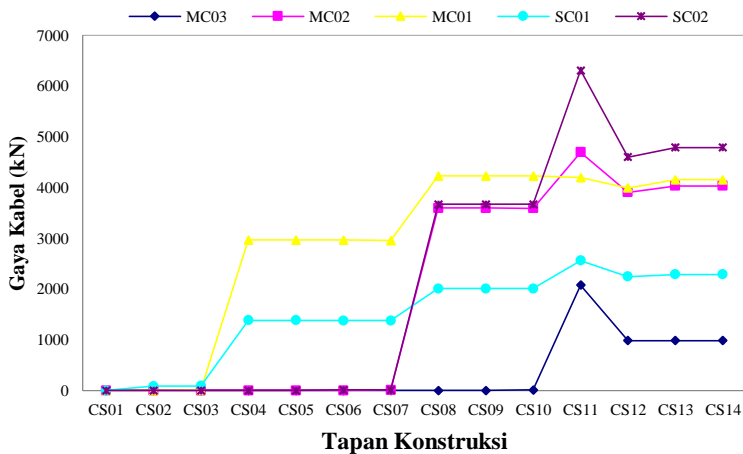


n) Momen lentur tahapan konstruksi 13

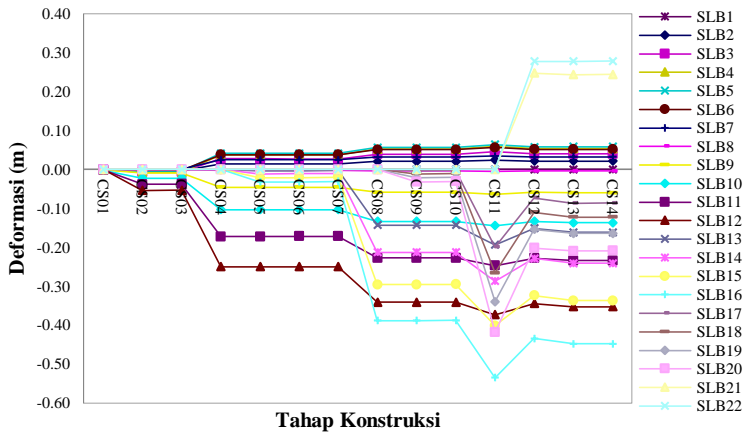
Gambar 13. Momen pada Tahapan Konstruksi – lanjutan

Tabel 6. Gaya kabel pada tahapan konstruksi

Tahap Konstruksi	Gaya Kabel (kN)				
	SC01	MC1	SC02	MC2	MC3
CS01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
CS02	84,581	0,000	0,000	0,000	0,0000
CS03	91,826	9,807	0,000	0,000	0,0000
CS04	1384,049	2963,743	0,000	0,000	0,0000
CS05	1384,049	2963,743	0,000	0,000	0,0000
CS06	1378,053	2964,993	9,807	0,000	0,0000
CS07	1379,330	2954,103	10,583	9,807	0,0000
CS08	2008,363	4228,891	3669,146	3596,884	0,0000
CS09	2008,363	4228,891	3669,146	3596,884	0,0000
CS10	2008,511	4225,954	3669,227	3588,556	9,8067
CS11	2559,540	4196,543	6310,007	4695,245	2075,8120
CS12	2243,678	3989,583	4601,034	3908,842	982,8210
CS13	2287,950	4152,998	4788,411	4029,878	983,4906
CS14	2287,950	4152,998	4788,411	4029,878	983,4906



Gambar 14. Gaya kabel berdasarkan tahapan konstruksi



Gambar 15 Deformasi gelagar berdasarkan tahapan konstruksi

E. Daftar Referensi

- Bruer, A., Pircher, H., & Bokan, H. (1999). *Computer Based Optimising of the Tensioning of Cable-Stayed Bridges*. IABSE Reports .
- MIDAS Civil Analysis Reference. (2006). *Analysis for Civil Structure*. MIDAS Information Technology Co. Ltd.
- Mueller-Haagen, S. (2005). *Berechnungsstrategien zur sicheren und formtreuen Errichtung von Schrägseilbrücken*. Hamburg: Technische Eniversitat Hamburg-Harburg (TUHH).

BIOGRAFI PENULIS



Muhammad Kadri Zamad,

Penulis dilahirkan di Tomoni (Sulawesi Selatan), 28 Mei 1994. Merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Al-Ikhlas Tomoni, SDN 172 Tomoni, SMPN 1 Mangkutana dan SMAN 1 Tomoni yang kesemuanya itu ditempuh dikota kelahiran penulis. Setelah menempuh pendidikan SMA tahun 2012, Penulis melanjutkan pendidikan pada Program Diploma III Teknik Sipil (PDTS), Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Kemudian setelah lulus dari Diploma III tahun 2015, penulis mengikuti ujian masuk dan diterima di Program Lanjut Jenjang D-IV Teknik Sipil FTSP-ITS serta terdaftar dengan NRP 3115040635.