

DESAIN STRUKTUR ATAS JEMBATAN *CABLE STAYED* BENTANG 470 METER

Muhammad Eko Setiawan
NRP: 1521018

Pembimbing: Dr. Yosafat Aji Pranata, S.T., M.T.

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia, mencakup sekitar 17.000 pulau, Indonesia terletak di 6 derajat LU (Lintang Utara) – 11 derajat LS (Lintang Selatan) dan 95 derajat BT (Bujur Timur) – 141 derajat BT (Bujur Timur). Kontur wilayah Indonesia yang bervariasi, terdiri atas gunung, lembah, dan banyak sungai yang membagi satu wilayah dari yang lain. Ini berarti sarana transportasi darat membutuhkan jembatan untuk menghubungkan satu jalan ke jalan lain.

Jembatan Kartanegara di Tenggarong, Kutai Kartanegara, adalah jembatan kedua yang melintasi Sungai Mahakam, setelah Jembatan Mahakam I di Kota Samarinda. Kedua jembatan tersebut berlokasi di Kalimantan Timur. Jembatan ini adalah bagian dari jalur poros pusat Kalimantan, yang menghubungkan kota Samarinda dan Tenggarong. Bentang jembatan utama adalah 270m dan merupakan jembatan gantung terpanjang ketiga di Indonesia, setelah Jembatan Mamberamo (235m) di Papua dan Jembatan Barito (240m) di Kalimantan Selatan. Pada tanggal 26 November 2011, Jembatan Kutai Kartanegara mengalami keruntuhan pada saat masa pemeliharaan, oleh karena itu, jembatan ini hanya berfungsi sepuluh tahun setelah masa konstruksi, kegagalan jembatan menewaskan sedikitnya 20 orang dan melukai 40 orang.

Tugas Akhir ini yang berjudul "Desain Struktur Atas Jembatan *Cable-Stayed* Bentang 470 meter" akan merancang struktur atas jembatan yang terdiri atas *pylon* dan kabel dengan mempertimbangkan beban gempa menggunakan analisis dinamik (respon spektrum) dan metode statik ekuivalen.

Gaya gempa yang dihasilkan dari metode statik ekuivalen lebih besar dibandingkan dengan analisis dinamik (respon spektrum), namun demikian, pengaruh beban gempa tidak perlu dipertimbangkan karena zona intensitas gempa di Kalimantan Timur adalah zona 1. Dengan demikian, desain didasarkan pada beban gravitasi.

Hasil desain didapat *pylon* yang digunakan adalah *pylon* prismatis dengan tinggi 95meter dan dimensi penampang $6,15 \times 6,15 \text{m}^2$, rasio tulangan longitudinal *pylon* sebesar 1%, torsi dan geser yang terjadi pada *pylon* tidak menimbulkan pengaruh yang signifikan, dan kabel yang digunakan adalah kabel standar ASTM ditinjau dari rasio tegangan yang terjadi.

Kata kunci: kabel *stay*, respon spektrum, metode statik ekuivalen, Kutai Kartanegara

DESIGN OF CABLE-STAYED BRIDGE SUPERSTRUCTURE WITH SPAN OF 470 METERS

Muhammad Eko Setiawan
NRP: 1521018

Supervisor: Dr. Yosafat Aji Pranata, S.T., M.T.

ABSTRACT

Indonesia is the world's largest archipelago country, covers around 17,000 islands, and lies to the north of the equator, between 6° and 11° south latitude and 97° and 114° east longitude. The contours of the regions are varied, consisting of mountains, valleys, and many rivers which divide one region from another. This means land transportation requires bridges to connect one roadway to another.

The Kartanegara Bridge in Tenggarong, Kutai Kartanegara, is the second bridge that crosses over the Mahakam River, after the Mahakam I Bridge in the city of Samarinda. Both bridges are located in East Kalimantan. This bridge is part of the Kalimantan central axis lane, which connects the cities of Samarinda and Tenggarong. The main bridge span is 270m and is the third-longest suspension bridge in Indonesia, after the Mamberamo Bridge (235m) in Papua and the Barito Bridge (240m) in South Kalimantan. On November 26th 2011, the bridge collapsed only ten years after it was completed, killing at least 20 people and injuring 40.

This Undergraduate Thesis entitled "Design of Cable-Stayed Bridge Superstructure with Span of 470 Meters" will design the bridge superstructures that consist of pylon, cable stay, and beam. By considering earthquake load using dynamic analysis (response spectrum), and static equivalent method.

The result of static equivalent method is way greater than dynamic analysis (response spectrum), nevertheless, the influences of earthquake load needn't to be considered due to the earthquake intensity zone in East Kalimantan is zone 1. Thus, the design results are based on gravity loads.

The design results are: using prismatic pylon with a height of 95 meters and a cross-sectional dimension of 6,15×6,15m², the pylon longitudinal reinforcement ratio of 1%, torque and shear that occurs in the pylon does not have a significant effect, and the cable used is a cable ASTM standard based on the stress ratio.

Keywords: cable-stay, response spectrum, static equivalent method, Kutai Kartanegara

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS LAPORAN PENELITIAN	iii
PERNYATAAN PUBLIKASI LAPORAN PENELITIAN	iv
SURAT KETERANGAN TUGAS AKHIR	v
SURAT KETERANGAN SELESAI TUGAS AKHIR	vi
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR NOTASI	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Ruang Lingkup	4
1.4 Sistematika Penulisan	5
BAB II STUDI LITERATUR	6
2.1 Pengertian Jembatan	6
2.2 Jembatan Tipe <i>Cable Stayed</i>	6
2.3 Komponen Penyusun Jembatan Tipe <i>Cable Stayed</i>	7
2.3.1 <i>Pylon</i>	7
2.3.2 <i>Deck dan Stiffening Girder</i>	9
2.3.3 <i>Cable-Stay</i>	10
2.4 Beton Bertulang	15
2.5 Gempa Bumi	15
2.6 Beban	16
2.6.1 Beban Mati	16
2.6.2 Beban Hidup	17
2.7 Kombinasi Pembebanan	17
2.7.1 Berat Sendiri (MS)	18
2.7.2 Beban Mati Tambahan (MA)	19
2.7.3 Beban Lajur (TD)	19
2.7.4 Gaya Rem (TB)	21
2.7.5 Beban Pejalan Kaki (TP)	21
2.7.6 Beban Angin (EW)	22
2.8 Diagram Interaksi	22
2.9 Kriteria Lendutan pada Jembatan	23
2.10 Desain Awal Struktur Atas Jembatan	25
2.10.1 Kabel	25
2.10.2 <i>Pylon</i>	26
2.11 Analisis Respon Spektrum Jembatan	26
2.12 Metode Statik Ekuivalen	28
2.13 Persyaratan <i>Pylon</i>	28

2.13.1 Tulangan Longitudinal	28
2.13.2 Tahanan Lentur	28
2.13.3 Geser Kolom dan Tulangan Transversal	29
2.13.4 Kapasitas Tulangan Geser	29
2.13.5 Tulangan Geser Maksimum dan Minimum	30
2.13.6 Spasi Tulangan Transversal untuk Pengekang	31
2.13.7 Sambungan <i>Pylon</i>	31
2.13.8 Pengaruh Torsi	32
2.14 Zona Gempa	33
2.14.1 Zona Gempa I	33
2.14.2 Zona Gempa II	34
BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1 Diagram Alir	35
3.2 Data Material Struktur	36
3.3 <i>Preliminary Design</i>	36
3.3.1 Konfigurasi Susunan Kabel	36
3.3.2 <i>Pylon</i>	37
3.3.3 <i>Girder</i> yang Digunakan	38
3.3.4 Dimensi Awal Kabel	39
3.4 Pembebanan	42
3.4.1 Berat Sendiri (MS)	42
3.4.2 Beban Mati Tambahan (MA)	43
3.4.3 Beban Lajur (TD)	43
3.4.4 Gaya Rem (TB)	43
3.4.5 Pejalan Kaki (TP)	44
3.4.6 Beban Angin (EW)	45
3.5 Pemodelan Struktur Jembatan	47
3.6 Kontrol Lendutan	68
BAB IV ANALISIS DATA	70
4.1 Analisis Respon Spektrum	70
4.1.1 Partisipasi Massa Ragam	70
4.1.2 <i>Mode Shape</i> dan Gaya Geser Dinamik	71
4.1.3 Persyaratan P-Delta	72
4.2 Metode Statik Ekuivalen	75
4.3 Analisis Gaya Dalam	75
4.4 Analisis Tegangan Kabel	75
4.5 Penulangan <i>Pylon</i>	82
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	88
5.1 Kesimpulan	88
5.2 Saran	88
DAFTAR PUSTAKA	89
LAMPIRAN	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Jembatan Kutai Kartanegara	2
Gambar 1.2 Keruntuhan Jembatan Kutai Kartanegara	3
Gambar 1.3 Dimensi Jembatan Kutai Kartanegara	3
Gambar 1.4 Jembatan <i>Cable-Stayed</i> Rio Antirio	4
Gambar 2.1 Beberapa Bentuk <i>Pylon</i>	9
Gambar 2.2 Tipe-tipe Sistem Kabel	10
Gambar 2.3 <i>Cable Planes</i>	11
Gambar 2.4 Ilustrasi Jembatan <i>Cable-Stayed Two Vertical Plane System</i>	12
Gambar 2.5 Jembatan Millau Perancis	12
Gambar 2.6 <i>Spiral Seven-Wire Strand</i>	14
Gambar 2.7 <i>Large Spiral Strands</i>	14
Gambar 2.8 <i>Multi-Strands Rope</i>	15
Gambar 2.9 Ketentuan Penggunaan Beban “D” pada Jembatan	20
Gambar 2.10 Diagram Interaksi P-M	22
Gambar 2.11 Bentuk Tipikal Respons Spektrum Gempa	27
Gambar 2.12 Tulangan Spiral	29
Gambar 2.13 Detail Penulangan <i>Pylon</i> Persegi	30
Gambar 2.14 Detail Tulangan Pengekang Kolom Persegi Panjang	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 3.2 Dimensi <i>Box Girder</i> yang Digunakan	38
Gambar 3.3 Besar Sudut Kabel pada Gelagar	39
Gambar 3.4 Lokasi Jembatan yang akan Didesain	45
Gambar 3.5 Respon Spektrum Kalimantan Timur	46
Gambar 3.6 Tampilan CSiBridge 2016	47
Gambar 3.7 Tampilan pada Bagian <i>File</i>	48
Gambar 3.8 Tampilan pada Bagian <i>New Model</i>	48
Gambar 3.9 Tampilan <i>New Model > More</i>	49
Gambar 3.10 Tampilan Bagian <i>Layout Line</i>	49
Gambar 3.11 Tampilan <i>Bridge Layout Line Data</i>	50
Gambar 3.12 Tampilan pada Bagian <i>Components</i>	50
Gambar 3.13 Tampilan pada Bagian <i>Components > Type > Material</i>	50
Gambar 3.14 Data Properti Material	51
Gambar 3.15 Tampilan pada Bagian <i>Components > Items</i>	52
Gambar 3.16 Tampilan <i>Select Bridge Deck Section Type</i>	52
Gambar 3.17 Tampilan Data <i>Box Girder</i> yang Digunakan	52
Gambar 3.18 Tampilan <i>Bridge Section Points for Box Girder</i>	54
Gambar 3.19 Tampilan pada Bagian <i>Components</i>	56
Gambar 3.20 Tampilan Pilihan Penampang Beton	56
Gambar 3.21 Data Penampang <i>Pylon</i>	57
Gambar 3.22 Tampilan Bagian <i>Components</i>	57
Gambar 3.23 Data Penampang Kabel	58

Gambar 3.24 Tampilan pada Bagian <i>Components</i>	58
Gambar 3.25 Data Properti <i>Link/Support</i>	59
Gambar 3.26 Tampilan Isometrik Model Jembatan	59
Gambar 3.27 Tampilan Bagian <i>Loads</i>	60
Gambar 3.28 Tampilan Pola Beban yang Didefinisikan	60
Gambar 3.29 Beban Mati Tambahan (MA) Sebesar 56,49kN	61
Gambar 3.30 Beban Angin Sebesar 5,65 kN/m	61
Gambar 3.31 <i>Input</i> Gaya Rem (TB)	61
Gambar 3.32 Gaya Rem pada Jembatan Sebesar 9,09 kN	62
Gambar 3.33 <i>Input</i> Beban Lajur (TD)	62
Gambar 3.34 Beban Lajur (TD) pada Jembatan Sebesar 95,55kN	63
Gambar 3.35 Beban Pejalan Kaki (TP) pada Jembatan	63
Gambar 3.36 Tampilan <i>Load > Type > Response Spectrum</i>	64
Gambar 3.37 <i>Input</i> Data Respon Spektrum dan Kurva Respon Spektrum	64
Gambar 3.38 Tampilan Pembuatan <i>Response Spectrum Cases</i>	64
Gambar 3.39 Tampilan <i>Input Load Case Data</i> Arah X dan Y	65
Gambar 3.40 <i>Load Patterns > Modify Lateral Load Pattern</i>	65
Gambar 3.41 NEHRP 97 <i>Seismic Load Pattern</i> Data Arah X	65
Gambar 3.42 NEHRP 97 <i>Seismic Load Pattern</i> Data Arah Y	66
Gambar 3.43 Tampilan <i>Input</i> Kombinasi Pembebanan	67
Gambar 3.44 <i>Run Analysis</i>	67
Gambar 3.45 Lendutan yang Terjadi di Tengah Bentang	69
Gambar 4.1 Translasi Arah X (Mode 3)	71
Gambar 4.2 Translasi Arah Y (Mode 5)	72
Gambar 4.3 Perpindahan Titik Atas <i>Pylon</i> akibat Gempa Elastis X (mm)	73
Gambar 4.4 Perpindahan Titik Atas <i>Pylon</i> akibat Gempa Elastis Y (mm)	73
Gambar 4.5 Nomor Kabel	76
Gambar 4.6 Momen yang Terjadi pada <i>Pylon</i>	82
Gambar 4.7 Luas Tulangan Longitudinal Perlu Hasil Desain CSiBridge	82
Gambar 4.8 Rasio Tulangan Longitudinal Perlu Hasil Desain CSiCol	83
Gambar 4.9 Diagram Interaksi	85
Gambar 4.10 Denah Penulangan <i>Pylon</i>	87

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kombinasi Pembebanan	18
Tabel 2.2 Faktor Beban untuk Berat Sendiri (MS)	19
Tabel 2.3 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan (MA)	19
Tabel 2.4 Faktor Beban untuk Beban Lajur “D”	20
Tabel 2.5 Kriteria Lendutan Opsional	23
Tabel 2.6 Kriteria Lendutan Diperlukan	24
Tabel 3.1 Dimensi Awal <i>Pylon</i> Berdasarkan Konfigurasi <i>Pylon</i>	38
Tabel 3.2 Jenis Kabel	39
Tabel 3.3 Besar Sudut Kabel Terhadap Gelagar	40
Tabel 3.4 Perhitungan Penampang dan Jumlah Kabel <i>Strand</i>	41
Tabel 3.5 Perhitungan Modulus Elastisitas Ekuivalen	42
Tabel 3.6 Perhitungan Beban Mati Tambahan (MA)	43
Tabel 3.7 Parameter Desain Respon Spektrum	46
Tabel 3.8 Zona Gempa	47
Tabel 3.9 Data <i>Section Box Girder</i>	53
Tabel 3.10 Data <i>Section Points Box Girder</i>	55
Tabel 3.11 Kombinasi Pembebanan	66
Tabel 4.1 Partisipasi Massa Ragam Jembatan	70
Tabel 4.2 Gaya Geser Dinamik Arah X dan Y	72
Tabel 4.3 Periode Fundamental untuk Arah X dan Y	73
Tabel 4.4 Gaya Statik Ekuivalen	75
Tabel 4.5 Gaya Dalam <i>Pylon</i>	75
Tabel 4.6 Gaya Dalam Kabel	76
Tabel 4.7 Tegangan Kabel vs Tegangan Izin Kabel (ASTM)	77
Tabel 4.8 Jenis Kabel	78
Tabel 4.9 Tegangan Sesudah Modifikasi Jumlah <i>Strand</i> (ASTM)	78
Tabel 4.10 Tegangan Kabel vs Tegangan Izin Kabel (Euronorme)	79
Tabel 4.11 Tegangan Sesudah Modifikasi Jumlah <i>Strand</i> (Euronorme)	80
Tabel 4.12 Perbedaan Rasio Tegangan Kabel ASTM dan Euronorme	81

DAFTAR NOTASI

A	= luas penampang elemen
A_g	= luas brutto
b	= lebar elemen tidak diperkaku
b_v	= lebar efektif penampang
C_{sm}	= koefisien respons elastik
DL'	= beban mati yang bekerja
d_v	= kedalaman geser efektif
d	= tinggi efektif penampang
E	= modulus elastisitas
EQ_x	= beban gempa yang bekerja pada arah x
EQ_y	= beban gempa yang bekerja pada arah y
E_q	= gaya gempa horizontal statis
f_y	= tegangan leleh baja
F_{PGA}	= faktor amplifikasi percepatan yang mewakili getaran periode 0 detik
F_a	= faktor amplifikasi percepatan yang mewakili getaran periode 0,2 detik
F_u	= kuat tarik baja
F_v	= faktor amplifikasi percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik
f_{ye}	= tegangan leleh elemen
f_c'	= kuat tekan beton
LL	= beban hidup yang bekerja
M_n	= kuat lentur nominal kolom atau pilar
M_{ns}	= kuat lentur nominal elemen
M_u	= momen ultimit terfaktor yang bekerja pada elemen
PGA	= percepatan puncak batuan dasar
P_n	= kuat tekan aksial nominal
R	= faktor modifikasi respon
r	= jari-jari girasi
S_1	= parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode 1 detik
S_{D1}	= nilai spektra permukaan tanah pada periode 1 detik
S_{DS}	= nilai spektra permukaan tanah pada periode 0,2 detik
S_g	= modulus penampang pelat buhul pada sumbu kuat
S_s	= parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode pendek
s	= spasi sengkang
T_f	= periode fundamental jembatan
T_{max}	= beban statik terfaktor diaplikasikan pada penulangan
W_t	= berat total struktur
V_c	= kapasitas geser kontribusi dari beton
V_n	= tahanan geser nominal
ϕ	= faktor reduksi tahanan
γ_{EQ}	= faktor beban hidup kondisi gempa
Δ	= perpindahan titik kolom atau pilar relatif terhadap dasar fondasi
Δ_e	= perpindahan berdasarkan analisis gempa elastis

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran L.1 Pemodelan Struktur Jembatan dengan Bantuan Perangkat Lunak	91
Lampiran L.2 Detail Penulangan <i>Pylon</i>	92
Lampiran L.3 <i>Layout</i> Jembatan	93
Lampiran L.4 Standar Kabel	94
Lampiran L.5 Prosedur Desain	96

