

TUGAS AKHIR
ANALISIS DAN DESAIN
STRUKTUR JEMBATAN “CABLE-STAYED”



Disusun oleh:

Rizki Budi Utomo

Nomor Mhs. : 92 310 036
Nirm : 920051013114120036

Sholeh Purwoko

Nomor Mhs. : 92 310 054
Nirm : 920051013114120054

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA

2000

KATA PENGANTAR

Bismillaa-hirrohmaa-nirrohiim

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan nikmat-Nya kepada seluruh umat manusia, serta salam dan sholawat kita mohonkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW.

Tugas Akhir atau Skripsi merupakan tugas yang harus dipenuhi mahasiswa sebagai syarat untuk mencapai kesarjanaan (S-1) pada Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Tugas Akhir disusun setelah memenuhi persyaratan teori-teori, tugas/ praktikum, Kuliah Kerja Nyata dan Kerja Praktik sesuai dengan kurikulum yang berlaku.

Atas selesainya Tugas Akhir ini maka kami ingin menyampaikan ucapan terima kasih secara tulus kepada:

1. Ir. Widodo, MSCE, PhD sebagai Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia,
2. Ir. H. Tadjuddin BMA, MS sebagai Ketua Jurusan Teknik Sipil di Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia,
3. Ir. H. Moch. Teguh, MSCE sebagai Dosen Pembimbing I,
4. Ir. H. Ilman Noor, MSCE sebagai Dosen Pembimbing II,
5. Ir. Fatkhurrohman, MT sebagai Dosen Tamu,
6. para dosen yang telah menyampaikan ilmunya sebagai pijakan untuk berkreasi dengan lebih baik,
7. dan teman-teman semua yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung.

Kami menyadari bahwa dalam tulisan ini masih banyak bagian yang belum sempurna. Oleh karena itu kami sangat mengharapkan dan memberi penghargaan yang tinggi atas semua masukan yang disampaikan kepada kami. Lepas dari ketidak sempurnaan tersebut, kami berharap semoga tulisan ini mampu memberikan tambahan wawasan kepada para pembaca.

Akhir kata, atas semua yang telah kita kerjakan, semoga menjadi pahala bagi kita dan rahmat bagi seluruh umat manusia, amien.

Kaliurang, 24 Februari 2000
Penyusun

motto:

JANGAN PERNAH BERHENTI BERIMAJINASI

kupersembahkan kepada:

ibunda, ayahanda serta adik-adikku tercinta

guru-guru yang telah mendidikku

...yaa Allah sayangilah kedua orang tuaku seperti mereka

menyayangiku ketika aku masih kecil

doaku selalu kupanjatkan untukmu semoga Allah

menjadikan aku sebagai pahala bagimu, aamiin

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
MOTTO	iv
PERSEMBAHAN	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
ABSTRAK	xvi
1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
2 STUDI PUSTAKA	
2.1 Pengantar	5
2.2 Faktor Penentu Dalam Desain Jembatan.....	6
2.3 Klasifikasi Jembatan	6
2.4 Jembatan Bentangan Panjang.....	7
2.4.1 <i>Arch Bridge</i>	8
2.4.2 Jembatan Gantung	9
2.4.3 <i>Cable-Stayed Bridge</i>	10
2.5 Faktor Beban AASHTO	11

3	TEORI <i>CABLE-STAYED BRIDGE</i>	
3.1	Pengantar.....	12
3.2	<i>Cable-Stayed Bridge</i> Modern.....	12
3.3	Konfigurasi Komponen Jembatan.....	13
3.3.1	Susunan Bentangan.....	14
3.3.2	Susunan Kabel Transversal	15
	1. Sistem Satu Bidang (<i>Single-Plane System</i>)	15
	2. Sistem Dua Bidang (<i>Double-Plane System</i>).....	16
	3. Sistem Tiga Bidang (<i>Three-Plane System</i>).....	17
3.3.3	Susunan Kabel Longitudinal.....	17
3.3.4	Menara	20
3.3.5	Struktur Gelagar	22
3.4	Evaluasi Ekonomis.....	25
3.5	Kabel Struktural	28
3.6	Kriteria Desain	30
3.6.1	Proporsi Bentangan.....	30
3.6.2	Geometri Susunan Kabel.....	32
3.6.3	Menara/ <i>Pylons</i>	32
3.6.4	Tipe Gelagar	32
3.7	Beban Untuk <i>Cable-Stayed Bridges</i>	33
3.8	Pengangkeran	34
3.9	Nonlinieritas.....	36
3.10	Distribusi Gaya Antar Elemen	37
4	SPESIFIKASI DESAIN	
4.1	Geometri Struktur.....	39
4.2	Penampang Melintang Jembatan.....	40
4.3	Spesifikasi Kabel.....	44
4.4	<i>Pylon/ Menara</i>	46
4.5	Spesifikasi Umum	48
	4.5.1 Struktur Atas.....	49
	4.5.2 Struktur Bawah.....	49
5	ANALISIS STRUKTUR	
5.1	Pendahuluan	50
5.2	Identifikasi Elemen Struktur.....	51
5.3	Identifikasi Beban	51
5.4	Analisis dan Desain Kabel	56

5.4.1	Analisis dan Desain Kabel Terhadap Beban Mati....	56
1.	Menghitung Koefisien Pagas Vertikal Awal	57
2.	Analisis Anjakan.....	58
3.	Menghitung Koreksi Panjang Kabel.....	59
4.	Menghitung Koreksi Pegas Vertikal (kv')	60
5.4.2	Analisis Kabel Terhadap Beban Hidup	62
5.4.3	Analisis Kabel Terhadap Beban Angin	63
5.5	Analisis dan Desain Gelagar	64
5.5.1	Analisis Beban Mati	66
5.5.2	Analisis Beban Hidup.....	66
5.5.3	Desain Gelagar	67
5.6	Analisis dan Desain Menara.....	70
6	PEMBAHASAN	
6.1	Pendahuluan	76
6.2	Pembebanan	77
6.3	Struktur Kabel	78
6.4	Struktur Gelagar	80
6.5	Struktur Menara.....	81
7	SIMPULAN DAN SARAN	
7.1	Simpulan.....	83
7.2	Saran	84

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1	Rasio tinggi gelagar terhadap bentangan.....	24
Tabel 3-2	Studi ekonomi Jembatan Sitka Harbor (rasio biaya terhadap <i>cable-stayed bridge</i> = 1,00).....	27
Tabel 3-3	Spesifikasi <i>Seven-Wire Strand</i> dengan nilai modulus elastisitas (E) 28.160 ksi.....	29
Tabel 3-4	Rasio bentangan utama terhadap total bentangan pada dua bentangan.....	31
Tabel 3-5	Rasio bentangan utama terhadap total bentangan pada tiga bentangan.....	31
Tabel 3-6	Beban Jalur Terpusat dan Merata pada Desain Jembatan Bentangan Panjang (dari panitia kerja ASCE, 1981).....	34
Tabel 4-1	Bentuk penampang dengan sifat mekanisnya	42
Tabel 4-2	Perhitungan titik berat penampang gelagar dihitung dari sisi bawah potongan.....	43
Tabel 4-3	Perhitungan momen inersia gelagar terhadap garis netral horisontal (sumbu x).....	44
Tabel 4-4	Spesifikasi kabel <i>seven wire strand ASTM A416-90a Grade 270</i>	45
Tabel 4-5	Spesifikasi struktur <i>rope</i> sebagai elemen kabel	46
Tabel 4-6	Perhitungan luas penampang <i>pylon</i> dan inersia penampang terhadap sumbu kuat (sumbu x)	48
Tabel 4-7	Perhitungan luas penampang <i>pylon</i> dan inersia penampang terhadap sumbu lemah (sumbu y).....	48
Tabel 5-1	Identifikasi elemen struktur pada model <i>cable-stayed bridge</i>	51
Tabel 5-2	Perhitungan beban mati merata yang bekerja pada gelagar ..	52
Tabel 5-3	Perhitungan beban mati terpusat	53
Tabel 5-4	Identifikasi beban rencana pada struktur <i>cable-stayed bridge</i>	56
Tabel 5-5	Tabel koreksi panjang kabel terhadap beban mati	60
Tabel 5-6	Hasil perhitungan gaya tarik kabel akibat beban mati.....	62

Tabel 5-7	Gaya tarik kabel pada tipe beban hidup	63
Tabel 5-8	Gaya tarik kabel akibat beban angin.....	64
Tabel 5-9	Gaya ultimit sebagai acuan desain gelagar.....	67
Tabel 5-10	Perhitungan gaya eksternal yang bekerja pada menara	70
Tabel 5-11	Hasil analisis struktur sebagai gaya internal maksimal pada menara	72
Tabel 5-12	Perhitungan modulus panampang platis sumbu-x berdasar gambar 4-6.....	73
Tabel 5-13	Perhitungan modulus panampang platis sumbu-y berdasar gambar 4-6	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1	Posisi <i>deck</i> (lantai) jembatan dapat diklasifikasikan dalam tiga jenis yaitu (a) <i>deck</i> ; (b) <i>semi-through</i> ; (c) <i>through</i> (Troitsky, 1994).....	7
Gambar 2-2	Tipe jembatan rangka-busur (<i>arch-truss bridge</i>) dengan menggunakan baja sebagai material dasar (Ahuja & Birdy, 1993).....	8
Gambar 2-3	Struktur jembatan <i>cable-supported</i> tipe <i>suspension bridge</i> (S. Fukunaga, 1997)	9
Gambar 2-4	Struktur jembatan <i>cable-supported</i> dengan tipe <i>cable-stayed</i> (Podolny & Scalzi, 1976).....	11
Gambar 3-1	<i>The Strömsund Bridge</i> (Swedia), <i>cable-stayed bridge</i> modern pertama.....	13
Gambar 3-2	Contoh struktur <i>cable-sayed bridge</i> dengan dua bentangan asimetris pada <i>Severin Bridge</i> di Cologne-Jerman	14
Gambar 3-3	Contoh struktur <i>cable-sayed bridge</i> dengan tiga bentangan pada <i>North Bridge</i> di Düsseldorf-Jerman	14
Gambar 3-4	Contoh struktur <i>cable-sayed bridge</i> dengan multi bentangan pada <i>Maracaibo Bridge</i> di Venezuela	14
Gambar 3-5	Susunan kabel transversal. (a) <i>single plane-vertical</i> ; (b) <i>single plane-vertical/ lateral</i> ; (c) <i>double plane-vertical</i> ; (d) <i>double plane-sloping</i>	15
Gambar 3-6	Susunan kabel longitudinal: (a) <i>radiating</i> ; (b) <i>harp</i> ; (c) <i>fan</i> ; (d) <i>star</i>	18
Gambar 3-7	Matrik konfigurasi kabel arah longitudinal.....	20
Gambar 3-8	Alternatif tipe menara: (a) modifikasi <i>A-frame</i> ; (b) <i>diamond</i> ; (c) modifikasi <i>diamond</i> atau <i>delta</i>	21
Gambar 3-9	<i>Solid web girders</i> dengan tipe-tipe: (a) <i>twin I girders</i> ; (b) <i>multiple I girders</i> ; (c) <i>rectangular box girder</i> ; (d) <i>trapezoidal box girder</i> ; (e) <i>twin rectangular box girders</i> ; (f) <i>twin trapezoidal box girders</i>	23
Gambar 3-10	Penurunan rasio tinggi gelagar terhadap panjang bentangan utama.....	24

Gambar 3-11	Perbandingan tipe bentangan. (<i>Courtesy of the British Constructional Steelwork Association, Ltd.</i>).....	26
Gambar 3-12	Gaya aksial gelagar pada sistem <i>self-anchored</i>	35
Gambar 3-13	Gaya aksial gelagar pada sistem <i>fully-anchored</i>	36
Gambar 3-14	Gaya aksial gelagar pada sistem <i>partially anchored</i>	36
Gambar 3-15	Gaya tarik yang terjadi pada kabel dapat memberikan efek gaya desak pada <i>pylon</i> dan <i>deck</i> sehingga membentuk kesetimbangan gaya	37
Gambar 4-1	Struktur <i>cable-stayed bridge</i> dua bidang kabel <i>radiating</i> (satuan dalam meter).....	39
Gambar 4-2	Potongan melintang gelagar <i>cable-stayed bridge</i> sebagai <i>box girder</i> beton (satuan dalam cm)	40
Gambar 4-3	Detail ukuran potongan melintang <i>box girder</i> yang dibagi menjadi pias-pias untuk menghitung sifat penampang (satuan dalam cm)	43
Gambar 4-4	Potongan melintang struktur <i>rope</i> dan <i>seven-wire strand</i> spesifikasi <i>ASTM A416-90a Grade 270</i>	45
Gambar 4-5	<i>Pylon</i> berupa rangka baja berpengaku sebagai tumpuan sistem kabel dan menumpu pada <i>pier</i>	46
Gambar 4-6	Penampang melintang elemen <i>pylon</i> yang menggunakan material baja profil dan pelat baja (ukuran dalam mm).....	47
Gambar 5-1	Geometri dasar struktur <i>cable-stayed bridge</i> dalam dua dimensi	50
Gambar 5-2	Denah posisi diafragma, balok kantilever dan potongan melintang jembatan.....	53
Gambar 5-3	Gaya tekan angin yang berkerja pada gelagar dengan sudut elevasi 30°	55
Gambar 5-4	Setengah panjang total jembatan dan penomeran kabel	57
Gambar 5-5	Model matematis dengan koefisien pegas	58
Gambar 5-6	Grafik anjakan pada model gambar 5-5 untuk setengah panjang jembatan	58
Gambar 5-7	Anjakan gelagar δv , deformasi kabel δL dan kabel memanjang menjadi L_0'	59
Gambar 5-8	Distribusi beban merata dan beban terpusat pada jenis beban mati	60
Gambar 5-9	Distribusi beban hidup merata untuk analisis gelagar dalam desain struktur kabel.....	62

Gambar 5-10	Distribusi beban angin arah vertikal pada gelagar	64
Gambar 5-11	Model gelagar dengan beban mati	66
Gambar 5-12	Model gelagar dengan beban hidup merata dan terpusat	66
Gambar 5-13	Model struktur menara dengan beban vertikal dan horisontal.....	71
Gambar 5-14	Resultan gaya pada menara akibat beban hidup asimetris pada gelagar.....	71

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran A Diagram Alir Analisis dan Desain Struktur *Cable-Stayed Bridge*.
- Lampiran B Analisis Gelagar Terhadap Beban Mati pada Tumpuan Pegas.
- Lampiran C Analisis Gelagar Terhadap Beban Mati pada Tumpuan *Roll*.
- Lampiran D Analisis Gelagar Terhadap Beban Hidup pada Tumpuan Pegas.
- Lampiran E Analisis Gelagar Terhadap Beban Angin pada Tumpuan Pegas.
- Lampiran F Analisis Menara/ Pylon.
- Lampiran G Garis Pengaruh Momen pada Gelagar.
- Lampiran H Gambar Penulangan Pokok *Box Girder*.
- Lampiran I Diagram Alir Mekanisme Pembebanan pada Analisis dan Desain Struktur *Cable-Stayed Bridge*.

DAFTAR NOTASI

α	= sudut inklinasi kabel.
δ_v	= anjakan vertikal pada tumpuan kabel.
δ_L	= koreksi panjang kabel/ deformasi yang terjadi pada kabel.
γ	= berat jenis/ berat per satuan volume.
σ_T	= tegangan tarik kabel.
A	= luas penampang bruto.
A_{net}	= luas bersih penampang kabel.
E	= modulus elastisitas.
E_{eq}	= modulus elastisitas ekivalen kabel.
$f'c$	= kuat desak beton.
f_y	= tegangan luluh.
h	= tinggi gelagar.
H	= tinggi menara/ <i>pylon</i> .
I_x	= momen inersia terhadap sumbu-x.
I_y	= momen inersia terhadap sumbu-y.
kv	= koefisien pegas vertikal mula-mula.
kv'	= koefisien pegas vertikal terkoreksi.
L	= panjang bentangan jembatan.
L_0	= panjang kabel mula-mula.
L_0'	= panjang kabel mula-mula akibat deformasi beban mati.
L_1	= panjang kabel terkoreksi.
lh	= jarak tumpuan kabel terhadap menara.
P	= beban terpusat.
Q_D	= beban mati per satuan panjang.
Q_L	= beban hidup per satuan panjang.
R	= rasio tegangan tarik kabel terhadap tegangan leleh kabel.
R_{th}	= resultan gaya horisontal akibat gaya tarik kabel.
R_{tv}	= resultan gaya vertikal akibat gaya tarik kabel.
t	= tebal elemen.
T	= gaya tarik kabel.
T_h	= komponen horisontal terhadap gaya tarik kabel.
T_v	= komponen vertikal terhadap gaya tarik kabel.
V	= volume.
Z_x	= modulus penampang plastis terhadap sumbu-x.
Z_y	= modulus penampang plastis terhadap sumbu-y.

ABSTRAK

Cable-stayed bridge merupakan tipe jembatan bentangan panjang yang dapat mengatasi persoalan lalu-lintas air (navigasi air) dengan menyediakan kebebasan horisontal dan vertikal yang cukup. Jembatan bentangan pendek umumnya menggunakan banyak *intermediate piers*. *Cable-stayed bridge* mengganti *intermediate piers* dengan satu atau lebih titik kabel dan dihubungkan secara langsung menuju menara. *Cable-stayed bridge* mampu mengoptimalkan jangkauan bentangan sampai pada batas tertentu tanpa menambah dimensi gelagar tetapi dilakukan dengan menambah titik kabel sebagai tumpuan.

Prinsip analisis *cable-stayed bridge* didasarkan atas penggantian fungsi *intermediate piers* sebagai tumpuan desak dengan satu atau lebih titik kabel sebagai tumpuan tarik. Analisis kabel sebagai tumpuan pegas (*springs*) perlu dilakukan pada beban hidup, karena kabel sebagai tumpuan luluh (*yielding support*) dapat mengalami deformasi sehingga pada tumpuan tersebut mengalami anjakan relatif.

Desain *cable-stayed bridge* dengan konfigurasi bentangan 120-260-120m, lebar jembatan 17,8m, dua menara dengan tinggi 50m, konfigurasi kabel *radiating* dua bidang, jumlah titik kabel 24 setiap bidang kabelnya dan stuktur kabel berupa *rope* 140 buah *seven wire strand (ASTM A416-90a Grade 270)*, mampu memberikan nilai aman pada kabel sebesar 2,52 dari batas yang diijinkan 1,78.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara berkembang yang sedang giat melaksanakan Pembangunan Nasional. Di dalam Garis-garis Besar Haluan Negara (GBHN), pembangunan jalan dan jembatan merupakan salah satu agenda penting. Jalan dan jembatan sebagai prasarana transportasi diarahkan untuk memperlancar arus manusia, barang dan jasa serta informasi ke penjuru Indonesia. Pembangunan prasarana di bidang transportasi harus didasarkan atas optimalisasi fungsi, sehingga dicapai efektifitas dan efisiensi pelayanan.

Perkembangan rancang bangun di bidang rekayasa teknik sipil telah membawa pada suatu babak baru, yaitu suatu sistem struktur dengan menggunakan kabel. Pemakaian kabel sebagai unsur struktur pendukung dalam konstruksi jembatan menarik untuk dikembangkan. Struktur dengan *cable supported* dapat memberikan desain yang ekonomis dan efisien. Jembatan dengan bentangan panjang didominasi oleh struktur dengan sistem *cable supported*. Jembatan dengan *cable supported* dapat dibagi dalam dua tipe struktur, yaitu

suspension bridge dan *cable-stayed bridge*.

Nilai ekonomis suatu struktur ditentukan oleh sampai sejauh mana pemanfaatan material mampu memberikan kapasitas kekuatan yang dibutuhkan, tingkat kemudahan dalam fabrikasi dan pemasangannya. Batasan tersebut dapat memberikan nilai yang sifatnya relatif, tergantung dari sistem dan metode yang digunakan. Penilaian tersebut diharapkan dapat membawa pada suatu predikat *bentangan ekonomis* sebuah jembatan. Bentangan ekonomis ini dikembangkan dari penggunaan berbagai tipe jembatan dikaitkan dengan panjang bentangan yang dapat dicapai secara optimum dalam batas-batas nilai ekonomisnya.

Pemanfaatan rangka baja untuk struktur jembatan bentangan panjang yang pernah digunakan di Indonesia adalah pada Jembatan Krasak. Jembatan Krasak merupakan jembatan bentangan khusus, sepanjang 112 meter dengan menggunakan rangka Baja Austria kelas A. Ini merupakan bentangan terpanjang untuk sistem struktur tersebut. Pemanfaatan rangka baja standar sebagai jembatan biasanya hanya mencapai bentangan bersih maksimum 60 meter. Namun, bila menggunakan jembatan dengan sistem *cable-stayed*, dapat dicapai bentangan bersih hingga 360 meter dengan nilai ekonomis yang cukup tinggi dibandingkan dengan rangka baja.

Pemanfaatan teknologi *cable-stayed bridge* di Indonesia pertama kali pada pembangunan rangkaian jembatan Barelang, ruas Jembatan Batam-Tonton. Jembatan ini menggunakan sistem pilar berupa *double pylon* dengan panjang bentangan utama 350 m dan konfigurasi bentangan (147, 350, 147).

1.2 Rumusan Masalah

Kebutuhan pembangunan sebuah jembatan, tidak jarang dihadapkan pada situasi dan kondisi yang serba terbatas. Permasalahan yang umum dihadapi dalam perencanaan sebuah jembatan perlu dirumuskan agar jelas masalahnya, antara lain sebagai berikut ini.

1. Keberadaan navigasi perairan memberikan suatu batasan dalam pemasangan pilar yang seminimal mungkin, supaya lalu-lintas air tidak terganggu, sehingga perlu direncanakan sebuah jembatan bentangan menengah dengan tipe *cabl-stayed*.
2. Kondisi fisik tanah dan lokasi, tidak memungkinkan (secara teknis maupun ekonomis) jika direncanakan pemasangan pondasi yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan pilar jembatan bentangan pendek. Salah satu pemecahannya dibuat suatu jembatan bentangan menengah dengan tipe *cabl-stayed*.

1.3 Tujuan

Tujuan Tugas Akhir ini adalah untuk menganalisis struktur *cabl-stayed bridge* akibat beban yang bekerja padanya agar dapat dipakai sebagai dasar perhitungan selanjutnya.

1.4 Manfaat

Manfaat yang bisa diambil dari Tugas Akhir ini adalah untuk memberikan tambahan wawasan tentang analisis dan desain struktur *cabl-stayed bridge*.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diangkat untuk Tugas Akhir antara lain sebagai berikut ini.

1. Tugas akhir ini difokuskan pada analisis struktur *cable-stayed bridge* dan selanjutnya dilakukan desain atas dasar hasil analisis struktur tersebut.
2. Beban gempa statis dan dinamis tidak diperhitungkan.
3. Beban kendaraan (hidup) diperhitungkan berdasarkan rekomendasi panitia kerja ASCE 1981.
4. Beban hidup untuk analisis kabel diasumsikan sebagai beban merata sepanjang total bentangan.
5. Beban hidup untuk analisis gelagar diasumsikan sebagai beban merata sepanjang total bentangan dan beban terpusat pada tengah bentangan utama.
6. Beban hidup untuk analisis menara berupa efek beban merata sepanjang total bentangan dan beban merata sepanjang bentangan utama saja.
7. Faktor beban untuk desain kekuatan elemen berdasarkan peraturan AASHTO.
8. Spesifikasi kabel merujuk pada *ASTM A416-90a Grade 270*.
9. Aplikasi desain jembatan *cable-stayed* menggunakan susunan kabel *radiating* dua bidang dan dua pilar tipe H tiga bentangan, dengan konfigurasi bentangan seperti pada gambar 4-1.
10. Analisis struktur berdasarkan model matematis dua dimensi dan dihitung dengan program komputer SAP90™.
11. Torsi yang terjadi pada gelagar dan menara tidak diperhitungkan.

BAB 2

STUDI PUSTAKA

2.1 Pengantar

Jembatan adalah sebuah struktur dengan lintasan yang berfungsi untuk melewati lalu-lintas pada sebuah rintangan. Rintangan tersebut dapat berupa sebuah jurang, sungai atau lalu-lintas pada arah yang lain. Lintasan tersebut dapat berupa jalan raya, rel kereta api atau pipa. Istilah-istilah yang sering muncul dalam rekayasa jembatan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *span* atau bentangan adalah jarak antara dua pusat dukungan,
2. *main span* atau bentangan utama adalah bentangan yang paling panjang,
3. *clear span* atau bentangan bersih adalah jarak bersih antara dua dukungan,
4. *pier* adalah dukungan antara (*intermediate support*) yang terletak di antara struktur atas dan struktur bawah. Dukungan antara ini dapat diklasifikasikan sebagai struktur bawah (*sub-structure*),
5. *abutment* adalah dukungan untuk struktur atas yang terletak pada dua ujung jembatan.

6. bentangan ekonomis adalah bentangan jembatan dengan total biaya minimal,

2.2 Faktor Penentu Dalam Desain Jembatan

Proses pemilihan sebuah jembatan didahului dengan studi kelayakan. Di dalam studi kelayakan, dilakukan suatu pertimbangan ekonomis suatu jembatan, dengan mengacu pada investasi yang kecil tapi dapat memberikan pelayanan yang besar. Penilaian tersebut sangat tergantung dari situasi dan kondisi setempat. Menurut Ahuja & Birdi (1967), proses pemilihan sebuah jembatan ditentukan oleh beberapa faktor sebagai berikut:

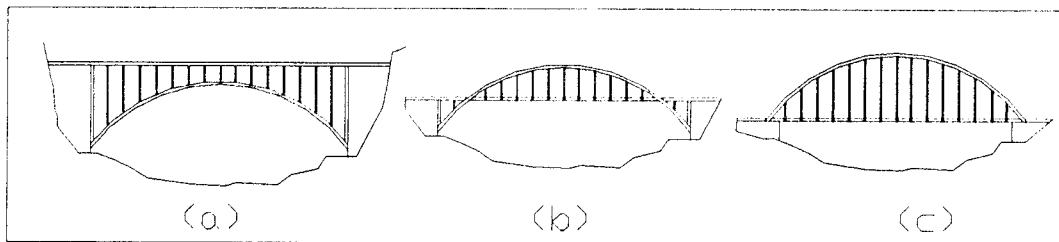
1. volume dan jenis lalu lintas yang diakomodasi,
2. kondisi alamiah sungai, dan tanah dasar,
3. ketersediaan material dan dana,
4. batas waktu untuk menyelesaikan jembatan secara penuh,
5. ketersediaan dan kemampuan sumber daya manusia,
6. ada atau tidaknya lalu lintas sungai yang dilalui jembatan,
7. fasilitas yang tersedia selama proses konstruksi,
8. bentangan ekonomis jembatan,
9. total panjang jembatan yang direncanakan.

2.3 Klasifikasi Jembatan

Jembatan secara umum dapat diklasifikasikan sebagai berikut ini.

1. Fungsi atau kegunaan, yaitu sebagai jalan raya, jalan rel, *aquaduck*, *pedestrian bridge*.

2. Material yang digunakan, yaitu kayu, batu, baja, beton bertulang, atau beton prategang.
3. Usia pemakaian rencana, yaitu sebagai jembatan sementara atau permanen.
4. Posisi relatif dari lantai jembatan, diklasifikasikan sebagai *deck*, *semi-through*, *through* (lihat gambar 2-1).
5. Tipe struktur atas, yaitu busur, girder, rangka batang, *suspension bridge*, *cable-stayed*.
6. *Fixed* atau *moveable*, ada atau tidaknya cukup ruangan untuk lalu lintas di bawah jembatan (pada daerah lalu lintas air).



Gambar 2-1 Gambar posisi *deck* (lantai) jembatan dapat diklasifikasikan dalam tiga jenis yaitu (a) *deck*, (b) *semi-through*, (c) *through* (Troitsky, 1994).

Berdasarkan posisi lantai jembatan pada gambar 2-1, tidak semua tipe jembatan dapat direncanakan hingga memenuhi semua kriteria tersebut. Sebagai contoh jembatan dengan *cable-supported* hanya dapat direncanakan sebagai jembatan *through* (gambar 2-1c).

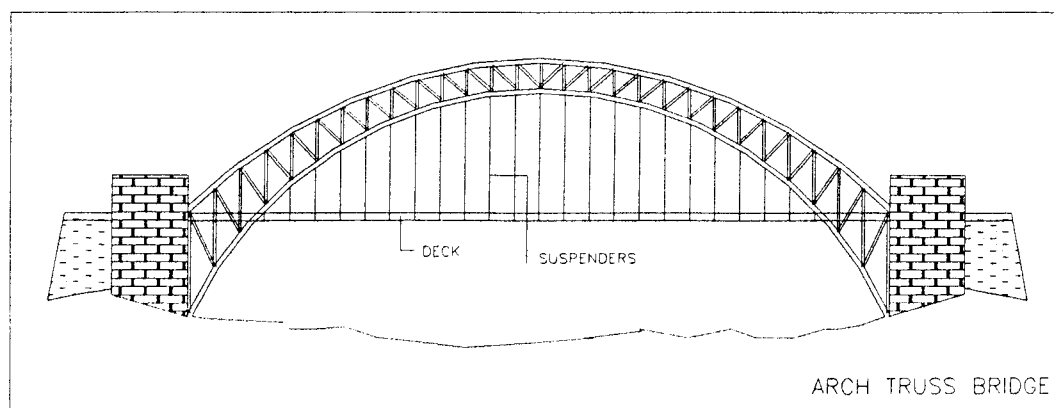
2.4 Jembatan Bentangan Panjang

Jembatan bentangan panjang adalah jembatan yang mempunyai bentangan

lebih dari 100 m. Kebutuhan jembatan dengan bentangan panjang umumnya menggunakan tipe *arch bridge*, *suspension bridge*, atau *cable-stayed bridge*. *Suspension bridge* dan *cable-stayed bridge* termasuk dalam jembatan dengan teknologi *cable-supported*.

2.4.1 Arch Bridge

Arch bridge atau jembatan busur menitik beratkan kekuatan struktur atas pada elemen yang dibuat dengan figur busur. Pemilihan jembatan tipe ini berdasarkan pertimbangan bahwa pada beberapa area tertentu tidak memungkinkan untuk membangun *intermediate piers*. Konsekuensi yang ditimbulkan dari jembatan tipe busur adalah besarnya gaya horisontal yang relatif besar pada pada dua ujung jembatan. Jembatan tipe busur dengan struktur *arch-truss* (lihat gambar 2-2), mampu menjangkau bentangan sampai dengan 520 m. Salah satu contoh jembatan tipe ini adalah jembatan Sidney Harbour (1932) dengan *steel arch* bentangan 503 m di Sidney, Australia.



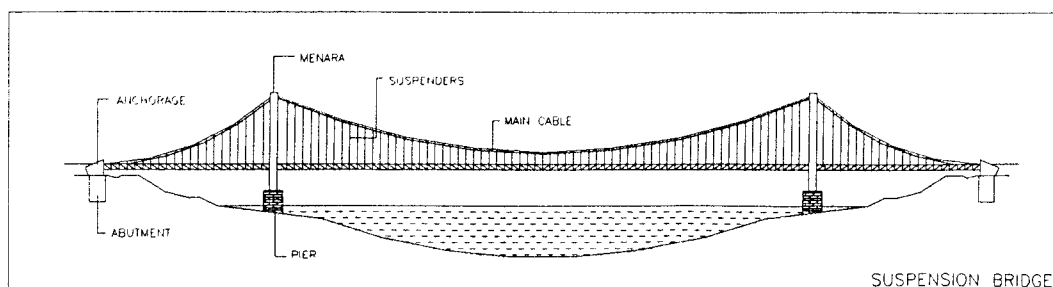
Gambar 2-2 Tipe jembatan rangka-busur (*arch-truss bridge*) dengan menggunakan baja sebagai material dasar (Ahuja dan Birdy, 1993).

Material dasar yang digunakan untuk jembatan tipe *arch* dapat berupa baja atau beton. Jembatan tipe *arch* dapat dibedakan dalam dua jenis, yaitu:

1. *arch rib* dengan bahan dasar beton mempunyai jangkauan bentangan antara 90 m s/d 130 m; dan dengan bahan dasar baja antara 120 m s/d 370 m,
2. *arch truss* dengan bahan dasar baja, mempunyai jangkauan bentangan antara 240 m sampai 520 m.

2.4.2 Jembatan Gantung

Jembatan gantung dapat diklasifikasikan sebagai sistem struktur yang memanfaatkan teknologi *cable-supported* (lihat gambar 2-3). Jembatan gantung terpanjang di dunia yang berhasil dibangun sampai saat ini adalah jembatan *Akashi Kaikyo* di Jepang. Jembatan ini mempunyai bentangan utama 1.990 m, dan dua bentangan samping masing-masing 960 m, sehingga panjang total bentangannya adalah 3.910 m. Pada tanggal 17 Januari 1995 terjadi gempa Kobe dengan *magnitude* 7,23 skala *richter* tepat di bawah jembatan, dengan akselerasi maksimum 800 cm/dt². Saat terjadi gempa, jembatan sedang dalam pelaksanaan, sehingga jembatan diuji skala penuh ketahanan terhadap gempa (S. Fukunaga, 1997)



Gambar 2-3 Struktur jembatan *cable-supported* tipe *suspension bridge* (S. Fukunaga, 1997).

Dengan mengacu pada gambar 2-3, *suspension bridge* mendistribusikan gaya yang bekerja pada lantai jembatan (*deck*) melalui penggantung (*suspenders*) untuk disalurkan menuju kabel utama (*main cable*). Kabel utama dihubungkan menuju angker (*anchorage*) melalui menara (*tower*). Gaya tarik yang terjadi pada kabel utama ditahan oleh angker. Gaya tarik tersebut juga diterima oleh menara, sehingga menimbulkan gaya aksial desak dan gaya momen pada menara. Gaya yang diterima oleh menara diteruskan menuju *pier* dan kemudian disebar oleh *footing* menuju titik-titik pondasi.

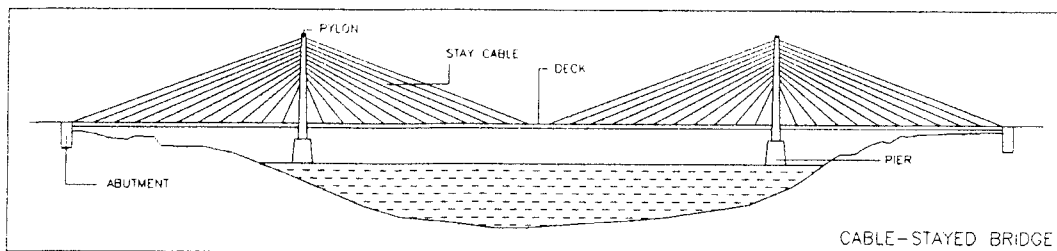
2.4.3 *Cable-Stayed Bridge*

Jembatan dengan menggunakan teknologi *cable-supported* selain *suspension bridge* adalah *cable-stayed bridge*. Frederick S. Merrit (1972) mengungkapkan bahwa *cable-stayed bridge* dapat memberikan solusi ekonomis terhadap kebutuhan jembatan bentangan menengah dan panjang.

Menurut Zarkasi & Rosliansjah (1995) berdasarkan Troitsky (1977), konsep jembatan *cable stayed* pertama kali digunakan oleh bangsa Mesir dalam pembuatan kapal layar, yaitu dengan menggantungkan kabel miring dari menara dengan memberi tumpuan antara terhadap girder. Faustus Varantius (1617) merencanakan jembatan kayu yang didukung besi miring. Pada tahun 1784-1837 insinyur Jerman, Inggris dan Perancis berlomba menyempurnakan konsep ini.

Pembangunan *cable-stayed bridge* modern mulai berkembang ke penjuru dunia sejak tahun 1955. *Cable-stayed bridge* modern pertama dibuat di Swedia dengan tiga bentangan (74, 183, 74) meter. Dalam jangka waktu 40 tahun

(1955-1995), kurang lebih 220 buah *cable-stayed bridge* ini telah dibangun atau sedang dalam perencanaan sebagai lalu lintas jalan raya (B. Supriyadi, 1996).



Gambar 2-4 Struktur jembatan *cable-supported* dengan tipe *cable-stayed* (Podolny & Scalzi, 1976).

Dengan merujuk pada gambar 2-3 dan gambar 2-4, maka diperoleh perbedaan yang mendasar pada *cable-stayed bridge* dan *suspension bridge*. Distribusi gaya pada *suspension bridge* melalui kabel penggantung (*suspenders*) kemudian kabel utama yang dilimpahkan kepada menara (*tower*) dan angker. Distribusi gaya pada *cable-stayed bridge* berasal dari kabel penggantung (*stay cable*) yang langsung diterima oleh menara (*pylon*).

2.5 Faktor Beban AASHTO

Faktor beban yang diberikan dalam analisis/ desain struktur mengacu pada peraturan AASHTO dengan ketentuan sebagai berikut ini.

$$C_n = \gamma [\beta_D \cdot D + \beta_L \cdot (L + I) + \beta_W \cdot W] \dots\dots\dots (2-1)$$

$$C_1 = 1,3 [1,0 \cdot D + 2,2 \cdot (L + I)] \dots\dots\dots (2-1a)$$

$$C_2 = 1,3 [1,0 \cdot D + 1,0 \cdot (L + I) + 0,3 \cdot W] \dots\dots\dots (2-1b)$$

dengan D = beban mati, L = beban hidup,
 I = beban kejut, W = beban angin.

BAB 3

TEORI *CABLE-STAYED BRIDGE*

3.1 Pengantar

Cable-stayed bridge termasuk dalam kelas jembatan bentangan panjang yang menggunakan teknologi *cable-supported*. Jembatan ini menjadi populer setelah dilakukan rekonstruksi secara intensif terhadap jembatan-jembatan di Eropa yang hancur semasa Perang Dunia II.

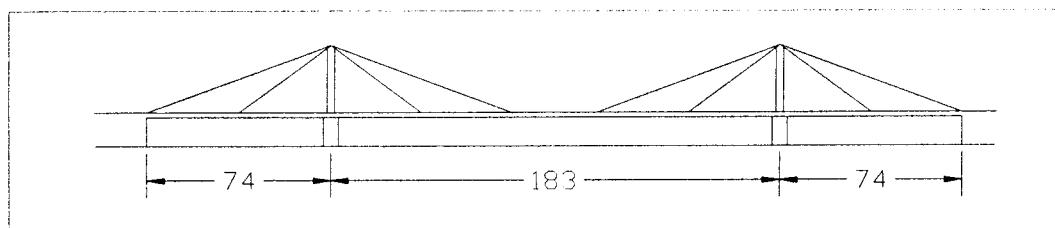
Kabel yang bertumpu pada menara disebar ke beberapa titik sepanjang gelagar. Kabel tersebut berfungsi sebagai dukungan yang di dalamnya bekerja gaya tarik. Sistem kabel ini sangat ideal pada kondisi alam berupa sungai yang lebar dan dalam atau jurang karena pemasangan *piers* tidak banyak dibutuhkan.

3.2 *Cable-Stayed Bridge Modern*

Cable-stayed bridge modern pertama adalah *The Strömsund Bridge* di Swedia (gambar 3-1) yang selesai pembangunannya pada tahun 1955. Jembatan ini dibangun oleh kontraktor Jerman yaitu Demag, bersama dengan insinyur Jerman, Professor F. Dischinger.

Dalam periode relatif singkat dari 1955 sampai 1974 kurang lebih 60 *cable-stayed bridge* telah berhasil dibangun atau masih dalam perencanaan sebagai lalu lintas jalan raya. Sebagian besar jembatan tersebut atau lebih dari 25% dibangun di Jerman. Berikut ini adalah dokumentasi sejumlah pembangunan *cable-stayed bridge* sampai dengan tahun 1974 yang merujuk kepada Podolny & Scalzi (1976), adalah sebagai berikut:

Jerman	17	Belanda	2
Amerika	8	Uni Soviet	2
Jepang	7	Austria	1
Kanada	4	Denmark	1
Inggris Raya	3	India	1
Itali	3	Libya	1
Argentina	2	Swedia	1
Australia	2	Venezuela	1
Perancis	2	Zambia	1



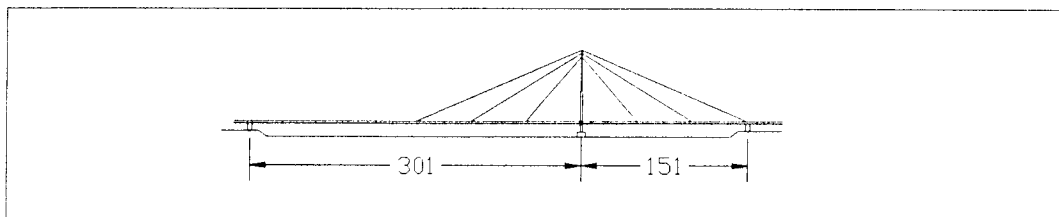
Gambar 3-1 *The Strömsund Bridge* (Swedia), *cable-stayed bridge* modern pertama.

3.3 Konfigurasi Komponen Jembatan

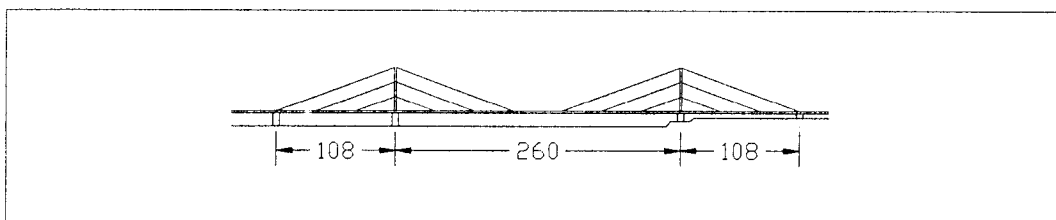
Bagian utama struktur *cable-stayed bridge* adalah kabel, menara dan gelagar. Tiga komponen pokok tersebut dapat divariasikan dalam beranekaragam susunan, tipe atau konfigurasi struktur *cable-stayed bridge*. Kemungkinan variasi tersebut menjadikan jembatan tipe ini dapat dibentuk sehingga mempunyai nilai estetika yang tinggi.

3.3.1 Susunan Bentangan

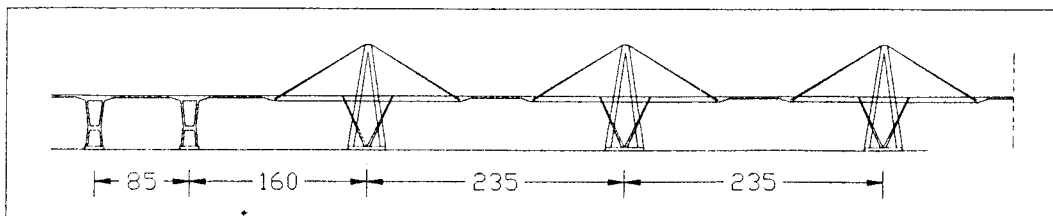
Variasi penyusunan bentangan dapat dikembangkan dengan merujuk pada 3 (tiga) bentuk dasar. Kategori tersebut adalah dua bentangan simetris atau asimetris (gambar 3-2), tiga bentangan (gambar 3-3), dan multi bentangan (gambar 3-4).



Gambar 3-2 Contoh struktur *cable-stayed bridge* dengan dua bentangan asimetris pada *Severin Bridge* di Cologne-Jerman.



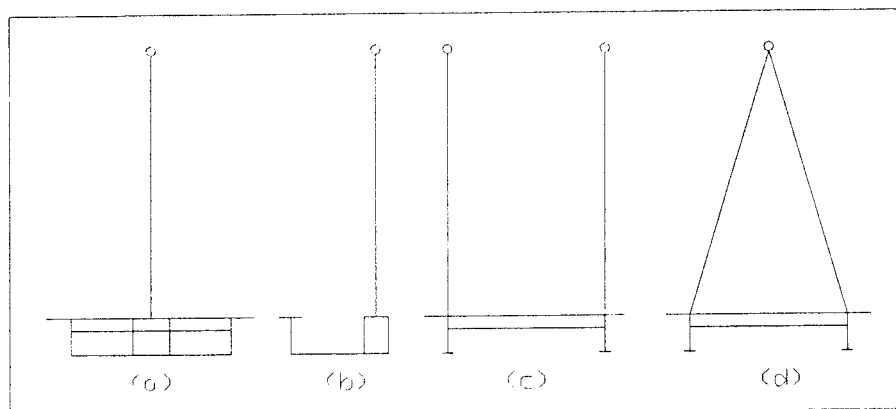
Gambar 3-3 Contoh struktur *cable-stayed bridge* dengan tiga bentangan pada *North Bridge* di Düsseldorf-Jerman.



Gambar 3-4 Contoh struktur *cable-stayed bridge* dengan multi bentangan pada *Maracaibo Bridge* di Venezuela.

3.3.2 Susunan Kabel Transversal

Susunan kabel arah transversal terhadap sumbu longitudinal jembatan, dapat disusun pada bidang tunggal atau ganda dan secara simetris atau tidak simetris. Susunan dasar ini dapat dilihat pada gambar 3-5 berikut ini.



Gambar 3-5 Susunan kabel transversal. (a) *single plane-vertical*, (b) *single plane-vertical/lateral*, (c) *double plane-vertical*, (d) *double plane-sloping*.

1. Sistem Satu Bidang (*Single-Plane System*)

Susunan kabel dengan sistem satu bidang (*single-plane system*) umumnya diterapkan pada jalan dengan pemisah di tengah (*median*) yang cukup lebar. Kabel disusun pada bidang vertikal *median*, dan diangkurkan di bawah jalan. Susunan ini mampu memberikan nilai ekonomis dan nilai estetika yang lebih baik.

Kabel yang disusun pada bidang vertikal *median*, mampu memberikan keleluasaan pandangan terhadap alam sekitar bagi pengemudi selama melintasi jembatan.

Kerugian pada sistem satu bidang kabel adalah konsentrasi gaya yang

relatif besar pada struktur gelagar utama, sehingga dibutuhkan koneksi yang lebih besar pada gelagar untuk menahan gaya kabel. Penambahan tulangan dan *deck* pengaku, pelat badan, dan sayap dasar perlu diberikan untuk mendistribusikan gaya secara merata ke arah lateral.

Pada sistem ini, kabel hanya mendukung beban gravitasi saja. Gaya torsi yang diakibatkan oleh beban kendaraan yang asimetris dan/ atau gaya angin, ditahan oleh pengaku torsi *box girder* kemudian dilimpahkan menuju *piers*.

Meskipun sistem satu bidang kabel diterapkan secara simetris (pada as jalan) untuk jembatan kendaraan (gambar 3-5a), tidak menutup kemungkinan dipasang secara asimetris (pada tepi jalan) untuk *pedestrian bridges* (gambar 3-5b). Apabila dipasang secara asimetris, maka harus bisa dijamin bahwa beban yang bekerja relatif kecil supaya torsi yang terjadi tidak beresiko besar.

2. Sistem Dua Bidang (*Double-Plane System*)

Sistem kabel dua bidang dibedakan dalam dua jenis yaitu sistem bidang vertikal pada dua sisi *superstructure* (gambar 3-5c) dan dua bidang miring seperti bidang atap pelana yang memotong bidang vertikal as jalan (gambar 3-5d). Pada sistem kabel dua bidang miring, umumnya menggunakan menara tipe *A-frame*.

Pengangkeran dua bidang sistem kabel dapat ditempatkan pada sisi luar struktur gelagar atau masuk ke dalam galagar pada batas tertentu. Keuntungan pada pengankeran sisi luar gelagar yaitu tidak mengurangi bagian *deck* untuk penempatan alat koneksi. Kerugiannya adalah, dibutuhkan penambahan tulangan untuk menyalurkan gaya eksentris kabel yang dapat berupa momen dan geser ke

dalam struktur utama gelagar.

Pengankeran yang masuk ke dalam bagian *deck*, mengakibatkan penambahan lebar *deck* sepanjang bentangan sebagai tambahan ruang untuk penempatan koneksi. Penambahan lebar jalan mengakibatkan peningkatan biaya *superstructure*.

3. Sistem Tiga Bidang (*Three-Plane System*)

Sistem tiga bidang adalah sistem kabel yang bekerja pada tiga bidang kabel vertikal. Tiga bidang kabel tersebut diletakkan pada median, dan pada dua sisi luar jembatan. Sistem ini biasa diterapkan pada daerah urban, yang di dalamnya terdapat satu sistem jalur angkutan massa atau jalur bus.

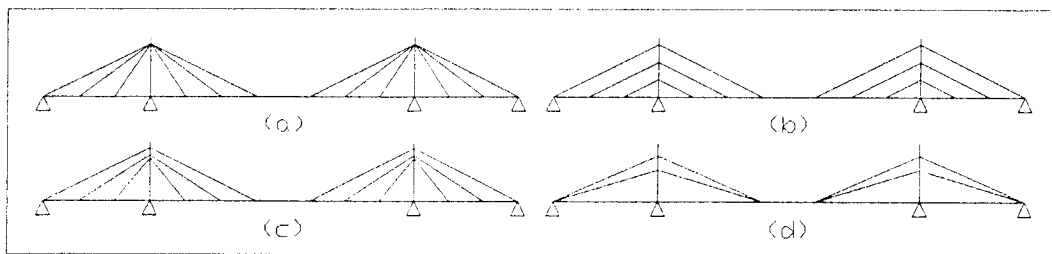
Sebagai contoh sistem tiga bidang kabel pada *Danish Great Belt Bridge*, yang dibangun oleh perusahaan konsultan Inggris, *White, Young and Partners*. Jembatan ini terdiri dari 3 (tiga) lajur kendaraan dan 1 (satu) lintasan kereta api pada masing-masing arah.

3.3.3 Susunan Kabel Longitudinal

Susunan kabel arah longitudinal memiliki banyak ragam sehingga selera seorang desainer banyak berperan dalam konfigurasi ini. Penyusunan kabel arah longitudinal ini selalu mempertimbangkan proporsi bentangan bersih dan tinggi menara. Jembatan dengan bentangan utama yang relatif pendek, satu *forestay* dan *backstay* biasanya cukup memenuhi kebutuhan. Pada bentangan utama yang panjang, penilaian teknis saja tidak cukup sehingga perlu dipertimbangan

konfigurasi geometri kabel yang dapat memberikan nilai estetika lebih baik.

Secara garis besar terdapat empat macam susunan kabel longitudinal yang diadaptasi dari seluruh bangunan *cable-stayed bridges* di dunia. Idealisasi susunan tersebut dapat dilihat pada gambar 3-6.



Gambar 3-6 Susunan kabel longitudinal: (a) *radiating*; (b) *harp*; (c) *fan*; (d) *star*

Pemilihan konfigurasi dan jumlah kabel tergantung pada panjang bentangan, tipe pembebanan, jumlah lajur jalan raya, tinggi menara, ekonomi, estetika, dan *sense of engineer* untuk memadukan secara proporsional. Hasil dari itu semua, ada beberapa jembatan dengan sedikit kabel dan ada yang memasang banyak kabel pada gelagar sebagai sistem tumpuan elastis menerus.

Faktor biaya banyak berpengaruh pada pemilihan susunan dan jumlah kabel. Kabel yang sedikit mengakibatkan konsentrasi gaya kabel yang sangat besar, sehingga memberikan totalitas dan kompleksitas koneksi pada gelagar dan menara. Konsentrasi gaya yang sangat besar pada koneksi membutuhkan detail dan pengerjaan tulangan secara cermat. Selain itu juga diperlukan penambahan pengaku untuk mendistribusikan gaya secara merata pada sistem struktur.

Penggunaan kabel yang sedikit untuk mendukung gelagar sehingga jarak

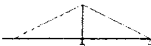
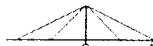
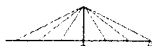


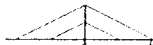
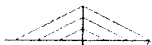
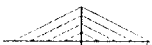
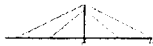
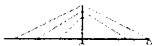
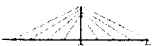

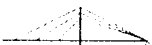
antar dukungan kabel menjadi besar, mengakibatkan tinggi gelagar yang dibutuhkan juga semakin besar. Apabila digunakan banyak kabel pada sistem struktur ini maka pengangkeran pada gelagar menjadi lebih mudah dan distribusi gaya lebih merata sepanjang struktur *deck* tanpa dilakukan penulangan khusus terhadap gelagar. Keuntungan lain adalah struktur cenderung memiliki stabilitas yang tinggi ketika bekerja gaya angin.

Konfigurasi kabel *radiating* lebih menguntungkan secara teknis karena dapat diperoleh sudut kemiringan kabel maksimal terhadap gelagar sehingga kabel dalam posisi optimal untuk mendukung gaya gravitasi beban mati maupun hidup. Posisi tersebut secara bersamaan juga menghasilkan gaya aksial yang lebih kecil bekerja pada sistem gelagar.

Pada sistem kabel dua bidang, konfigurasi *harp* cenderung dipilih karena mampu mengurangi perpotongan pandangan pada sudut tertentu sehingga pemakai jalan merasa lebih nyaman. Konfigurasi *harp* lebih efisien dari pada *radiating* dalam hal distribusi gaya pada menara. Pada konfigurasi kabel *radiating*, gaya terpusat pada puncak menara, sehingga menghasilkan momen dan gaya desak yang besar sepanjang menara. Selain itu, konsentrasi gaya yang besar pada puncak menara, memberikan kesulitan dalam pengangkeran juga penyaluran beban vertikal menjadi lebih kompleks. Konfigurasi *fan*, merupakan kompromi dari sistem konfigurasi ekstrim *harp* dan *radiating*. Sistem ini berguna bila ada kesulitan dalam penempatan seluruh kabel pada satu pusat koneksi menara.

Konfigurasi *star*, hanya digunakan pada Jembatan *Norderelbe* di Hamburg-

Jerman. Secara prinsip, pemilihan konfigurasi ini hanya didasarkan pada estetika dan penampakan yang unik. Sistem ini sama dengan membagi satu kabel yang lebih besar menjadi dua kabel yang lebih kecil, sehingga memudahkan dalam pemasangan dan penampakan yang lebih baik. Tabulasi dari 4 (empat) konfigurasi dasar tersebut dapat dilihat pada gambar 3-7 berikut ini:

Single	Double	Triple	Multiple	Combined	
					Radiating
					Harp
					Fan
					Star

Gambar 3-7 Matrik konfigurasi kabel arah longitudinal.

Gambar 3-7 merupakan matrik dari 4 (empat) tipe konfigurasi dasar kabel dan jumlah kabel yang menyebar dari satu menara. Berdasarkan empat macam konfigurasi kabel longitudinal dasar tersebut maka dapat diperoleh variasi kombinasi yang beragam. Varian yang dikembangkan dari empat tipe konfigurasi tersebut dapat menghasilkan penampakan *cable-stayed bridge* lebih eksotik.

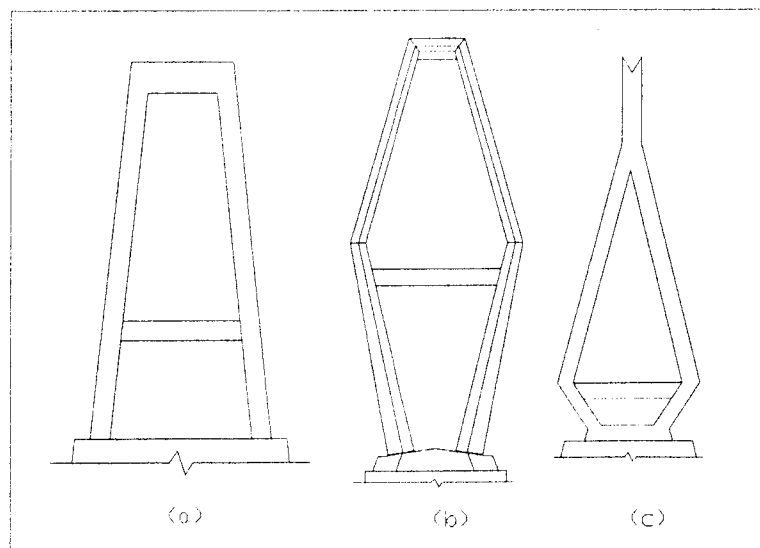
3.3.4 Menara

Menara atau dengan istilah lain *pylon* juga memiliki variasi bentuk. Variasi tersebut ditetapkan untuk memenuhi kebutuhan konfigurasi kabel yang tertentu, nilai estetika dan ekonomi. Menara dalam bentuk yang paling sederhana berupa *single cantilever* (gambar 3-5a dan b) untuk sistem kabel satu bidang, atau

double cantilever (gambar 3-5c) untuk sistem kabel dua bidang. Jembatan dengan bentangan total yang panjang biasanya dipasang menara lebih dari satu.

Bahan dasar pembuatan menara dapat berupa baja atau beton bertulang. Pemilihan material beton diantaranya berdasarkan pertimbangan bahwa suplai baja pada daerah tersebut sangat terbatas, tetapi memiliki sumber daya alam berupa bahan dasar beton yang cukup.

Penentuan tumpuan pada dasar menara sebagai sendi atau jepit berdasarkan pertimbangan besar dan hubungan gaya vertikal dan horisontal yang bekerja pada menara. Tumpuan jepit memberikan momen lentur yang besar pada dasar menara, sedangkan pada sendi tidak terjadi. Pertimbangan lain, tumpuan jepit lebih praktis dalam pelaksanaan sehingga memungkinkan pengurangan biaya dibanding memberikan sebuah tumpuan pin yang diperlukan sebagai dukungan eksternal hingga kabel terhubung.



Gambar 3-8 Alternatif tipe menara: (a) modifikasi *A-frame*, (b) *diamond*, (c) modifikasi *diamond* atau *delta*.

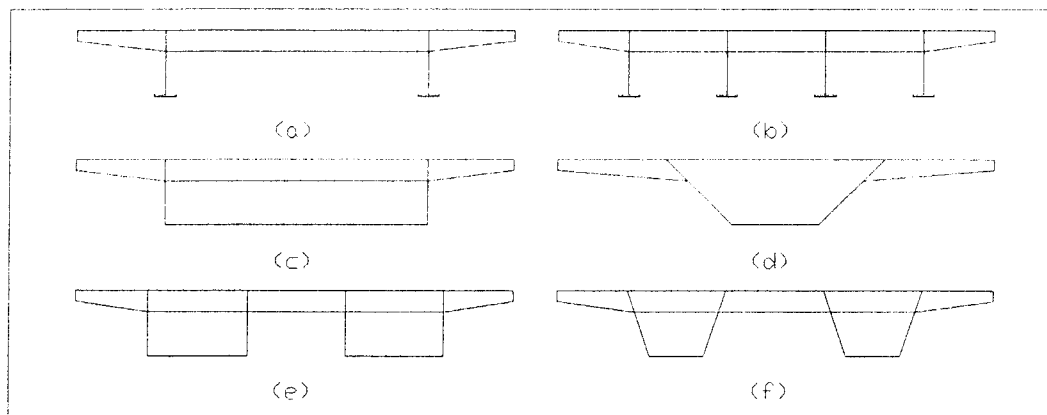
Pemilihan tipe menara harus mempertimbangkan beberapa faktor misalnya kebutuhan kebebasan vertikal yang disyaratkan di bawah *superstructure*, maka modifikasi *A-frame* (gambar 3-8a) dapat dipilih. Variasi *A-frame* berupa *diamond* dapat dipilih untuk kebebasan vertikal yang lebih besar dengan menempatkan struktur jalan raya pada tengah *diamond* (gambar 3-8b) seperti pada menara jembatan *Southern Bay Crossing* di San Fransisco. Modifikasi *diamond* berupa menara tipe delta (gambar 3-8c) digunakan pada jembatan *Köhlbrandbrücke*, di Hamburg-Jerman. Daya kreasi dan pertimbangan ekonomis dapat menghasilkan banyak variasi desain menara, berdasarkan kebutuhan dan keutamaan tertentu sehingga diperoleh desain yang lebih baik.

3.3.5 Struktur Gelagar

Tipe struktur gelagar untuk *cable-stayed bridge* dapat dikerjakan dengan berbagai macam tipe. Secara garis besar, terdapat dua kelompok tipe struktur gelagar yang biasa digunakan, yaitu *stiffening truss* dan tipe *solid web*. Berdasarkan pengalaman menunjukkan bahwa *stiffening truss* jarang digunakan dalam desain karena membutuhkan banyak fabrikasi dan perawatan yang cermat karena sifatnya yang korosif, sehingga kurang menarik untuk dipilih.

Tipe struktur gelagar yang biasa dipakai adalah *solid web girder* dengan banyak variasi (gambar 3-9). Pada gambar 3-9a dan 3-9b, merupakan tipe *solid web girder* dengan sistem *plate girder* yang terdiri dari dua *plate girder* utama dan *multiple plate girders*. Tipe susunan ini memiliki kelemahan dalam hal ketahanannya terhadap torsi.

Kekakuan torsi yang relatif besar dapat dicapai dengan menggunakan *box girder* (gambar 3-9c dan 3-9d). *Box girder* dapat terdiri dari satu sel atau banyak sel dengan dua bentuk pilihan, yaitu *box girder* persegi atau *box girder* trapesium.



Gambar 3-9 Bentuk *solid web girders* dengan tipe: (a) *twin I girders*, (b) *multiple I girders*, (c) *rectangular box girder*, (d) *trapezoidal box girder*, (e) *twin rectangular box girders*, (f) *twin trapezoidal box girders*.

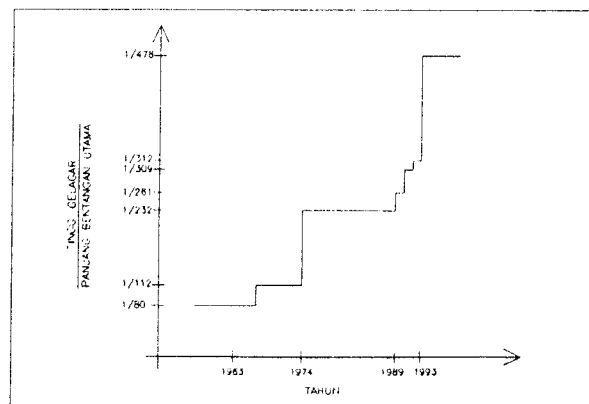
Apabila dibutuhkan jumlah lajur lalu lintas yang lebih banyak sehingga jembatan bertambah lebar maka alternatif pemilihan *twin box girder* dapat dijadikan sebagai pertimbangan (gambar 3-9e dan 3-9f). *Twin box girder* dapat dipilih dari bentuk persegi atau trapesium. Pengalaman desain pada *deck* jembatan menunjukkan adanya suatu peningkatan pemilihan *box girder* trapesium. *Box* dengan tambahan kantilever yang juga sebagai jalur lalu lintas dan *exterior web* miring memiliki kestabilan aerodinamik yang relatif lebih baik.

Rasio tinggi gelagar terhadap panjang bentangan utama dari survei 20 *cable-stayed bridges* memberi gambaran variasi antara 1:40 sampai 1:100. Hasil survei tersebut dapat dilihat pada tabel 3-1 berikut ini.

Tabel 3-1 Rasio tinggi gelagar terhadap bentangan utama.

Struktur	Bidang kabel transversal	Jumlah bentangan kabel	Konfigurasi kabel longitudinal	Tinggi gelagar/ bentangan
Strömsund (Swedia, 1955)	2	3	Converging	1/58
Brucksal (Jerman, 1956)	2	3	Converging	1/53
Nordbrücke (Jerman, 1958)	2	3	Harp	1/81
Severin (Jerman, 1959)	2	2	Fan	1/66
Elbe (Jerman, 1962)	1	3	Star	1/57
Shinno (Jepang, 1963)	2	2	Converging	1/40
Jülicherstrasse (Jerman, 1964)	1	3	Converging	1/60
Leverkusen (Jerman, 1965)	1	3	Harp	1/64
Maxau (Jerman, 1966)	1	2	Fan	1/62
Maya (Jepang, 1966)	1	2	Fan	1/50
Ludwingshafen (Jerman, 1967)	2	2	Converging	1/55
Rees (Jerman, 1967)	2	3	Harp	1/73
Bonn (Jerman, 1967)	1	3	Fan	1/61
Onomichi (Jepang, 1968)	2	3	Converging	1/67
Kniebrücke (Jerman, 1969)	2	2	Harp	1/100
Papineau-Leblanc (Kanada, 1969)	1	3	Converging	1/67
Toyosata (Jepang, 1970)	1	3	Fan	1/72
Arakawa (Jepang, 1970)	1	3	Harp	1/67
Ishikari (Jepang, 1972)	2	3	Fan	1/80
Sitka Harbor (U.S.A., 1973)	2	3	Converging	1/73

Seiring dengan perkembangan teknologi dan pengalaman dalam desain dan pelaksanaan *cable-stayed bridge*, ada kecenderungan semakin kecil rasio tinggi gelagar terhadap panjang bentangan utama.



Gambar 3-10 Penurunan rasio tinggi gelagar terhadap panjang bentangan utama

Berdasarkan gambar 3-10 di atas, setelah pertengahan tahun 70 an terdapat penurunan yang tajam pada rasio tinggi gelagar terhadap bentangan utama atau dengan kata lain terdapat kecenderungan pemakaian gelagar yang semakin ramping.

3.4 Evaluasi Ekonomis

Pemilihan tipe jembatan yang melintasi sungai, jurang, atau jalan raya adalah bukan sebuah penetapan secara otomatis. Banyak faktor yang harus dipertimbangkan sebelum keputusan akhir diambil. Secara prinsip, faktor yang menjadi pertimbangan adalah adanya keterkaitan antara variasi panjang bentangan, jumlah *piers* dan penempatannya secara aman dan ekonomis, pertimbangan estetika, dan terakhir adalah biaya relatif terhadap beberapa tipe jembatan dalam proporsi yang bisa diterima.

Beberapa tipe jembatan mempunyai kesamaan pertimbangan dalam hal keamanan dan nilai estetikanya, tapi biaya relatif jembatan tergantung dari jumlah dan panjang bentangan dan jumlah *piers* sehingga mempengaruhi metode konstruksinya. Studi perbandingan biaya antara *cable-stayed bridge* dengan tipe jembatan lain perlu dilakukan seorang perencana. Studi tersebut bertujuan untuk menampilkan detail kelayakan ekonomis dari total biaya beberapa tipe struktur jembatan yang bakal dipilih. Data dari hasil studi yang lengkap dan logis memudahkan untuk dilakukan pengambilan keputusan secara cepat dan tepat.

Kompetisi terbuka sistem desain di Jerman banyak menghasilkan studi kelayakan yang dapat dilihat dari banyaknya *cable-stayed bridges* yang dibangun

bridge dapat diterapkan untuk mengisi kekosongan ruang antara jembatan tiga bentangan menerus dengan *suspension bridge*. *Cable-stayed bridge* dengan bentangan utama antara 150 sampai 360 meter ditetapkan sebagai bentangan ekonomis dengan rasio bentangan tengah terhadap total bentangan berkisar antara 50 sampai 60% (lihat gambar 3-11). Meskipun demikian, dengan pengalaman desain dan konstruksi yang lebih baik maka panjang bentangan utama *cable-stayed bridge* dapat lebih ditingkatkan. Komparasi di atas dapat dijadikan sebagai rujukan bahwa konsep *cable-stayed bridge* memberikan nilai ekonomis pada jembatan bentangan menengah.

Sebagai contoh studi kelayakan ekonomi yang pernah dilakukan ialah pada Jembatan Sitka Harbor. Jembatan Sitka Harbor mempertimbangkan 6 (enam) tipe jembatan yang berbeda sebelum keputusan akhir diambil untuk menetapkan *cable-stayed bridge* sebagai pilihan. Variasi tersebut ditabulasikan dalam tabel 3-2 berikut ini.

Tabel 3-2 Studi ekonomi Jembatan Sitka Harbor (rasio biaya terhadap *cable-stayed bridge* = 1,00).

Tipe	Keterangan	Rasio Biaya
I	Plate girder with fenders	1,15
II	Plate girder continous	1,13
III	Orthotropic box girder	1,04
IV	Through tied arch	1,04
V	Half through tied arch	1,06
VI	Cable-stayed box girder	1,00

Rasio biaya dalam studi ekonomi tersebut tidak pernah sama apabila diterapkan pada lokasi pembangunan jembatan yang berbeda. Pertimbangan item

variasi jembatan tersebut tergantung dari kondisi kontur setempat, kondisi lingkungan setempat terhadap resiko bahaya alam, kondisi ekonomi lokal dan nasional pada saat dilakukan estimasi, sama halnya dengan waktu jangka pendek dan panjang terhadap situasi ekonomi yang mungkin mempengaruhi biaya akhir.

3.5 Kabel Struktural

Terdapat beberapa tipe kabel yang tersedia sebagai komponen tarik *cable-stayed bridge*. Konfigurasi penampang kabel struktural tergantung dari proses pembuatannya. Kabel dapat disusun sebagai *parallel wires*, *parallel strands* atau *ropes*, *single strand* atau *ropes*, *locked-coil strands*, atau *solid bars*. Definisi istilah-istilah yang berhubungan dengan kabel sebagai komponen struktur adalah sebagai berikut ini.

1. *Cable* --- komponen tarik yang fleksibel, terdiri dari satu atau lebih kelompok *wires*, *strands*, atau *rope*.
2. *Wire* --- sebuah batangan tunggal dengan panjang yang kontinyu sebagai hasil tempa dari batangan baja dingin.
3. *Strand* --- (kecuali *parallel wire strand*) adalah susunan beberapa *wire*, yang ditempatkan mengitari sebuah *wire* dengan dipilin (*twist*) untuk mendapatkan penampang yang simetris.
4. *Rope* --- sejumlah *strand* yang dipilin menjadi satu kesatuan (menyerupai keping rambut) yang ditengahnya diberi inti (*core*) berupa *strand* atau *rope* yang lain.
5. *Locked-coil strands* --- *strands* yang disusun dalam beberapa lapisan dan

diberi inti (*core*) kemudian diikat.

6. *Paralel wire strand*--- beberapa *wire* disusun secara paralel/ sejajar.

Kabel struktural merupakan hasil dari proses manufaktur dengan kontrol kualitas yang ketat. Setiap fase dari proses tersebut dilakukan inspeksi sehingga dihasilkan kabel struktural dengan kualitas tinggi dan konsisten. Untuk mencegah korosi, setiap *wire* dilapisi dengan seng (Zn).

Salah satu tipe kabel yang juga dipakai sebagai komponen *cable-stayed bridge* adalah tipe *seven-wire strand*. Spesifikasi kabel tersebut terdapat dalam *ASTM A416-90a* seperti yang ditunjukkan dalam tabel 3-3. Modulus elastisitas struktur kabel pada tabel 3-3 adalah sama yaitu 28.160 ksi ($19,7 \times 10^6$ t/m²). Faktor aman untuk kabel dalam perencanaan disyaratkan sebesar 1,78 terhadap batas luluh *strand*.

Tabel 3-3 Spesifikasi *Seven-Wire Strand* dengan nilai modulus elastisitas (*E*) 28.160 ksi.

		ϕ mm	Anet mm ²	W kg/1000m	Minimal gaya	
					Patah kN	Luluh kN
ASTM A416-90a	Grade 250	6,35	23,22	182	40,0	34,0
		7,94	37,42	294	64,5	54,7
		9,53	51,61	405	89,0	75,6
		11,11	69,68	548	120,1	102,3
		12,70	92,90	730	160,1	136,2
		15,24	139,35	1.094	240,2	204,2
	Grade 270	9,53	54,84	432	102,3	87,0
		11,11	74,19	582	137,9	117,2
		12,70	98,71	775	183,7	156,1
			15,24	140,00	1.102	260,7

Kriteria pemilihan kabel secara ekonomis berdasarkan pertimbangan

sebagai berikut:

1. jumlah *strand* yang minimal,
2. jumlah *wire* tiap *strand* yang terbanyak,
3. diameter setiap *wire* yang terbesar.

3.6 Kriteria Desain

Secara garis besar, beberapa pertimbangan yang perlu diperhitungkan sebelum diputuskan untuk memilih tipe *cable-stayed bridge* diantaranya adalah:

1. kebebasan (*clearance*) horisontal dan vertikal sebagai bukaan navigasi (*navigation opening*),
2. kondisi permukaan dasar sungai,
3. faktor-faktor lingkungan,
4. permasalahan pada fondasi.

Data yang dihasilkan dari studi tersebut kemudian ditetapkan sebagai dasar untuk menetapkan geometri *cable-stayed bridge* yang memenuhi persyaratan tersebut. Selain itu perlu juga dilakukan sebuah penelitian dengan beberapa variasi tipe jembatan sehingga dapat diketahui keuntungan dan kerugian terhadap tipikal lokasi tersebut.

3.6.1 Proporsi Bentangan

Pertimbangan pertama yang biasa dilakukan adalah membagi panjang total jembatan dalam beberapa bentangan dengan proporsi tertentu. Jumlah bentangan *cable-stayed bridge* umumnya dua atau tiga bentangan kabel. *Cable-stayed bridge*

yang dibangun dalam dua bentangan dapat dilihat pada tabel 3-4 berikut ini.

Tabel 3-4 Rasio bentangan utama terhadap total bentangan pada dua bentangan.

Jembatan	Bentangan Utama (Lm) (m)	Total Bentangan (Lt) (m)	Rasio (Lm/Lt)
Severin (Jerman)	301,0	452,0	0,67
Karlsruhe (Jerman)	175,0	292,0	0,60
Kniebrücke (Jerman)	320,0	515,0	0,62
Mannheim (Jerman)	287,0	412,0	0,70
Maya (Jepang)	139,4	208,8	0,67
East Hauntington (USA)	274,3	411,5	0,67
Batman (Australia)	210,0	260,0	0,81
Bratislava (Cekoslovakia)	303,0	378,0	0,80

Sebagai contoh dari *cable-stayed bridge* yang dibangun dengan proporsi tiga bentangan kabel dapat dilihat dalam tabel 3-5 berikut ini.

Tabel 3-5 Rasio bentangan utama terhadap total bentangan pada tiga bentangan.

Jembatan	Bentangan Utama (m)	Total Bentangan (Lt) (m)	Rasio (Lm/Lt)
Papineau (Kanada)	240,0	420,0	0,57
Duisburg (Jerman)	350,0	655,0	0,53
Rees (Jerman)	255,0	463,0	0,55
Bonn (Jerman)	280,0	520,0	0,54
Düsseldorf-North (Jerman)	260,0	476,0	0,55
Leverkusen (Jerman)	280,0	492,0	0,57
Nordelbe (Jerman)	172,0	300,0	0,57
Arakawa River (Jepang)	160,0	280,6	0,57
Suehiro (Jepang)	250,0	470,0	0,53
Onomichi (Jepang)	215,0	385,0	0,56
Toyosato (Jepang)	216,0	377,0	0,57
Strömsund (Swedia)	183,0	331,0	0,55
Sitka (USA)	137,2	228,6	0,60
Luling (USA)	376,4	678,2	0,55
Pasco-Kennewick (USA)	299,0	546,8	0,55
Manomonee Falls (USA)	66,1	110,0	0,60

Untuk mendapatkan konfigurasi bentangan pada tiga bentangan kabel,

rasio bentangan tengah terhadap total bentangan dapat ditentukan antara 0,5 sampai 0,6 (lihat gambar 3-10).

3.6.2 Geometri Susunan Kabel

Geometri susunan kabel untuk struktur *cable-stayed bridge* mempunyai variasi yang sangat banyak. Sejumlah susunan perlu menjadi pertimbangan untuk memenuhi kebutuhan lalu-lintas, aspek estetika dan keuntungan/ kerugian masing-masing susunan. Tahapan pokok tersebut adalah:

1. menetapkan geometri susunan kabel dalam arah transversal dan longitudinal,
2. menetapkan jumlah kabel berdasar dari beban yang direncanakan,
3. mempertimbangkan bagaimana gaya kabel tersebut didistribusikan menuju gelagar dan menara,
4. dan menetapkan distribusi spasi kabel pada gelagar dan menara.

3.6.3 Menara/ *Pylons*

Berdasarkan desain geometri kabel yang telah ditetapkan sebelumnya dapat dijadikan sebagai rujukan dalam pemilihan tipe menara. Dengan pendekatan ekonomis, maka rasio tinggi menara terhadap bentangan utama kurang lebih 0,2 (1:5), sementara pada *suspension bridge* kurang lebih 0,125 (1:8) atau untuk mendapatkan kekakuan yang lebih besar dipakai 1,111 (1:9).

3.6.4 Tipe Gelagar

Pemilihan material gelagar dapat berupa beton atau baja. Pemilihan tersebut adalah suatu fungsi berdasarkan ketersediaan material dan faktor

ekonomi. Fungsi ini tergantung dari waktu dan lokasi yang spesifik. Penetapan tipe gelagar sebagai *stiffening truss* dari baja atau *solid web* dari baja atau beton, dilakukan untuk menentukan metode konstruksi yang cocok untuk tipe tersebut. *Stiffening truss* membutuhkan fabrikasi dengan ketelitian tinggi dan perawatan yang lebih intensif dibanding tipe *solid web* dari beton. *Solid web* yang menggunakan material beton dapat dikerjakan secara *cast in place* atau *precast* dengan metode segmental.

3.7 Beban Untuk *Cable-Stayed Bridges*

Desain yang rasional pada jembatan bentangan panjang sering terhambat oleh kurang lengkapnya peraturan desain. Beban kendaraan pada kasus ini sering kali ditetapkan oleh konsultan desain.

Beban kendaraan pada jembatan bentangan pendek adalah kendaraan berat yang melintas pada lantai jembatan, tapi kasus ini tidak sama pada jembatan bentangan panjang karena struktur tidak mungkin secara keseluruhan dapat mengakomodasi kendaraan berat tersebut. Pernyataan ini telah diteliti pada jembatan di Vancouver, British Columbia, Canada (Navin et al., 1976), dengan bentangan utama 473 m. Dua metode yang lebih rasional dalam memprediksi pembebanan pada jembatan bentangan panjang adalah: solusi analitis murni dengan persamaan-persamaan probabilitas atau sebuah prosedur simulasi komputer dari penyebaran acak kedatangan lalu-lintas (Buckland, Navin, Zidek, dan Mc Bryde, 1980).

Komite ASCE untuk masalah beban dan gaya pada jembatan (1981),

memberikan rekomendasi untuk beban jalur dasar berupa beban merata (U) dan satu beban terpusat (P), yang tercantum dalam tabel 3-6. Jika lebih dari satu bentangan pembebanan, maka hanya digunakan satu beban terpusat P tiap jalurnya. Panjang pembebanan adalah panjang bentangan yang dibebani secara merata hingga memberikan efek maksimal. Beban terpusat P , diprioritaskan pada sepanjang beban merata, dan diletakkan pada posisi yang memberikan efek maksimal, dan tidak di luar panjang beban merata tersebut.

Tabel 3-6 Beban Jalur Terpusat dan Merata pada Desain Jembatan Bentangan Panjang (dari panitia kerja ASCE, 1981)

Panjang Beban [ft (m)]	Beban Titik, P [lb (kN)]	Beban Merata, U [lb/ft (kN/m)]		
		7.5% H.V.*	30% H.V.*	100% H.V.*
50 (15,25)	0 (0)	2.600 (37,9)	2.600 (37,9)	2.600 (37,9)
100 (30,5)	24.000 (107)	1.400 (20,4)	1.500 (21,9)	1.750 (25,5)
200 (61)	48.000 (214)	940 (13,7)	1.100 (16,1)	1.425 (20,8)
400 (122)	72.000 (320)	710 (10,4)	950 (13,9)	1.170 (17,1)
800 (244)	96.000 (427)	570 (8,3)	830 (12,1)	960 (14)
1.600 (488)	120.000 (534)	485 (7,1)	740 (10,8)	840 (12,3)
3.200 (976)	144.000 (641)	440 (6,4)	700 (10,2)	770 (11,2)
6.400 (1.952)	168.000 (747)	400 (5,8)	680 (9,9)	720 (10,5)

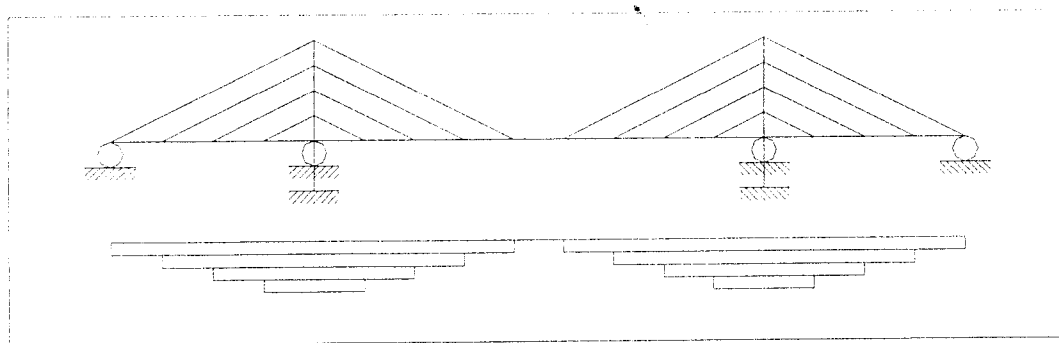
* %H.V. persentase rata-rata kendaraan berat yang melintas (bus dan truk lebih besar dari 12,000 lb [53 kN]).

3.8 Pengangkeran

Pengangkeran yang dilakukan dengan cara tertentu dapat berpengaruh

pada tingkat fleksibilitas gelagar. Fleksibilitas gelagar berkaitan dengan bertambah atau berkurangnya kekakuan gelagar sebagai akibat dari sifat gaya aksial yang bekerja terhadap gelagar. Pada *cable-stayed bridge* yang panjang, pertimbangan untuk menempatkan *expansion joint* lebih menguntungkan dan praktis.

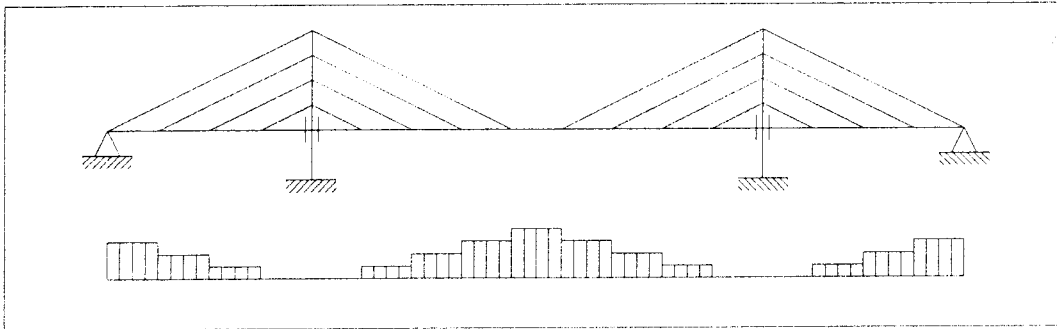
Ilustrasi gambar 3-12, struktur digambarkan menerima beban merata sepanjang gelagar. Tumpuan gelagar pada *abutment* dan menara sebagai *roll* (tidak ada *restraint* arah horisontal), sehingga gaya aksial desak maksimal terjadi pada menara dan segmen tengah pada bentangan utama sama dengan nol atau mendekati. Prinsip pengankeran ini secara umum gelagar mengalami gaya tekan, maka sistem ini disebut dengan sistem *self-anchored*,



Gambar 3-12 Gaya aksial gelagar pada sistem *self-anchored*.

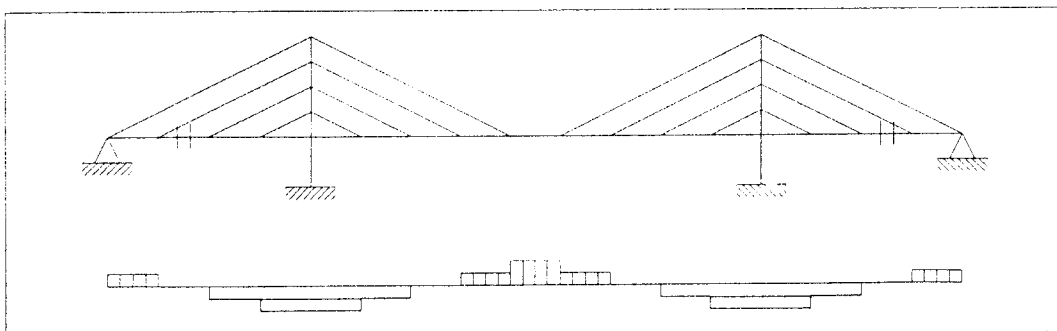
Jika sistem diberi *restraint* arah horisontal pada *abutment* dan *expansion joint* ditambahkan pada daerah menara, maka distribusi gaya aksial terjadi seperti pada gambar 3-13. Sistem terjadi gaya tarik maksimal pada segmen tengah bentangan utama dan gaya nol pada menara. Seluruh gaya aksial yang bekerja

pada gelagar adalah tarik. Sistem ini disebut sebagai *fully-anchored*.



Gambar 3-13 Gaya aksial gelagar pada sistem *fully-anchored*.

Untuk mengurangi besarnya gaya aksial tarik atau desak yang terjadi pada sistem, maka perlu dilakukan kombinasi antara *self-anchored* dan *fully-anchored* sebagai *partially anchored*. Pada sistem ini, gaya tarik maksimal terjadi pada segmen tengah bentangan utama dan gaya desak maksimal pada menara (lihat gambar 3-14).



Gambar 3-14 Gaya aksial gelagar pada sistem *partially anchored*.

3.9 Nonlinieritas

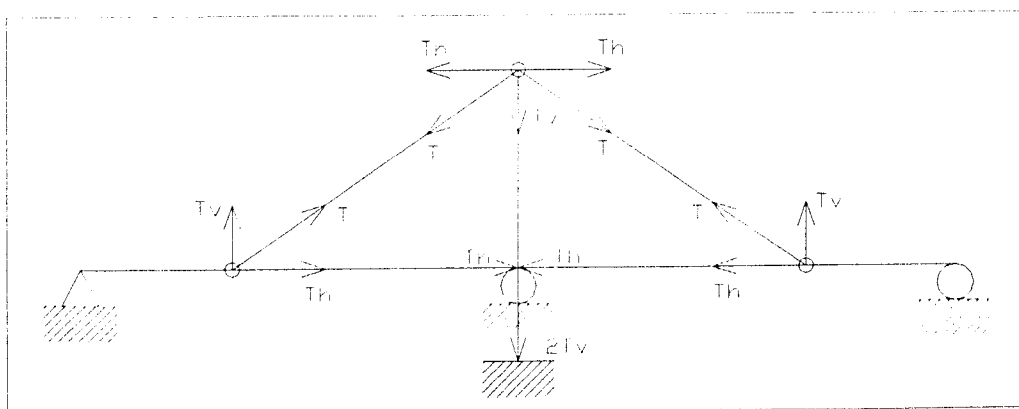
Pertimbangan nonlinier pada *cable-stayed bridge* diklasifikasikan dalam

tiga kategori. Perilaku nonlinier tersebut terjadi pada gelagar, kabel, dan menara. Perilaku nonlinier pada menara dan gelagar terjadi bila gaya aksial dan momen lentur bekerja secara simultan. Pada banyak kasus, nonlinieritas ini boleh diabaikan karena memberikan efek yang kecil. Meskipun demikian, pada gelagar dan menara yang langsing, analisis dengan pendekatan nonlinier perlu dilakukan. Nonlinieritas pada kabel terjadi ketika ada peningkatan gaya tarik kabel sehingga kelengkungan (*sag*) kabel berkurang dan memberikan penambahan panjang kabel.

Untuk keperluan praktis desain struktur kabel, maka perilaku nonlinier kabel dapat diabaikan dengan cara mereduksi modulus elastisitas kabel. Hasil reduksi modulus elastisitas tersebut berupa modulus elastisitas ekuivalen (E_{cq}).

3.10 Distribusi Gaya Antar Elemen

Tiga komponen struktur *cable-stayed bridge* yaitu *stay cable*, *pylon* dan *girder* terpadu dalam kesatuan sistem struktur, sehingga membentuk sebuah kesetimbangan gaya (lihat gambar 3-15).



Gambar 3-15 Gaya tarik yang terjadi pada kabel dapat memberikan efek gaya desak pada *pylon* dan *deck* sehingga membentuk kesetimbangan gaya.

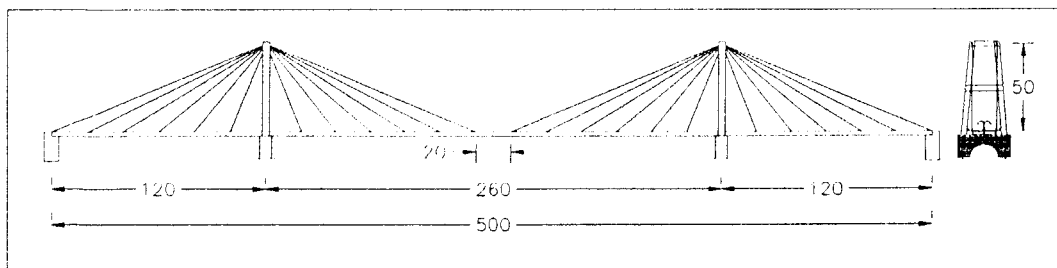
Gaya yang bekerja sepanjang gelagar/ lantai jembatan menimbulkan gaya reaksi pada kabel berupa gaya tarik. Gaya tarik pada kabel membentuk suatu kesetimbangan gaya sehingga dapat memberikan efek gaya desak pada *girder* dan gaya desak pada *pylons*. Gaya desak pada *girder* dan *pylons* terjadi karena efek dari penempatan kabel yang miring. Kabel dengan penempatan miring menimbulkan dua komponen gaya, yaitu gaya horisontal dan gaya vertikal. Komponen gaya vertikal kabel berpengaruh pada gaya desak *pylon*, dan komponen gaya horisontal kabel mempengaruhi gaya desak pada *girder*.

BAB 4

SPEKIFIKASI DESAIN

4.1 Geometri Struktur

Geometri struktur adalah sekumpulan titik nodal yang dihubungkan oleh elemen-elemen. Setiap elemen penyusun geometri struktur diberikan suatu identitas berupa set material yang mencakup sifat mekanis material penyusun. Kesatuan tersebut dikenal sebagai model matematis. Model matematis mempunyai peran penting sebagai dasar analisis struktur. Analisis struktur menghasilkan keluaran berupa gaya-gaya yang digunakan sebagai pedoman untuk merencanakan kekuatan elemen. Geometri struktur dalam aplikasi analisis *cable-stayed bridge* ditetapkan seperti pada gambar 4-1 di bawah ini.

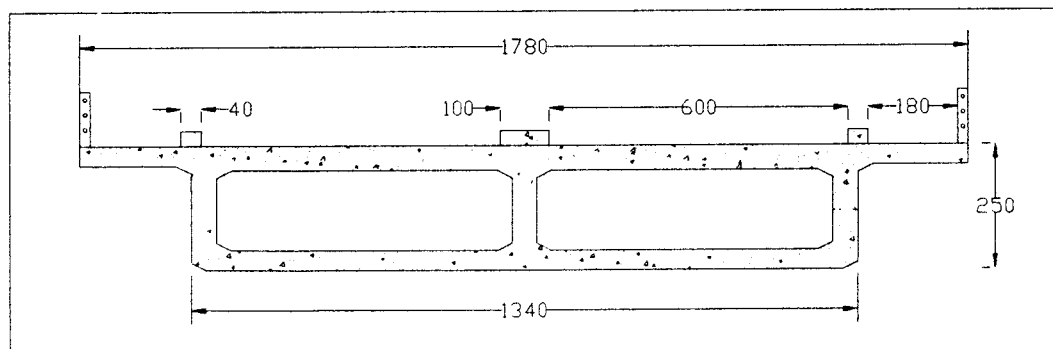


Gambar 4-1 Struktur *cable-stayed bridge* dua bidang kabel *radiating* (satuan dalam meter).

Set material yang digunakan untuk menyusun struktur *cable-stayed bridge* di atas, dapat dilihat secara detail pada gambar 4-2 untuk penampang gelagar, gambar 4-4 untuk penampang kabel, dan untuk detail menara dapat dilihat pada gambar 4-5.

4.2 Penampang Melintang Jembatan

Tahap awal di dalam desain atau biasa disebut *preliminary design* bertujuan untuk menetapkan parameter desain secara umum. Tahap *preliminary design* adalah menetapkan sebuah jembatan yang dapat mengakomodasi lalu-lintas 2 (dua) arah, dan pada setiap arah terdapat 2 (lajur) lalu-lintas jalan raya dan 1 (satu) lajur trotoar. Gelagar jembatan ditetapkan menggunakan *box girder* beton mutu $f'c = 45 \text{ Mpa}$ dengan dimensi sesuai gambar 4-2.



Gambar 4-2 Potongan melintang gelagar *cable-stayed bridge* sebagai *box girder* beton (satuan dalam cm).

Salah satu pertimbangan penting dalam merencanakan struktur gelagar *cable-stayed bridge* adalah kemungkinan terjadinya osilasi terhadap gelagar ketika menerima angin. Efek beban angin yang mengkhawatirkan pada gelagar

jembatan dapat dikurangi dengan merujuk pengalaman Firlz Leonhardt untuk *cable-staycd bridge* dengan sistem kabel dua bidang. Pendekatan tersebut dilakukan dengan memenuhi persamaan sebagai berikut ini.

$$B \geq 10H \dots\dots\dots (4-1)$$

atau

$$B \geq \frac{L}{30} \dots\dots\dots (4-2)$$

dengan:

- B = lebar jembatan
- H = tinggi gelagar
- L = panjang bentangan utama

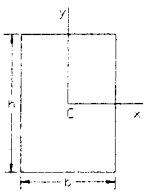

Panjang bentangan utama telah ditentukan sebesar 260 m (gambar 4-1), sehingga didapat rasio ($L/30$) sebesar 8,67 m. Rasio tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai B sebagai 17,8 m (gambar 4-2). Nilai tersebut telah memenuhi salah satu persamaan di atas (persamaan 4-2).

Di dalam model matematis diperlukan suatu parameter sehingga model dapat diselesaikan secara analitis. Parameter yang dibutuhkan di dalam analisis struktur ialah sifat-sifat mekanis elemen. Sifat mekanis suatu elemen di dalam ilmu mekanika bahan memiliki banyak parameter, indeks dan variabel.

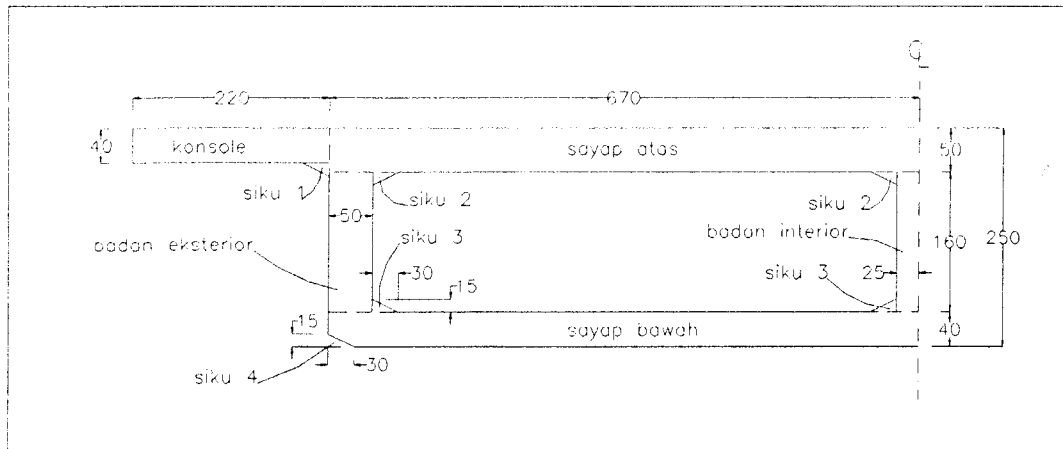
Aplikasi analisis struktur dalam sistem statis tak tentu, secara sederhana dibutuhkan sifat material dalam dua kelompok besar, yaitu; sifat potongan melintang meliputi momen inersia (I), luas penampang (A) dan sifat mekanis material penyusun berupa modulus elastisitas (E).

Struktur *box girder* umumnya mempunyai geometri penampang melintang yang relatif kompleks. Secara garis besar, geometri penampang *box girder* tersebut dapat disederhanakan dengan cara membagi beberapa bagian menjadi bentuk yang lebih sederhana. Pola-pola sederhana tersebut misalnya figur segi empat, segi tiga, lingkaran atau setengah lingkaran. Figur geometri yang lebih sederhana tersebut memungkinkan untuk menghitung sifat-sifat penampang secara keseluruhan dengan lebih mudah. Bentuk geometri yang dipakai dalam perhitungan sifat penampang *box girder* dapat ditabulasikan dalam tabel 4-1 berikut ini.

Tabel 4-1 Bentuk penampang dengan sifat mekanis penampangnya.

Penampang	A (luas)	I (inersia)
	$A = b \times h$	$I_x = \frac{1}{12} \times b \times h^3$
	$A = \frac{1}{2} \times b \times h$	$I_x = \frac{1}{36} \times b \times h^3$

Berdasarkan gambar 4-2 yang merupakan potongan melintang *box girder* secara utuh dan simetris terhadap sumbu vertikal, maka analisis penampang dapat dilakukan dengan setengah potongan terhadap sumbu vertikal seperti gambar 4-3 berikut ini.



Gambar 4-3 Detail ukuran potongan melintang *box girder* yang dibagi menjadi pias-pias untuk menghitung sifat penampang (satuan dalam cm).

Perhitungan sifat penampang *box girder*, diawali dengan menentukan posisi sumbu netral horizontalnya. Sumbu netral mempunyai peran penting dalam perhitungan momen inersia (I) selanjutnya. Perhitungan titik berat penampang berdasarkan setengah potongan seperti pada gambar-4-3, dapat ditabulasikan pada tabel 4-2 berikut ini.

Tabel 4-2 Perhitungan titik berat penampang dihitung dari sisi bawah potongan.

Bagian Box Girder	alas b (cm)	tinggi h (cm)	luas bidang A (cm ²)	lengan y _{box} (cm)	statis momen A·y _{box} (cm ³)
					(4×5)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Konsole	220	40	8.800	230,00	2,024E+06
Sayap atas	670	50	33.500	225,00	7,538E+06
Sayap bawah	670	40	26.800	20,00	5,360E+05
Badan (Int. + Eks.)	75	160	12.000	120,00	1,440E+06
Siku 1	30	15	225	205,00	4,613E+04
Siku 2	30	15	450	195,00	8,775E+04
Siku 3	30	15	450	45,00	2,025E+04
Siku 4	30	15	-225	5,00	-1,125E+03
			82.000	142,57	1,169E+07

Setelah menentukan titik berat penampang, selanjutnya menghitung momen inersia (I) penampang terhadap sumbu netral horizontalnya. Perhitungan ini juga mengacu pada setengah potongan (gambar 4-3). Perhitungan tersebut ditabulasikan dalam tabel 4-3 berikut ini.

Tabel 4-3 Perhitungan momen inersia relatif terhadap garis netral horizontal (sumbu x).

Bagian Box Girder	alas b (cm)	tinggi h (cm)	luas bidang A (cm ²)	lengan y (cm)	momen inersia	
					I _x (cm ⁴)	A·Y ² (cm ⁴)
						(4×5 ²)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Konsole	220	40	8.800	87,4329	1,1733E+06	6,7272E+07
Sayap atas	670	50	33.500	82,4329	6,9792E+06	2,2764E+08
Sayap bawah	670	40	26.800	-122,5671	3,5733E+06	4,0261E+08
Badan (Int. + Eks.)	75	160	12.000	-22,5671	2,5600E+07	6,1113E+06
Siku 1	30	15	225	62,4329	2,8125E+03	8,7702E+05
Siku 2	30	15	450	52,4329	5,6250E+03	1,2371E+06
Siku 3	30	15	450	-97,5671	5,6250E+03	4,2837E+06
Siku 4	30	15	-225	-137,5671	-2,8125E+03	-4,2581E+06
			82.000		3,7337E+07	7,0577E+08
Inersia Box Girder =						7,4311E+08

4.3 Spesifikasi Kabel

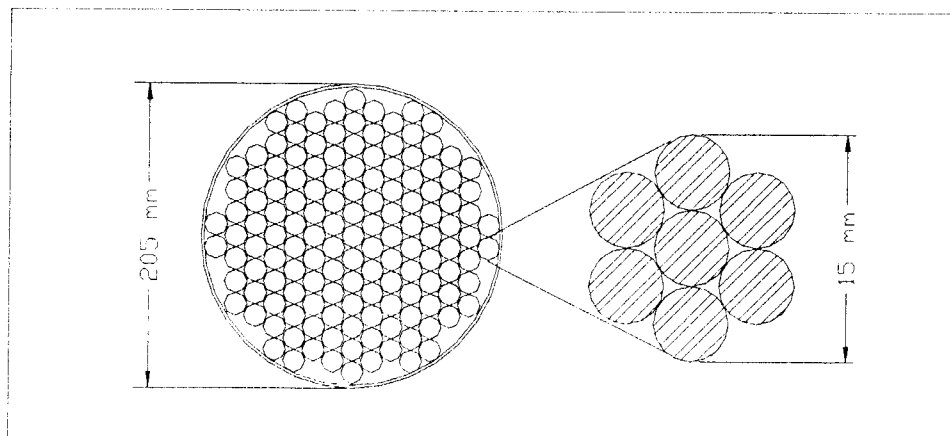
Elemen struktur *cable-stayed bridge* berupa kabel adalah elemen utama yang bekerja sama dengan menara menahan gelagar. Gaya-gaya yang bekerja pada kabel adalah gaya tarik. Kabel yang digunakan dalam aplikasi desain berupa *seven wire strand* yang terdiri dari tujuh buah kawat (*wire*) sesuai dengan spesifikasi *ASTM A416-90a Grade 270* (lihat detail gambar 4-4). *Strand* yang digunakan dalam aplikasi desain berjumlah 140 buah dan difabrikasi menjadi sebuah struktur *rope* (lihat gambar 4-4). Total jumlah *wire* yang digunakan dalam aplikasi desain adalah 980 buah (7×140). *Wire* perlu dilindungi dengan lapisan

seng (Zn) untuk menjamin struktur kabel tidak mengalami kerusakan karena korosi. Spesifikasi kabel berupa *seven wire strand* berdasarkan *ASTM A416-90a* dapat ditabulasikan dalam tabel 4-4 berikut ini.

Tabel 4-4 Spesifikasi kabel *seven wire strand ASTM A416-90a Grade 270*.

Uraian	Satuan Metrik	Satuan Inggris
Diameter nominal	1,524E-02 m	0,6 in
Luas penampang kabel nominal	1,400E-04 m ²	0,217 in ²
Berat nominal	1,102E-03 t/m	0,741 lb/ft
Modulus elastisitas (E)	1,940E+07 t/m ²	28160 ksi
Tegangan leleh (fy)	1,890E+05 t/m ²	270 ksi

Rope sebagai elemen tarik dalam desain *cable-stayed bridge* terdiri dari 140 buah *seven wire strand* yang dapat dilihat pada gambar 4-4.



Gambar 4-4 Potongan melintang struktur *rope* dan *seven-wire strand* spesifikasi *ASTM A416-90a Grade 270*.

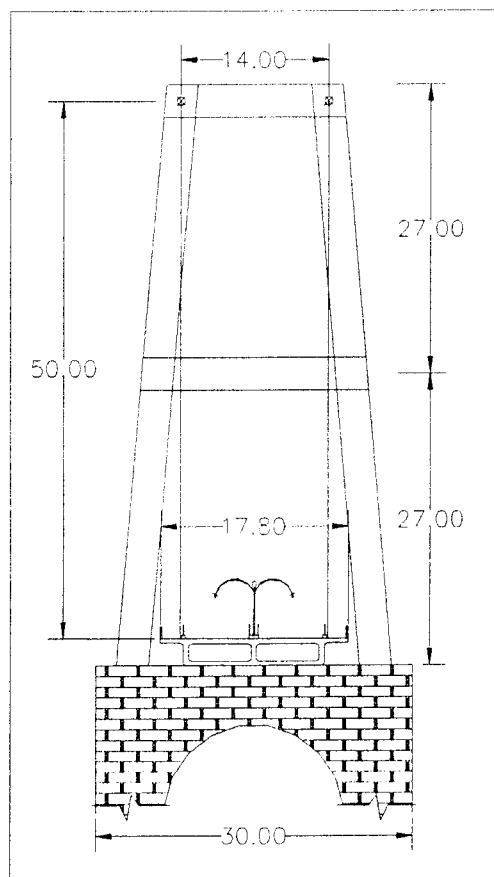
Berdasarkan tabel 4-4 struktur *rope* yang dipakai dalam aplikasi desain memiliki luas penampang nominal dan berat persatuan panjang yang ditabulasikan dalam tabel 4-5 berikut ini.

Tabel 4-5 Spesifikasi struktur *rope* sebagai elemen kabel.

Uraian	Satuan Metrik	Satuan Inggris
Luas penampang kabel nominal	0,0196 m ²	30,38 in ²
Berat nominal	0,1543 t/m	103,74 lb/ft

4.4 *Pylon/ Menara*

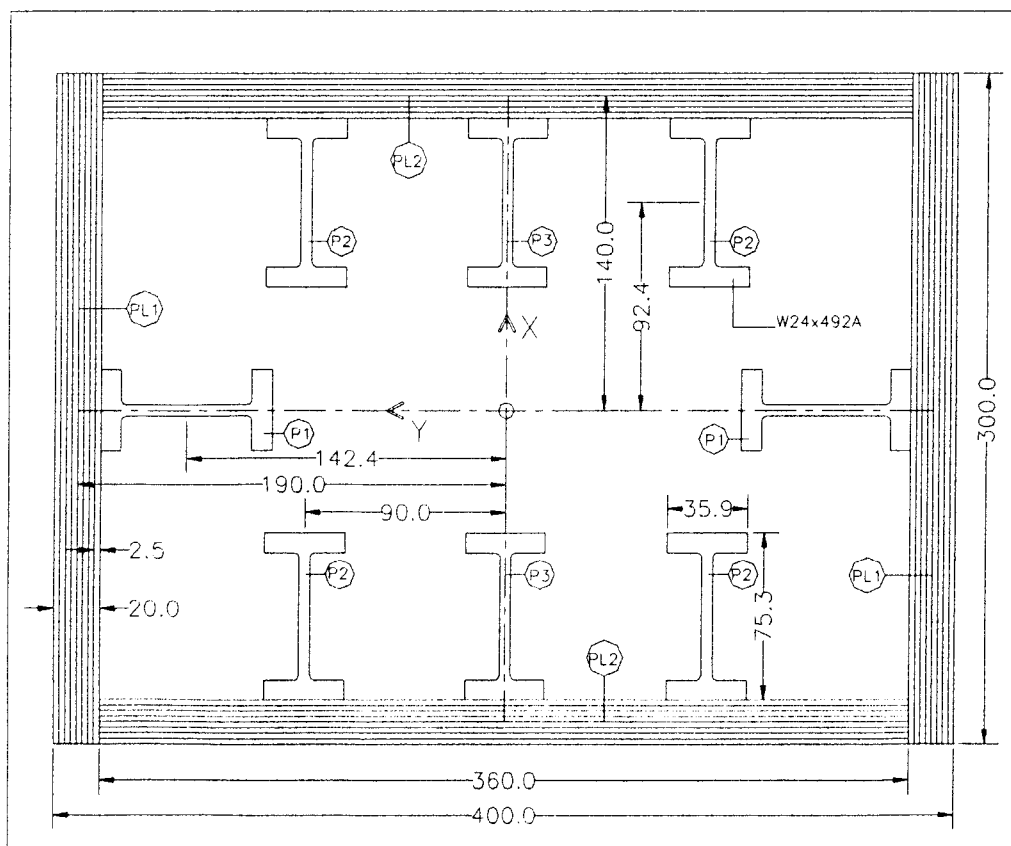
Menara yang dipakai dalam aplikasi adalah rangka portal baja dengan pengaku. Menara dibuat sedemikian hingga posisi kabel tegak lurus terhadap bidang horisontal (lihat gambar 4-5).



Gambar 4-5 *Pylon* berupa rangka baja berpengaku sebagai tumpuan sistem kabel dan menumpu pada *pier*.

Tumpuan menara pada *pier* direncanakan sebagai tumpuan jepit, sehingga pada *joint* tersebut terjadi momen. Momen yang terjadi pada menara dan disertai dengan gaya aksial mengharuskan menara direncanakan sebagai elemen balok-kolom. *Pier* yang mendukung *pylon* dibuat dari material beton $f'c = 35$ Mpa.

Menara sebagai portal berpengaku seperti pada gambar 4-5, disusun menggunakan 8 (delapan) lapis pelat baja dengan $f_y = 50$ ksi. Tebal masing-masing pelat adalah 2,5 cm. Pelat baja disusun membentuk sebuah *box* kemudian diberi pengaku berupa profil W24x492a. Potongan melintang elemen menara dapat dilihat pada gambar 4-6 berikut ini.



Gambar 4-6 Penampang melintang elemen *pylon* yang menggunakan material baja profil dan pelat baja (ukuran dalam cm).

Perhitungan sifat penampang elemen menara dilakukan berdasarkan pada gambar 4-6 di atas dan ditabulasikan dalam tabel 4-6 dan 4-7 berikut ini.

Tabel 4-6 Perhitungan luas penampang *pylon* dan inersia penampang terhadap sumbu kuat (sumbu x).

Elemen	jml. n	inersia I (cm ⁴)	luas bidang A (cm ²)	luas total n·A (cm ²)	lengan y (cm)	momen inersia	
						I _x (cm ⁴)	A·y ² (cm ⁴)
				(2×4)		(2×3)	(4×6 ²)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Profil 1	2	7,950E+05	929	1.858	142,4	1,590E+06	3,768E+07
Profil 2	4	6,951E+04	929	3.716	90,0	2,780E+05	3,010E+07
Profil 3	2	6,951E+04	929	1.858	0,0	1,390E+05	0,000E+00
Pelat 1	2	2,000E+05	6.000	12.000	190,0	4,000E+05	4,332E+08
Pelat 2	2	7,776E+07	7.200	14.400	0,0	1,555E+08	0,000E+00
				33.832		1,579E+08	5,010E+08
Inersia terhadap sumbu kuat =						I _x + A·y ² =	6,5890E+08

Tabel 4-7 Perhitungan luas penampang *pylon* dan inersia penampang terhadap sumbu lemah (sumbu y).

Elemen	jml. n	inersia I (cm ⁴)	luas bidang A (cm ²)	luas total n·A (cm ²)	lengan x (cm)	momen inersia	
						I _y (cm ⁴)	A·x ² (cm ⁴)
				(2×4)		(2×3)	(4×6 ²)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Profil 1	2	6,951E+04	929	1.858	0,0	1,390E+05	0,000E+00
Profil 2	4	7,950E+05	929	3.716	92,4	3,180E+06	3,173E+07
Profil 3	2	7,950E+05	929	1.858	92,4	1,590E+06	1,586E+07
Pelat 1	2	4,500E+07	6.000	12.000	0,0	9,000E+07	0,000E+00
Pelat 2	2	2,400E+05	7.200	14.400	140,0	4,800E+05	2,822E+08
				33.832		9,539E+07	3,298E+08
Inersia terhadap sumbu lemah =						I _y + A·x ² =	4,2522E+08

4.5 Spesifikasi Umum

Bagian struktur *cable-stayed bridge* dapat dibedakan dalam dua kelompok besar, yaitu struktur atas dan struktur bawah. Secara umum, material dasar yang

direncanakan untuk struktur *cable-stayed bridge* adalah sebagai berikut ini.

4.5.1 Struktur Atas

Struktur atas dalam desain ini meliputi struktur yang diperhitungkan dalam analisis struktur. Spesifikasi komponen struktur atas adalah sebagai berikut ini.

1. *Stay cable* berupa struktur *rope* yang terdiri dari 140 buah *seven-wire strand* dengan spesifikasi *ASTM A416-90a Grade 270* diameter nominal *strand* adalah 15,24 mm, $f_y = 189.000 \text{ t/m}^2$.
2. Gelagar menggunakan *box girder* beton segmental $f'c = 45 \text{ mpa}$, dimensi dapat dilihat pada gambar 4-2.
3. *Pylon* berupa susunan pelat-pelat baja yang diberi pengaku baja profil dengan menggunakan material dasar berupa baja mutu $f_y = 35.000 \text{ t/m}^2$ (gambar 4-6).

4.5.2 Struktur Bawah

Struktur bawah dalam desain ini tidak dibahas dalam Tugas Akhir ini. Spesifikasi secara umum komponen struktur bawah dalam perencanaan ditentukan, sebagai berikut ini.

1. *Pier* menggunakan beton bertulang mutu $f'c = 35 \text{ Mpa}$.
2. *Footing* menggunakan beton bertulang mutu $f'c = 35 \text{ Mpa}$.
3. Tiang pancang menggunakan beton bertulang diameter 50 cm dengan material dasar beton mutu $f'c = 50 \text{ Mpa}$.

BAB 5

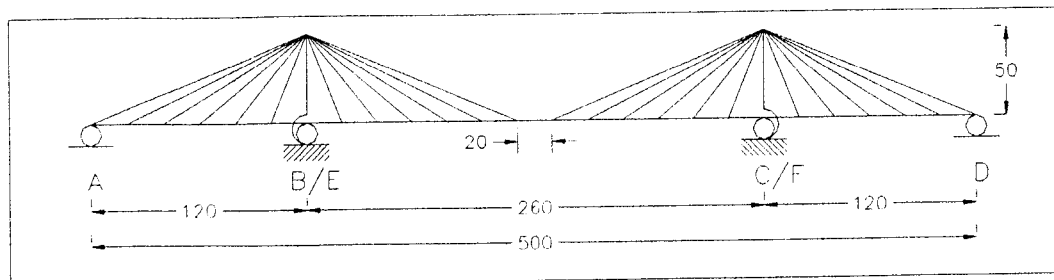
ANALISIS DAN DESAIN

5.1 Pendahuluan

Analisis dan desain struktur *cable-stayed bridge* dilakukan dalam tiga tahapan pokok. Tahapan tersebut ialah sebagai berikut ini.

1. Pemodelan matematis.
2. Analisis yang dilakukan dengan bantuan SAP90™ atau perhitungan biasa.
3. Desain kekuatan elemen.

Tahapan tersebut dilakukan berdasarkan model dasar struktur seperti pada gambar 5-1 berikut ini.



Gambar 5-1 Geometri dasar struktur *cable-stayed bridge* dalam dua dimensi.

Analisis dengan beberapa pemodelan yang dilakukan selanjutnya selalu

berdasar atas model seperti gambar 5-1.

5.2 Identifikasi Elemen Struktur

Identifikasi elemen struktur berdasarkan dimensi elemen dan jenis material yang telah ditentukan sebelumnya. Identifikasi ini sangat penting artinya untuk proses analisis selanjutnya. Dua kriteria dasar yang menentukan identifikasi elemen adalah sebagai berikut ini.

1. Dimensi elemen yang telah ditetapkan dianalisis hingga diperoleh data sifat penampang berupa luas penampang (A) dan momen inersia (I).
2. Jenis material yaitu beton dan baja menentukan nilai modulus elastisitas (E).

Identifikasi elemen struktur yang telah dihitung disajikan dalam tabel 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6 dan 4-7 dapat dirangkum dan ditabulasikan dalam tabel 5-1 berikut ini.

Tabel 5-1 Identifikasi elemen struktur pada model *cable-stayed bridge*.

Elemen	Jenis Material	A_{net} (m^2)	I_x (m^4)	I_y (m^4)	E (ton/m^2)
Kabel	Baja	1,9600E-02	-	-	1,9400E+07
Box Girder	Beton	8,2000E+00	7,4311E+00	-	3,1529E+06
Menara	Baja	1,8674E+00	3,3795E+00	2,3658E+00	2,0000E+07

5.3 Identifikasi Beban

Rencana pembebanan yang diperhitungkan dalam analisis dan desain meliputi beban-beban sebagai berikut:

1. beban mati pada gelagar,

2. beban kendaraan,
3. beban hidup pada trotoar,
4. beban air hujan,
5. beban kejut,
6. beban angin.

Identifikasi beban diperhitungkan berdasarkan setengah potongan melintang penampang jembatan atau pada as-jalan seperti gambar 4-3. Tahapan perhitungan beban tersebut ialah sebagai berikut ini.

1. Beban Mati pada Gelagar

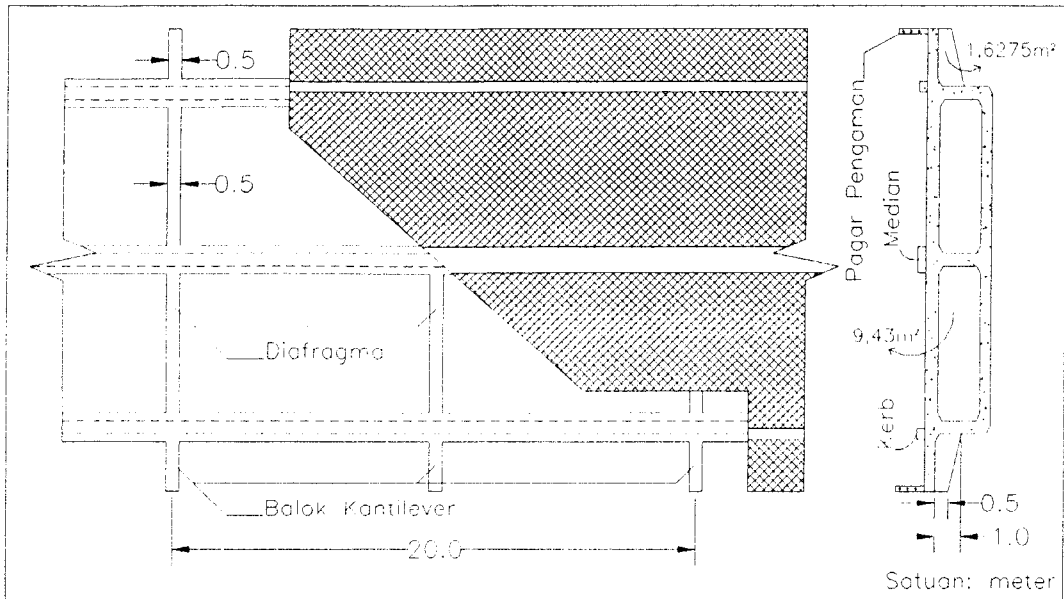
Beban mati pada struktur gelagar adalah beban yang sifatnya tetap dan menjadi bagian dari struktur tersebut selama usianya. Beban mati yang bekerja pada lantai jembatan dibedakan dalam dua tipe yaitu beban mati merata dan terpusat. Beban mati merata yang bekerja pada gelagar dapat ditabulasikan dalam tabel 5-2 berikut ini.

Tabel 5-2 Pehitungan beban mati merata yang bekerja pada gelagar.

Bagian Beban	luas tampang A (m ²)	berat jenis γ (t/m ³)	berat persatuan panjang Q _D (t/m)
Aspal (15 cm)	1,1700	2,25	2,6325
Box Girder	8,2000	2,40	19,6800
Median	0,2000	2,20	0,4400
Kerb	0,1200	2,20	0,2640
Pagar Pengaman			0,0523
			23,0688

Beban mati terpusat yang bekerja pada *box girder* adalah balok kantilever

dan diafragma yang dipasang pada setiap spasi 10 m (lihat gambar 5-2).



Gambar 5-2 Denah posisi diafragma, balok kantilever dan potongan melintang jembatan.

Beban mati terpusat yang bekerja pada gelagar dapat ditabulasikan dalam tabel 5-3 berikut ini.

Tabel 5-3 Perhitungan beban mati terpusat.

Struktur	A (m ²)	t (m)	V (m ³)	P (ton)
Diafragma	9,43	0,5	4,715	11,316
Balok Kantilever	1,6275	0,5	0,814	1,953
				13,269

2. Beban Kendaraan

Beban kendaraan direncanakan berdasarkan rekomendasi dari ASCE tentang beban pada jembatan bentangan panjang (lihat tabel 3-6). Beban hidup rencana diperoleh dengan cara interpolasi panjang bentangan utama ke dalam

tabel 3-6. Interpolasi nilai 260 m ke dalam nilai 244 m dan 488 m dapat dihasilkan beban merata (Q) sebesar 13,89 kN/m dan beban terpusat (P) sebesar 434 kN. Jembatan direncanakan dalam 2 (dua) lajur, maka nilai-nilai tersebut dikalikan dua.

$$QL_1 = 2 \cdot 13,89 = 27,78 \text{ kN/m} = 2,778 \cdot t/m$$

$$PL = 2 \cdot 434 = 868 \text{ kN} = 86,8 \cdot t$$

3. Beban Hidup Pada Trotoar

Beban hidup yang bekerja pada trotoar diperhitungkan menurut standar Binamarga sebesar 0,500 t/m². Jika lebar trotoar adalah 1,8 m, maka beban merata tersebut adalah 0,900 t/m.

$$QL_2 = 1,8 \cdot 0,5 = 0,9 \cdot t/m$$

4. Beban Air Hujan

Beban air hujan diasumsikan sebagai genangan air sedalam 2,5 cm pada permukaan lantai jembatan. Apabila berat jenis air γ_w adalah 1,0 t/m³, dan lebar setengah lantai jembatan adalah 8 m (lihat gambar 4-3), maka besar beban tersebut adalah 0,200 t/m.

$$QL_3 = 0,025 \cdot 8 \cdot 1,0 = 0,2 \cdot t/m$$

5. Beban Kejut atau Efek Dinamis dari Beban Hidup

Efek dinamis dari beban hidup diperhitungkan menurut spesifikasi Binamarga sebagai berikut ini.

$$I = \frac{20}{50 + L} \dots\dots\dots 5-1$$

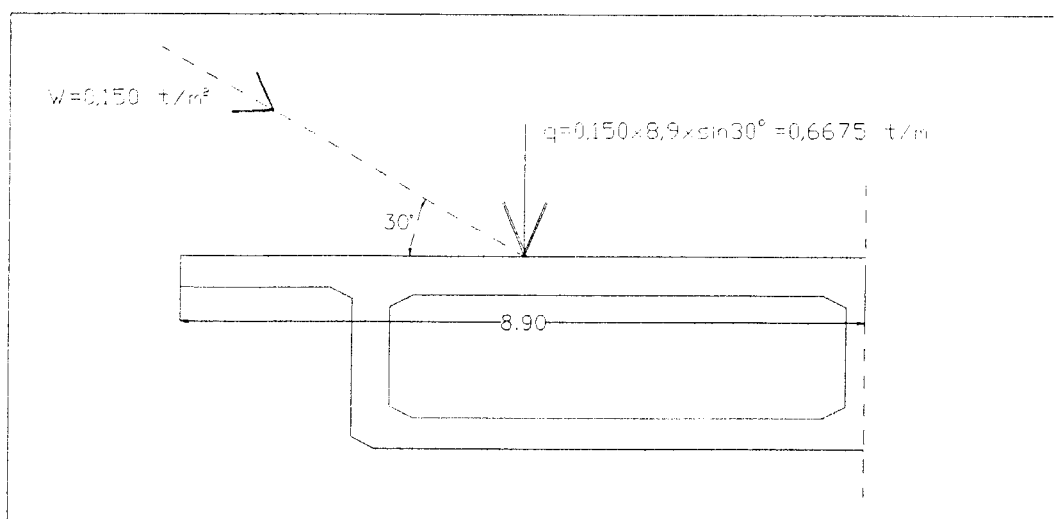
dengan L panjang beban (m).

Jika $L = 260$ m, maka diperoleh koefisien kejut I sebesar 0,06.

Koefisien kejut (I) tersebut dikalikan dengan beban hidup yang bekerja kemudian ditambahkan dengan beban hidup tersebut. Hasil penjumlahan dua nilai tersebut merupakan beban hidup rencana yang bekerja pada gelagar.

6. Beban Angin

Beban angin yang bekerja diperoleh dari tekanan angin yang ditetapkan sebesar $0,150 \text{ t/m}^2$ dari arah samping dengan sudut elevasi 30° . Arah angin dengan elevasi tersebut memberikan efek gaya lateral dan vertikal pada gelagar. Meskipun demikian, beban angin yang diperhitungkan hanya gaya vertikal saja. Ilustrasi dari gaya tersebut, dapat dilihat pada gambar 5-3 berikut ini.



Gambar 5-3 Gaya tekan angin yang berkerja pada gelagar dengan sudut elevasi 30°

5.4 Analisis dan Desain Kabel

Analisis dan desain kabel pada *cable-stayed bridge* dibedakan dalam dua tahap pemodelan struktur. Pemodelan struktur pertama untuk menganalisis beban tetap (mati) yang bekerja, dan pemodelan struktur yang kedua untuk menganalisis beban hidup yang bekerja. Beban-beban yang bekerja pada model mengacu pada identifikasi beban yang telah dilakukan sebelumnya. Identifikasi beban tersebut dapat dirangkum dalam tabel 5-4 berikut ini.

Tabel 5-4 Identifikasi beban rencana pada struktur *cable-stayed bridge*.

ID	Jenis Beban	Q/P	Satuan	Ket.	Distribusi
QD1	beban mati merata	23,0688	ton/m	Tabel 5-2	sepanjang gelagar
PD	beban mati terpusat	13,2690	ton	Tabel 5-3	setiap spasi 10 m
QL1	beban kendaraan	2,7780	ton/m	5-4 (2)	sepanjang gelagar
QL2	beban hidup trotoar	0,9000	ton/m	5-4 (3)	sepanjang gelagar
QL3	beban air hujan	0,2000	ton/m	5-4 (4)	sepanjang gelagar
QL4	$I = 0,06 \times (LL1 + LL2)$	0,2207	ton/m	5-4 (5)	sepanjang gelagar
QL5	beban angin	0,6675	ton/m	5-4 (6)	sepanjang gelagar
PL	beban hidup terpusat	86,8000	ton	5-4 (2)	tengah bentangan utama

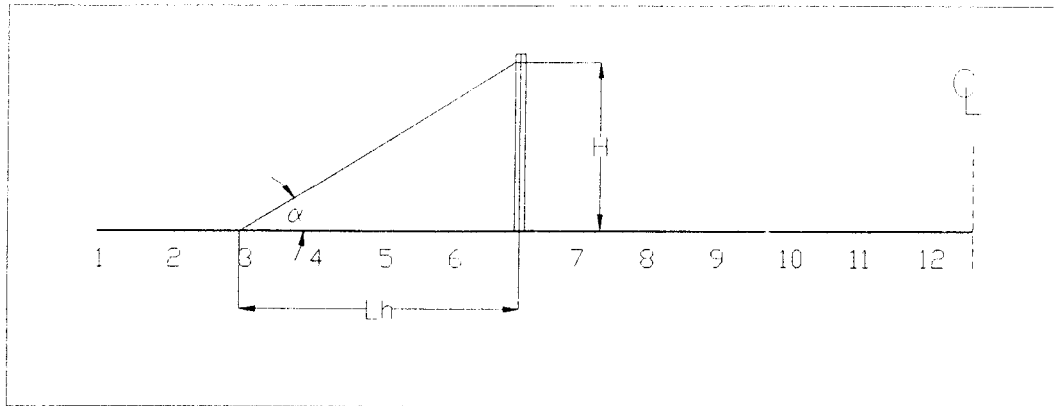
5.4.1 Analisis dan Desain Kabel Terhadap Beban Mati

Analisis dan desain kabel terhadap beban mati dilakukan dalam beberapa tahap perhitungan yaitu sebagai berikut ini.

1. Menghitung koefisien pegas vertikal mula-mula.
2. Menganalisis anjakan pada pegas dengan SAP90™.
3. Menghitung panjang kabel terkoreksi.
4. Menghitung koreksi pegas vertikal.

Analisis dan desain kabel yang ditampilkan berdasarkan setengah panjang

total jembatan seperti gambar 5-4 berikut ini.



Gambar 5-4 Setengah panjang total jembatan dan penomoran kabel.

1 Menghitung Koefisien Pegas Vertikal Awal

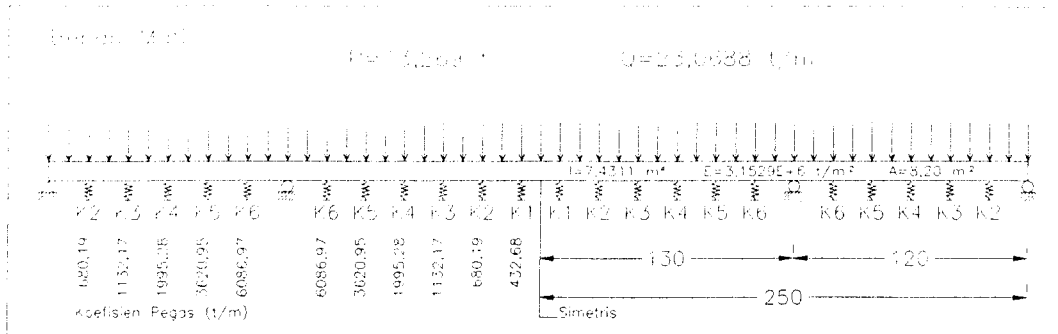
Perhitungan kekakuan kabel vertikal dilakukan untuk mendapatkan koefisien pegas vertikal. Perhitungan lengkap dapat dilihat dalam tabel 5-5. Rumus-rumus yang digunakan dalam memperhitungkan koefisien pegas adalah sebagai berikut ini.

$$\alpha^{\circ} = \arcsin \frac{H}{L_0} \quad (\text{sudut inklinasi kabel}) \dots\dots\dots (5-2)$$

$$L_0 = \sqrt{(L_h)^2 + (H)^2} \quad (\text{panjang kabel mula-mula}) \dots\dots\dots (5-3)$$

$$k_v = \frac{EA}{L_0} \cdot \sin^2 \alpha \quad (\text{koefisien pegas vertikal awal}) \dots\dots\dots (5-4)$$

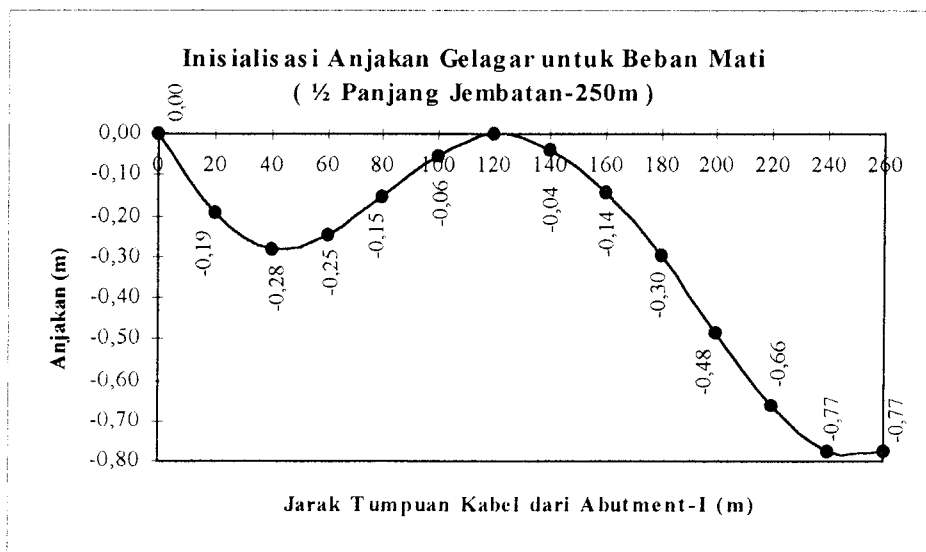
Hasil perhitungan dari persamaan (5-2), (5-3) dan (5-4) ditabulasikan dalam tabel 5-5. Hasil perhitungan koefisien pegas vertikal dijadikan sebagai model matematis seperti gambar 5-5 berikut ini.



Gambar 5-5 Model matematis dengan koefisien pegas.

2 Analisis Anjakan

Model gambar 5-5 sebagai masukan dan diproses dalam SAP90™. Anjakan sebagai keluaran diperhitungkan pada setiap titik kabel atau setiap spasi 20 m. Grafik anjakan gelagar tersebut dapat dilihat pada gambar 5-6 berikut ini.



Gambar 5-6 Grafik anjakan pada model gambar 5-5 untuk setengah panjang jembatan.

Anjakan yang terjadi seperti pada gambar 5-6 dapat dilihat dalam tabulasi tabel 5-5.

3 Menghitung Koreksi Panjang Kabel

Koreksi panjang kabel diperlukan untuk menghilangkan anjakan vertikal akibat beban mati seperti gambar 5-6. Rumus yang digunakan untuk mendapatkan koreksi panjang kabel adalah sebagai berikut ini.

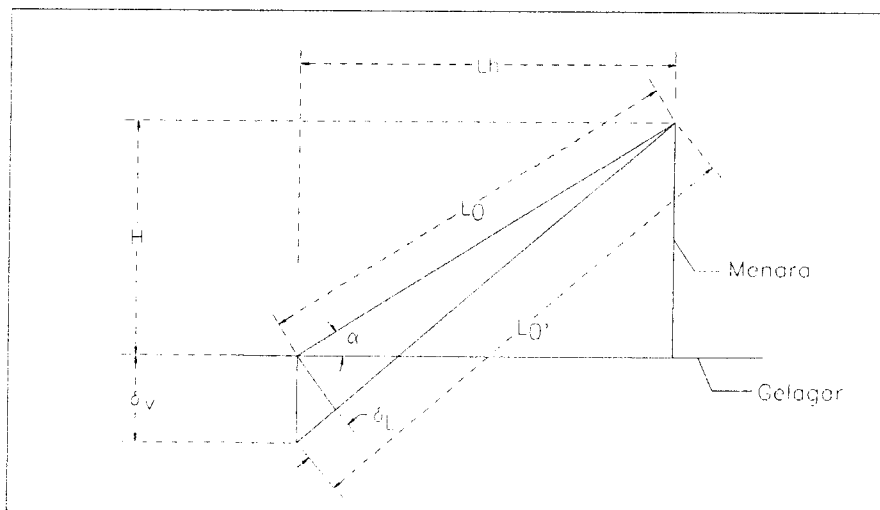
$\delta_v = \text{Output SAP90}^{\text{TM}}$ (anjakan vertikal pada titik kabel)

$$L_0' = \sqrt{(Lh)^2 + (H + \delta_v)^2} \text{ (pemanjangan kabel)..... (5-5)}$$

$$\delta_L = L_0' - L_0 \text{ (koreksi panjang kabel)..... (5-6)}$$

$$L_1 = L_0 - \delta_L \text{ (panjang kabel terkoreksi)..... (5-7)}$$

Notasi rumus dapat diperjelas dengan ilustrasi gambar 5-7 berikut ini.



Gambar 5-7 Anjakan gelagar δ_v , deformasi kabel δ_L dan kabel memanjang menjadi L_0' .

Tiga tahapan analisis kabel yaitu:

1. perhitungan koefisien pegas vertikal mula-mula (k_v),
2. analisis anjakan pada pegas dengan SAP90TM,

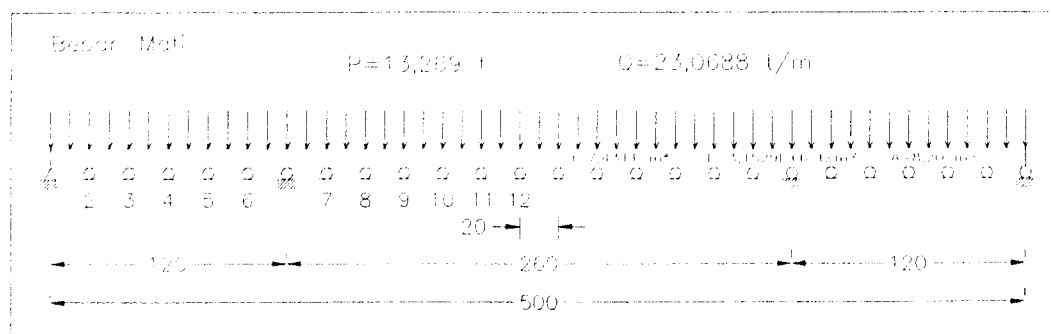
3. perhitungan panjang kabel terkoreksi ($L1$) dapat ditabulasikan dalam tabel 5-5 berikut ini.

Tabel 5-5 Tabel koreksi panjang kabel terhadap beban mati

No. Kbl.	Lh (m)	α ($^\circ$) (5-2)	Lo (m) (5-3)	kv (t/m) (5-4)	δv (m) SAP90™	Lo' (m) (5-5)	δL (m) (5-6)	L1 (m) (5-7)
1	120	23	130,00		0,00			
2	100	27	111,80	680,19	0,19	111,89	0,09	111,72
3	80	32	94,34	1.132,17	0,28	94,49	0,15	94,19
4	60	40	78,10	1.995,28	0,25	78,26	0,16	77,94
5	40	51	64,03	3.620,95	0,15	64,15	0,12	63,91
6	20	68	53,85	6.086,97	0,06	53,90	0,05	53,80
7	20	68	53,85	6.086,97	0,04	53,89	0,04	53,81
8	40	51	64,03	3.620,95	0,14	64,14	0,11	63,92
9	60	40	78,10	1.995,28	0,30	78,29	0,19	77,91
10	80	32	94,34	1.132,17	0,48	94,60	0,26	94,08
11	100	27	111,80	680,19	0,66	112,10	0,30	111,51
12	120	23	130,00	432,68	0,77	130,30	0,30	129,70

4 Menghitung Koreksi Pegas Vertikal (kv')

Perhitungan koefisien pegas vertikal terkoreksi dilakukan berdasarkan panjang kabel terkoreksi ($L1$). Pemberian koreksi panjang kabel menyebabkan anjakan akibat beban mati menjadi 0 (nol) seperti gambar 5-8 berikut ini.



Gambar 5-8 Distribusi beban merata dan beban terpusat pada jenis beban mati.

Perhitungan reaksi tumpuan gambar 5-8 untuk mendapatkan komponen gaya vertikal kabel (T_v) diperoleh dengan cara menjumlahkan beban mati merata dan mati terpusat yang berada pada $\frac{1}{2}$ jarak kiri dan $\frac{1}{2}$ jarak kanan tumpuan. Apabila T_v telah diperoleh maka gaya tarik kabel dapat dihitung dan selanjutnya dapat diperoleh modulus elastisitas ekuivalen (E_{eq}). Perhitungan koreksi koefisien pegas dilakukan setelah diperoleh modulus elastisitas ekuivalen (E_{eq}). Tahapan perhitungan koreksi koefisien pegas vertikal berdasarkan urutan rumus-rumus sebagai berikut ini.

$$Th = \frac{T_v}{\tan \alpha} \text{ (komponen horisontal gaya tarik kabel)..... (5-8)}$$

$$T = \frac{T_v}{\sin \alpha} \text{ (gaya tarik kabel)..... (5-9)}$$

$$\sigma_T = \frac{T}{A_{net}} \text{ (tegangan tarik kabel)..... (5-10)}$$

$$R = \frac{\sigma_T}{f_y} \text{ (rasio tegangan } f_y=189.000 \text{ t/m}^2\text{)..... (5-11)}$$

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \left\langle \frac{(W \cdot Lh)^2 A \cdot E}{12 \cdot T^3} \right\rangle} \text{ (modulus elastisitas ekuivalen) (5-12)}$$

W = berat kabel persatuan panjang

$$k_v' = \frac{E_{eq} A}{L_1} \cdot \sin^2 \alpha \text{ (koefisien pegas vertikal terkoreksi) (5-13)}$$

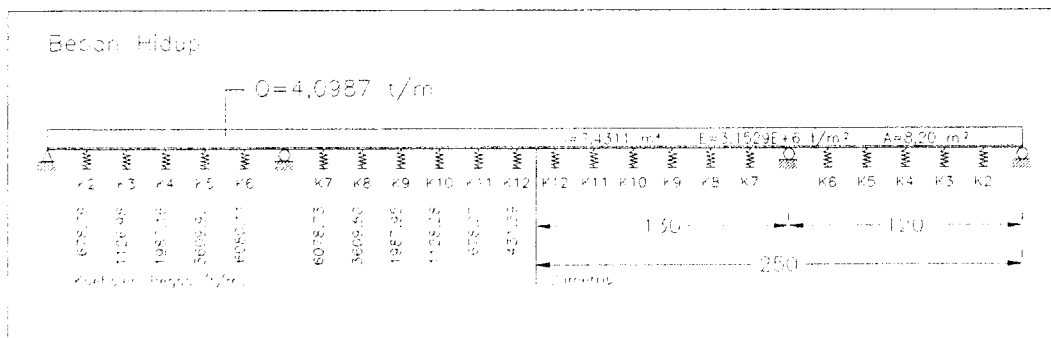
Perhitungan koreksi pegas vertikal berdasarkan model gambar 5-8 dapat ditabulasikan sebagai tabel 5-6 berikut ini.

Tabel 5-6 Hasil perhitungan gaya tarik kabel (T) akibat beban mati.

No. Kbl.	T_v (t) Reaksi tump.	T_h (t) (5-8)	T (t) (5-9)	σ_1 (t/m ²) (5-10)	Rasio teg. (5-11)	E_{eq} (t/m ²) (5-12)	kv' (t/m) (5-13)
1	487,91	1.170,99	1.268,58	64.723,29	34,25%		
2	487,91	975,83	1.091,01	55.663,72	29,45%	19.287.979	676,79
3	487,91	780,66	920,59	46.969,10	24,85%	19.280.713	1.126,98
4	487,91	585,50	762,15	38.885,00	20,57%	19.281.742	1.987,16
5	487,91	390,33	624,83	31.879,33	16,87%	19.304.505	3.609,92
6	487,91	195,17	525,50	26.811,20	14,19%	19.359.753	6.080,11
	2.927,48						
7	487,91	195,17	525,50	26.811,20	14,19%	19.359.753	6.078,73
8	487,91	390,33	624,83	31.879,33	16,87%	19.304.505	3.609,50
9	487,91	585,50	762,15	38.885,00	20,57%	19.281.742	1.987,95
10	487,91	780,66	920,59	46.969,10	24,85%	19.280.713	1.128,28
11	487,91	975,83	1.091,01	55.663,72	29,45%	19.287.979	678,07
12	487,91	1.170,99	1.268,58	64.723,29	34,25%	19.297.339	431,39
	2.927,48						

5.4.2 Analisis Kabel Terhadap Beban Hidup

Pemodelan struktur untuk analisis kabel terhadap beban hidup dilakukan dengan koefisien pegas (*springs*) vertikal terkoreksi. Pemodelan tersebut dapat dilihat pada gambar 5-9 berikut ini.



Gambar 5-9 Distribusi beban hidup merata untuk analisis gelagar dalam desain struktur kabel.

Model gambar 5-9 sebagai masukan dalam SAP90™ dan memberikan

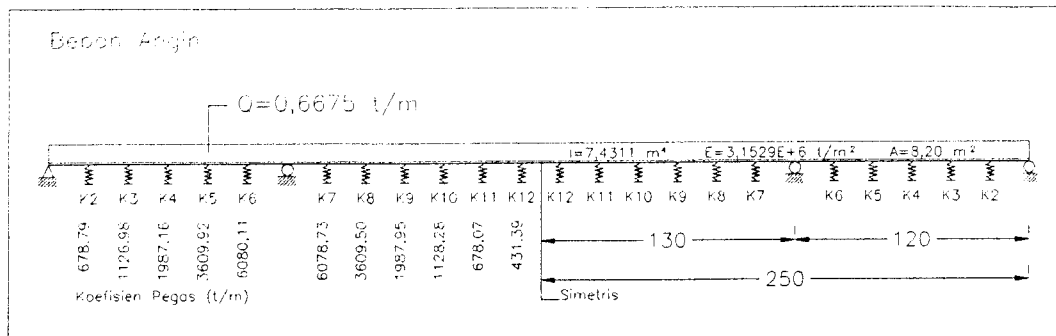
keluaran berupa reaksi tumpuan vertikal pada pegas. Tumpuan vertikal pegas merupakan komponen vertikal gaya tarik kabel (T_v). Perhitungan selengkapnya dapat ditabulasikan dalam tabel 5-7 berikut ini.

Tabel 5-7 Gaya tarik kabel pada tipe beban hidup

No. Kbl.	α (α°) (5-2)	T_v (ton) SAP90™	T_h (ton) (5-8)	T (ton) (5-9)	σ_T (ton/m ²) (5-10)	Rasio Teg. (5-11)
1	22,62					
2	26,57	22,21	44,42	49,66	2.533,6	1,34%
3	32,01	53,05	84,89	100,10	5.107,2	2,70%
4	39,81	83,10	99,72	129,81	6.622,9	3,50%
5	51,34	93,84	75,07	120,17	6.131,4	3,24%
6	68,20	56,36	22,54	60,70	3.097,0	1,64%
		308,56	326,64			
7	68,20	42,90	17,16	46,20	2.357,2	1,25%
8	51,34	88,13	70,50	112,86	5.758,0	3,05%
9	39,81	99,30	119,16	155,12	7.914,1	4,19%
10	32,01	91,82	146,92	173,25	8.839,2	4,68%
11	26,57	75,65	151,30	169,15	8.630,3	4,57%
12	22,62	56,29	135,10	146,36	7.467,2	3,95%
		454,09	640,13			

5.4.3 Analisis Kabel Terhadap Beban Angin

Model matematis beban angin memiliki model yang sama dengan model beban hidup tetapi keduanya memiliki nilai beban yang berbeda. Beban angin diperhitungkan berasal dari arah samping dengan sudut elevasi 30° menuju lantai jembatan. Pada arah tersebut menyebabkan gelagar menerima dua buah gaya sebagai gaya horisontal dan vertikal. Analisis gaya tarik kabel terhadap beban angin hanya diperhitungkan pada arah gaya yang vertikal saja. Gaya tersebut bekerja secara merata sepanjang gelagar seperti gambar 5-10 berikut ini.



Gambar 5-10 Distribusi beban angin arah vertikal pada gelagar.

Analisis kabel terhadap beban angin dari model matematis gambar 5-10 dapat ditabulasikan dalam tabel 5-8 berikut ini.

Tabel 5-8 Gaya tarik kabel akibat beban angin

No. Kbl.	α (α°)	Tv (ton)	Th (ton)	T (ton)	σ_T (ton/m ²)	Rasio Teg. (%)
	(5-2)	SAP90 TM	(5-8)	(5-9)	(5-10)	(5-11)
1	22,62					
2	26,57	3,62	7,23	8,09	412,6	0,22%
3	32,01	8,64	13,82	16,30	831,7	0,44%
4	39,81	13,53	16,24	21,14	1.078,6	0,57%
5	51,34	15,28	12,23	19,57	998,5	0,53%
6	68,20	9,18	3,67	9,89	504,4	0,27%
		50,25	53,20			
7	68,20	6,99	2,79	7,52	383,9	0,20%
8	51,34	14,35	11,48	18,38	937,7	0,50%
9	39,81	16,17	19,41	25,26	1.288,9	0,68%
10	32,01	14,95	23,93	28,21	1.439,5	0,76%
11	26,57	12,32	24,64	27,55	1.405,5	0,74%
12	22,62	9,17	22,00	23,84	1.216,1	0,64%
		73,95	104,25			

5.5 Analisis dan Desain Gelagar

Analisis gelagar sebagai acuan dalam desain gelagar memiliki kesamaan seperti dalam analisis gelagar untuk desain kabel. Analisis tersebut dibedakan

dalam pemodelan sebagai berikut:

1. gelagar dengan tumpuan *roll* untuk beban mati,
2. gelagar dengan tumpuan pegas untuk beban angin/ hidup.

Analisis struktur gelagar dimaksudkan untuk mencari gaya-gaya yang bekerja padanya sehingga dapat dijadikan pedoman dalam desain kekuatan gelagar. Analisis ini sudah menyertakan faktor beban menurut ketentuan AASHTO. Faktor beban diberikan pada blok data *combo* sebagai masukan SAP90™. Kombinasi beban yang dipakai adalah sebagai berikut:

$$C_1 = 1,3D + 2,86L \text{ (kombinasi 1)..... (5-14)}$$

$$C_2 = 1,3D + 1,3L + 0,39W \text{ (kombinasi 2)..... (5-15)}$$

Dua macam kombinasi faktor beban yang dirumuskan dalam persamaan (5-14) dan (5-15) hanya dipilih salah satu yang menghasilkan gaya maksimal. Faktor beban yang diberikan pada beban mati pada dua kombinasi tersebut memiliki nilai yang sama sehingga faktor beban yang menentukan pilihan adalah beban hidup dan angin. Perhitungan untuk menentukan pemilihan faktor beban adalah sebagai berikut ini.

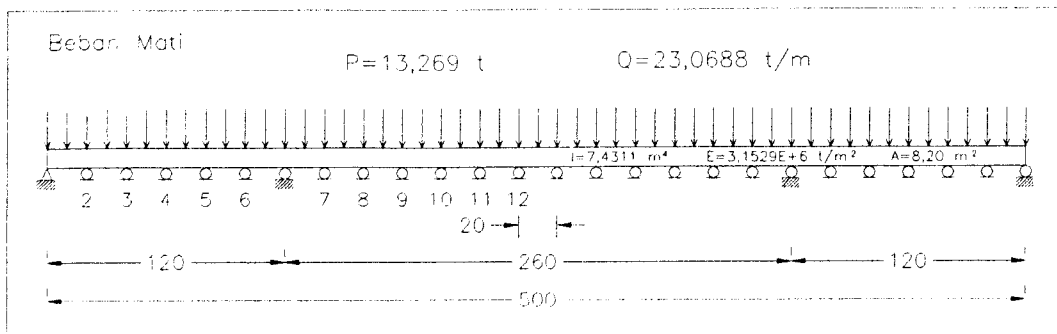
$$C_1 = 2,86 \times 4,0987 \cdot t / m = 11,72 \cdot t / m \text{(menentukan)}$$

$$C_2 = 1,3 \times 4,0987 \cdot t / m + 0,39 \times 0,6675 \cdot t / m = 5,59 \cdot t / m$$

Dari perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa beban angin yang bekerja pada struktur gelagar seperti model gambar 5-10 tidak diperhitungkan dalam analisis gelagar atau dengan kata lain beban yang menentukan dalam analisis gelagar adalah beban mati dan beban hidup.

5.5.1 Analisis Beban Mati

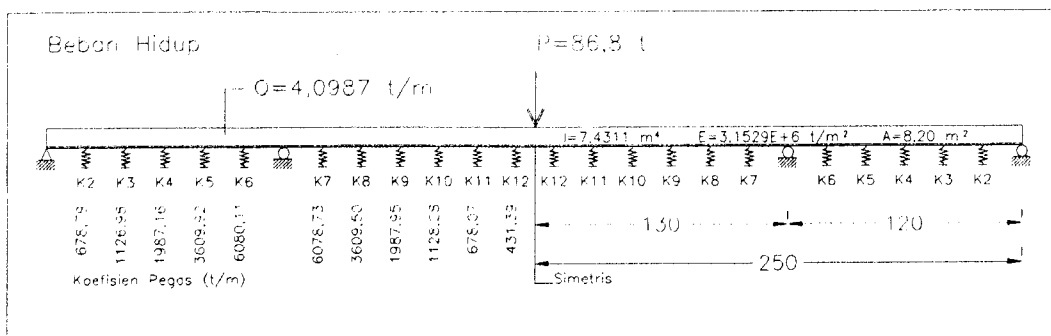
Analisis gelagar terhadap beban mati merujuk kepada model seperti gambar 5-11. Data-data yang tertera pada model gambar 5-11 dijadikan sebagai masukan untuk SAP90™.



Gambar 5-11 Model gelagar dengan beban mati.

5.5.2 Analisis Beban Hidup

Analisis gelagar terhadap beban hidup merujuk kepada model seperti gambar 5-12. Data-data yang tertera pada model gambar 5-12 dijadikan sebagai masukan untuk SAP90™.



Gambar 5-12 Model gelagar dengan beban hidup merata dan terpusat.

Hasil analisis model gambar 5-11 dan 5-12 dapat dilihat secara lengkap dalam lampiran. Secara ringkas gaya yang bekerja dalam gelagar sebagai acuan desain dapat ditabulasikan dalam tabel 5-9 berikut ini.

Tabel 5-9 Gaya ultimit sebagai acuan desain gelagar.

Tipe Beban Ultimit	Momen Max		Geser Max		Momen Max		Geser Max	
	250 tm	PIER tm	240 ton	250 ton	250 Nmm	PIER Nmm	240 N	250 N
PL	2.947	90	124	-124	2,947E+10	9,000E+08	1,240E+06	-1,240E+06
QL	3.611	-3.904	117	0	3,611E+10	-3,904E+10	1,170E+06	0,000E+00
DL	573	-1.042	309	-9	5,730E+09	-1,042E+10	3,090E+06	-8,630E+04
	7.131	-4.856	550	-133	7,131E+10	-4,856E+10	5,500E+06	-1,326E+06

5.5.3 Desain Gelagar

Desain gelagar diperhitungkan dalam setengah potongan melintang jembatan seperti pada gambar 4-3. Momen lentur dan gaya geser rencana diambil dari tabel 5-9. Prosedur desain gelagar adalah sebagai berikut ini.

$$f_c = 45 \cdot \text{mpa} \dots\dots\dots (\text{kuat desak beton})$$

$$f_y = 400 \cdot \text{mpa} \dots\dots\dots (\text{tegangan luluh baja tulangan})$$

$$h = 2500 \cdot \text{mm} \dots\dots\dots (\text{tinggi gelagar})$$

1 Desain Kapasitas Lentur

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f_c} = \frac{400}{0,85 \cdot 45} = 10,4575$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008 \cdot (f_c - 30) = 0,85 - 0,008 \cdot (45 - 30) = 0,73$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f_c \cdot \beta_1}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \dots\dots\dots (\text{rasio tulangan seimbang})$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot 45 \cdot 0,73}{400} \times \frac{600}{600 + 400} = 0,0419$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0419 = 0,0314$$

$$Mu = 7,131 \cdot 10^{10} \cdot N \cdot mm \dots\dots\dots (\text{Momen Positif Ultimit})$$

$$b = 8900 \cdot mm$$

$$d = 2500 - 40 - 16 - 25 - 0,5 \cdot 30 = 2.404 \cdot mm \dots\dots\dots (\text{tinggi efektif gelagar})$$

$$Rn = \frac{Mu}{0,8 \cdot b \cdot d^2} = \frac{7,131 \cdot 10^{10}}{0,8 \cdot 8900 \cdot 2.404^2} = 1,7330$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot Rn}{f_y}} \right) = \frac{1}{10,458} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 10,458 \cdot 1,733}{400}} \right) = 0,0044$$

$$\rho_{\min} < \rho_{\text{perlu}} < \rho_{\max} \dots\dots\dots \text{dipakai rasio tulangan perlu}$$

$$A_{S_{\text{perlu}}} = \rho_{\text{perlu}} \cdot b \cdot d = 0,0044 \cdot 8900 \cdot 2.404 = 94.898 \cdot mm^2$$

$$\text{Jumlah Tulangan} = \frac{A_{S_{\text{perlu}}}}{A_{\text{Ø25}}} = \frac{94.898}{490,87} \approx 194 \dots (\text{jumlah tulangan tersedia dua lapis})$$

$$A_S = 194 \cdot 490,87 = 95.230 \cdot mm^2 \dots\dots\dots (\text{luas tulangan tersedia})$$

Kontrol:

$$a = \frac{A_S \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{95.230 \cdot 400}{0,85 \cdot 45 \cdot 8900} = 111,9 \cdot mm < \text{tebal pelat atas} = 400 \cdot mm$$

$$Mn = A_S \cdot f_y \cdot (d - 0,5 \cdot a)$$

$$Mn = 95.230 \cdot 400 \cdot (2.404 - 0,5 \cdot 111,9) = 8,91 \cdot 10^{10} \cdot Nmm > Mu \dots\dots\dots \text{OK}$$

$$Mu = 4,856 \cdot 10^{10} \cdot N \cdot mm \dots\dots\dots (\text{Momen Negatif Ultimit})$$

$$b = 6.700 \cdot mm$$

$$d = 2500 - 40 - 16 - 0,5 \cdot 25 = 2.431,5 \cdot mm \dots\dots\dots (\text{tinggi efektif gelagar})$$

$$Rn = \frac{Mu}{0,8 \cdot b \cdot d^2} = \frac{4,856 \cdot 10^{10}}{0,8 \cdot 6.700 \cdot 2.431,5^2} = 1,532$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot Rn}{f_y}} \right) = \frac{1}{10,458} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 10,458 \cdot 1,532}{400}} \right) = 0,0029$$

$$\rho_{min} < \rho_{perlu} < \rho_{max} \dots\dots\dots (\text{dipakai rasio tulangan perlu})$$

$$A_{S_{perlu}} = \rho_{perlu} \cdot b \cdot d = 0,0029 \cdot 6.700 \cdot 2.431,5 = 63.381 \cdot mm^2$$

$$\text{Jumlah Tulangan} = \frac{A_{S_{perlu}}}{A_{\emptyset 25}} = \frac{63.381}{490,87} \approx 130 \dots\dots\dots (\text{jumlah tulangan tersedia})$$

$$A_S = 130 \cdot 490,87 = 63.814 \cdot mm^2 \dots\dots\dots (\text{luas tulangan tersedia})$$

Kontrol:

$$a = \frac{A_S \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{63.814 \cdot 400}{0,85 \cdot 45 \cdot 6.700} = 74,98 \cdot mm < \text{tebal pelat bawah} = 400 \cdot mm$$

$$Mn = A_S \cdot f_y \cdot (d - 0,5 \cdot a)$$

$$Mn = 63.814 \cdot 400 \cdot (2.431,5 - 0,5 \cdot 74,98) = 6,07 \cdot 10^{10} \cdot Nmm > Mu \dots\dots\dots (\text{OK})$$

$$Vu = 5,500 \cdot 10^6 \cdot N \dots\dots\dots (\text{Geser Ultimit})$$

$$Vc = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{45} \cdot 750 \cdot 2.404 = 2,016 \cdot 10^6 \cdot N$$

$$Vs = \frac{Vu}{\phi} - Vc = \frac{5,500 \cdot 10^6}{0,6} - 2,016 \cdot 10^6 = 7,152 \cdot 10^6 \cdot N$$

$$A_{v(\varnothing 16)} = 6 \cdot 201,1 = 1.206,6 \cdot \text{mm}^2$$

$$s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s} = \frac{1.206,6 \cdot 400 \cdot 2.431,5}{7,128 \cdot 10^6} \approx 160 \cdot \text{mm}$$

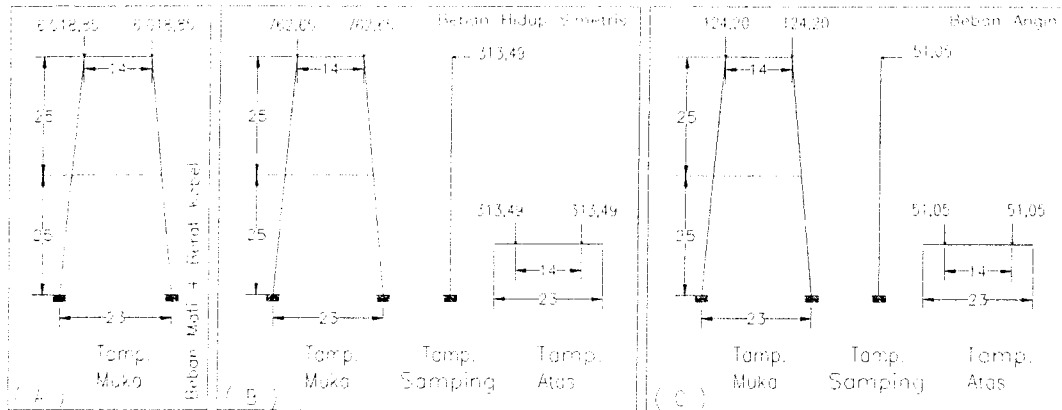
5.6 Analisis dan Desain Menara

Gaya tarik kabel memberikan pengaruh gaya eksternal pada menara. Konfigurasi kabel yang direncanakan dengan tipe *radiating* menyebabkan resultan gaya vertikal dan horisontal memiliki satu titik tangkap dan bekerja pada koneksi kabel-menara. Resultan gaya horisontal (RTh) dan vertikal (RTv) diperoleh dari tabel 5-6 untuk beban mati, tabel 5-7 untuk beban hidup dan tabel 5-8 untuk beban angin. Gaya tersebut dapat ditabulasikan dalam tabel 5-10 berikut ini.

Tabel 5-10 Perhitungan gaya eksternal yang bekerja pada menara.

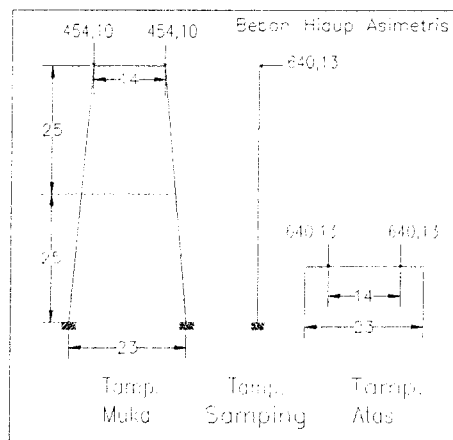
No. Kbl.	Gaya Vertikal				Gaya Horisontal	
	Pv-mati (ton)	Pv-kabel (ton)	Pv-hidup (ton)	Pv-angin (ton)	Ph-hidup (ton)	Ph-angin (Ton)
1	487,91	19,99				
2	487,91	17,24	22,21	3,62	44,42	7,23
3	487,91	14,53	53,05	8,64	84,89	13,82
4	487,91	12,03	83,10	13,53	99,72	16,24
5	487,91	9,86	93,84	15,28	75,07	12,23
6	487,91	8,30	56,36	9,18	22,54	3,67
R1	2.927,48	81,94	308,56	50,25	326,64	53,20
7	487,91	8,30	42,90	6,99	17,16	2,79
8	487,91	9,86	88,13	14,35	70,50	11,48
9	487,91	12,03	99,30	16,17	119,16	19,41
10	487,91	14,53	91,82	14,95	146,92	23,93
11	487,91	17,24	75,65	12,32	151,30	24,64
12	487,91	19,99	56,29	9,17	135,10	22,00
R2	2.927,48	81,94	454,09	73,95	640,13	104,25
ΣR	(R1+R2) 5854,96	(R1+R2) 163,89	(R1+R2) 762,65	(R1+R2) 124,20	(R2-R1) 313,49	(R2-R1) 51,05

Resultan gaya vertikal dan horisontal pada tabel 5-10 dapat dibentuk sebagai sebuah model struktur seperti gambar 5-13 berikut ini.



Gambar 5-13 Model struktur menara dengan beban vertikal dan horisontal.

Resultan gaya yang bekerja pada menara juga diperhitungkan dari beban hidup asimetris pada gelagar. Beban asimetris tersebut diperhitungkan sebagai beban hidup merata yang hanya bekerja pada bentangan utama. Gaya tersebut dapat diperoleh berdasarkan tabel 5-10 yaitu sebagai gaya R2. Model menara untuk pembebanan hidup asimetris dapat dilihat pada gambar 5-14 berikut ini.



Gambar 5-14 Resultan gaya pada menara akibat beban hidup asimetris pada gelagar.

Berdasarkan beban terfaktor pada persamaan (5-14) dan (5-15) maka perlu ditentukan kombinasi beban yang memberikan efek maksimal. Perhitungan tersebut adalah sebagai berikut ini.

$$\Sigma V_1 = 1,3 \cdot 6.018,85 + 2,86 \cdot 762,65 = 10.005,68 \cdot t \dots\dots\dots(\text{menentukan})$$

$$\Sigma V_2 = 1,3 \cdot 6.018,85 + 1,3 \cdot 762,65 + 0,39 \cdot 124,20 = 8.864,39 \cdot t$$

$$\Sigma H_1 = 1,3 \cdot 0 + 2,86 \cdot 313,49 = 896,58 \cdot t \dots\dots\dots(\text{menentukan})$$

$$\Sigma H_2 = 1,3 \cdot 0 + 1,3 \cdot 313,49 + 0,39 \cdot 51,05 = 427,45 \cdot t$$

Hasil analisis struktur model gambar 5-13a, 5-13b dan 5-14 dapat dilihat secara lengkap dalam lampiran. Secara ringkas hasil analisis struktur menara dapat ditabulasikan dalam tabel 5-11 berikut ini.

Tabel 5-11 Hasil analisis struktur sebagai gaya internal maksimal pada menara.

Beban Ultimit	Aksial ton	Mom x ton·m	Mom y ton·m	Keterangan
1,3DL+2,86LL	10.722	47.958	198	Beban hidup simetris
1,3DL+2,86LL	9.836	97.927	207	Beban hidup asimetris

Perhitungan kekuatan menara berdasarkan penampang menara yang sudah ditetapkan seperti pada gambar 4-6. Perhitungan sifat penampang berupa nilai inersia (I) dan luas penampang (A) dapat dilihat kembali dalam tabel 4-6 dan 4-7. Perhitungan sifat penampang yang lain adalah modulus penampang plastis sebagai dasar dalam menentukan kapasitas lentur palstis. Perhitungan modulus penampang plastis tersebut dapat dilihat pada tabel 5-12 dan 5-13.

Desain menara mengacu pada peraturan AISC-LRFD dengan faktor beban berdasarkan AASHTO. Hasil analisis struktur menara seperti yang terangkum di

dalam tabel 5-11 dijadikan sebagai acuan perhitungan desain kekuatan menara.

Tabel 5-12 Perhitungan modulus penampang plastis sumbu-x berdasar gambar 4-6.

	n jml.	A cm ²	y cm	Zx cm ³
Profil 1	2	144×2,54 ² = 929	142,4	2×929×142,4 = 2,6459E+05
Profil 2	4	144×2,54 ² = 929	90	4×929×90 = 3,3445E+05
Profil 3	2	144×2,54 ² = 929	0	2×375×2,54 ³ = 1,2290E+04
Pelat 1	2	300×20 = 6000	190	2×6.000×190 = 2,2800E+06
Pelat 2	2	360×20 = 7200	0	2×¼×20×360 ² = 1,2960E+06
				ΣZx = 4,1873E+06

Tabel 5-13 Perhitungan modulus penampang plastis sumbu-y berdasar gambar 4-6.

	n jml.	A cm ²	x cm	Zy cm ³
Profil 1	2	144×2,54 ² = 929	0	2×375×2,54 ³ = 1,2290E+04
Profil 2	4	144×2,54 ² = 929	92,4	4×929×92,4 = 3,4337E+05
Profil 3	2	144×2,54 ² = 929	92,4	2×929×92,4 = 1,7168E+05
Pelat 1	2	300×20 = 6000	0	2×¼×20×300 ² = 9,0000E+05
Pelat 2	2	360×20 = 7200	140	2×7.200×140 = 2,0160E+06
				ΣZy = 3,4433E+06

Perhitungan kekuatan menara berdasarkan gaya dalam seperti pada tabel 5-11 dan sifat penampang seperti yang tercantum dalam tabel 4-6, 4-7, 5-12 dan 5-13 dapat diikuti dalam tahapan sebagai berikut ini.

$$f_y = 35.000 \cdot t / m^2 \dots\dots\dots (\text{tegangan luluh baja})$$

$$E = 2 \times 10^7 \cdot t / m^2 \dots\dots\dots (\text{modulus elastisitas baja})$$

$$\lambda_p = \frac{5.000}{\sqrt{f_y}} = \frac{5.000}{\sqrt{35.000}} = 26,73 \dots\dots\dots (\text{batasan penampang kompak})$$

$$\frac{b}{t} = \frac{1,30 \cdot m}{0,2 \cdot m} = 6,5 \dots\dots\dots (\text{rasio lebar takberpengaku terhadap tebal sayap})$$

$$\frac{b}{t} < \lambda_p \dots\dots\dots (\text{penampang kompak})$$

$$K = 2.1 \dots\dots\dots (\text{asumsi})$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{23-14}{2}\right)^2 \times (50)^2} = 50,20 \cdot m \dots\dots\dots (\text{panjang elemen menara})$$

$$L_b = 1/2 \cdot 50,20 = 25,10 \cdot m \dots\dots\dots (\text{jarak lateral bracing})$$

$$\lambda_c = \frac{K \cdot l}{r_y \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{2,1 \cdot 25,10}{1,1210 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{35 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^6}} = 0,6259$$

$$\lambda_c = \frac{K \cdot l}{r_x \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{2,1 \cdot 50,20}{1,3956 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{35 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^6}} = 1,0055 \dots\dots\dots (\text{menentukan})$$

$$\lambda_c \leq 1,5 \text{ maka}$$

$$F_{cr} = (0,658^{\lambda_c^2}) \cdot F_y = (0,658^{1,0055^2}) \cdot 35 \cdot 10^3 = 22.924 \cdot t / m^2$$

$$P_n = A_g \cdot F_{cr} = 3,3832 \cdot 22.924 = 77.558 \cdot t \dots\dots\dots (\text{kuat desak nominal})$$

$$M_{nx} = Z_x \cdot F_y = 4,1873 \times 35 \cdot 10^3 = 146.556 \cdot t \cdot m \dots\dots (\text{kuat lentur nominal-kuat})$$

$$M_{ny} = Z_y \cdot F_y = 3,4433 \times 35 \cdot 10^3 = 120.516 \cdot t \cdot m \dots\dots (\text{kuat lentur nominal-lemah})$$

Kontrol Terhadap Beban Hidup Simetris

$$\frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} = \frac{11.722}{0,85 \cdot 77.558} = 0,1626$$

$$\frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} < 0,2 \text{ maka } \frac{P_u}{2 \cdot \phi_c \cdot P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1,0$$

$$\frac{11.722}{2 \cdot 0,85 \cdot 44.558} + \frac{47.958}{0,9 \cdot 146.556} + \frac{198}{0,9 \cdot 120.516} = 0,45 \leq 1,0 \dots\dots\dots (\text{OK})$$

Kontrol Terhadap Beban Hidup Asimetris

$$\frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} = \frac{9.836}{0,85 \cdot 77.558} = 0,1492$$

$$\frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} < 0,2 \quad \text{maka} \quad \frac{P_u}{2 \cdot \phi_c \cdot P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1,0$$

$$\frac{9.836}{2 \cdot 0,85 \cdot 44.558} + \frac{97.927}{0,9 \cdot 146.556} + \frac{207}{0,9 \cdot 120.516} = 0,82 \leq 1,0 \dots\dots\dots(\text{OK})$$

BAB 6

PEMBAHASAN

6.1 Pendahuluan

Struktur *cable-stayed bridge* terdiri dari tiga komponen penting yaitu kabel, menara dan gelagar. Tiga komponen tersebut dirangkai menjadi sebuah struktur *cable-stayed bridge* dengan konfigurasi yang ditentukan dalam *preliminary design*. Sifat hubungan elemen kabel terhadap gelagar dan menara adalah sebagai hubungan fleksibel. Antara gelagar dan menara tidak terdapat suatu hubungan yang bersifat struktural karena gelagar hanya melewati menara atau secara sederhana gelagar menumpu pada *pier*. Kondisi tersebut memungkinkan struktur dianalisis secara terpisah.

Analisis struktur dilakukan dengan mengambil model gelagar sebagai komponen yang menentukan terhadap analisis kabel dan menara. Gelagar dimodelkan dalam kondisi yang berbeda sesuai dengan fungsi tujuan dari model tersebut.

Desain geometri sebagai tahap awal diperlukan untuk menyediakan parameter/ variabel yang dibutuhkan dalam analisis struktur. Setelah analisis

struktur dilakukan maka dapat diperoleh gaya-gaya yang bekerja dalam komponen struktur. Gaya-gaya tersebut sebagai acuan dalam memperhitungkan desain kekuatan komponen struktur jembatan. Tahapan-tahapan tersebut secara lengkap dan urut dapat dilihat pada diagram alir yang terdapat dalam Lampiran A.

6.2 Pembebanan

Beban hidup yang menjadi pertimbangan dalam tulisan ini merupakan beban hidup merata yang bekerja sepanjang bentangan penuh. Analisis struktur jembatan dengan prosedur pembebanan semacam itu tidak dapat menjamin diperoleh efek gaya yang maksimal. Prosedur pembebanan yang umum dilakukan dalam analisis jembatan ialah dengan menggunakan metode garis pengaruh. Garis pengaruh merupakan prosedur sistematis untuk menentukan variasi gaya pada bagian struktur tertentu terhadap posisi beban yang berbeda (sebagai beban berjalan). Dengan garis pengaruh, maka dapat ditentukan posisi beban yang memberikan efek gaya maksimal pada bagian struktur yang ditinjau.

Diagram garis pengaruh momen seperti pada Lampiran G berfungsi untuk menentukan posisi beban merata sehingga dapat memberikan efek momen maksimal pada titik tertentu. Momen maksimal tersebut dapat berupa momen positif atau momen negatif. Dengan melihat garis pengaruh momen gelagar, maka dapat ditentukan posisi beban merata yang memberikan efek momen maksimal. Posisi beban untuk mendapatkan momen negatif maksimal dapat ditentukan dengan memberikan beban merata mulai stasiun 2 sampai dengan stasiun 11. Posisi beban tersebut memberikan momen negatif maksimal terjadi

pada tumpuan. Satu hal lagi, posisi beban untuk mendapatkan momen positif maksimal dapat ditentukan dengan memberikan beban merata mulai stasiun 11 sampai dengan stasiun 15. Posisi beban tersebut memberikan nilai momen positif maksimal terjadi pada stasiun 13.

6.3 Struktur Kabel

Analisis struktur kabel terhadap beban mati dapat dilihat dalam sub bab 5.4.1 halaman 56. Analisis terhadap beban mati mengacu pada model gambar 5-5 dan 5-6. Hasil analisis tersebut ditabulasikan dalam tabel 5-5 dan 5-6. Di dalam perhitungan tersebut terdapat sebuah variasi koefisien pegas vertikal meskipun kabel direncanakan dengan luasan penampang yang seragam. Variasi tersebut terjadi karena pada satu menara dipasang lebih dari satu pasang kabel sehingga ada perbedaan panjang kabel. Selain itu perbedaan sudut kemiringan kabel terhadap gelagar (sudut inklinasi) sebagai konsekuensi dari susunan kabel tipe *radiating*. Akibatnya sudut inklinasi kabel yang lebih besar memberikan efektifitas kabel dalam menahan gaya vertikal. Efektifitas dalam menahan gaya vertikal ditandai dengan nilai koefisien pegas vertikal yang lebih besar. Kabel yang lebih pendek juga memberikan nilai kekakuan kabel yang lebih besar dibanding kabel yang lebih panjang. Nilai-nilai tersebut membentuk kecenderungan koefisien pegas yang semakin kecil apabila kabel dihubungkan pada gelagar yang semakin jauh dari menara. Kenyataan tersebut dapat dirasionalisasi seperti dalam persamaan 5-4.

Selain kekakuan kabel, kekakuan gelagar juga memberikan tambahan

kekakuan sistem sehingga anjakan dapat dikurangi apabila kekakuan gelagar ditingkatkan. Terdapat perbedaan sifat material antara kabel dan gelagar yang memberikan kekakuan sistem. Kabel berperan sebagai kekakuan aksial yang dipengaruhi oleh modulus elastisitas kabel dan luas penampang kabel. Gelagar berperan sebagai kekakuan lentur yang dipengaruhi oleh modulus elastisitas gelagar dan momen inersia. Secara garis besar apabila empat parameter tersebut ditingkatkan nilainya, maka besarnya anjakan dapat dikurangi.

Nilai maksimal gaya tarik kabel terhadap beban mati dapat dicapai pada posisi kabel yang paling jauh dari menara atau kabel terluar. Gaya tarik kabel mempunyai hubungan terbalik terhadap nilai sinus sudut inklinasi. Sifat dari konfigurasi tipe *radiating* adalah memberikan sudut inklinasi kabel yang semakin kecil apabila kabel semakin jauh dari posisi menara. Posisi kabel dengan sudut inklinasi terkecil juga memberikan nilai sinus terkecil. Nilai maksimal pada posisi tersebut dapat dicapai karena penerapan konfigurasi kabel tipe *radiating*.

Analisis struktur kabel terhadap beban hidup dan angin dapat dilihat dalam sub bab 5.4.2 halaman 62 dan sub bab 5.4.3 halaman 63. Analisis kabel terhadap beban hidup dan angin mengacu pada model gambar 5-9 dan 5-10. Hasil analisis ditabulasikan dalam tabel 5-7 dan 5-8. Reaksi pegas diperoleh dari keluaran SAP90™ dan dijadikan sebagai masukan untuk analisis gaya tarik kabel. Dua model tersebut memiliki kesamaan nilai koefisien pegas dan distribusi beban merata. Perbedaan terletak pada intensitas beban dengan beban hidup lebih besar dari beban angin.

Perbedaan posisi gaya tarik maksimal kabel antara model sebagai tumpuan *roll* dan model sebagai tumpuan pegas terletak pada distribusi reaksi vertikal yang diberikan pada masing-masing tumpuan. Pada tumpuan *roll*, gaya reaksi relatif konstan tetapi pada tumpuan pegas terjadi variasi reaksi pegas. Semakin kaku koefisien pegas maka semakin besar reaksi yang terjadi. Selain pengaruh variasi kekakuan kabel, efek konfigurasi kabel tipe *radiating* juga memberikan potensi gaya tarik kabel yang semakin besar pada sudut kemiringan kabel yang terkecil.

Reaksi vertikal pegas mengalami kecenderungan semakin besar apabila semakin dekat dengan menara. Kecenderungan tersebut diakibatkan karena koefisien pegas yang semakin besar (kaku) apabila semakin dekat dengan menara. Meskipun demikian potensi gaya tarik kabel mengalami kecenderungan meningkat apabila semakin jauh dari menara atau pada sudut inklinasi terkecil. Dari dua parameter tersebut, maka terdapat posisi optimal sehingga gaya tarik kabel bekerja secara maksimal. Posisi optimal dari analisis dalam tabel 5-7 dan 5-8 tersebut memberikan gaya tarik maksimal pada kabel dengan nomor 10.

6.4 Struktur Gelagar

Analisis gelagar terhadap beban hidup pada tumpuan pegas memberikan momen yang jauh lebih besar dibanding analisis terhadap beban mati pada tumpuan *roll*. Potensi momen yang besar terhadap gelagar pada tumpuan pegas disebabkan adanya derajat penurunan pada tumpuan tersebut. Nilai penurunan pegas (anjakan pada titik kabel) berbanding terbalik terhadap kekakuan pegas vertikal dan kekakuan gelagar. Koefisien pegas vertikal atau identik dengan

kekakuan kabel memiliki hubungan terbalik terhadap momen yang terjadi pada gelagar. Hubungan tersebut dapat dicermati dalam analisis struktur gelagar pada tumpuan pegas dan *roll*. Apabila kekakuan pegas vertikal ditingkatkan yaitu dengan cara menambah luasan kabel, maka momen yang terjadi pada gelagar akibat beban hidup dapat berkurang. Atas dasar hubungan tersebut maka, satu hal yang dapat dijadikan sebagai alasan untuk mengurangi tinggi gelagar adalah dengan menambah kekakuan kabel dan atau mengurangi spasi kabel.

Hasil analisis gelagar terhadap baban hidup dalam Lampiran D dapat dijadikan sebagai acuan desain. Apabila dicermati hasil tersebut, maka posisi momen maksimal positif ditentukan oleh beban hidup terpusat dan posisi momen maksimal negatif ditentukan oleh beban hidup merata. Momen gelagar yang ditimbulkan oleh beban hidup dapat memberikan nilai yang signifikan. Momen tersebut dijadikan sebagai dasar dalam perhitungan tulangan pokok yang hasilnya dapat dilihat pada Lampiran H.

6.5 Struktur Menara

Analisis dan desain menara terhadap beban hidup menngacu pada model gambar 5-13 dan gambar 5-14. Pada model gambar 5-13b, beban hidup diperhitungkan secara merata pada seluruh bentangan sehingga beban hidup bekerja secara simetris terhadap menara. Beban hidup untuk model gambar 5-14 diberikan pada bentangan utama saja sehingga beban hidup bekerja secara asimetris terhadap menara.

Dari hasil analisis struktur menara, maka dapat dilihat bahwa gaya aksial

BAB 7

SIMPULAN DAN SARAN

7.1 Simpulan

Analisis dan desain struktur *cable-stayed bridge* dengan konfigurasi kabel *radiating* dua bidang dapat disimpulkan antara lain sebagai berikut ini.

1. Gaya tarik kabel akibat beban mati memiliki rasio tegangan terbesar 34,25% (periksa tabel 5-6).
2. Gaya tarik kabel akibat beban hidup memiliki rasio tegangan terbesar 4,68% (periksa tabel 5-7).
3. Gaya tarik kabel akibat beban angin memiliki rasio tegangan terbesar 0,76% (periksa tabel 5-8).

Total rasio tegangan yang terjadi terhadap tegangan luluh kabel dari tiga tipe beban di atas adalah 39,69%. Batasan rasio dari tegangan kabel yang terjadi terhadap tegangan luluh kabel adalah tidak lebih dari 56,18%, sehingga spesifikasi tersebut sudah memenuhi kriteria keamanan sebagai komponen tarik *cable-stayed bridge*.

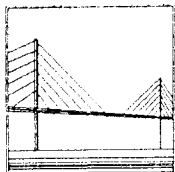
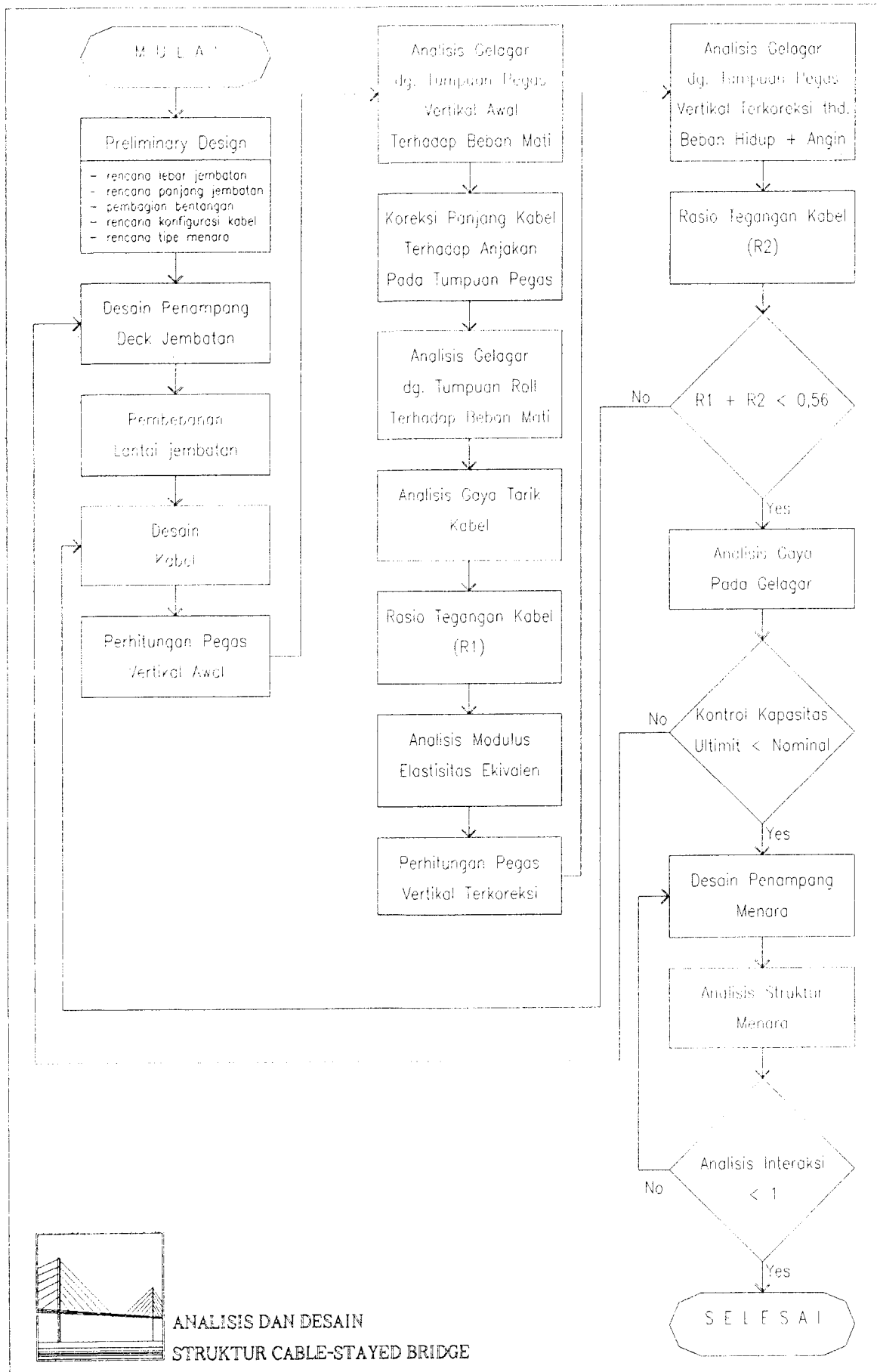
7.2 Saran

Beberapa hal lain yang tidak termasuk dalam bahasan tugas akhir ini dan perlu menjadi pertimbangan adalah sebagai berikut ini.

1. Perhitungan koefisien pegas sebagai tumpuan gelagar selain dari kekakuan kabel, untuk lebih teliti sebaiknya juga memperhitungkan parameter kekakuan menara sebagai pertimbangan.
2. Analisis beban dinamik gempa perlu diperhitungkan dalam beberapa *mode shape* getaran.
3. Fleksibilitas yang tinggi memungkinkan terjadinya osilasi karena pengaruh gaya angin sehingga perlu dilakukan uji terowongan angin.
4. Meskipun *box girder* memiliki resistensi torsi yang relatif tinggi, maka bukan berarti gaya torsi dapat diabaikan. Torsi yang terjadi pada gelagar akibat pembebanan hidup asimetris sisi kiri/ kanan jembatan, efek dinamis angin dan beban dinamis gempa, perlu dikontrol untuk menjamin keamanan *box girder*.
5. Analisis struktur terhadap beban hidup berjalan pada gelagar jembatan dengan menggunakan metode garis pengaruh perlu dilakukan untuk mendapatkan efek gaya yang maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T.D. Ahuja & G.S. Birdi, *Roads, Railways, Bridges and Tunnels Engineering*, Standart Book House, 1993.
- [2] Conrad P. Heins & Richard A. Lawrie, *Design of Modern Concrete Highway Bridges*, Wiley Interscience, 1984.
- [3] Petros P. Xanthakos. *Theory and Design of Bridges*, Wiley Interscience,
- [4] Podolny & J.B. Scalzi. *Construction and Design of Cable-Stayed Bridges*, John Wiley and Sons, 1986.
- [5] Decky Priambodo K., ir & Mustaszir, ir. *Penerapan Desain Khusus pada Pembangunan Jembatan Panjang di Kepulauan Riau*, Makalah Teknik Desain & Pelaksanaan Vol. 1, DPU.
- [6] Iwan Zarkasi, ir, M Eng.Sc & Sefra Rosliansyah, Ir. *Perkembangan Akhir Jembatan Cable-Stayed*, Makalah Teknik Desain & Pelaksanaan Vol. 1, DPU.
- [7] Susumu Fukunaga, *Efek Gempa Kobe Terhadap Jembatan Akashi Kaikyo*, Konferensi Regional Teknik Jalan Ke-5, Yogyakarta, 22-24 September 1997.



ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR CABLE-STAYED BRIDGE

```
ANALISIS GELAGAR CABLE-STAYED BRIDGE
C FILE: "C:\SKRIPSI\ANALYSIS\DL"
C KONFIGURASI BENTANGAN 120-260-120
C ANALISIS GELAGAR TERHADAP BEBAN MATI PADA TUMPUAN PEGAS
C UNITS METER-TON
C INISIALISASI KABEL
SYSTEM
L=2
JOINTS
1      X=0      Y=-250      Z=0
26     Y=250      Z=0      G=1,26,1

RESTRAINTS
1,26,1  R=1,0,0,0,1,1 :MODEL 2D PADA BIDANG YZ
1       R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-ABUTMENT A1
7       R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-PIER P2
20      R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-PIER P3
26      R=1,1,1,0,1,1 :SENDI-ABUTMENT A4

SPRINGS
2,25,23 K=0,0,680.19 :K2 LIHAT MODEL GAMBAR 5-5 HALAMAN 58
3,24,21 K=0,0,1132.17 :K3
4,23,19 K=0,0,1995.28 :K4
5,22,17 K=0,0,3620.95 :K5
6,21,15 K=0,0,6086.97 :K6
8,19,11 K=0,0,6086.97 :K6
9,18,9  K=0,0,3620.95 :K5
10,17,7 K=0,0,1995.28 :K4
11,16,5 K=0,0,1132.17 :K3
12,15,3 K=0,0,680.19 :K2
13,14,1 K=0,0,432.68 :K1

FRAME
NM=1 NL=2
1 I=7.4311 A=8.2000 E=3.1529E+6 :BOX GIRDER BETON 45 MPA
1 WG=0,0,-23.0688 :BERAT SENDIRI GIRDER
2 PLD=0,-13.2690,0,10,-13.2690 :DIAFRAGMA+BALOK KONSOLE
C DECK LINE
1,1,2 G=24,1,1,1 M=1 NSL=1,2 LP=3

COMBO
1 C=1,1

SELECT
NT=1 ID=1,13,1 :ANJAKAN PADA JOINT 1 S/D 13
```

SHOLEH PURWOKO - UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA -

PAGE 1
PROGRAM: SAP90/FILE: DL.SOL

ANALISIS GELAGAR CABLE-STAYED BRIDGE

J O I N T D I S P L A C E M E N T S

LOAD COMBINATION 1 - DISPLACEMENTS "U" AND ROTATIONS "R"

JOINT	U(Y)	U(Z)	R(X)
1	.000000	.000000	-.011050
2	.000000	-.194716	-.007449
3	.000000	-.279327	-.001051
4	.000000	-.248109	.003645
5	.000000	-.154240	.005234
6	.000000	-.055024	.004380
7	.0000E+00	.0000E+00	.3798E-03
8	.000000	-.041884	-.003929
9	.000000	-.144827	-.006389
10	.000000	-.296305	-.008678
11	.000000	-.482863	-.009603
12	.000000	-.662112	-.007780
13	.000000	-.774541	-.003028

ANALISIS CABLE-STAYED BRIDGE

C FILE: "C:\SKRIPSI\ANALYSIS\DEAD"
C KONFIGURASI BENTANGAN 120-260-120
C ANALISIS GELAGAR TERHADAP BEBAN MATI PADA TUMPUAN ROLL
C UNITS METER-TON

SYSTEM

L=2

JOINTS

1 X=0 Y=-250 Z=0
26 Y=250 G=1,26,1

RESTRAINTS

1,26,1 R=1,0,1,0,1,1 :MODEL 2D PADA BIDANG Y-Z
1 R=1,1,1,0,1,1 :SENDI-ABUTMENT A1
7 R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-PIER P2
20 R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-PIER P3
26 R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-ABUTMENT A4

FRAME

NM=1 NL=2

1 I=7.4311 A=8.2000 E=3.1529E+6 :BOX GIRDER BETON 45 MPA
1 WG=0,0,-23.0688 :BERAT SENDIRI + BEBAN MATI
2 PLD=0,-13.2690,0,10,-13.2690 :DIAFRAGMA + BALOK KANTILEVER

C GIRDER

1,1,2 G=24,1,1,1 M=1 NSL=1,2 LP=3

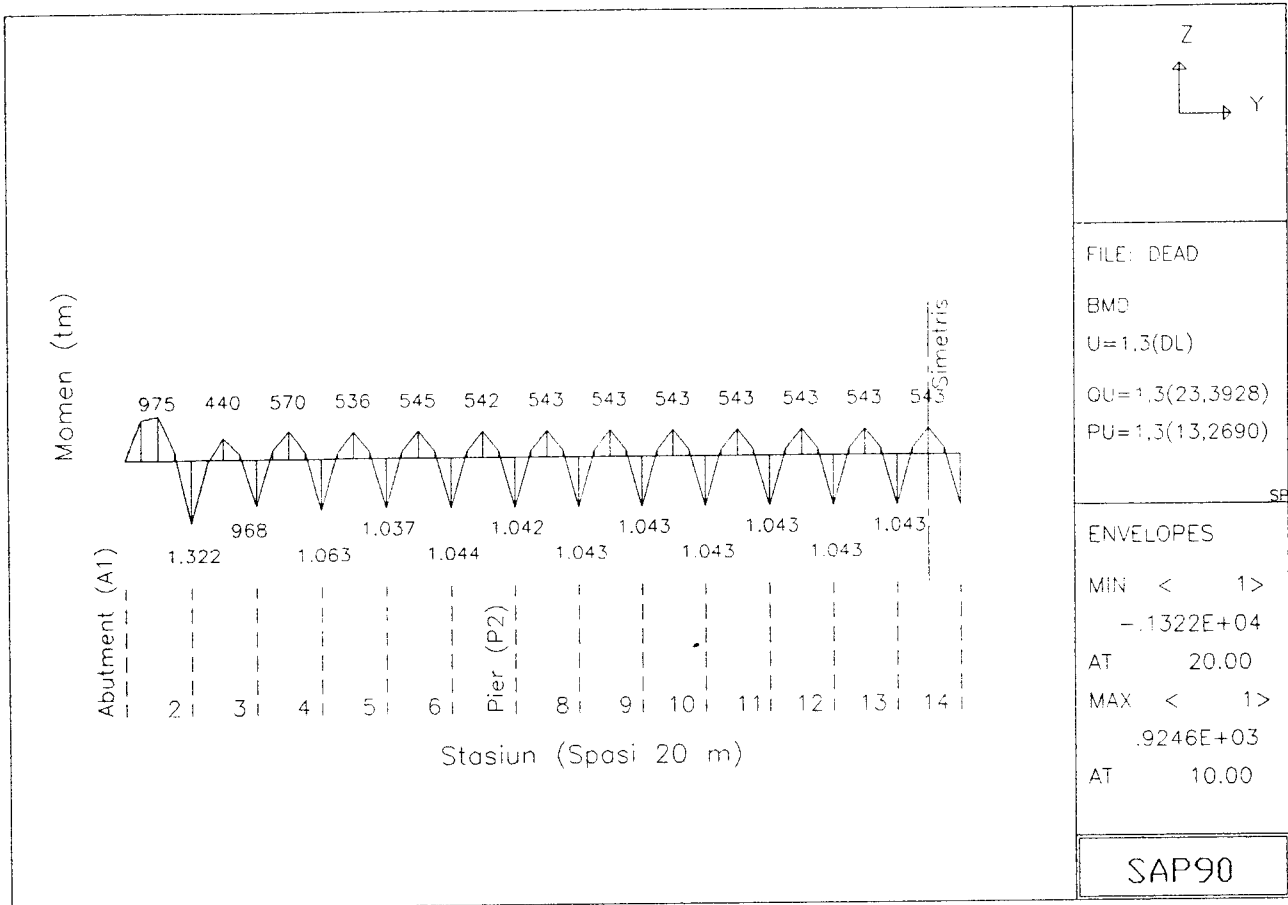
COMBO

1 C=1.3,1.3

SELECT

NT=5 ID=1,13,1

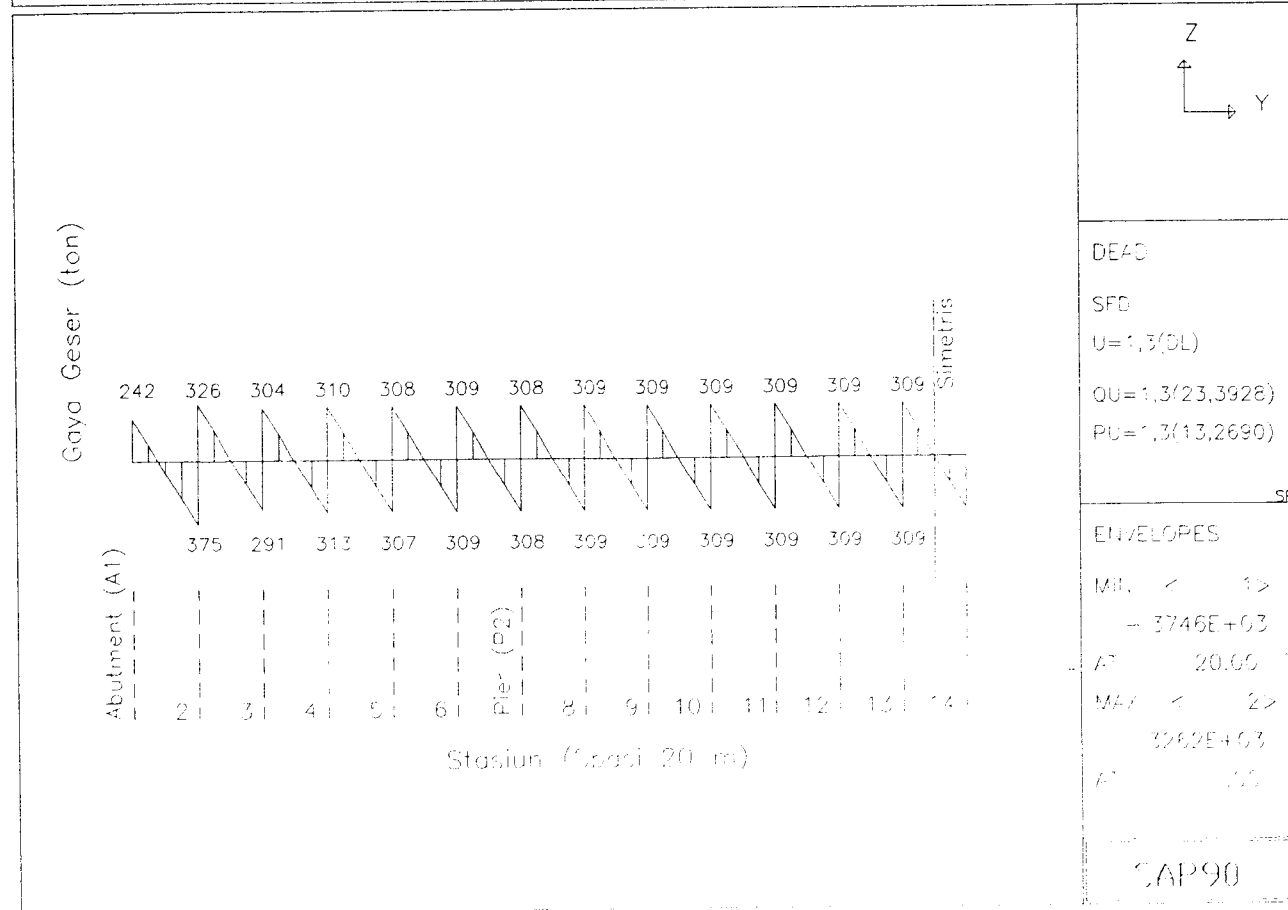
Lampiran C-2
Analisis Gelagar Terhadap Beban Mati pada Tumpuan Roll



FILE: DEAD
BMD
U=1,3(DL)
QU=1,3(23,3928)
PU=1,3(13,2690)

ENVELOPES
MIN < 1 >
-1.322E+04
AT 20.00
MAX < 1 >
.9246E+03
AT 10.00

SAP90



DEAD
SFD
U=1,3(DL)
QU=1,3(23,3928)
PU=1,3(13,2690)

ENVELOPES
MIN < 1 >
-3746E+03
AT 20.00
MAX < 2 >
3262E+03
AT 10.00

SAP90

Lampiran D-1
Analisis Gelagar Terhadap Beban Hidup pada Tumpuan Pegas

ANALISIS GELAGAR CABLE-STAYED BRIDGE
C FILE: "C:\SKRIPSI\ANALYSIS\LL"
C KONFIGURASI BENTANGAN 120-260-120
C ANALISIS GELAGAR TERHADAP BEBAN HIDUP PADA TUMPUAN PEGAS
C UNITS METER-TON
SYSTEM
L=2
JOINTS
1 X=0 Y=-250 Z=0
26 Y=250 G=1,26,1

RESTRAINTS
1,26,1 R=1,0,0,0,1,1 :MODEL 2D PADA BIDANG Y-Z
1 R=1,1,1,0,1,1 :SENDI-ABUTMENT A1
7 R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-PIER P2
20 R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-PIER P3
26 R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-ABUTMENT A4

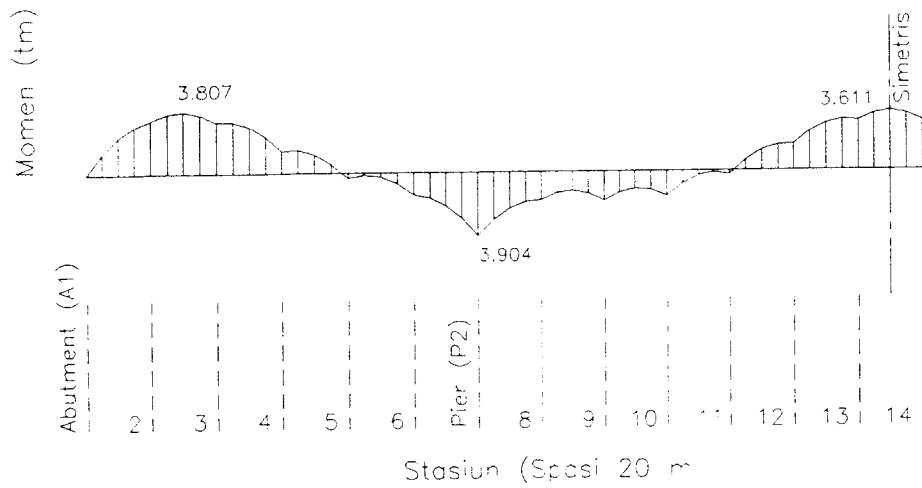
SPRINGS
2,25,23 K=0,0,676.79 :K2 LIHAT MODEL GAMBAR 5-9 DAN 5-12
3,24,21 K=0,0,1126.98 :K3 HALAMAN 62 DAN 66
4,23,19 K=0,0,1987.16 :K4
5,22,17 K=0,0,3609.92 :K5
6,21,15 K=0,0,6080.11 :K6
8,19,11 K=0,0,6078.73 :K7
9,18,9 K=0,0,3609.50 :K8
10,17,7 K=0,0,1987.95 :K9
11,16,5 K=0,0,1128.28 :K10
12,15,3 K=0,0,678.07 :K11
13,14,1 K=0,0,431.39 :K12

FRAME
NM=1 NL=2
1 I=7.4311 A=8.2000 E=3.1529E+6 :BOX GIRDER BETON 45 MPA
1 WG=0,0,-4.0987 :BEBAN HIDUP MERATA (QL)
2 PLD=10,-86.8 :BEBAN HIDUP TERPUSAT (PL)
C GIRDER
1,1,2 G=11,1,1,1 M=1 NSL=1 LP=3
13,13,14 M=1 NSL=1,2
14,14,15 G=11,1,1,1 M=1 NSL=1

COMBO
1 C=1 :DESAIN KABEL TERHADAP QL
2 C=2.86 :DESAIN GELAGAR TERHADAP QL (AASHTO FACTOR)
3 C=0,2.86 :DESAIN GELAGAR TERHADAP PL (AASHTO FACTOR)
4 C=2.86,2.86 :SUPERPOSISI

SELECT
NT=2 ID=1,13,1
NT=5 ID=1,13,1

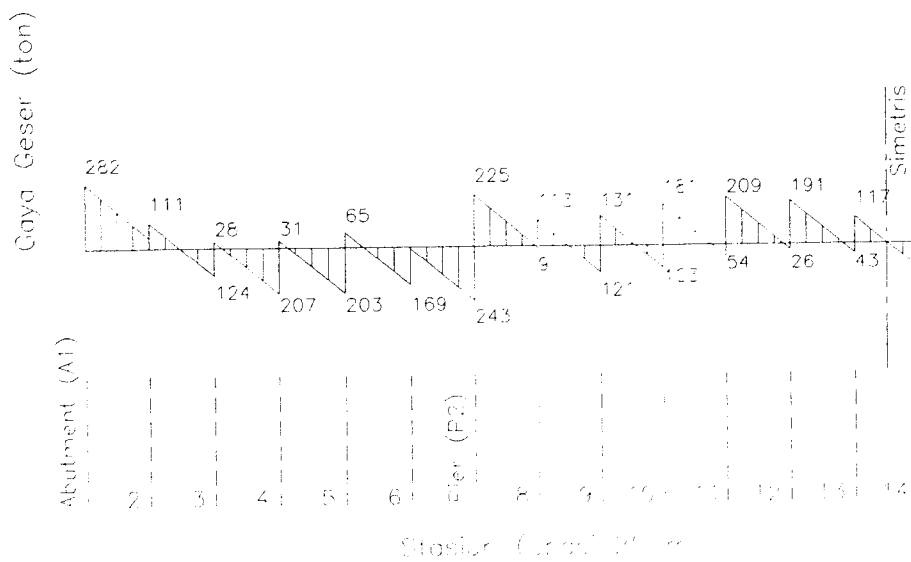
Lampiran D-2
Analisis Gelagar Terhadap Beban Hidup pada Tumpuan Pegas



FILE: LL
 BMD
 U=2,86(LL)
 QU=2,56(4,0987)

ENVELOPES
 MIN < 6>
 -3904E+04
 AT 20.00
 MAX < 2>
 3907E+04
 AT 10.00

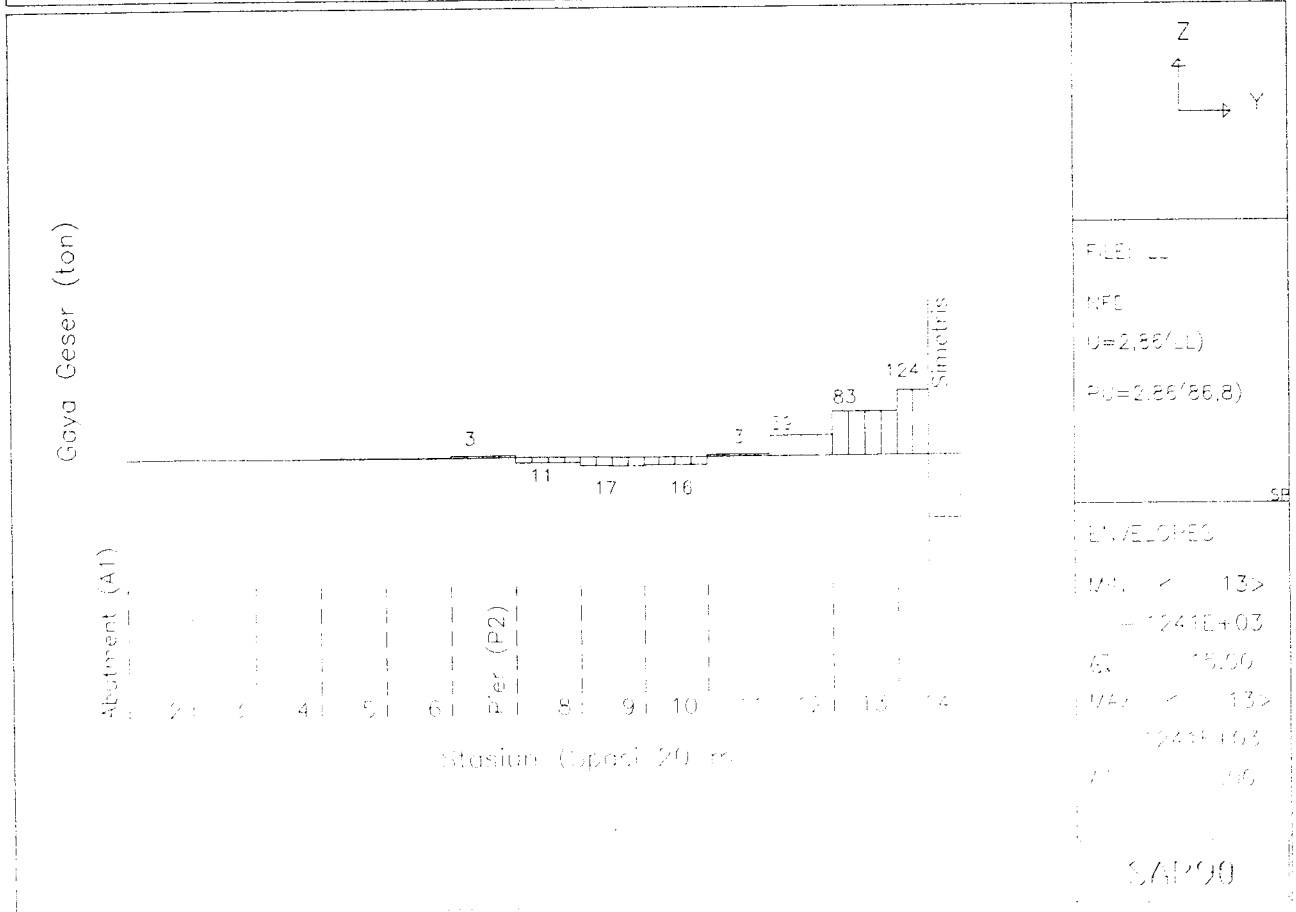
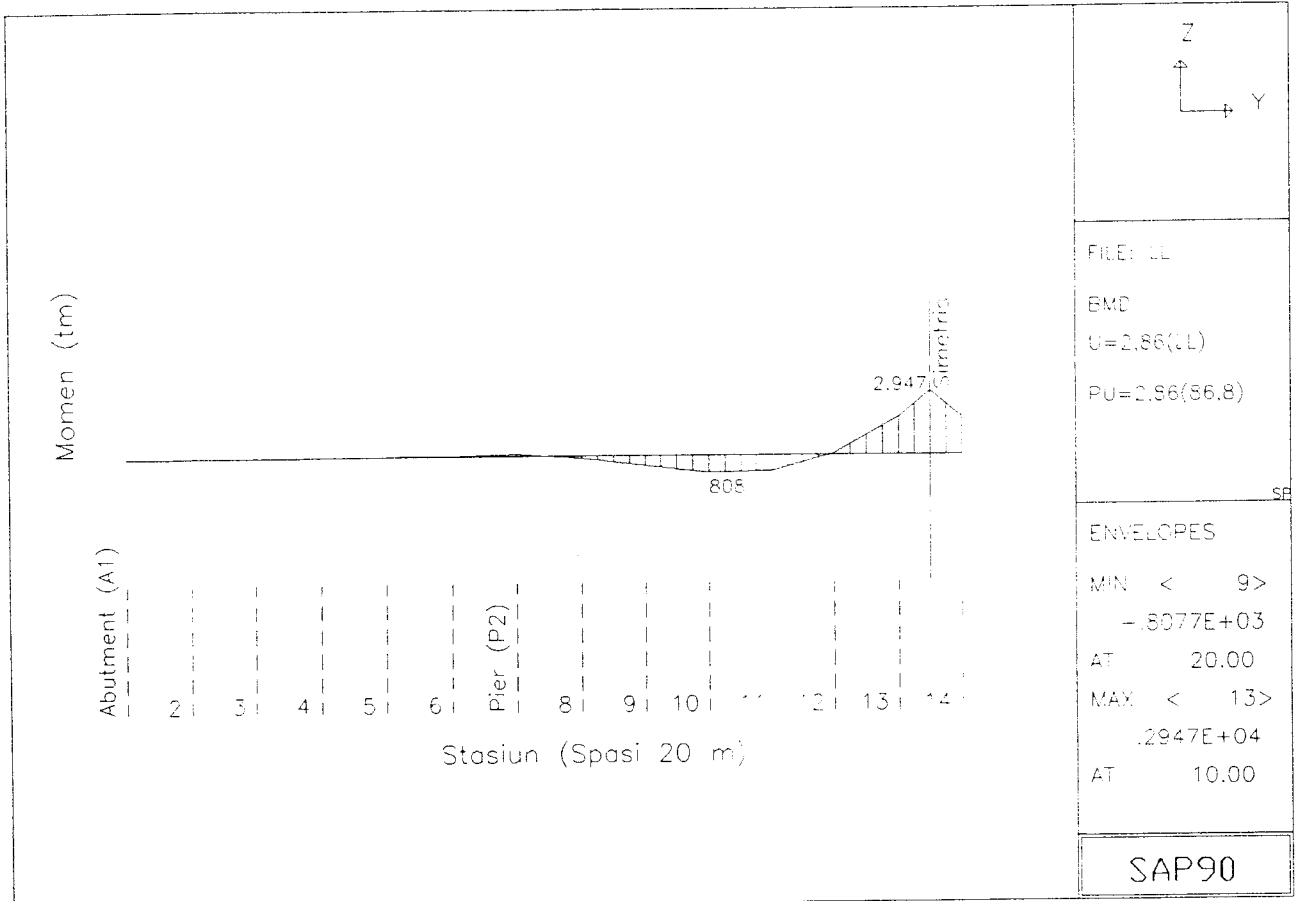
SAP90



FILE: LL
 SFD
 U=2,86(LL)
 QU=2,56(4,0987)

ENVELOPES
 MIN < 6>
 -2425E+03
 AT 20.00
 MAX < 2>
 2425E+03
 AT 10.00

SAP90



```
ANALISIS GALAGAR CABLE-STAYED BRIDGE
C FILE "C:\SKRIPSI\ANALYSIS\WL"
C KONFIGURASI BENTANGAN 120-260-120
C ANALISIS GELAGAR TERHADAP BEBAN ANGIN PADA TUMPUAN PEGAS
C UNITS METER-TON
SYSTEM
L=1
JOINTS
1      X=0      Y=-250  Z=0
26     Y=250    Z=0      G=1,26,1

RESTRAINTS
1,26,1  R=1,0,0,0,1,1 :MODEL 2D PADA BIDANG Y-Z
1       R=1,1,1,0,1,1 :SENDI-ABUTMENT A1
7       R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-PIER      P2
20      R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-PIER      P3
26      R=1,0,1,0,1,1 :ROLL-ABUTMENT A4

SPRINGS
2,25,23 K=0,0,676.79 :K2 LIHAT MODEL GAMBAR 5-10 HALAMAN 64
3,24,21 K=0,0,1126.98 :K3
4,23,19 K=0,0,1987.16 :K4
5,22,17 K=0,0,3609.92 :K5
6,21,15 K=0,0,6080.11 :K6
8,19,11 K=0,0,6078.73 :K7
9,18,9  K=0,0,3609.50 :K8
10,17,7 K=0,0,1987.95 :K9
11,16,5 K=0,0,1128.28 :K10
12,15,3 K=0,0,678.07 :K11
13,14,1 K=0,0,431.39 :K12

FRAME
NM=1 NL=1
1 I=7.4311 A=8.2000 E=3.1529E+6 :BOX GIRDER BETON 45 MPA
1 WG=0,0,-0.6675 :BEBAN ANGIN
C GIRDER
1,1,2 G=24,1,1,1 M=1 NSL=1 LP=3

SELECT
NT=2 ID=1,13,1
```

ANALISIS STRUKTUR MENARA CABLE-STAYED BRIDGE

C FILE: "C:\SKRIPSI\ANALYSIS\PYLON"

C UNITS TON-METER

C ANALISIS 3 DIMENSI

SYSTEM

L=4

JOINTS

1 X=0 Y=-11.5 Z=0
2 X=0 Y=11.5
5 Y=-7 Z=25.9+27.4 G=1,5,2
6 Y=7 G=2,6,2

RESTRAINTS

1,6,1 R=0,1,0,0,0,1
1,2,1 R=1,1,1,1,1,1 :DASAR MENARA SEBAGAI JEPIT

FRAME

NM=1 NL=1

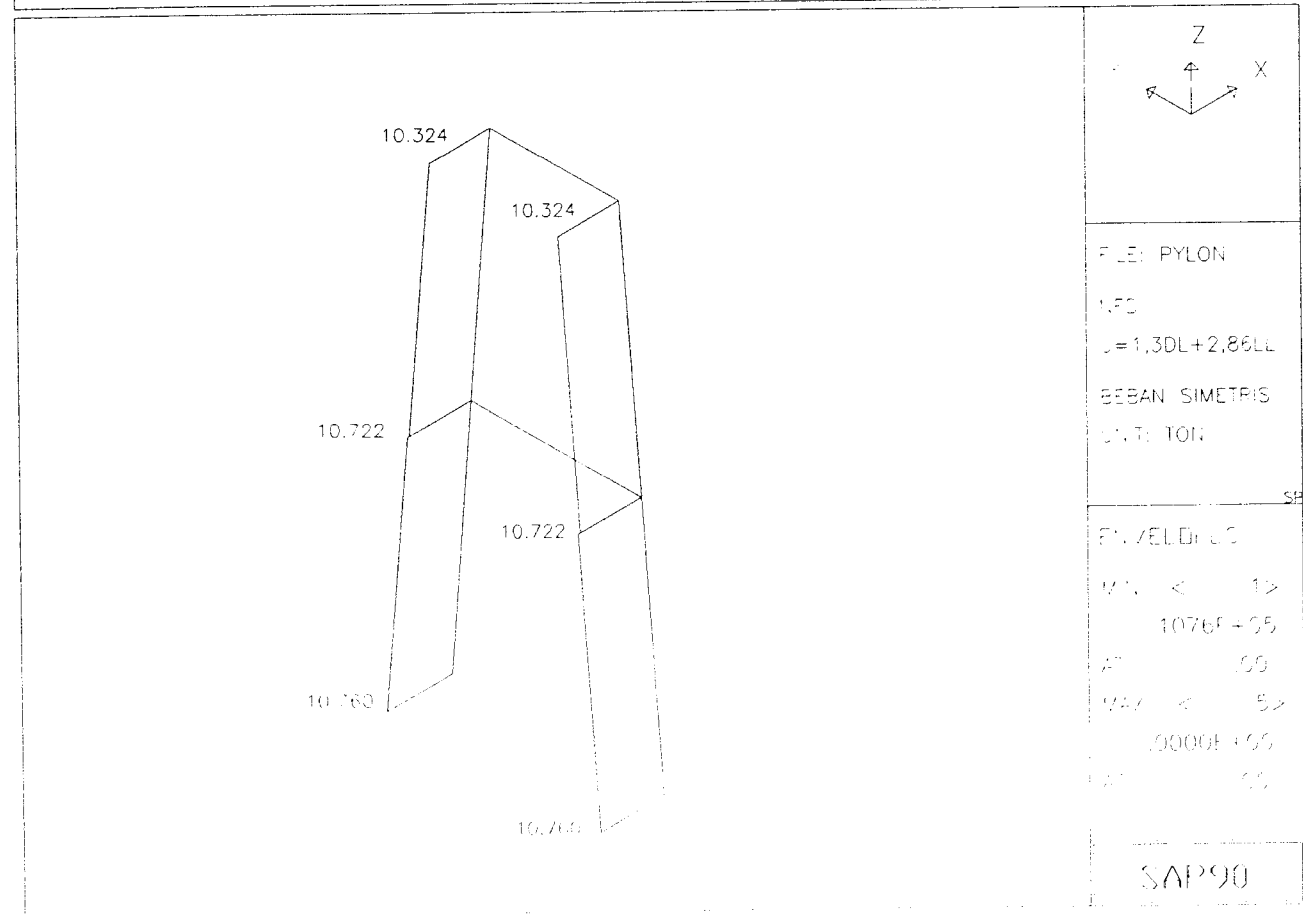
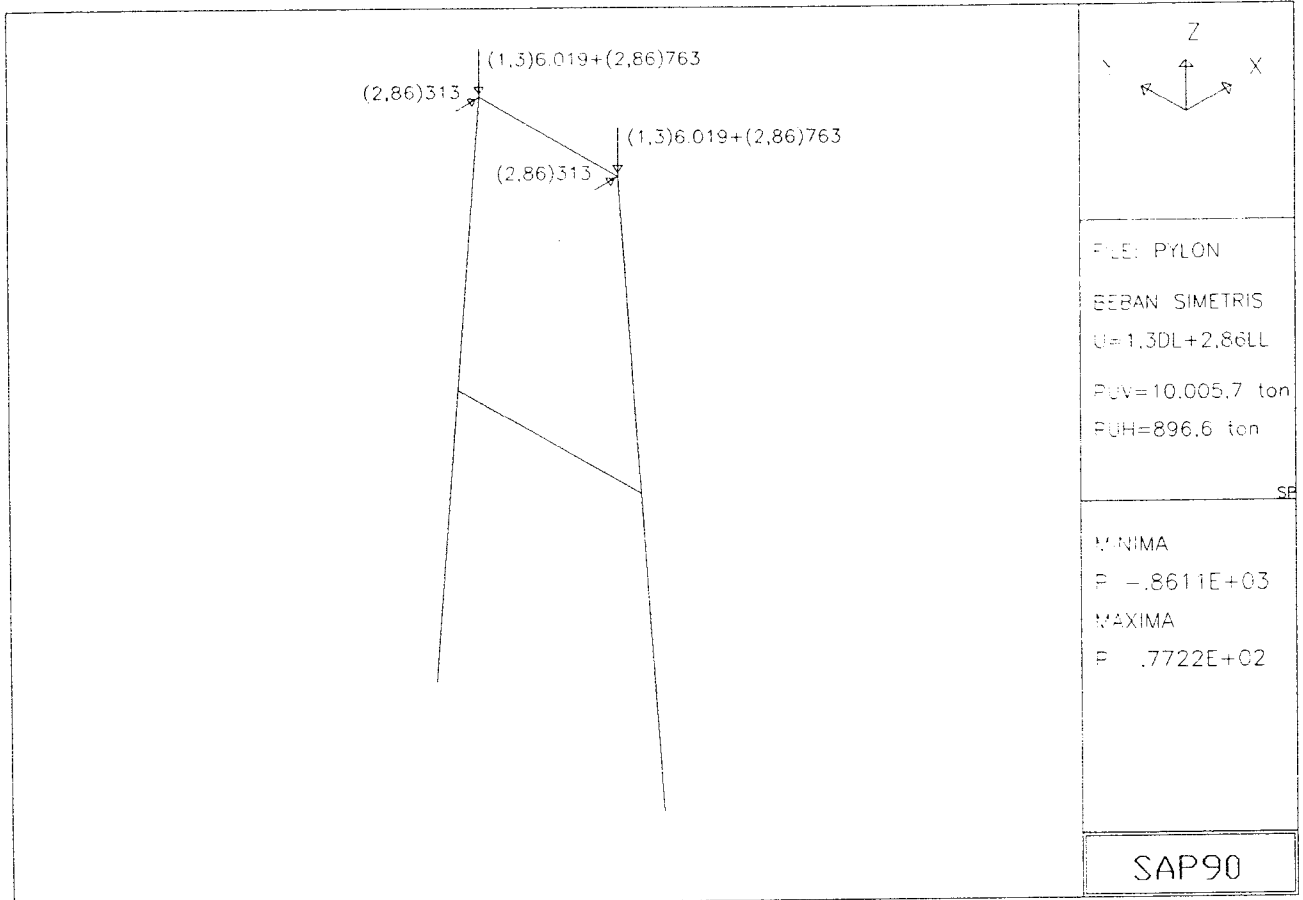
1 I=6.5890,4.2522 A=3.3832 E=2.0E+7 :PYLON/ MENARA
1 WG=0,0,-3.3832*7.850 :BERAT SENDIRI ELEMEN MENARA
1,1,3 G=3,1,1,1 M=1 NSL=1 LP=2 :ELEMEN KOLOM
5,3,4 G=1,1,2,2 M=1 NSL=1 LP=3 :ELEMEN BALOK

LOADS

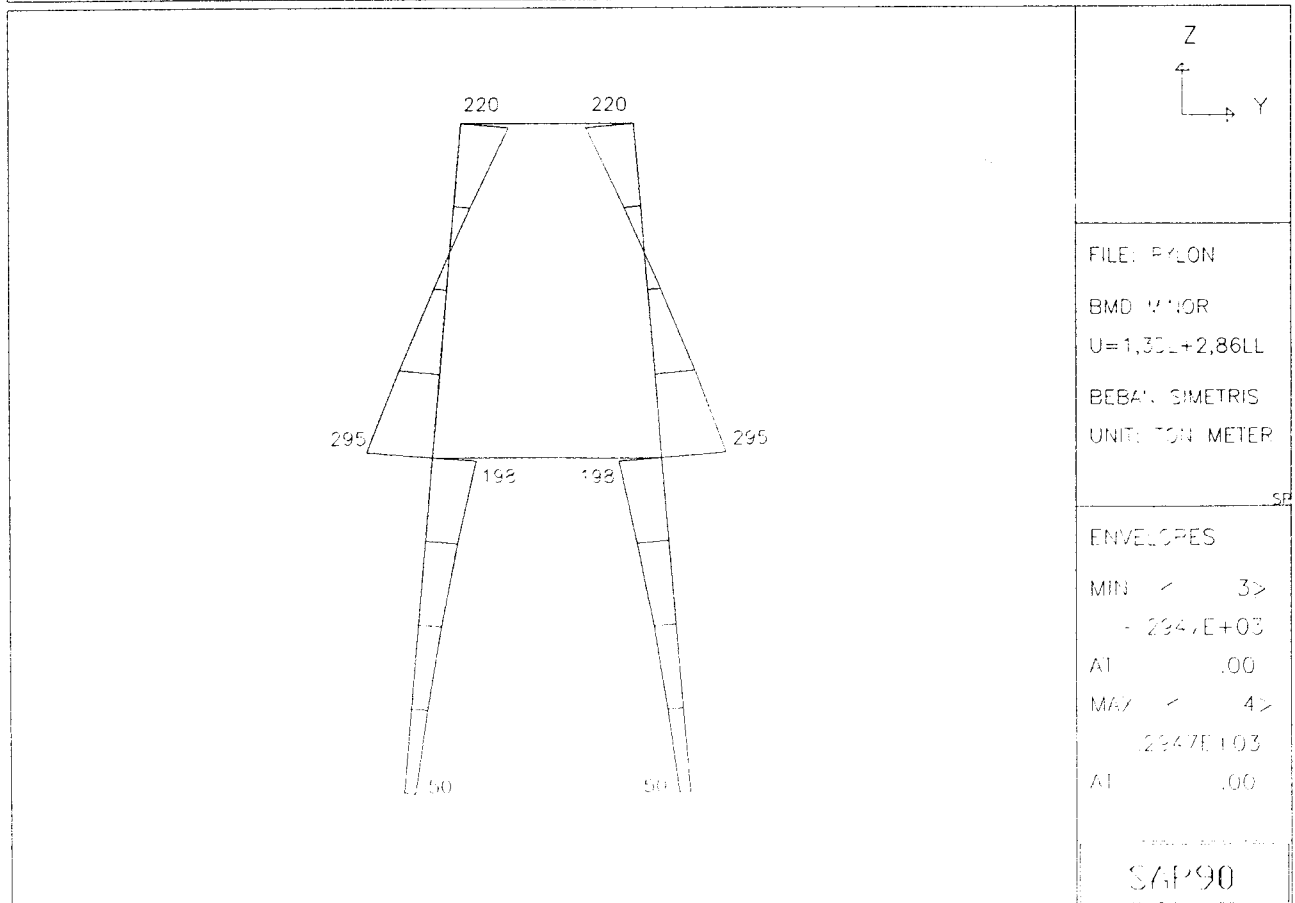
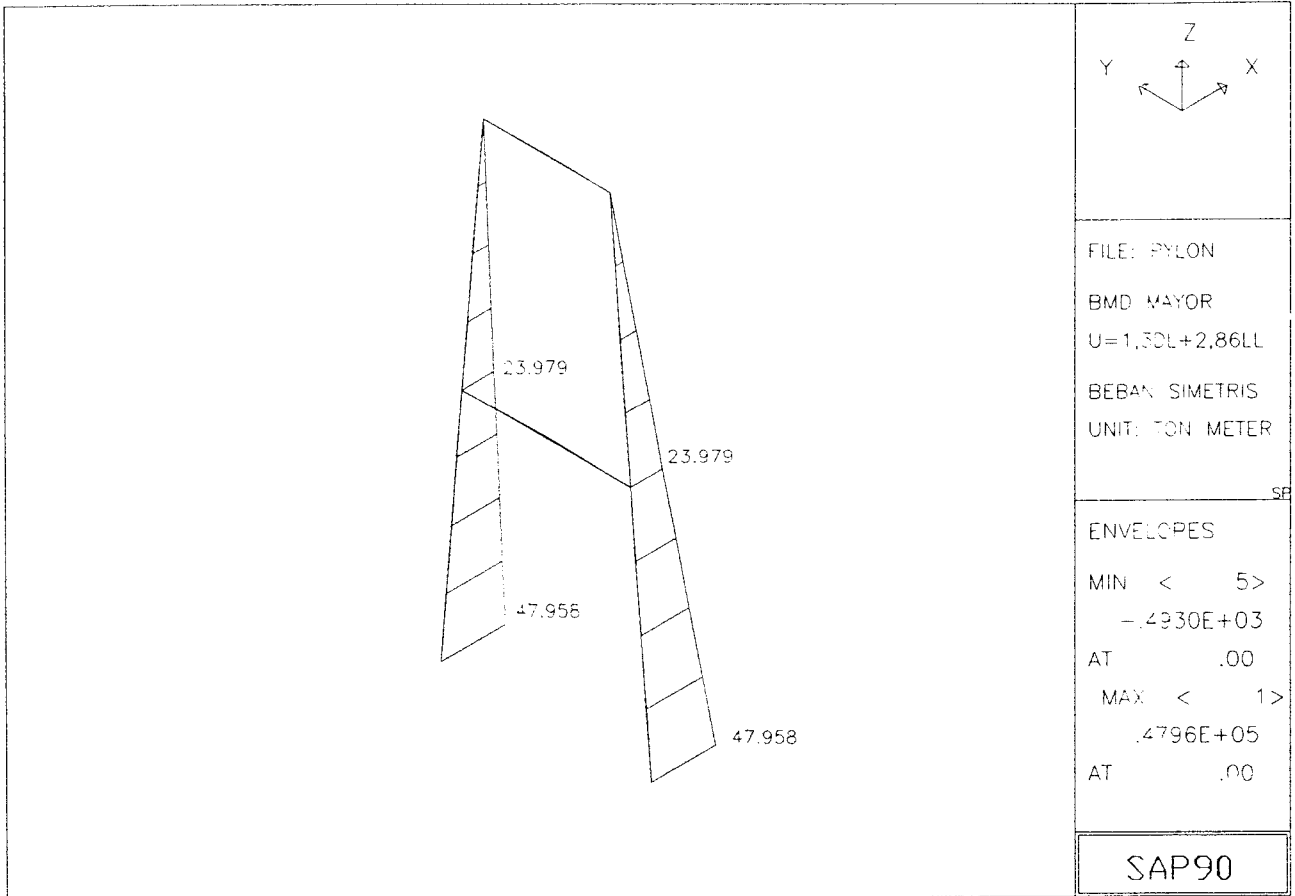
5,6,1 F=0,0,-6018.85 L=2 :BEBAN MATI GELAGAR+BERAT KABEL
5,6,1 F=313.49,0,-762.65 L=3 :BEBAN HIDUP-QL SIMETRIS
5,6,1 F=640.13,0,-454.09 L=4 :BEBAN HIDUP-QL ASIMETRIS

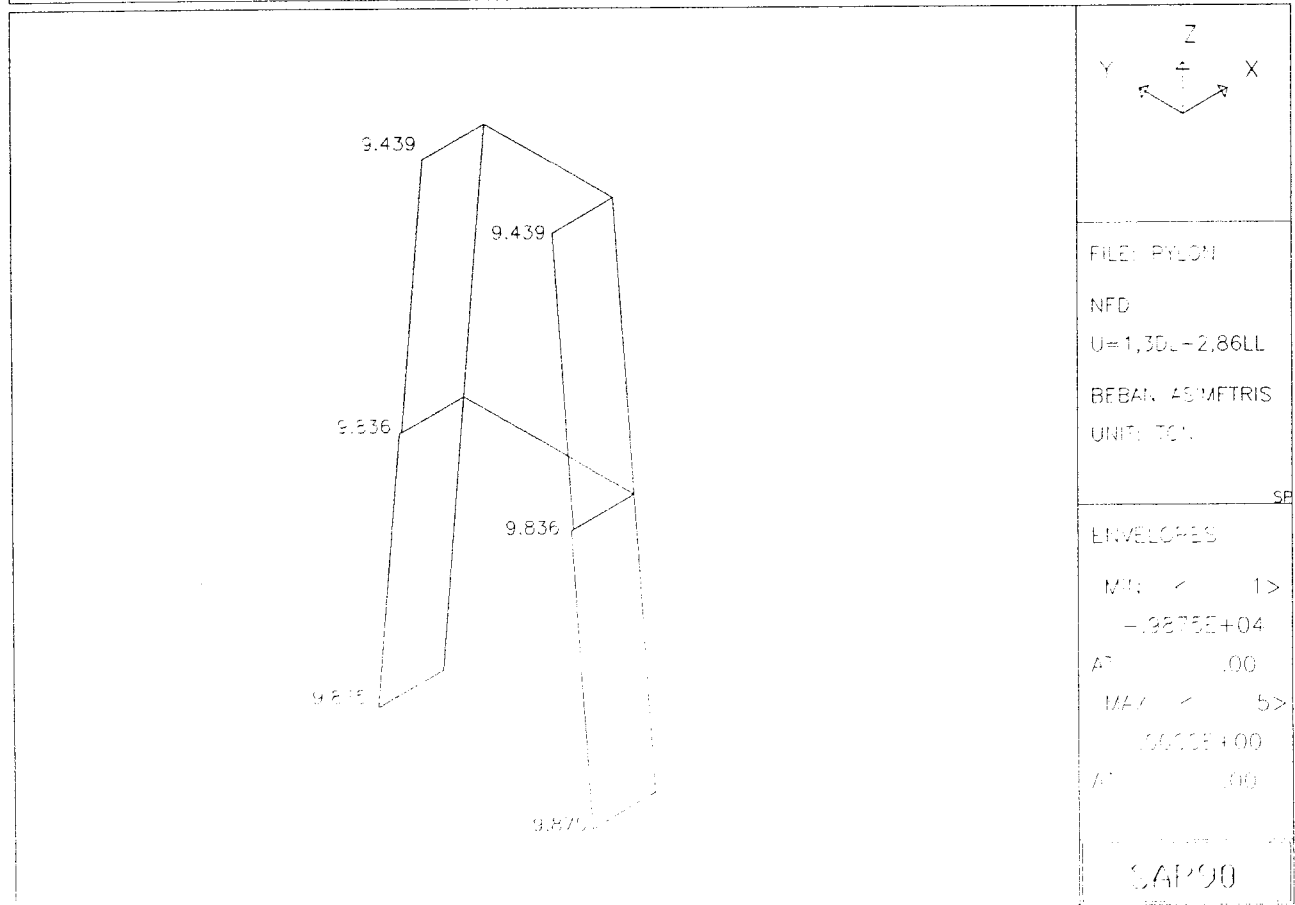
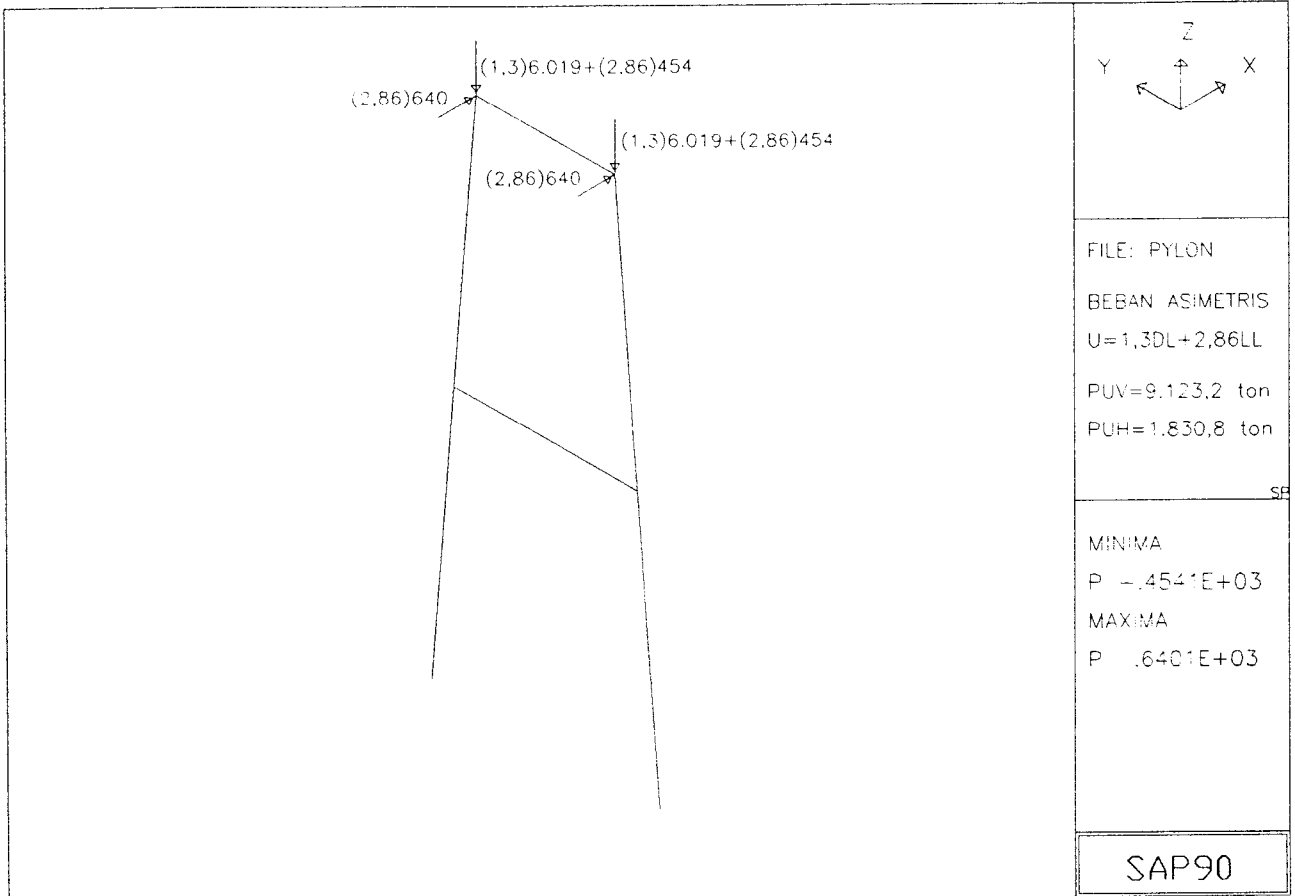
COMBO

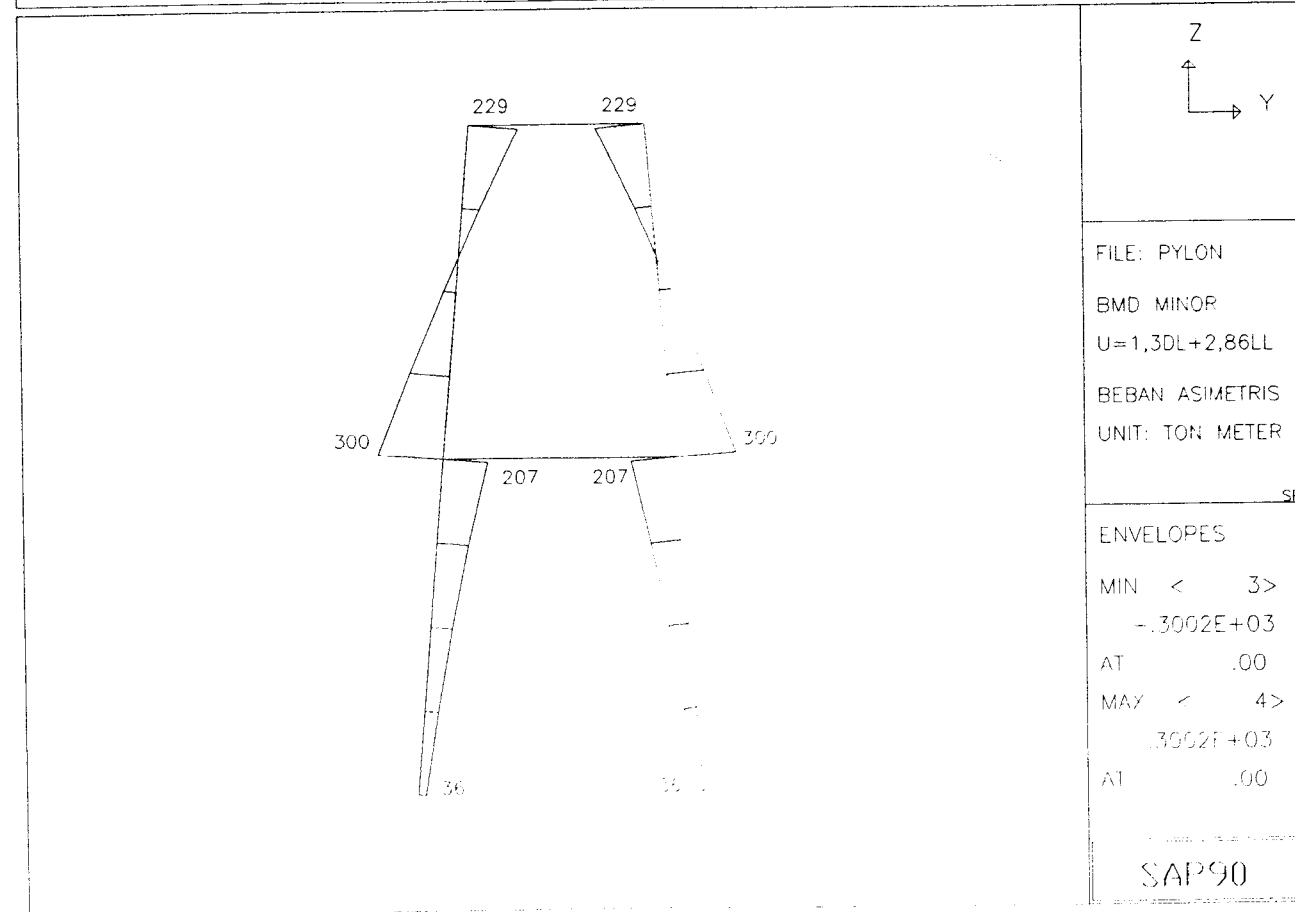
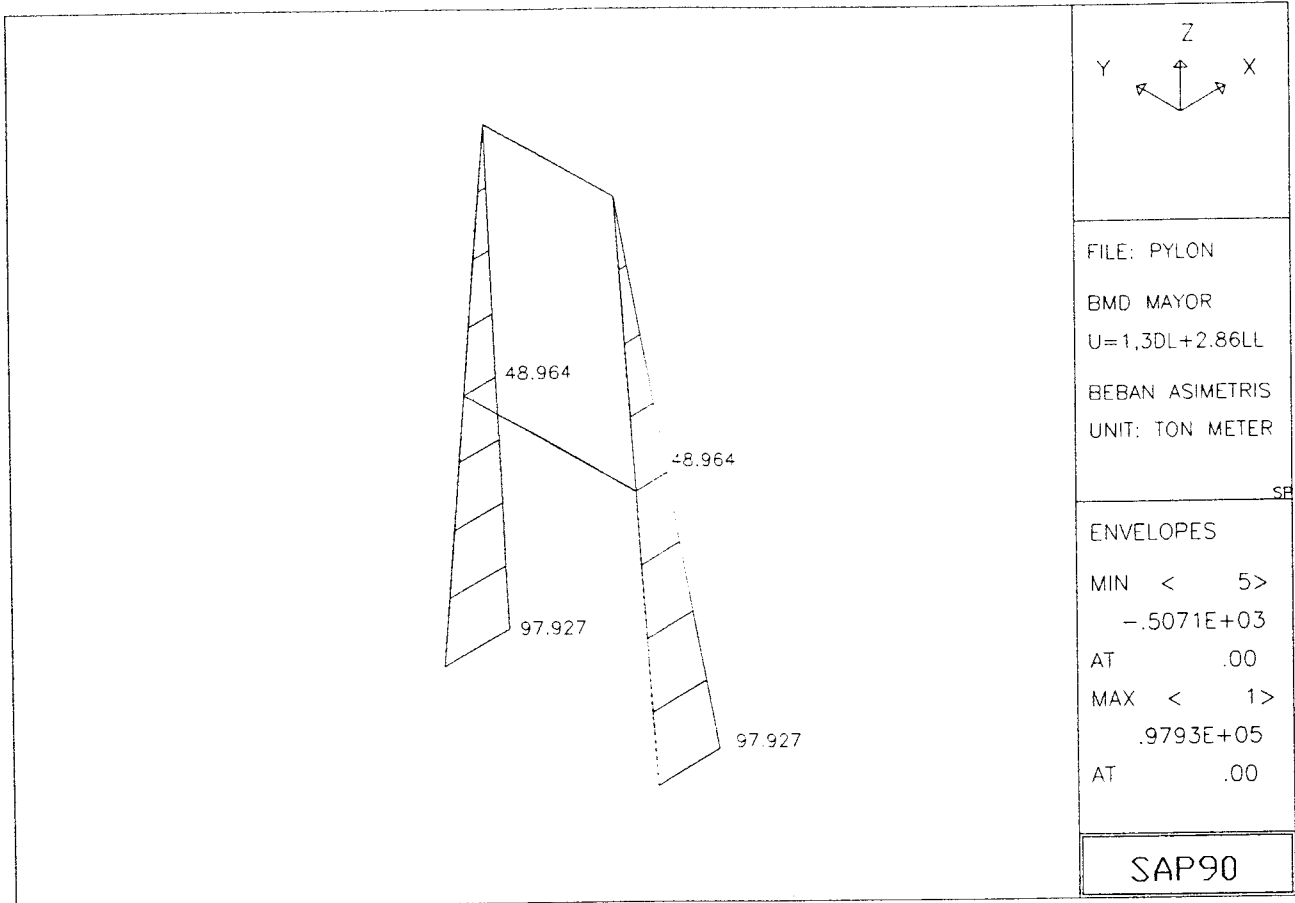
1 C=1.3,1.3,2.86 :BEBAN MATI+BEBAN HIDUP SIMETRIS
2 C=1.3,1.3,0,2.86 :BEBAN MATI+BEBAN HIDUP ASIMETRIS



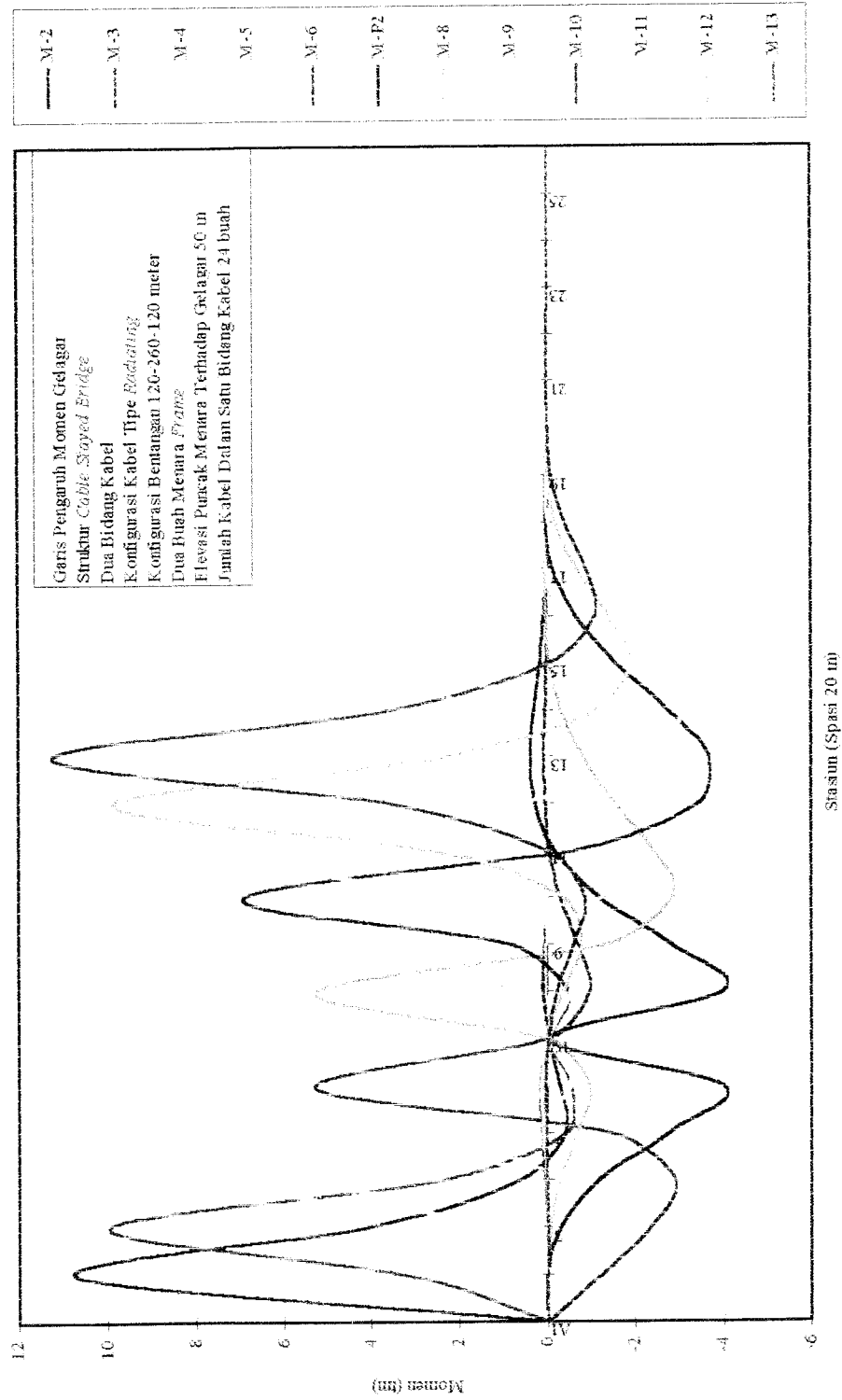
Lampiran F-3
 Analisis Menara/ Pylon



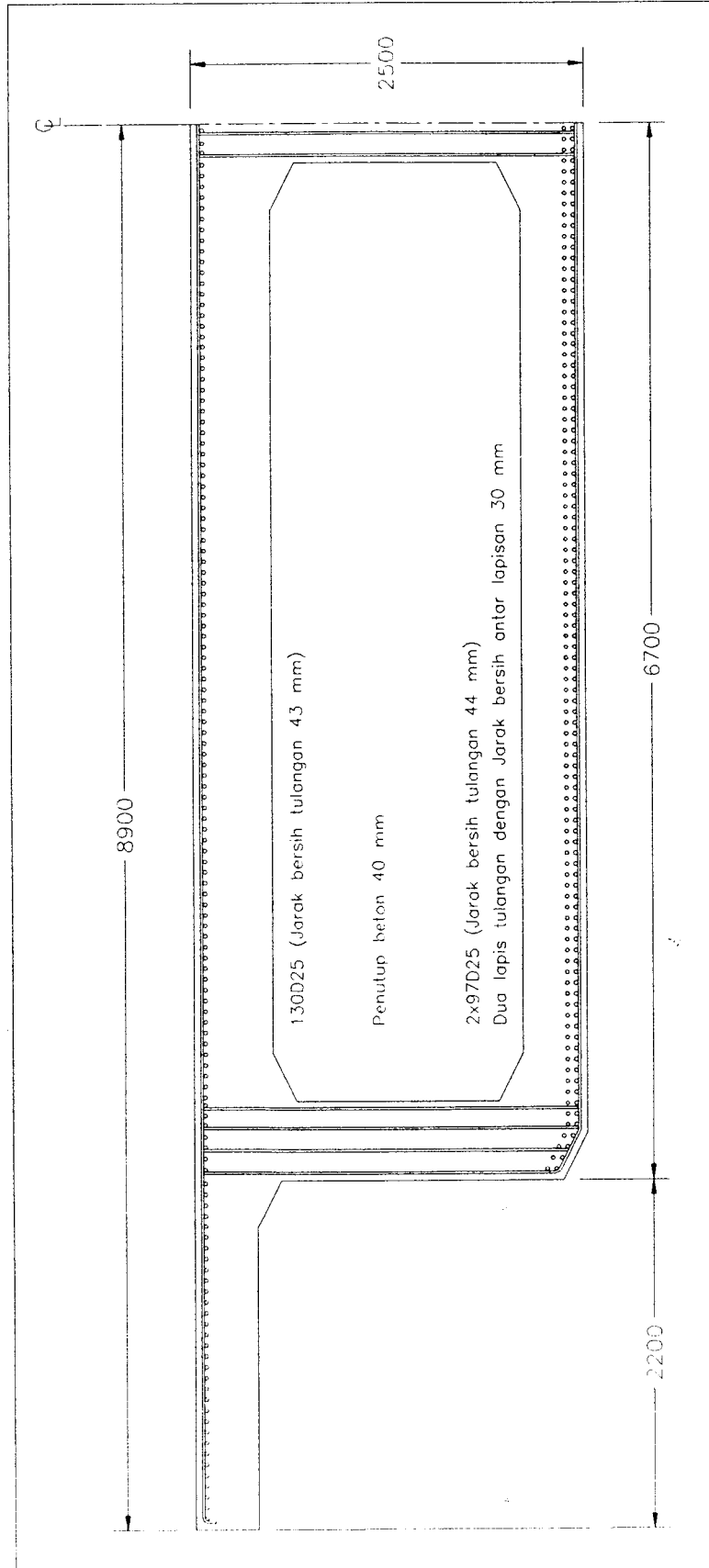




Garis Pengaruh Momen Gelagar



PENULANGAN POKOK BOX GIRDER



Diameter Tulangan Pokok : 25 mm
Diameter Sengkang : 16 mm (Empat Kaki)
Jarak Sengkang : 160 mm

DIAGRAM ALIR MEKANISME PEMBEBANAN PADA ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR JEMBATAN CABLE-STAYED

