

TUGAS AKHIR

ANALISA KEHILANGAN GAYA PRATEGANG PADA GIRDER DAN DEFORMASI PILAR PADA STRUKTUR *FLY OVER* KERETA API *DOUBLE TRACK*

(Studi Literatur)

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat-Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Sipil Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

RETNO FRIANA DEWI

1407210013



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2018

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Retno Friana Dewi

NPM : 1407210013

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Skripsi : Analisa Kehilangan Gaya Prategang pada Girder dan Deformasi
Pilar pada Struktur *Fly Over* Kereta Api *Double Track*

Bidang Ilmu : Struktur

Telah Berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, September 2018

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I / Penguji


Tondi Anirsyah P. S.T,M.T

Dosen Pembimbing I / Penguji


Dr. Ade Faizal .S.T,M.Sc

Dosen Pembimbing II / Penguji


Sri Prafanti S.T,M.T

Dosen Pembimbing II / Penguji


Dr. Fahrizal Zulkarnain, S.T, M.Sc

Program Studi Teknik Sipil

Ketua


Dr. Fahrizal Zulkarnain, S.T, M.Sc



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Lengkap : Retno Friana Dewi
Tempat/Tanggal Lahir : Medan/ 24 April 1996
NPM : 1407210013
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Analisa Kehilangan Gaya Prategang pada Girder dan Deformasi Pilar pada Struktur *Fly Over* Kereta Api *Double Track*”.

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidak sesuaian antara fakta dan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademi di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, September 2018

Saya yang menyatakan,



Retno Friana Dewi

ABSTRAK

ANALISA KEHILANGAN GAYA PRATEGANG PADA GIRDER DAN DEFORMASI PILAR PADA STRUKTUR *FLY OVER* KERETA API *DOUBLE TRACK*

Retno Friana Dewi
1407210013
Tondi Amirsyah P ST, MT
Sri Prafanti ST, MT

Fly over kereta api *double track* Medan adalah transportasi massal kereta api dengan jalur ganda yang pertama dibangun di kota Medan, Indonesia. Struktur *fly over* direncanakan dengan struktur melayang pada ketinggian 9-12 meter di atas permukaan tanah menggunakan box girder, struktur jembatan bersifat *discontinuous* dengan panjang gelagar antar pilar sebesar 40 m. Perencanaan jembatan ini dimulai dengan pengumpulan data dan literatur yang diperlukan dalam perencanaan. Perencanaan akan mengacu pada SNI T-12-2004, peraturan pembebanan menggunakan SNI 1725-2016 dan peraturan jalur teknis kereta api PM No 60 tahun 2012. Dimana pada tugas akhir ini penulis akan menganalisa kehilangan gaya prategang yang terjadi pada girder dan membandingkan perilaku struktur terhadap pilar persegi yang merupakan data eksisting proyek dengan pilar bulat, analisa struktur jembatan menggunakan program *CSI Bridge*, kehilangan gaya prategang pada girder mencakup kehilangan pada susut, rangkai, relaksasi baja, perpendekan elastis, slip ankur dan gesekan pada kabel sebesar 18,62 %, hasil selisih nilai perbandingan perioda getar adalah sebesar 0,08879 sec, selisih nilai perbandingan lendutan maksimum sebesar 0,0445 mm, selisih perbandingan berat struktur 2,26 %, dan selisih perbandingan deformasi struktur sebesar 0,0002 mm, dari hasil yang diperoleh penulis menyimpulkan bahwa penggunaan pilar bulat lebih lemah menahan lendutan yang terjadi akan tetapi masih dalam batas izin.

Kata Kunci: jembatan, *box girder*, *double track*, tendon, kehilangan prategang.

ABSTRACT

ANALYSIS OF LOSS PRESTRESSING FORCE ON THE GIRDER AND DEFORMATION OF THE PIER IN THE DOUBLE TRACK RAILROAD FLY OVER STRUCTURE

Retno Friana Dewi
1407210013
Tondi Amirsyah P ST, MT
Sri Frapanti ST, MT

Fly over the double track train Medan is the first double-track mass transportation train built in Medan, Indonesia. The structure of the fly over is planned with a floating structure at an altitude of 9-12 meters above the ground using a box girder, the bridge structure is discontinuous with a girder length between pillars of 40 m. Bridge planning begins with collecting data and literature needed in planning. Planning will refer to SNI T-12-2004 and the regulation of imposition by using PM No 60-2012th, where on this final project, the writer will analyze the loss of prestressing force that occurs in the girder and compare the structure used for existing data of the project with rounded pillar, the analysis of bridge structure is using the csi bridge program. loss of prestressing force on the girder includes loss of creep and shrinkage, relaxation of prestressing steel, elastic shortening of concrete, slip at anchorages, and friction of 18.62%, The difference of period comparison value is 0,08879, the difference in the value of the maximum deflection ratio is 0,0445 mm, the difference in the ratio of the weight of the structure is 2,26%, and the difference in the ratio of the structure deformation is 0,0002 mm, based on the results obtained the write, concludes that the use of round pillars is weaker with stand deflection that occurs eventought it is still whitin the permit limit.

Keywords: bridge, box girder, double track, tendon, loss of prestressing.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabil'amin, segala puji atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufik serta hidayah-Nya kepada penulis, sehingga atas barokah dan ridho-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini sebagai mana yang diharapkan.

Adapun judul dari tugas akhir ini adalah “Analisa Kehilangan Gaya Prategang pada Girder dan Deformasi Pilar pada Struktur *Fly Over* Kereta Api *Double Track*” yang diselesaikan selama kurang lebih 10 bulan. Tugas Akhir ini disusun untuk melengkapi syarat menyelesaikan jenjang kesarjanaan Strata 1 pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Selama menyelesaikan Tugas Akhir ini, penulis telah banyak mendapat bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, untuk itu dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Tondi Amirsyah P S.T, M.T. selaku Dosen Pembimbing - I dalam penulisan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Sri Frapanti S.T, M.T selaku Dosen Pembimbing - II dalam penulisan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ade Faisal, S.T, M.Sc selaku Dosen Pembimbing - I dalam penulisan Tugas Akhir ini dan Wakil Dekan I Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Dr. Fahrizal Zulkarnain, S.T, M.Sc selaku Dosen Pembimbing - II dalam penulisan Tugas Akhir ini dan Ketua Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak dan Ibu staf pengajar dan Pegawai Biro Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

7. Teristimewa sekali kepada Ayahanda Nasib Syahputra dan Ibunda Halimah yang telah mengasuh dan membesarkan penulis dengan rasa cinta dan kasih sayang yang tulus.
8. Terimakasih kepada abangda Muhammad Iqbal Y Saran S.T, Effan Ferarri Gultom S.T, Muhammad Prayudha S.T, Muhammad Luthfi Sofyan Lubis S.T, M Fuad Hanif S.T, dan yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah banyak membantu selama proses kuliah hingga penyelesaian tugas akhir ini.
9. Nizar Fuadi, Juni Indriani, Yuwinda Arthika S.T, Rahmad Amin Pasaribu, Hanifah Zahra, Sapto Prabowo, Jefri Rahmad Fadhil, Adisti, Rahmad Haryadi, Rizki, Puji Ramazana, Fahmi Idris serta keluarga besar Teknik Sipil 2014, Keluarga A1 Pagi Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, dan seluruh teman-teman yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan dikarenakan keterbatasan waktu serta kemampuan yang dimiliki oleh penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang sifatnya membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih dan rasa hormat yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini. Semoga Tugas Akhir bisa memberikan manfaat bagi kita semua terutama bagi penulis dan juga bagi teman-teman mahasiswa Teknik Sipil khususnya. Aamiin....

Wassalamu'Alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Medan, September 2018

Penulis

Retno Friana Dewi

1407210013

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR NOTASI	xvii
DAFTAR SINGKATAN	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Jembatan	5
2.2 Jembatan Jalan Rel	5
2.3 Persyaratan Komponen	6
2.3.1 Elemen Struktur Jembatan Kereta Api	8
2.3.1.1 Bangunan Atas (<i>Super Structure</i>)	8
2.3.1.2 Bangunan Bawah (<i>Sub Structure</i>)	14
2.4 Beton Prategang	16
2.4.1 Defenisi Beton Prategang	16
2.4.2 Konsep Dasar Beton Prategang	17
2.4.3 Sistem Pemberian Prategang	19
2.4.4 Persyaratan Material Beton Prategang	20
2.4.5 Material Beton Prategang	21

2.4.5.1	Struktur Beton	21
2.4.5.2	Tulangan Baja Prategang	29
2.4.5.3	Selongsong	31
2.4.5.4	Angkur	32
2.4.5.5	Penyambung (<i>coupler</i>)	32
2.4.6	Kehilangan Gaya Prategang	32
2.4.6.1	Kehilangan Akibat Perpendekan Elastis Beton (ES)	33
2.4.6.2	Kehilangan Akibat Susut Pada Beton (SH)	33
2.4.6.3	Kehilangan Tegangan akibat Friksi/ Gesekan (F)	34
2.4.6.4	Kehilangan Prategang Akibat Slip Pengangkuran (ANC)	35
2.4.6.5	Kehilangan Akibat Rangkak Pada Beton (CR)	36
2.4.6.6	Kehilangan Tegangan akibat Relaksasi Baja (R)	36
2.5	Persyaratan Pada Sistem <i>Fly Over</i> Kereta Api <i>Double Track</i>	38
2.5.1	Beban Gandar	38
2.5.2	Lendutan	38
2.5.3	Stabilitas Konstruksi	39
2.6	Beban Gempa (EQ)	39
2.7	Pembebanan Pada <i>Fly Over</i> Kereta Api <i>Double Track</i>	45
2.7.1	Berat Sendiri (MS)	45
2.7.2	Beban Mati Tambahan/Utilitas (MA)	46
2.7.3	Pengaruh Tetap Pelaksanaan (PL)	47
2.7.4	Pengaruh Prategang (PR)	47
2.7.5	Pengaruh Susut dan Rangkak (SH)	48
2.7.6	Beban Pengereman Dan Traksi (TB)	48
2.7.7	Beban Horizontal	48
2.7.7.1	Beban Sentrifugal (TR)	48
2.7.7.2	Beban Lateral Kereta (LR)	49
2.7.7.3	Beban Pengereman Dan Traksi	49
2.7.8	Gesekan Pada Perletakan (BF)	49
2.7.9	Beban Lalu Lintas (TD)	49
2.7.10	Beban Lokomotif dan Tender (TT)	50
2.7.11	Beban Akibat Penurunan (SE)	51

2.7.12	Beban Kejut (i)	52
2.7.13	Beban Rel Panjang Longitudinal (L_F)	52
2.7.14	Gaya Akibat Temperatur Seragam (EUn)	52
2.7.15	Temperatur Gradien	53
2.7.16	Beban Angin (EW)	54
2.7.17	Faktor Beban Dinamis	55
2.8	Kombinasi Pembebanan	55
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		58
3.1	Metodologi Penelitian	58
3.2	Metode Analisis	59
3.3	Uraian Metode	59
3.3.1	Pengumpulan Data	59
3.3.2	<i>Preliminary Design</i>	59
3.3.3	Pemodelan Struktur	64
3.3.4	Data-Data Bahan untuk Perencanaan	65
3.3.5	Perhitungan Section Properties <i>Box girder Prestress</i>	66
3.3.6	Analisis Pembebanan	68
3.3.6.1	Beban Mati (MS)	69
3.3.6.2	Beban Mati Tambahan (MA)	69
3.3.6.3	Beban Pelaksanaan (PL)	71
3.3.6.4	Beban Susut (SH)	71
3.3.6.5	Gaya akibat Rem (TB)	72
3.3.6.6	Gaya Akibat Tumbukan Kendaraan	72
3.3.6.7	Beban Hidup / Lokomotif dan Tender (TT)	73
3.3.6.8	Beban Angin Pada Struktur (EWs)	76
3.3.6.9	Angin pada kendaraan (EW _L)	76
3.3.6.10	Gaya akibat Temperatur Seragam (EUn)	77
3.3.6.11	Temperatur Gradien	77
3.3.6.12	Beban Friksi	77
3.3.6.13	Beban Gempa	78
3.3.7	Kombinasi Pembebanan	81
3.3.8	Perencanaan Prategang Box Girder	82

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	86
4.1 Tinjauan umum	86
4.2 Hasil analisa	86
4.2.1 Kontrol Lendutan	86
4.2.2 Hasil analisis perioda getar model	88
4.2.3 Hasil analisis prategang dan jumlah strand	89
4.2.4 Hasil analisis tegangan akibat kombinasi Layan	89
4.2.5 Hasil analisis nilai gaya geser arah X (V2)	91
4.2.6 Hasil analisis nilai gaya geser arah Y (V3)	91
4.2.7 Hasil analisis nilai gaya aksial (P)	92
4.2.8 Kehilangan Prategang pada Box Girder	93
4.2.9 Analisis Kekuatan <i>Pier</i> Pemodelan 1	98
4.2.9.1 Pengaruh Berat Struktur	99
4.2.9.2 Pengaruh Deformasi	100
4.2.10 Analisis Kekuatan <i>Pier</i> Pemodelan 2	100
4.2.10.1 Pengaruh Berat Struktur	100
4.2.10.2 Pengaruh Deformasi	101
4.2.11 Diagram Interaksi	101
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	104
5.1 Kesimpulan	104
5.2 Saran	105
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	: Pembagian kelas jalan rel di Indonesia (PM No 60 Tahun 2012)	8
Tabel 2.2	: Dimensi penampang rel	9
Tabel 2.3	: Tipe <i>pier</i>	15
Tabel 2.4	: Selimut beton untuk acuan dan pemadatan standar	25
Tabel 2.5	: Koefisien standar susut beton sbagai tambahan regangan Jangka panjang	27
Tabel 2.6	: Koefisien standar rangkak beton sebagai tambahan regangan jangka panjang	29
Tabel 2.7	: Kawat-kawat untuk beton prategang	31
Tabel 2.8	: Strands standar tujuh kawat untuk beton prategang	31
Tabel 2.9	: Nilai KSH untuk komponen struktur <i>pascatarik</i>	34
Tabel 2.10	: Koefisien gesek kelengkungan dan <i>wobble</i>	35
Tabel 2.11	: Nilai KRE dan J	37
Tabel 2.12	: Nilai C	37
Tabel 2.13	: Koefisien lendutan maksimum jembatan baja	38
Tabel 2.14	: Koefisien lendutan maksimum jembatan beton	38
Tabel 2.15	: Faktor amplifikasi periode 0 detik dan 0,2 detik (FPGA/FA)	43
Tabel 2.16	: Nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (Fv)	43
Tabel 2.17	: Faktor modifikasi respon (R)	45
Tabel 2.18	: Berat jenis bahan	46
Tabel 2.19	: Faktor beban akibat berat sendiri	46
Tabel 2.20	: Faktor beban untuk beban mati tambahan	47
Tabel 2.21	: Faktor beban akibat pengaruh pelaksanaan	47
Tabel 2.22	: Faktor beban akibat pengaruh prategang	48
Tabel 2.23	: Faktor beban akibat susut dan rangkak	48
Tabel 2.24	: Faktor beban akibat gesekan pada perletakan	49
Tabel 2.25	: Faktor beban akibat penurunan	52
Tabel 2.26	: Temperatur jembatan rata-rata nominal	53
Tabel 2.27	: Sifat bahan rata-rata akibat pengaruh temperatur	53
Tabel 2.28	: Parameter T_1 dan T_2	54

Tabel 2.29 : Kombinasi beban dan faktor beban	57
Tabel 3.1 : Nilai-nilai faktor kapasitas daya dukung Terzaghi (1943)	62
Tabel 3.2 : Spesifikasi <i>elastomeric bearing pad</i>	63
Tabel 3.3 : Berat jenis bahan	65
Tabel 3.4 : Analisa <i>section properties box girder</i>	67
Tabel 3.5 : Berat <i>box girder</i>	69
Tabel 3.6 : Komposisi pembebanan	74
Tabel 3.7 : Beban penumpang	74
Tabel 3.8 : Beban kereta dan penumpang	74
Tabel 3.9 : Pemakaian jumlah <i>strands</i> tendon	84
Tabel 3.10 : Pemakaian jumlah <i>strands</i>	84
Tabel 4.1 : Nilai lendutan maksimum akibat kombinasi pada model 1	86
Tabel 4.2 : Nilai lendutan maksimum akibat kombinasi pada model 2	87
Tabel 4.3 : Nilai perioda getar (T) pada model 1 <i>pier</i> kotak	88
Tabel 4.4 : Nilai perioda getar (T) pada model 2 <i>pier</i> bulat	88
Tabel 4.5 : Tegangan (σ) akibat kombinasi layan pada pemodelan girder	90
Tabel 4.6 : Nilai gaya geser X (V2) maksimum	91
Tabel 4.7 : Nilai gaya geser Y (V3) maksimum	91
Tabel 4.8 : Nilai gaya aksial (P) maksimum	92
Tabel 4.9 : Beban ultimit pada pemodelan 1 pada <i>pier</i>	95
Tabel 4.10 : Beban ultimit pada pemodelan 2 pada <i>pier</i>	100
Tabel 4.11 : <i>Output</i> gaya momen dan aksial <i>pier</i> kotak	102
Tabel 4.12 : <i>Output</i> gaya momen dan aksial <i>pier</i> bulat	103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 : Potongan melintang penyusun bagian atas (PM No. 60 Tahun 2012)	10
Gambar 2.2 : Struktur bagian atas komponen penyusun	10
Gambar 2.3 : <i>PC voided slab</i>	11
Gambar 2.4 : <i>Box girder</i>	12
Gambar 2.5 : <i>PCI girder</i>	12
Gambar 2.6 : <i>PCU girder</i>	13
Gambar 2.7 : Komponen LRB	13
Gambar 2.8 : Tipe <i>pier</i> jembatan penyebrangan <i>viaduct</i> dan darat	16
Gambar 2.9 : Tipe <i>pier</i> jembatan penyeberangan sungai dan <i>waterway</i>	16
Gambar 2.10 : Distribusi tegangan serat beton pada balok persegi panjang dengan tendon lurus	18
Gambar 2.11 : Metode pratarik	20
Gambar 2.12 : Metode <i>pascatarik</i>	20
Gambar 2.13 : Grafik penentuan faktor susut	26
Gambar 2.14 : Grafik penentuan faktor rangkai	28
Gambar 2.15 : Spesifikasi angkur	32
Gambar 2.16 : Perpendekan elastis. (a) Balok tak bertegangan. (b) balok yang memendek secara longitudinal bertegangan	33
Gambar 2.17 : Kurva perbandingan susut terhadap waktu	34
Gambar 2.18 : Percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk melampaui probabilitas 10% dalam 50 tahun	40
Gambar 2.19 : Peta <i>respons spectra</i> percepatan 1 detik d batuan untuk probabilitas terlampaui 10 % dalam 50 tahun	41
Gambar 2.20 : Peta <i>respons spectra</i> percepatan 0,2 detik d batuan untuk probabilitas terlampaui 5 % dalam 50 tahun	42
Gambar 2.21 : Spektrum rencana gempa (2013)	44
Gambar 2.22 : Beban lateral kereta	49
Gambar 2.23 : Gradien temperatur vertikal pada bangunan atas beton Dan baja	54
Gambar 2.24 : Faktor beban dinamis untuk beban hidup kendaraan	55
Gambar 3.1 : Diagram alir perencanaan <i>fly over double track</i>	58

Gambar 3.2	: Potongan melintang <i>box girder</i>	59
Gambar 3.3	: Dimensi <i>box girder prestress</i> .	60
Gambar 3.4	: Potongan melintang <i>pier</i> kotak	61
Gambar 3.5	: Potongan melintang <i>pier</i> bulat	61
Gambar 3.6	: Peta lintas kereta api dari stasiun Medan ke Bandar Khalifah	63
Gambar 3.7	: Tampak 3D struktur <i>fly over double track</i>	64
Gambar 3.8	: Tampak 3D struktur jembatan model 1 pada <i>software</i>	64
Gambar 3.9	: Tampak 3D struktur jembatan model 2 pada <i>software</i>	65
Gambar 3.10	: <i>Section properties</i> gelagar jembatan	67
Gambar 3.11	: Jarak terhadap alas “y”	67
Gambar 3.12	: Pembagian segmen <i>box girder</i>	69
Gambar 3.13	: Beban mati tambahan pada <i>box girder</i>	70
Gambar 3.14	: Pemodelan beban mati tambahan pada <i>software</i>	71
Gambar 3.15	: Pemodelan beban pelaksanaan pada <i>software</i>	71
Gambar 3.16	: <i>Input</i> beban TB pada <i>software</i>	72
Gambar 3.17	: <i>Input</i> beban tumbukan pada <i>software</i>	73
Gambar 3.18	: Ilustrasi kereta 3 gerbong	73
Gambar 3.19	: Pemodelan beban hidup kereta pada <i>software</i>	75
Gambar 3.20	: <i>Input</i> beban angin <i>pier</i> pada <i>software</i>	76
Gambar 3.21	: <i>Input</i> beban angin struktur pada <i>software</i>	76
Gambar 3.22	: <i>Input</i> beban angin kendaraan pada <i>software</i>	76
Gambar 3.23	: <i>Input</i> temperatur gradien pada <i>software</i>	77
Gambar 3.24	: Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk kota Medan	78
Gambar 3.25	: Peta respon spektra percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk kota Medan	79
Gambar 3.26	: Peta respon spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk kota Medan	79
Gambar 3.27	: Grafik respon <i>spectrum</i>	81
Gambar 3.28	: Pemodelan respon <i>spectrum</i> pada <i>software</i>	81
Gambar 3.29	: Detail perletakan kabel tendon	82
Gambar 3.30	: Tabel jenis dan karakteristik tendon <i>box girder</i>	82

Gambar 3.31 : Posisi tendon pada tumpuan tengah	85
Gambar 3.32 : Posisi tendon pada tumpuan tepi	85
Gambar 3.33 : <i>Output</i> nilai Fcsd pada <i>software</i>	85
Gambar 4.1 : Grafik perbandingan nilai lendutan	87
Gambar 4.2 : Grafik perbandingan nilai perioda getar T pada model 1 dan 2	89
Gambar 4.3 : Tegangan pada kombinasi Layan 1	90
Gambar 4.4 : Tegangan pada kombinasi Layan 3	90
Gambar 4.5 : Grafik perbandingan V2 dan V3	92
Gambar 4.6 : Grafik perbandingan gaya aksial	92
Gambar 4.7 : <i>Output</i> nilai Fcsd pada <i>software</i>	96
Gambar 4.8 : Diagram interaksi <i>pier</i> kotak	102
Gambar 4.9 : Diagram interaksi <i>pier</i> bulat	103

DAFTAR NOTASI

A_c	= Luasan penampang
P	= Gaya tekan
f^t	= Tegangan di serat atas
f^b	= Tegangan di serat bawah
c	= $\frac{H}{2}$, untuk penampang persegi panjang
I_g	= $\frac{B.H^3}{12}$, untuk momen inersia bruto penampang
A_c	= Luas penampang beton
P	= Gaya tekan
E_c	= Eksentrisitas tendon
M_c	= Momen akibat berat sendiri
I_g	= Momen inersia beton
W_c	= Menyatakan berat jenis beton dalam satuan Kg/m^3
f_c'	= Menyatakan kuat tekan beton dalam satuan MPa
E_c	= Modulus elastisitas beton
E_p	= Modulus elastisitas baja prategang
$\epsilon_{cs.t}$	= Nilai regangan susut beton pada umur t hari, dan
$\epsilon_{cs.u}$	= Nilai susut maksimum beton
t	= Umur beton yang dirawat basah di lokasi pekerjaan, terhitung sejak 7 hari setelah pengecoran [hari]
K_h^s	= Faktor pengaruh kelembaban relatif udara setempat [H (%)]
K_d^s	= Faktor pengaruh ketebalan komponen beton [d (cm)]
K_s^s	= Faktor pengaruh konsistensi (<i>slump</i>) adukan beton [s (cm)]
K_f^s	= Faktor pengaruh kadar agregat halus dalam beton [F (%)]
K_b^s	= Faktor pengaruh jumlah semen dalam beton [C (Kg/m^3)]
K_{ac}^s	= Faktor pengaruh kadar udara dalam beton [AC (%)].
T	= Waktu setelah pembebanan [hari]
C_u	= Koefisien rangkai maksimum
K_h^c	= Faktor pengaruh kelembaban relatif udara setempat [H (%)]
K_d^c	= Faktor pengaruh ketebalan komponen beton [d (cm)]

- K_s^c = Faktor pengaruh konsistensi (*slump*) adukan beton [s (cm)]
 K_f^c = Faktor pengaruh kadar agregat halus dalam beton [F (%)]
 K_{ac}^c = Faktor pengaruh kadar udara dalam beton [AC (%)]
 K_{to}^c = Faktor pengaruh umur beton saat dibebani [t_o (hari)]
 f_{cfr} = Tegangan beton pada garis berat baja (c.g.s) akibat gaya prategang yang efektif segera setelah gaya prategang telah dikerjakan pada beton
 M_G = Momen akibat berat sendiri beton.
 E_s = Modulus elastisitas tendon prategang
 E_{ci} = Modulus elastisitas beton pada saat pengangkutan
 F_{pF} = Gaya prategang setelah terjadi kehilangan akibat friction
 f_{pF} = Besarnya gaya kehilangan prategang akibat friksi
 F_i = Gaya awal prategang
 A = Sudut kelengkungan
 M = Koefisien friksi (gesekan)
 K = Koefisien *wobble*
 L = Panjang bersih balok
 F = Fokus tendon (eksentrisitas dari cgs)
 F_{pA} = Kehilangan gaya prategang akibat slip ankur
 A_{ps} = Luas penampang tendon
 Δf_{pA} = Jumlah hilangnya tegangan prategang akibat ankur
 f_{st} = Besarnya tegangan ijin baja tendon minimum
 α = Sudut kelengkungan tendon
 μ = Koefisien friksi (gesekan)
 K = Koefisien woble
 L = Panjang bersih balok
 i = Faktor kejut
 L = Panjang bentang (m)
 X = Koefisien slip ankur berdasarkan bentuk profil tendon (digunakan profil tendon berbentuk parabola)
 f_{cds} = Tegangan beton pada titik berat tendon akibat seluruh beban mati yang bekerja pada komponen struktur setelah diberi gaya prategang
 E_s = Modulus elastisitas tendon prategang

E_c	= Modulus elastisitas beton umur 28 hari
K_{sh}	= Koefisien faktor susut
RH	= Kelembaban relatif
V/S	= Perbandingan volume terhadap permukaan
N	= Hasil uji penetrasi standar
S_u	= Kuat geser tak terdrainase dengan tebal lapisan tanah sebagai besaran pembobotnya
t_i	= Tebal lapisan tanah ke-i
V_{si}	= Kecepatan rambat gelombang geser melalui lapisan tanah ke-i
N_i	= Nilai hasil uji penetrasi standar lapis tanah ke-i
S_{ui}	= Kuat geser tak terdrainase lapis tanah ke-i
m	= Jumlah lapis tanah yang ada di atas batuan dasar.
PGA	= Percepatan puncak batuan dasar
S_s	= Parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode pendek ($T=0.2$ detik)
SS	= Lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons dinamik spesifik
S_1	= Parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode 1 detik
MS	= Beban mati komponen <i>structural</i> dan <i>non structural</i> jembatan
MA	= Beban mati perkerasan dan utilitas
TA	= Gaya horizontal akibat tekanan tanah
PL	= Gaya-gaya yang terjadi pada struktur jembatan yang disebabkan oleh proses pelaksanaan
PR	= Prategang
SH	= Gaya akibat susut/rangkak
TB	= Gaya akibat rem
TR	= Gaya sentrifugal
TC	= Gaya akibat tumbukan kendaraan
TV	= Gaya akibat tumbukan kapal
EQ	= Gaya gempa
BF	= Gaya friksi
TD	= Beban lajur "D"

TT	= Beban Truk “T”
TP	= Beban pejalan kaki
SE	= Beban akibat penurunan
ET	= Gaya akibat temperatur gradien
EU _n	= Gaya akibat temperatur seragam
EF	= Gaya apung
EW _s	= Beban angin pada struktur
EW _L	= Beban angin pada kendaraan
EU	= Beban arus dan hanyutan
n _i	= Faktor pengubah respons berkaitan dengan daktilitas, redudansi, dan klasifikasi operasional
y _i	= Adalah faktor beban ke-i
Q _i	= Pengaruh gaya
ϕ	= Faktor tahanan
R _n	= Tahanan nominal
R _r	= Tahanan terfaktor
F1	= Besarnya gaya prategang dititik 1
F2	= Besarnya prategang dititik 2
Pi	= Gaya prategang awal

DAFTAR SINGKATAN

SNI	= Standar Nasional Indonesia
RSNI	= Revisi Standar Nasional Indonesia
BSN	= Badan Standarisai Nasional
PBKT	= Perencanaan Beban dan Kekuatan Terfaktor
PBL	= Perencanaan berdasarkan Batas Layan
ASTM	= <i>American Standart Testing and Material</i>
PM	= Peraturan Menteri
EG	= Elastik Ganda
ET	= Elastik Tunggal

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Transportasi dan ekonomi adalah dua hal yang saling berkaitan satu sama lain. Terhambatnya kegiatan transportasi tentu akan berdampak pada menurunnya pendapatan secara ekonomi. Begitu pula sebaliknya, maka dari itu perlu adanya kesinambungan antara kedua hal ini sehingga pertumbuhan ekonomi dapat meningkat, (Aditya, 2016).

Transportasi darat atau *ground transport* adalah salah satu jenis transportasi yang banyak digunakan oleh para pelaku usaha. Di pulau Sumatera, khususnya Medan, jalur distribusi barang berpusat pada daerah Deli Serdang yaitu di kawasan Bandara Internasional Kuala Namu yang dapat ditempuh melalui Jalan Tol Medan – Kuala Namu – Tebing Tinggi.

Untuk mengurangi kemacetan pemerintah memberikan solusi pembangunan *flyover* kereta api Medan menuju Kuala Namu, rel kereta api dua lajur ini akan mempersingkat waktu perjalanan dari pusat kota Medan ke Bandara Kuala Namu, yang akan melayani lalu lintas dua arah secara terus-menerus, dan akan menghemat setidaknya 10 menit dari 30 menit waktu perjalanan seperti saat ini.

Proyek ini adalah proyek pertama yang menggunakan segmental *box girder* di Medan, yang membutuhkan teknologi tingkat tinggi milik Wijaya Karya Tbk. karena dibangun di atas jalur kereta api aktif yang sudah ada. Sebagai kontraktor utama, WIKA Beton Tbk. memastikan bahwa proyek akan selesai secara efektif pada program '*fast-track*' dengan memasok *precast segmental box girder* yang digunakan untuk span utama di struktur bagian atas.

Satu segmen *box girder* memiliki tinggi 2,4 meter dan lebar 10,3 meter, dengan berat maksimum 40 ton. Sementara itu, tinggi tipikal span utama adalah 40 m yang membutuhkan 15 segmen untuk satu rentang. Jumlah segmen *precast girder* adalah 2.974 buah.

Pembebanan jembatan *fly over* kereta api ini mengacu pada “Standar Pembebanan untuk Jembatan” dalam SNI 1725-2016 dengan tambahan peraturan

menteri No 60. Tahun 2012 tentang peraturan jalur teknis kereta api dan “Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Jembatan” SNI 2833-2013.

Beban gempa merupakan beban yang berbahaya bagi suatu struktur, karena beban gempa adalah beban yang memiliki periode sehingga dapat menyebabkan struktur bergoyang berulang-ulang. Jika hal ini berlangsung terus-menerus, maka struktur tersebut akan runtuh tergantung dari besarnya beban gempa yang terjadi.

Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia telah meresmikan Peta Zonasi Gempa Indonesia 2010, dimana dalam peta zonasi gempa yang baru ini telah dimasukkan sesar-sesar aktif di daratan yang sebelumnya tidak dicantumkan di dalam Peta Zonasi Gempa Indonesia 2002 selain zona gempa subduksi (pertemuan antar lempeng tektonik) yang memang sudah terdeteksi.

Oleh karena itu, diperlukan suatu analisis struktur terhadap *fly over* kereta api *double track* ini terhadap gempa berdasarkan “Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk jembatan” SNI 2833-2013 untuk mengetahui deformasi yang terjadi.

Dalam tugas akhir ini akan di lakukan analisa kehilangan gaya prategang pada *girder* dan deformasi pilar pada struktur *fly over* kereta api *double track*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang ditinjau dalam evaluasi struktur *fly over* kereta api *double track* di kota Medan adalah:

1. Bagaimana analisa kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *box girder prestress*?
2. Bagaimana perilaku lendutan pada *girder* dan perilaku deformasi struktur akibat bentuk *pier* yang berbeda?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian dilakukan dengan ruang lingkup sebagai berikut:

1. Struktur yang di evaluasi adalah keseluruhan struktur kecuali pondasi dan abutment.
2. Jembatan layang (*fly over*) yang direncanakan adalah jembatan beton prategang *discontinious* dengan bentang total 8 Km, terdiri dari *pier* dengan jarak 40 m.

3. Struktur dilaksanakan di atas tanah sedang.
4. Perencanaan jalur kereta api di lakukan dengan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 tahun 2012 tentang persyaratan teknis jalur kereta api.
5. Perencanaan struktur jembatan di lakukan dengan RSNI perencanaan struktur beton untuk jembatan T-12-2004, analisis perilaku struktur dilakukan berdasarkan standar perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan SNI 2833-2013 serta peta wilayah gempa Indonesia.
6. Analisis pembebanan jembatan di lakukan dengan peraturan SNI 1725-2016 standar pembebanan untuk jembatan.
7. Analisa struktur *fly over* kereta yang ditinjau menggunakan bantuan *software CSI Bridge*.
8. Tidak melakukan perhitungan penulangan pada *pier*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penyusunan tugas akhir ini adalah:

1. Untuk menganalisa kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *box girder prestress*.
2. Untuk mengetahui perilaku lendutan pada *girder* dan simpangan pada pilar.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penulisan skripsi ini terbagi menjadi dua bagian yaitu manfaat teoritis dan manfaat praktis, sebagai berikut:

1.4.1 Manfaat Teoritis

Manfaat teoritis untuk penulis dari laporan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui bagaimana proses perencanaan struktur *fly over* kereta api *double track*, dan perilaku struktur akibat bentuk *pier* yang berbeda.

1.4.2 Manfaat Praktis

Diharapkan nantinya agar hasil dari tugas akhir saya ini dapat bermanfaat sebagai acuan dalam merencanakan struktur *fly over* kereta api *double track*.

1.6 Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini terdiri dari lima bab yang direncanakan dan diharapkan dapat menjelaskan perihal topik bahasan, yaitu:

BAB 1: Pendahuluan menguraikan latar belakang permasalahan, identifikasi dan rumusan permasalahan, ruang lingkup pembahasan, tujuan dilakukannya penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan laporan tugas akhir.

BAB 2: Tinjauan pustaka menguraikan teori-teori tentang *fly over*, metode analisa yang akan digunakan serta ketentuan dalam desain yang harus dipenuhi sesuai syarat.

BAB 3: Metode penelitian dan pemodelan menjelaskan rencana atau prosedur yang dilakukan penulis memperoleh jawaban yang sesuai dengan kasus permasalahan dan bagaimana memodelkan struktur dengan *CSI Bridge*.

BAB 4: Hasil dan pembahasan menguraikan hasil pembahasan analisis desain dan kinerja struktur.

BAB 5: Kesimpulan dan saran kesimpulan sesuai dengan analisis terhadap studi literatur dan berisi saran untuk pengembangan lebih lanjut yang baik di masa yang akan datang.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Jembatan

Jembatan pada umumnya berfungsi untuk menghubungkan dua tempat yang terpisah baik karena kondisi alam maupun karena sebab lainnya. Seiring dengan perkembangan waktu, fungsi jembatan tidak hanya sebagai alat penghubung masyarakat sekitar, tetapi juga sebagai *landmark* dari wilayah tersebut. Sehingga bentuk jembatan tidak hanya dirancang dari aspek stuktur, tetapi juga dari nilai estetika atau keindahannya (Yohanes, 2016).

Penggunaan beton pratekan dapat mereduksi volume bahan, sehingga berat profil lebih ringan dan pondasi yang digunakan akan menahan beban yang lebih ringan juga. Keuntungan pemilihan profil *box girder* sebagai alternatif antara lain:

1. Lebih efisien untuk penampangnya dikarenakan memiliki berat struktur yang lebih ringan.
2. Dari segi struktur kuat terhadap momen torsi karena merupakan satu kesatuan struktur.
3. Kuat terhadap gempa.

2.2 Jembatan Jalan Rel

Kereta api adalah salah satu alat transportasi darat yang banyak dan sering diminati oleh masyarakat golongan menengah kebawah, sehingga sering disebut sebagai moda massal di indonesia, keperluan akan jasa angkutan ini dewasa ini semakin banyak “digandrungi” oleh massa, hal ini dapat dilihat pada masa-masa liburan dan pada keadaan mudik lebaran.

Dalam peraturan di Indonesia, dan secara umum di dunia bahwa perjalanan moda jalan rel harus mendapat prioritas dalam lalu lintas di pertemuan/persilangan antara jalan rel dan jalan raya. Kondisi ini tentunya sangat kurang menguntungkan bila volume lalu lintas sangat padat, untuk mengatasi dapat dibuat terowongan, jembatan atau *underpass* bagi kendaraan atau kereta api. Biasanya penggunaan jembatan jalan rel banyak digunakan bila jalan rel melintasi

sungai atau jalan raya. Oleh karenanya, dalam perencanaan dan perancangan struktur perlu dibuat struktur yang kuat bila ditinjau dari segi teknis, estetika dan sebagainya.

2.3 Persyaratan Komponen

1. Komponen jembatan terdiri dari:
 - a. Konstruksi jembatan bagian atas
 - b. Konstruksi jembatan bagian bawah, dan
 - c. Konstruksi pelindung
2. Persyaratan untuk konstruksi jembatan bagian atas dan bawah disesuaikan dengan material pembentuk konstruksinya: baja, beton (bertulang dan prategang), dan komposit.
3. Konstruksi jembatan bagian atas dengan material baja harus memenuhi persyaratan berikut:
 - a. Tegangan (*stress*) dan tegangan leleh (*fatigue*) yang timbul pada baja struktural lebih kecil dari pada tegangan yang diizinkan.
 - b. Tegangan (*stress*) yang timbul pada baut dan paku keling/ sumbat (*rivet*) lebih kecil dari tegangan yang diizinkan.
 - c. Tegangan tarik material minimal sama atau lebih besar dari material yang disambung.
4. Konstruksi jembatan bagian atas dengan material beton bertulang dan beton prategang paling sedikit harus memenuhi persyaratan berikut:
 - a. Tegangan (*stress*) yang timbul pada beton lebih kecil dari pada tegangan yang diizinkan.
 - b. Material tumpuan atau perletakan (*bearing*) pada abutment dan *pier* dapat berupa *elastomer polyetelin* atau bahan lainnya.
 - c. Persyaratan material untuk *elastomer polyetelin* harus mengacu pada spesifikasi ASTM.
 - d. Material baja *prestressed* harus memenuhi persyaratan ASTM.
 - e. Tegangan yang terjadi pada kawat *prestressed* harus lebih kecil daripada tegangan yang diizinkan.

5. Konstruksi jembatan bagian atas dengan komposit paling sedikit harus memenuhi persyaratan berikut:
 - a. Persyaratan beton pada jembatan komposit harus mengikuti ketentuan yang ditetapkan pada jembatan beton.
 - b. Persyaratan baja pada jembatan komposit harus mengikuti ketentuan yang ditetapkan pada jembatan baja.
 - c. Material tumpuan atau perletakan (*bearing*) pada abutment dan *pier* dapat berupa *elastomer polyetelin* atau bahan lainnya. Persyaratan material untuk *elastomer polyetelin* harus mengacu pada ASTM.
 - d. Konektor geser (*shear connector*) dapat berfungsi sepenuhnya sebagai sarana pengikat material pembentuk komposit menjadi satu kesatuan. Persyaratan material untuk *shear connector* harus mengacu pada ASTM.
6. Konstruksi jembatan bagian bawah paling sedikit harus memenuhi persyaratan berikut:
 - a. Kapasitas daya dukung tanah lebih besar dari beban yang diterima dengan faktor keamanan $\sim 2,5$.
 - b. Tegangan (*stress*) yang timbul lebih kecil dari pada tegangan yang diizinkan.
 - c. Nilai standar unit penurunan yang merupakan rasio penurunan terhadap gaya aksial dari struktur atas dan struktur bawah jembatan, nilai maksimum nya harus sesuai dengan sebagaimana dinyatakan ketentuan yang berlaku.
7. Konstruksi pelindung jembatan meliputi:
 - a. Pelindung abutment, *pier*, tebing dari arus sungai
 - b. Pengarah arus
 - c. Pelindung tebing dari longsoran arah badan jalan.
8. Persyaratan untuk konstruksi pelindung jembatan disesuaikan dengan material pembentuk konstruksinya, dapat berupa baja, beton bertulang, beton prategang, pasangan batu kali, bronjong, atau konstruksi lainnya.
9. Konstruksi pelindung jembatan harus memenuhi persyaratan berikut:
 - a. Mampu melindungi abutment, *pier*, dan tebing sungai dari gerusan, benturan material bawaan arus sungai (batu, batang kayu dan lain-lain).

- b. Mampu mengarahkan arus untuk konstruksi pengarah arus.
- c. Mampu melindungi abutment dari longsoran tebing sungai untuk konstruksi pelindung tebing dari longsoran arah badan jalan.

2.3.1 Elemen Struktur Jembatan Kereta Api

2.3.1.1 Bangunan Atas (*Super Structure*)

Bangunan atas pada struktur jembatan kereta api umumnya terdiri dari jalur rel, bantalan, *ballast*, *deck slab*, balok gelagar dan Tumpuan (*bearing*). Gelagar memiliki fungsi untuk mendistribusikan beban dari kereta api menuju ke *pier* dan pondasi, potongan melintang struktur bagian atas dapat dilihat pada Gambar 2.1.

1. Rel

Jalan rel direncanakan sesuai dengan klasifikasi jalur untuk melewati berbagai jumlah angkutan barang dan/atau penumpang dalam suatu jangka waktu tertentu. Rel memiliki pembagian kelas jalan rel serta tipe rel. Dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1: Pembagian kelas jalan rel di Indonesia (PM No. 60 Tahun 2012).

Kelas Jalan Rel	Kapasitas Angkut Lintas ($\times 10^6$ ton/tahun)	Kecepatan Maksimum (Km/jam)	Tipe Rel	Jenis Bantalan/ Jarak (mm)	Jenis Penambat
I	>20	120	R.60/R.54	Beton/600	EG
II	10-20	110	R.54/R.50	Beton/Kayu/600	EG
III	5-10	100	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/ Baja/600	EG
IV	2,5-5	90	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/ Baja/600	EG/ET
V	<2,5	80	R.42	Kayu/Baja/600	ET

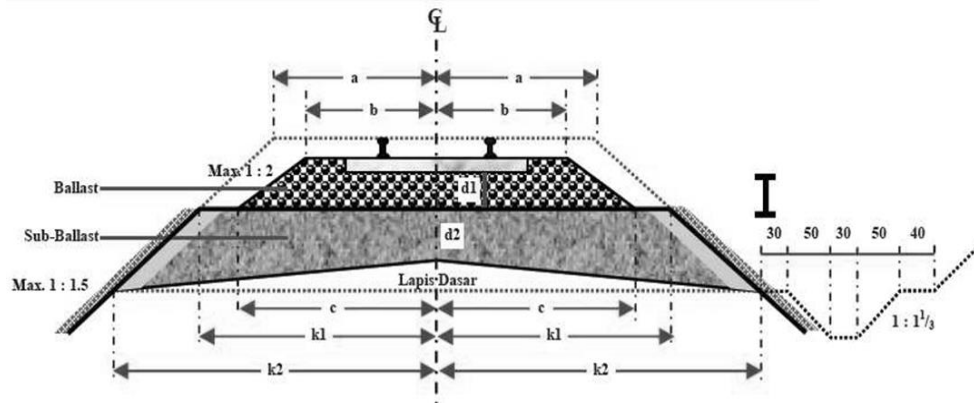
Sementara itu, penampang rel harus memenuhi ketentuan dimensi rel seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2: Dimensi penampang rel.

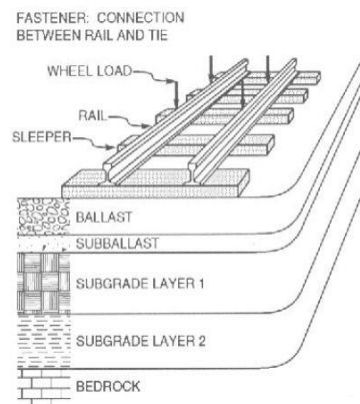
Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R 42	R 50	R 54	R 60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
G (mm)	72,00	76,00	74,79	80,95
R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
A (cm ²)	54,26	64,20	69,34	76,86
W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
A	= Luas penampang			
W	= Berat rel permeter			
I _x	= Momen inersia terhadap sumbu x			
y _b	= Jarak tepi bawah rel ke garis netral			

2. Bantalan

Bantalan yang umum digunakan di Indonesia adalah bantalan beton, bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sebesar +1500 Kgm pada bagian dudukan rel dan -930 Kgm pada bagian tengah bantalan. Jarak bantalan adalah jarak antara titik tengah pada bantalan yang beraturan dan nilai optimal untuk rel standar maupun metrik adalah sebesar 0,6 meter.



Gambar 2.1: Potongan melintang penyusun bagian atas.



Gambar 2.2: Struktur bagian atas komponen penyusun.

Potongan melintang dan komponen penyusun dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2, bantalan harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- Untuk lebar jalan rel 1067 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 500 Kg/cm^2 , dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar $16,876 \text{ Kg/cm}^2$ (1,655 MPa).
- Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sebesar +1500 Kgm pada bagian dudukan rel dan -930 Kgm pada bagian tengah bantalan. Untuk lebar jalan rel 1435 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 600 Kg/cm^2 , dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar $16,876 \text{ Kg/cm}^2$ (1,655 MPa).
- Bantalan kayu, harus memenuhi persyaratan kayu mutu A kelas 1 modulus elastisitas (E) minimum 125.000 Kg/cm^2 . Harus mampu menahan momen maksimum sebesar 800 Kgm, lentur *absolute* tidak

boleh kurang dari 46 Kg/cm². Berat jenis kayu minimum = 0,9, kadar air maksimum 15% tanpa mata kayu, retak tidak boleh sepanjang 230 mm dari ujung kayu.

- d. Bantalan besi harus memiliki kandungan *carbon manganese steel grade* 900 A, pada bagian tengah bantalan maupun pada bagian bawah rel, mampu menahan momen maksimum sebesar 650 Kgm, tegangan tarik 88 – 103 Kgm.

3. Gelagar Beton (*Concrete Girder*)

a. *PC Voided Slab*

Precast PC Voided Slab merupakan *girder* jembatan yang menggabungkan fungsi sekaligus *slab*. *Girder* jenis ini biasanya digunakan pada jembatan berbentang pendek. *precast PC voided* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3: *PC voided slab*.

b. *Box Gider*

Box girder merupakan bentuk *girder* yang paling baik untuk pekerjaan jembatan, karena dalam spesifikasi produksi tidak memiliki batasan panjang bentang. Dalam proses tahapan pekerjaan, *box girder* terlebih dahulu mengalami proses *erection*, dan diangkat per-segmental. Bentuknya cukup memenuhi nilai estetika pada bangunan jembatan sehingga penggunaannya mampu menambah keindahan kota. *Box girder* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4: *Box girder*.

c. *PCI Girder*

Precast concrete I girder merupakan bentuk yang paling banyak digunakan untuk pekerjaan balok jembatan. Profil *PCI girder* berbentuk penampang I dengan penampang bagian tengah lebih langsing dari bagian pinggirnya. *PCI girder* memiliki jenis penampang yang lebih kecil dibandingkan jenis *girder* lainnya, sehingga biasanya dari hasil analisa merupakan penampang yang ekonomis. *PCI girder* juga memiliki berat sendiri yang relatif lebih ringan per unitnya. Gambar *PCI girder* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5: *PCI girder*.

d. *PCU Girder*

Precast Concrete U girder merupakan bentuk/konsep baru yang mulai di populerkan belakangan ini. *PCU girder* merupakan bentuk *box girder* dalam bentuk dan ukuran yang lebih kecil. Tidak seperti *PCI girder* yang langsing. *PCU girder* memiliki bentuk badan yang lebih lebar namun pada bagian tengah bentang penampangnya cukup langsing. Bentuk *PCU girder* yang mirip dengan *box girder* cukup memenuhi nilai estetika jika

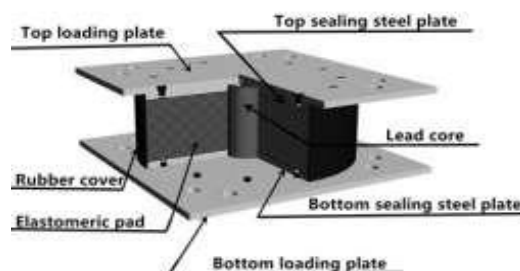
dibandingkan dengan *PCI girder* yang kaku dan terlalu tegas, *PCU girder* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6: *PCU girder*.

4. Lead Rubber *Bearing* (LRB)

Perletakan (*bearing*) digunakan pada struktur sebagai landasan, fungsinya adalah untuk mentransfer tegangan dari struktur bagian atas ke struktur bagian bawah yang dapat memberikan pergerakan pada bagian atas struktur jembatan, *bearing* juga berfungsi untuk mengakomodasi pergerakan rotasi dan translasi longitudinal. *Lead rubber bearing* adalah modifikasi dari bantalan *elastomer* berlapis dengan menambahkan inti didalamnya untuk menyerap energi seismik yang ditimbulkan dari getaran gempa. Terdiri atas pelat baja yang terikat secara kimiawi pada karet secara berlapis. Jumlah inti didalamnya dapat disesuaikan dengan desain rencana. Bagian atas dan bawah dari pelat baja dilengkapi dengan pelat *dowel* untuk memudahkan pemasangan. Lapisan baja dan karet memberikan kekakuan, kekuatan dan fleksibilitas ke arah vertikal untuk mendukung berat struktur dan dikombinasi dengan inti didalamnya untuk menghasilkan fleksibilitas, penyebaran energi dan redaman pada arah horizontal. LRB dapat berbentuk persegi panjang atau lingkaran seperti terlihat pada Gambar 2.7



Gambar 2.7: Komponen LRB.

2.3.1.2 Bangunan Bawah (*Sub Structure*)

Struktur bawah pada jembatan kereta api ini terdiri dari *abutment* dan *pier*, dimana *abutment* adalah bangunan bawah jalan layang yang terletak pada kedua ujung jalan layang yang berfungsi memikul reaksi beban pada ujung jalan layang dan dapat juga berfungsi sebagai dinding penahan tanah. Perencanaan *pier* (*pier*) merupakan hal yang sangat penting dan mendasar yang akan mempengaruhi estetika, keekonomisan serta perilaku struktur dari jalan layang. *Pier* untuk jalan layang *box girder* beton akan menerima gaya yang besar akibat bentang jembatan yang besar serta berat *box girder* itu sendiri. Penampang *pier* dapat dibuat masif ataupun berongga.

1. Pilar (*pier*)

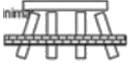


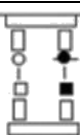


Pier jembatan merupakan struktur yang memberikan dukungan vertikal untuk rentang diantara dua poin. *Pier* jembatan memiliki dua fungsi utama yaitu mentransfer beban bangunan atas vertikal ke pondasi dan menahan kekuatan horisontal yang bekerja pada jembatan. Meskipun *pier* secara umum dirancang untuk menahan beban vertikal dari struktur di atasnya, *pier* juga didesain untuk menahan beban lateral tinggi disebabkan oleh peristiwa seismik.

Pier jembatan sederhana adalah suatu konstruksi beton bertulang yang menumpu di atas pondasi tiang–tiang pancang yang terletak di tengah sungai atau yang lain yang berfungsi sebagai pemikul antara bentang tepi dan bentang tengah bangunan atas jembatan (SNI 2541-2008).

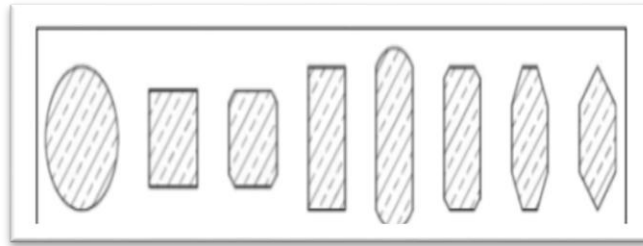
Pada umumnya di Indonesia dipakai susunan rangka pendukung untuk pondasi tiang. Pada susunan tersebut tiang diteruskan langsung pada balok melintang (*cross head*) *pier*. Kelebihan utama dari susunan ini adalah biaya, kemudahan pelaksanaan dan kurangnya kemungkinan penggerusan sungai. Kekurangan utama susunan ini adalah penampilannya yang kurang menarik terutama pada waktu muka air rendah. Tambah lagi *pile cap* sering ditempatkan sangat tinggi diatas muka air. Jika pondasi sumuran digunakan untuk *pier*, sistem topi beton, kolom dan balok melintang ujung dipakai. Sistem kolom dapat berupa kolom tunggal atau kolom majemuk atau dapat berupa dinding penuh. Kepala jembatan dengan pondasi sumuran biasanya

menempatkan bangunan kepala jembatan langsung pada pondasi sumuran. Kepala jembatan dan *pier* menyalurkan gaya-gaya vertikal dan horizontal dari bangunan atas pondasi. Bentuk umum digambarkan pada Tabel 2.3.

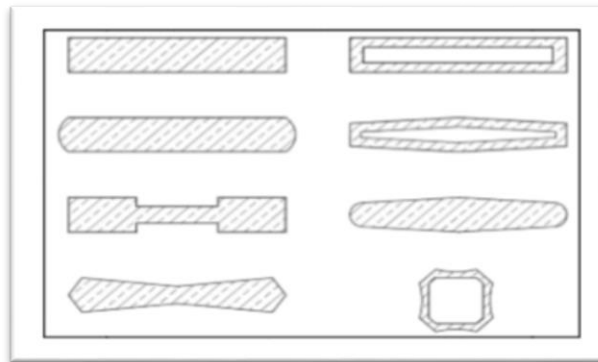
Tabel 2.3: Tipe *pier*.

Jenis <i>Pier</i>	
<p><i>Pier</i> Balok Cap Tiang Sederhana</p> <p>Dua baris tiang adalah umumnya minimal.</p>	
<p><i>Pier</i> Tembok</p> <p>Ujung bundar dan alinemen tembok sesuai arah aliran membantu mengurangi gaya aliran dan gerusan lokal.</p>	
<p><i>Pier</i> Kolom Tunggal</p> <p>Dianjurkan kolom sirkular pada aliran arus.</p>	
<p><i>Pier</i> Portal Satu Tingkat (Kolom Ganda atau Majemuk)</p> <p>Dianjurkan kolom sirkular pada aliran arus pemisahan kolom dengan 2D atau lebih membantu kelancaran aliran arus.</p>	
<p><i>Pier</i> Portal Dua Tingkat</p>	
<p><i>Pier</i> Tembok – Penampang</p> <p>Penampang ini mempunyai karakteristik tidak baik terhadap aliran arus dan dianjurkan untuk penggunaan didarat.</p>	

Ada beberapa tipe *pier* yang biasa digunakan pada jembatan diantaranya, *pier* solid, *hollow*, *pier* bulat, *oktagonal*, *heksagonal*, *rectangular* dan lain-lain. Macam-macam bentuk *pier* sesuai kegunaannya dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan Gambar 2.9.



Gambar 2.8: Tipe *pier* jembatan penyebrangan *viaduct* dan darat.



Gambar 2.9: Tipe *pier* jembatan penyebrangan sungai dan *waterway*.

Setiap perancangan bentuk *pier* memiliki tujuan dan fungsi masing masing. Perancangan *pier* dengan bentuk dan jumlah *pier* tertentu memiliki alasan tersendiri terhadap pemilihan *pier* tersebut. Dalam penelitian ini akan dibahas perhitungan tipe *pier* bulat (*circle*) dengan struktur kepala *pier* (*pier head*) adalah berbentuk trapesium.

2. Abutment

Abutment adalah bangunan bawah jembatan yang terletak pada kedua ujung-ujung *pier-pier* jembatan, berfungsi sebagai pemikul seluruh beban hidup dan beban mati pada jembatan.

2.4 Beton Prategang

2.4.1 Defenisi Beton Prategang

Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal (ACI).

Dalam defenisi lain, beton prategang merupakan beton bertulang yang telah di berikan tegangan tekan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam

akibat beban kerja (SNI 03-2847-2002).

Beton prategang juga dapat di definisikan sebagai beton dimana tegangan tariknya pada kondisi pembebanan tertentu dihilangkan atau dikurangi sampai batas aman dengan pemberian gaya tekan permanen, dan baja prategang yang di gunakan untuk keperluan ini di tarik sebelum beton mengeras (pratarik) atau setelah beton mengeras (*pasca* tarik).

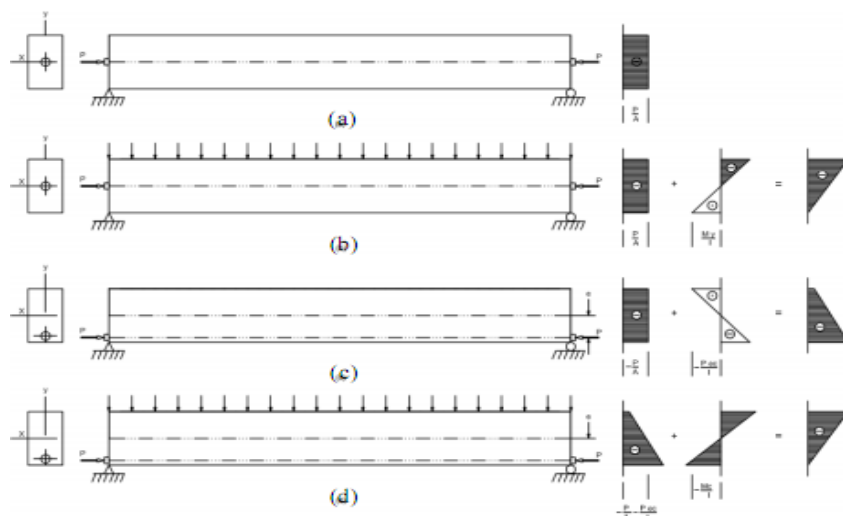
2.4.2 Konsep Dasar Beton Prategang

Perbedaan utama antara beton bertulang dan beton prategang pada kenyataannya adalah beton bertulang mengkombinasikan beton dan tulangan baja dengan cara menyatukan dan membiarkan keduanya bekerja bersama-sama sesuai dengan keinginannya, sedangkan beton prategang mengkombinasikan beton berkekuatan tinggi dan baja mutu tinggi dengan cara-cara “aktif”. Hal ini dicapai dengan cara menarik baja tersebut dan menahannya ke beton, jadi membuat beton dalam keadaan teretekan. Kombinasi aktif ini menghasilkan perilaku yang lebih baik dari kedua bahan tersebut. Baja adalah bahan yang liat dan di buat untuk bekerja dengan kekuatan tarik yang tinggi oleh prategang. Beton adalah bahan yang getas dan kemampuannya menahan tarikan di perbaiki dengan memberikan tekanan, sementara kemampuannya menahan tekanan tidak dikurangi, jadi beton prategang merupakan kombinasi yang ideal dari dua buah bahan modern berkekuatan tinggi.

Pemberian gaya prategang secara longitudinal sejajar sumbu komponen struktur dikenal sebagai pemberian prategang linier. Pemberian gaya prategang sebelum pengecoran beton disebut sebagai sistem pratarik (*pra-tension*) dan pemberian gaya prategang sesudah dilakukan pengecoran disebut sebagai system *pasca*-tarik (*post-tension*).

Beton prategang mempunyai 2 jenis penegangan, yaitu prategang penuh (*fully-stressed*) dan prategang sebagian (*partial-stressed*). Prategang penuh (*fully stressed*) merupakan pemberian gaya prategang hingga struktur tidak diizinkan menerima tegangan tarik baik pada masa transfer maupun pada saat layan dan tegangan pada serat bawah dianggap tidak ada. Sedangkan prategang sebagian (*partial-stressed*) merupakan struktur yang direncanakan untuk menerima

tegangan tarik di penampang selama masa transfer maupun masa layan dan pada serat bawah memiliki tegangan yang tidak sama dengan nol. Menurut Nawy (2001) menyatakan bahwa pada balok prategang, balok diasumsikan bersifat homogen dan elastis. Ketidak mampuan beton untuk menahan tegangan tarik, digantikan oleh tegangan tekan yang diakibatkan oleh tendon prategang. Berikut konsep-konsep dasar pemberian prategang. Tinjauan balok persegi panjang yang ditumpu sederhana mengalami gaya prategang P kosentris seperti pada Gambar 2.10 (a).



Gambar 2.10: Distribusi tegangan serat beton pada balok persegi panjang dengan tendon lurus.

Tegangan tekan seragam dan mempunyai intensitas:

$$f = - \frac{P}{A_c} \quad (2.1)$$

Jika timbul beban transversal pada balok pada Gambar 2.10 (b), maka akan timbul momen maksimum ditengah bentang, maka tegangan pada serat atas menjadi:

$$f^t = - \frac{P}{A_c} - \frac{MC}{I_g} \quad (2.2)$$

dan tegangan pada serat bawah menjadi:

$$f^b = - \frac{P}{A_c} + \frac{MC}{I_g} \quad (2.3)$$

Pada konsep ini, gaya prategang P kosentris $-P/A$ mengurangi tegangan lentur tarik Mc/I di serat bawah sebesar yang dikehendaki bahkan hingga

tegangan tarik hilang sama sekali atau hingga tegangan tarik masih diizinkan ada sesuai dengan peraturan. Sebaliknya, tegangan tekan P kosentris menambah tegangan lentur tekan yang terjadi tegangan di serat atas. Untuk menghindari pembatasan ini, perlu ditambah tegangan tarik di serat atas dengan cara meletakkan tendon prategang secara eksentris di bawah garis netral. Jika tendon diletakkan dengan besar eksentrisitas e dari pusat berat beton, maka akan timbul momen P_e , sehingga tegangan di tengah bentang pada tegangan serat atas menjadi:

$$f^t = -\frac{P}{A_c} + \frac{P_e e}{I_g} - \frac{M_C}{I_g} \quad (2.4)$$

Sedangkan tegangan pada serat bawah menjadi:

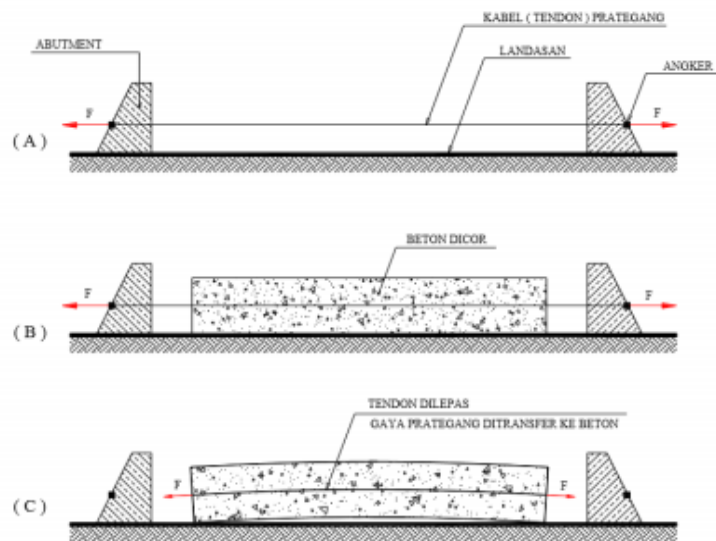
$$f^b = -\frac{P}{A_c} + \frac{P_e e}{I_g} + \frac{M_C}{I_g} \quad (2.5)$$

2.4.3 Sistem Pemberian Prategang

Ada 2 jenis metode pemberian gaya prategang pada beban yaitu:

1. Pemberian Pratarik (*Pretension*)

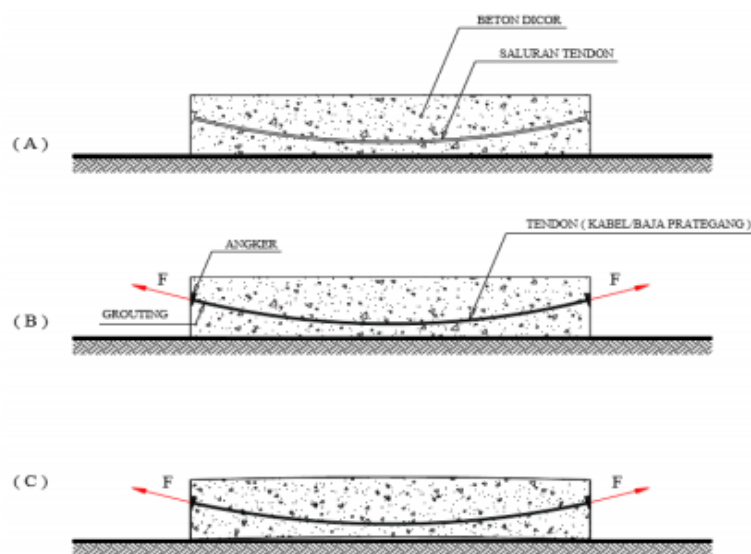
Pada metode pratarik, tendon di tarik sebelum beton di cor. Setelah beton cukup keras tendon dipotong dan gaya prategang akan tersalur ke beton melalui lekatan. Metode ini sangat cocok bagi produksi massal. Baja prategang di beri pratarik terhadap pengangkeran independen sebelum pengecoran beton di sekitarnya. Sebutan pratarik berarti pemberian paratarik pada baja prategang, bukan pada baloknya. Pemberian pratarik biasanya dilakukan di lokasi pembuatan beton pracetak. Adapun prinsip dari metode ini ialah seperti terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11: Metode pratarik.

2. Pemberian Pascatarik (*Post Tension*)

Pada metode *pascatarik*, tendon ditarik setelah beton dicor. Seperti terlihat pada Gambar 2.12 Sebelum pengecoran dilakukan terlebih dahulu di pasang selongsong untuk alur dari tendon. Setelah beton jadi, tendon dimasukkan kedalam beton melalui selubung tendon yang sebelumnya sudah dipasang ketika pengecoran. Penarikan dilakukan setelah beton mencapai kekuatan yang di inginkan sesuai dengan perhitungan. Setelah penarikan di lakukan maka selongsong diisi dengan bahan *grouting*.



Gambar 2.12: Metode *pascatarik*.

2.4.4 Persyaratan Material Beton Prategang

Menurut RSNI T-12-2004 sifat-sifat penting material seperti kekuatan (kekuatan tekan, tarik, dan lentur; kekuatan statis dan fatik), kekakuan, perilaku yang tergantung waktu (rangkai, susut, relaksasi, serta perubahan tegangan dan kekakuan, perilaku, serta perubahan pada regangan tinggi), dan konduktivitas serta pengembangan akibat suhu harus ditetapkan dengan benar sesuai batasan-batasan nilai yang diberikan di dalam bagian I, atau ditetapkan berdasarkan hasil pengujian.

2.4.5 Material Beton Prategang

2.4.5.1 Struktur Beton

Berdasarkan RSNI T 12-2004, untuk jembatan berbentang panjang (>100 m), atau yang menggunakan sistem struktur khusus, atau material khusus, atau cara pelaksanaan yang khusus, perlu diperhatikan kondisi-kondisi khusus yang sesuai, dimana usulan dan analisis struktur yang telah memperhitungkan kondisi-kondisi khusus tersebut harus dilakukan secara rinci, dan diserahkan kepada yang berwenang beserta semua pembuktian kebenarannya. Beton normal yang dimaksud dalam standar ini adalah beton yang dibuat dengan menggunakan semen portland, mempunyai massa jenis sekitar 2400 Kg/m^3 , dan mempunyai kuat tekan (berdasarkan benda uji silinder) antara 20 MPa sampai dengan 60 MPa (setara dengan K250 – K700 berdasarkan benda uji kubus), termasuk beton ringan yang mempunyai massa jenis tidak kurang dari 2000 Kg/m^3 dan mempunyai kuat tekan antara 20 MPa sampai dengan 40 MPa. Walaupun demikian, standar ini bisa berlaku untuk penggunaan beton bermutu tinggi dengan kuat tekan yang lebih tinggi dari 60 MPa, atau beton ringan dengan massa jenis yang kurang dari 2000 Kg/m^3 , asalkan bila dianggap perlu bisa dilakukan penyesuaian pada perilaku material beton tersebut, berdasarkan suatu acuan teknis atau hasil penelitian yang bisa diterima oleh yang berwenang.

1. Kuat Tekan

Bila tidak disebutkan lain dalam spesifikasi teknik, kuat tekan harus diartikan sebagai kuat tekan beton pada umur 28 hari, f_c' , dengan berdasarkan

suatu kriteria perancangan dan keberhasilan sebagai berikut:

- a. Ditetapkan berdasarkan prosedur probabilitas statistik dari hasil pengujian tekan pada sekelompok benda uji silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, dinyatakan dalam satuan MPa, dengan kemungkinan kegagalan sebesar 5%.
- b. Sama dengan mutu kekuatan tekan beton yang ditentukan dalam criteria perencanaan, dengan syarat perawatan beton tersebut sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan.
- c. Mencapai tingkat keberhasilan dalam pelaksanaan, berdasarkan hasil pengujian pada benda uji silinder, dinyatakan dalam satuan MPa, yang memenuhi kriteria keberhasilan sebagaimana disyaratkan.

Dalam segala hal, beton dengan kuat tekan (benda uji silinder) yang kurang dari 20 MPa tidak dibenarkan untuk digunakan dalam pekerjaan struktur beton untuk jembatan, kecuali untuk pembetonan yang tidak dituntut persyaratan kekuatan. Dalam hal komponen struktur beton prategang, sehubungan dengan pengaruh gaya prategang pada tegangan dan regangan beton, baik dalam jangka waktu pendek maupun jangka panjang, maka kuat tekan beton disyaratkan untuk tidak lebih rendah dari 30 MPa.

2. Kuat Tarik

Kuat tarik langsung dari beton, f_{ct} , bisa diambil dari ketentuan:

- a. $0,33 \sqrt{f_c'}$ MPa pada umur 28 hari, dengan perawatan standar; atau
- b. Dihitung secara probabilitas statistik dari hasil pengujian.

3. Kuat Tarik Lentur

Kuat tarik lentur beton, f_{cf} , bisa diambil sebesar:

- a. $0,6 \sqrt{f_c'}$ MPa pada umur 28 hari, dengan perawatan standar; atau
- b. Dihitung secara probabilitas statistik dari hasil pengujian.

4. Tegangan Izin

a. Tegangan Izin Tekanan Pada Kondisi Batas Layan

Tegangan tekan dalam penampang beton, akibat semua kombinasi beban tetap pada kondisi batas layan lentur dan/atau aksial tekan, tidak boleh melampaui nilai $0,45 f_c'$, di mana f_c' adalah kuat tekan beton yang direncanakan pada umur 28 hari, dinyatakan dalam satuan MPa.

- b. Tegangan Izin Tekan pada Kondisi Beban Sementara atau Kondisi Transfer Gaya Prategang untuk Komponen Beton Prategang

Untuk kondisi beban sementara, atau untuk komponen beton prategang pada saat transfer gaya prategang, tegangan tekan dalam penampang beton tidak boleh melampaui nilai $0,60 f_{ci}'$, di mana f_{ci}' adalah kuat tekan beton yang direncanakan pada umur saat dibebani atau dilakukan transfer gaya prategang, dinyatakan dalam satuan MPa.

- c. Tegangan Izin Tarik pada Kondisi Batas Layan

Tegangan tarik yang diizinkan terjadi pada penampang beton, boleh diambil untuk:

- beton tanpa tulangan : $0,15 \sqrt{f_c}'$
- beton prategang penuh : $0,5 \sqrt{f_c}'$

- d. Tegangan Izin Tarik pada Kondisi Transfer Gaya Prategang untuk Komponen Beton Prategang

Tegangan tarik yang diizinkan terjadi pada penampang beton untuk kondisi transfer gaya prategang, diambil dari nilai-nilai:

- Serat terluar mengalami tegangan tarik, tidak boleh melebihi nilai $0,25 \sqrt{f_{ci}'}$, kecuali untuk kondisi di bawah ini.
- Serat terluar pada ujung komponen struktur yang didukung sederhana dan mengalami tegangan tarik, tidak boleh melebihi nilai $0,5 \sqrt{f_{ci}'}$.

5. Massa Jenis

Massa jenis beton, w_c , ditentukan dari nilai-nilai:

- a. Untuk beton dengan berat normal, diambil tidak kurang dari 2400 Kg/m³; atau
- b. Ditentukan dari hasil pengujian.

6. Lengkung Tegangan-Regangan

Lengkung tegangan-regangan beton bisa digambarkan sebagai:

- a. Dianggap kurva *bilinier* atau *trilinier* berdasarkan persamaan matematik yang disederhanakan.
- b. Dianggap *linier*, berdasarkan tegangan kerja.
- c. Ditentukan dari hasil pengujian.

7. *Elasticity of Concrete* (E_c)

Adalah modulus elastisitas beton (E_c) untuk beton, nilainya tergantung pada mutu beton, yang terutama dipengaruhi oleh material dan proposi campuran beton, namun untuk analisis perencanaan struktur beton yang menggunakan beton normal dengan kuat tekan yang tidak melampaui 60 MPa, atau beton ringan dengan berat jenis yang tidak kurang dari 2000 kg/m³ dan kuat tekan yang tidak melampaui 40 MPa, nilai E_c bisa di ambil sebagai:

$$E_c = w_c^{1.5} (0,043\sqrt{f'_c}) \quad (2.6)$$

Dengan pertimbangan bahwa kenyataannya harga ini bisa bervariasi \pm 20%. w_c menyatakan berat jenis beton dalam satuan Kg/m³, f'_c menyatakan kuat tekan beton dalam satuan MPa, dan E_c dinyatakan dalam satuan MPa. Untuk beton normal dengan massa jenis sekitar 2400 Kg/m³, E_c boleh diambil sebesar $4700\sqrt{f'_c}$, dinyatakan dalam MPa atau ditentukan dari hasil pengujian.

8. Angka *Poisson*

Angka Poisson untuk beton, ν , bisa diambil sebesar:

- a. 0,2 atau
- b. Ditentukan dari hasil pengujian.

9. Koefisien Muai Panas

Koefisien muai panjang beton akibat panas, bisa diambil sebesar:

- a. 10×10^{-6} per °C, dengan pertimbangan bisa bervariasi \pm 20%; atau
- b. Ditentukan dari hasil pengujian.

10. Tebal selimut beton

Tebal selimut beton direncanakan menurut keadaan lingkungan jembatan dan mutu beton yang di gunakan, seperti terlampir pada Tabel 2.4, tebal selimut beton untuk keperluan pengecoran tidak boleh kurang dari nilai yang terbesar dari ketentuan berikut:

- a. 1,5 kali ukuran agregat terbesar.
- b. Setebal diameter tulangan yang dilindungi atau 2 kali diameter tulangan terbesar bila dipakai berkas tulangan.

- c. Tebal selimut bersih untuk tendon dengan sistem pratarik harus minimum 2 kali diameter tendon, namun tidak harus lebih besar dari 40 mm. Jika tendon dikelompokkan, terutama pada bidang horisontal, tebal selimut beton harus dipertebal untuk keperluan pengecoran dan pemadatan.
- d. Tebal selimut beton untuk selongsong sistem *pasca* tarik harus diambil minimum 50 mm dari permukaan selongsong ke bagian bawah komponen dan 40 mm pada bagian lain.
- e. Selimut beton harus dipertebal bila tendon dikelompokkan dalam bidang horizontal atau bila digunakan selongsong dalam beton.
- f. Tebal selimut beton minimum untuk ujung tendon *pasca* tarik atau perlengkapan angkur harus diambil 50 mm.

Tabel 2.4: Selimut beton untuk acuan dan pemadatan standar.

Klasifikasi Lingkungan	Tebal selimut beton nominal [mm] untuk beton dengan kuat tekan f_c' yang tidak kurang dari				
	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa	40 MPa
A1	35	30	25	25	25
B1	(65)	45	40	35	25
B2	-	(75)	55	45	35
C	-	-	(90)	70	60

11. Susut Beton

Bila tidak dilakukan pengukuran atau pengujian secara khusus, nilai regangan susut rencana beton pada umur t (hari), untuk beton yang dirawat basah di lokasi pekerjaan, bisa ditentukan berdasarkan rumusan di bawah ini:

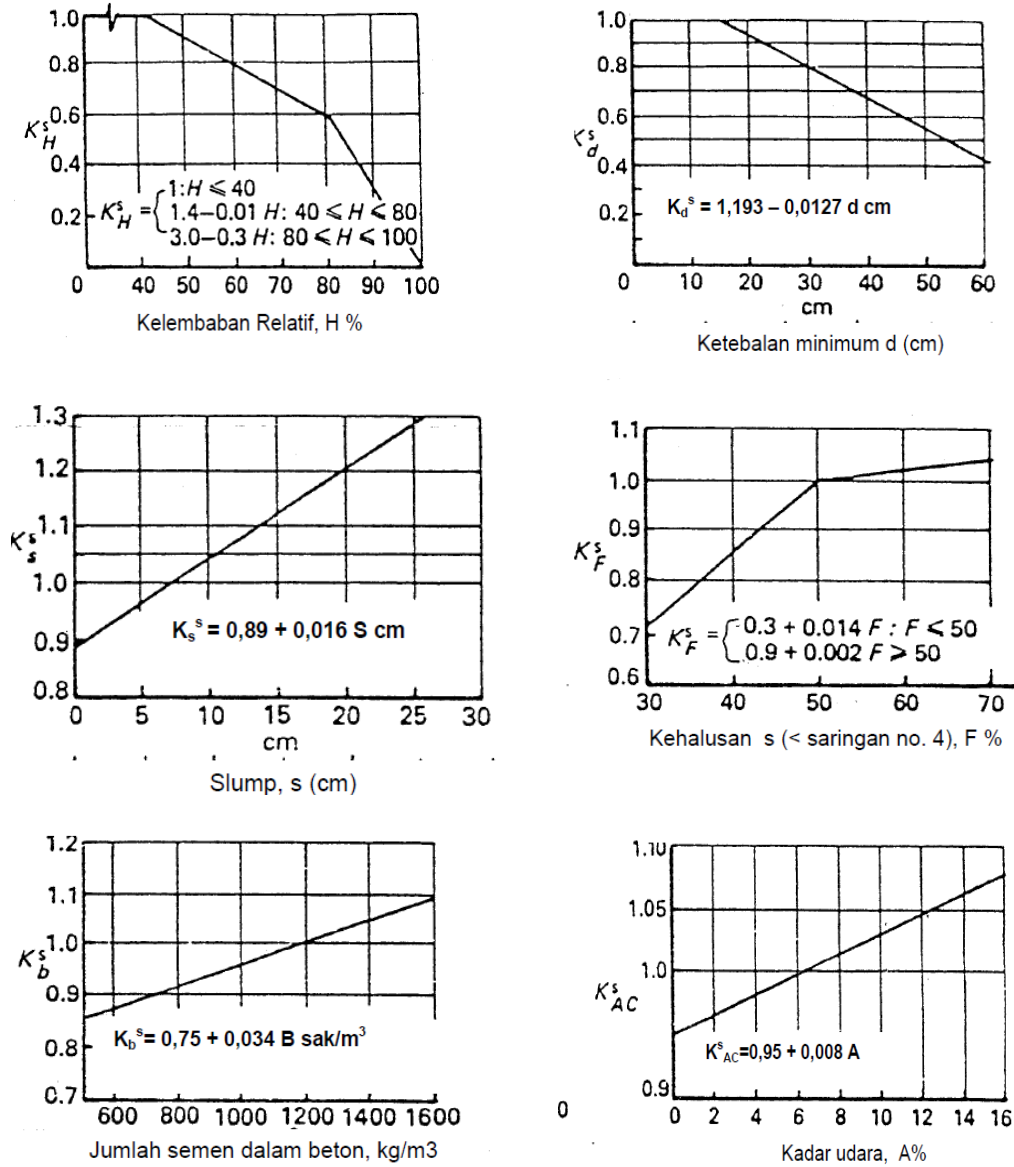
$$\epsilon_{cs,t} = (t / (35 + t)) \epsilon_{cs,u} \quad (2.7)$$

$$\epsilon_{cs,u} = 780 \times 10^{-6} \lambda_{cs} \quad (2.8)$$

Nilai λ_{cs} ditentukan oleh kondisi campuran beton dan lingkungan pekerjaan:

$$\lambda_{cs} = K_h^s \cdot K_d^s \cdot K_s^s \cdot K_f^s \cdot K_b^s \cdot K_{ac}^s \quad (2.9)$$

Besaran faktor-faktor K_h^s , K_d^s , K_s^s , K_f^s , K_b^s , K_{ac}^s dapat diambil pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13: Grafik penentuan faktor susut.

Untuk komponen beton yang dirawat dengan cara penguapan (*steam cured*), maka nilai $\epsilon_{cs,t}$ ditentukan oleh Persamaan (2.10) di bawah ini:

$$\epsilon_{cs,t} = (t / (55 + t)) \epsilon_{cs,u} \quad (2.10)$$

dimana t menyatakan umur beton yang dirawat dengan cara penguapan, terhitung sejak 1 - 3 hari setelah pengecoran, dalam satuan hari.

Tabel 2.5: Koefisien standar susut beton sebagai tambahan regangan jangka panjang.

Kekuatan karakteristik f_c' [MPa]	20	25	30	35	40-60
Koef. Susut maksimum $\epsilon_{cs,t}$	0,000174	0,000170	0,000163	0,000161	0,000153

12. Rangkak pada Beton

Rangkak, yang merupakan regangan jangka panjang yang tergantung waktu pada suatu kondisi tegangan tetap, dan yang akan mengakibatkan suatu tambahan regangan terhadap regangan elastis beton, bisa dihitung dalam perbandingannya terhadap regangan elastis, melalui suatu koefisien rangkak $\varphi_{cc}(t)$, di mana:

$$\epsilon_{cc,t} = \varphi_{cc}(t) \cdot \epsilon_e \quad (2.11)$$

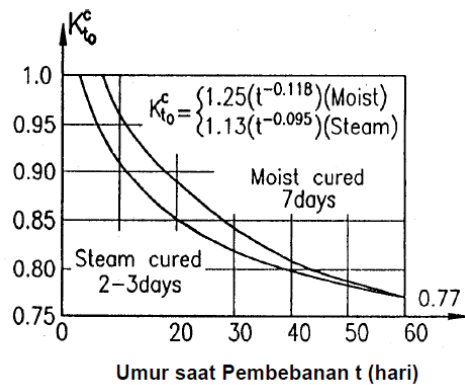
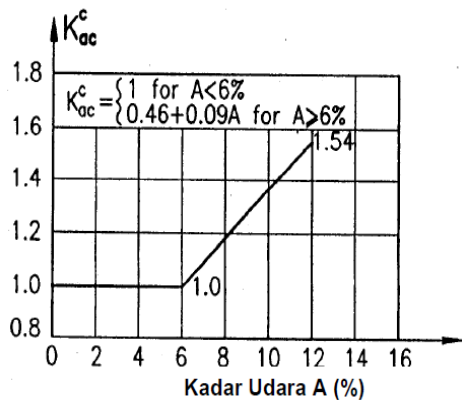
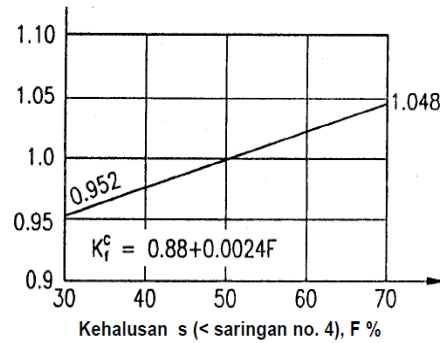
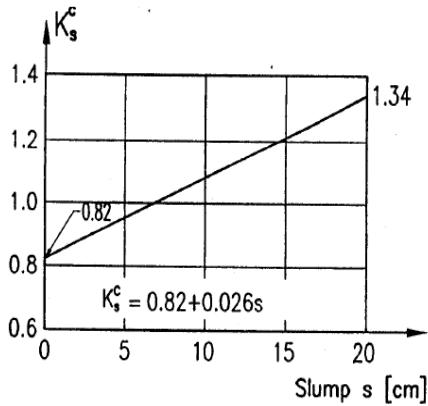
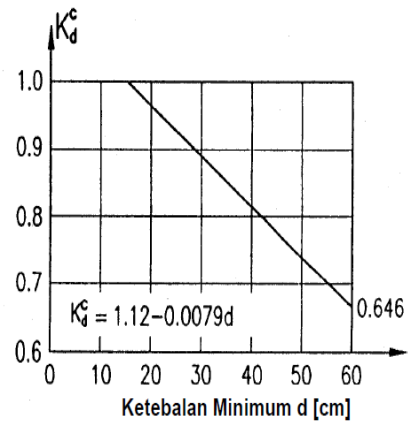
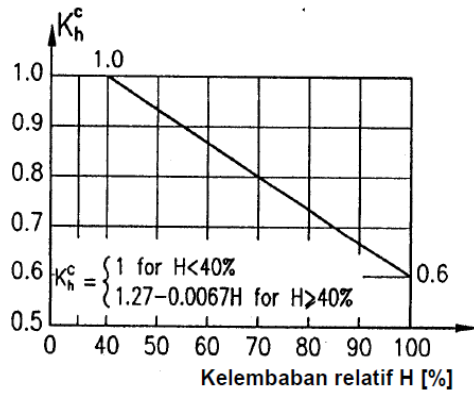
ϵ_e merupakan regangan elastis sesaat, yang diakibatkan oleh bekerjanya suatu tegangan tetap. Dalam hal koefisien rangkak $\varphi_{cc}(t)$, bila tidak dilakukan pengukuran atau pengujian secara khusus, bisa dihitung dari rumusan:

$$\varphi_{cc}(t) = (t^{0,6} / (10 + t^{0,6})) C_u \quad (2.12)$$

$$C_u = 2,35 \gamma_{cc} \quad (2.13)$$

$$\gamma_{cc} = K_h^c \cdot K_d^c \cdot K_s^c \cdot K_f^c \cdot K_{ac}^c \cdot K_{to}^c \quad (2.14)$$

Besaran faktor-faktor K_h^c , K_d^c , K_s^c , K_f^c , K_{ac}^c , dan K_{to}^c dapat diambil dari Gambar 2.14.



Gambar 2.14: Grafik penentuan faktor rangkak.

Namun demikian bila tidak dilakukan suatu perhitungan rinci seperti yang dirumuskan dalam Persamaan (2.11) sampai (2.14), atau bila dianggap memang tidak dibutuhkan suatu perhitungan rinci yang sebagaimana disebutkan di atas, maka dalam asumsi pada suatu kondisi yang standar, nilai koefisien rangkak maksimum C_u bisa diambil secara langsung dari Tabel 2.6 di bawah ini.

Dalam hal ini, yang disebut sebagai suatu kondisi standar adalah:

- Kelembaban relatif udara setempat $H = 70 \%$
- Ketebalan minimum komponen beton $d = 15 \text{ cm}$
- Konsistensi (*slump*) adukan beton $s = 7,5 \text{ cm}$
- Kadar agregat halus dalam beton $F = 50 \%$
- Kadar udara dalam beton $AC = 6 \%$.

Tabel 2.6: Koefisien standar rangkai beton sebagai tambahan regangan jangka panjang.

Kekuatan karakteristik f_c' [MPa]	20	25	30	35	40-60
Koef. Rangkai maksimum C_u	2,8	2,5	2,3	2,15	2,0

2.4.5.2 Tulangan Baja Prategang

1. Kekuatan Nominal

a. Kuat Tarik Putus

Kuat tarik baja prategang, f_{pu} , harus ditentukan dari hasil pengujian, atau diambil sebesar mutu baja yang disebutkan oleh fabrikator berdasarkan sertifikat fabrikasi yang resmi.

b. Kuat tarik leleh ekuivalen

Kuat leleh baja prategang, f_{py} , harus ditentukan dari hasil pengujian atau dianggap sebagai berikut:

- Untuk kawat baja prategang : $0,75 f_{pu}$
- Untuk semua kelas *strand* dan tendon baja bulat : $0,85 f_{pu}$

2. Tegangan Izin

a. Tegangan Izin pada Kondisi Batas Layan

Tegangan tarik baja prategang pada kondisi batas layan tidak boleh melampaui nilai berikut:

- Tendon *pasca* tarik, pada daerah jangkar dan sambungan, sesaat setelah penjangkaran tendon, sebesar $0,70 f_{pu}$.
- Untuk kondisi layan, sebesar $0,60 f_{pu}$.

b. Tegangan Izin pada Kondisi Transfer Gaya Prategang

Tegangan tarik baja prategang pada kondisi transfer tidak boleh melampaui nilai berikut:

- Akibat gaya penjangkaran tendon, sebesar 0,94 *fpy* tetapi tidak lebih besar dari 0,85 *fpu* atau nilai maksimum yang direkomendasikan oleh *fabricator* pembuat tendon prategang atau jangkar.
- Sesaat setelah transfer gaya prategang, boleh diambil sebesar 0,82 *fpy*, tetapi tidak lebih besar dari 0,74 *fpu*.

3. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas baja prategang, E_p , bisa diambil sebesar:

- untuk kawat tegang-lepas : 200.000 MPa
- untuk *strand* tegang-lepas : 195.000 MPa
- untuk baja ditarik dingin dengan kuat tarik tinggi : 170.000 MPa
- ditentukan dari hasil pengujian.

4. Lengkung Tegangan - Regangan

Lengkung tegangan - regangan baja prategang ditentukan dari hasil pengujian.

5. Relaksasi Baja Prategang

Relaksasi baja prategang harus diperhitungkan pada tiap umur dan tahapan penegangan, dari kondisi kawat baja, *strand*, dan batang-batang baja prategang yang berperilaku relaksasi rendah, sesuai dengan hasil pengujian.

6. Tendon Baja Prategang

Tendon baja prategang bisa terbuat dari kawat baja (*wire*), kawat untai (*strand*), atau batang baja (*bar*), yang sesuai dengan standar spesifikasi yang berlaku. Bila tidak ada jaminan spesifikasi dari pabrik pembuatnya, maka kualitas tendon baja prategang harus ditentukan melalui pengujian sesuai dengan standar spesifikasi yang berlaku. Tendon baja prategang yang digunakan tidak boleh diberi galvanisasi.

Kawat-kawat *stress relived* adalah kawat-kawat tunggal yang ditarik dengan cara dingin yang sesuai dengan ASTM A 421, sedangkan *stress relived* yang mengikuti standar ASTM A 416 adalah merupakan *strands* yang terbuat dari tujuh kawat dengan memuntir enam diantaranya pada pitch sebesar 12 sampai 16 kali diameter disekeliling kawat lurus yang sedikit lebih besar.

Tabel 2.7: Kawat-kawat untuk beton prategang.

Diameter nominal (in.)	Kuat tarik minimum (psi)		Tegangan minimum pada ekstensi 1% (psi)	
	Tipe BA	Tipe WA	Tipe BA	Tipe WA
0,912		250.000		212.500
0,196	240.000	250.000	204.000	212.500
0,250	240.000	240.000	204.000	204.400
0,276	235.000	235.000	199.750	199.750

Tabel 2.8: *Strands* standar tujuh kawat untuk beton prategang.

Diameter nominal <i>strand</i> (in)	Kuat patah <i>strand</i> (min.lb)	luas baja nominal <i>strand</i> (in ²)	Berat nominal <i>strand</i> (lb/1000 ft)	Beban minimum pada ekstensi 1% (lb)
Mutu 250				
¼ (0,25)	9.000	0,038	122	7.650
5/16 (0,313)	14.500	0,058	197	12.000
3/8 (0,375)	20.000	0,080	272	17.000
7/16 (0,438)	27.000	0,108	367	23.000
½ (0,500)	36.000	0,144	490	30.600
3/5 (0,600)	54.000	0,216	7373	45.900
Mutu 270				
3/8 (0,375)	23.000	0,065	290	19.550
7/16 (0,438)	31.000	0,115	390	26.350
½ (0,500)	41.300	0,153	520	35.100

3/5 (0,600)	58.600	0,217	740	49.800
-------------	--------	-------	-----	--------

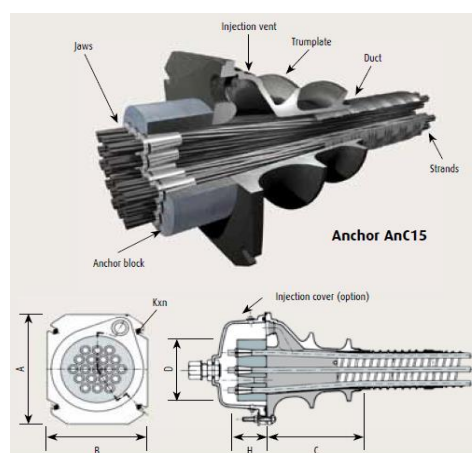
2.4.5.3 Selongsong

Selongsong untuk sistem *pasca* tarik harus memenuhi kekuatan berikut:

- Selongsong untuk tendon baja prategang harus kedap mortar dan tidak reaktif dengan beton, baja prategang, atau bahan *grouting* yang akan digunakan
- Selongsong untuk tendon yang akan dilakukan *grouting* harus mempunyai diameter dalam setidaknya 6 mm lebih besar dari diameter tendon.
- Selongsong tendon yang akan dilakukan *grouting* harus mempunyai luas penampang dalam minimum 2 kali luas tendon.

2.4.5.4 Angkur

Angkur yang dipakai harus diproduksi oleh fabrikator yang dikenal dengan jaminan mutu yang sesuai dengan spesifikasi teknik, yang bila perlu ditentukan dengan pengujian.



Gambar 2.15: Spesifikasi ankur.

2.4.5.5 Penyambung (*coupler*)

Penyambung (*coupler*) harus dapat menyalurkan gaya yang tidak lebih kecil dari kuat tarik batas elemen yang disambung. Penyambung harus dipasang dalam

daerah yang disetujui oleh yang berwenang dan dipasang sedemikian rupa sehingga memungkinkan terjadinya gerakan yang diperlukan.

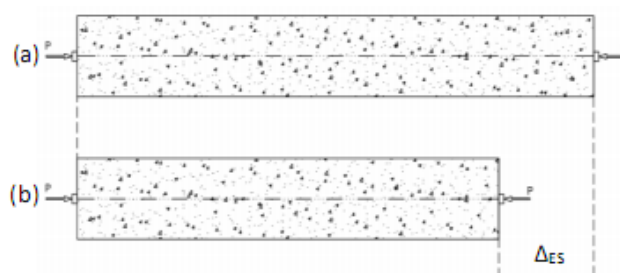
2.4.6 Kehilangan Gaya Prategang

Dalam menganalisis kehilangan, harus mempertimbangkan bahan-bahan yang sebenarnya dan kondisi lingkungan masing masing bahan (waktu, kondisi pemaparan, dimensi dan ukuran komponen struktur, dan sebagainya) yang mempengaruhi jumlah dari kehilangan prategang. Dalam perencanaan beton pratekan, analisis gaya-gaya efektif dari tendon penting sekali untuk diketahui.

Dalam buku karangan T.Y Lin dan Ned H Burns tahun 1988 disebutkan bahwa kehilangan gaya prategang akan terjadi dalam dua tahap dan keduanya akan sangat mempengaruhi hasil akhir gaya-gaya efektif tendon yang akan terjadi. Tahap pertama, pada saat setelah peralihan gaya prategang ke penampang beton, tegangan dievaluasi sebagai tolak ukur perilaku elemen struktur. Pada tahap ini kehilangan gaya prategang meliputi:

2.4.6.1 Kehilangan Akibat Perpendekan Elastis Beton (ES)

Pada saat gaya pratekan dialihkan ke beton, komponen struktur akan memendek dan baja akan ikut memendek bersamanya. Jadi ada kehilangan gaya pratekan pada baja, konsep perpendekan elastis dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16: Perpendekan elastis. (a) Balok tak bertegangan. (b) balok yang memendek secara longitudinal bertegangan.

Rekomendasi SK SNI 03-2847-2002 untuk memperhitungkan kehilangan tegangan pada struktur *pasca-tarik* dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

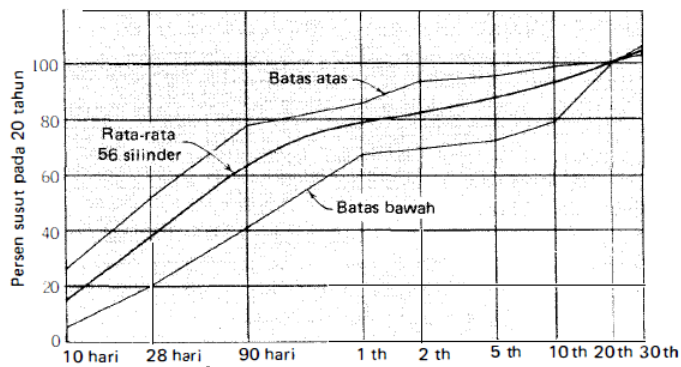
$$ES = \Delta f_c = \frac{nP_i}{A_c} \quad (2.15)$$

Atau secara praktis, untuk struktur *pasca tarik* dapat digunakan persamaan:

$$ES = 0,5 \frac{E_s}{E_c} f_c \quad (2.16)$$

2.4.6.2 Kehilangan Akibat Susut Pada Beton (SH)

Susut pada beton dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti rangkai dan perhitungan-perhitungan kehilangan gaya prategang dari sumber ini akan menggambarkan yang mana hal-hal yang paling penting: perbandingan antara volume dan permukaan, kelembaban relatif, dan waktu dari akhir *curing* sampai dengan bekerjanya gaya prategang. Karena susut tergantung dari waktu (lihat Gambar 2.17 untuk kurva perbandingan susut terhadap waktu).



Gambar 2.17: Kurva perbandingan susut terhadap waktu.

Kita tidak mengalami 100% kehilangan tegangan batas dalam beberapa tahun, tetapi 80% terjadi pada tahun pertama. Faktor-faktor modifikasi untuk perbandingan volume terhadap permukaan (V/S) dan kelembaban relative (RH) diberikan di bawah ini:

$$\Delta f_{pSH} = 8,2 \times 10^{-6} K_{SH} E_s \left(1 - 0,06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) \quad (2.17)$$

Dimana nilai K_{SH} untuk komponen struktur *pascatarik* dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9: Nilai K_{SH} untuk komponen struktur *pasca* tarik.

Waktu dari perawatan basah	1	3	5	7	10	20	30	60
----------------------------	---	---	---	---	----	----	----	----

hingga pemberian prategang								
KSH	0,92	0,85	0,8	0,77	0,73	0,64	0,58	0,45

2.4.6.3 Kehilangan Tegangan Akibat Friksi/ Gesekan (F)

Kehilangan prategang terjadi pada komponen struktur *pasca* tarik akibat adanya gesekan antara beton dengan tendon disekitarnya. Besarnya kehilangan ini merupakan fungsi dari elinyemen tendon, yang disebut efek kelengkungan. Selain itu juga terdapat deviasi lokal dalam elinyemen tendon yang tak dapat dihindari atau tidak disengaja, disebut sebagai efek *wobble*. Koefisien efek kelengkungan dan efek *wobble* dapat diperoleh pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10: Koefisien gesek kelengkungan dan *wobble*.

Jenis tendon	Koefisien <i>wobble</i> (K)	Koefisien kelengkungan (μ)
Tendon diselubungi metal fleksibel		
Tendon kawat	0,0033 - 0,0049	0,15 - 0,25
<i>Strand</i> 7 kawat	0,0016 - 0,0066	0,15 - 0,25
Batang mutu tinggi	0,0003 - 0,0020	0,08 - 0,30
Tendon di saluran metal yang rigid	0,0002	0,15 - 0,25
<i>Strand</i> 7 kawat		
Tendon yang dilapisi <i>mastic</i>	0,0033 - 0,0066	0,05-0,15
Tendon kawat dan <i>strand</i> 7 kawat	0,0033 - 0,0066	
Tendon yang dilumasi <i>pre-greassed</i>	0,0010 - 0,0066	0,05 - 0,15
Tendon kawat dan <i>strand</i> 7 kawat	0,0010 - 0,0066	

Sedangkan kehilangan tegangan akibat friksi pada tendon dapat ditentukan dengan Persamaan 2.18:

$$\frac{F_2 - F_1}{F_1} = -KL - \mu\alpha \quad (2.18)$$

2.4.6.4 Kehilangan Prategang Akibat Slip Pengangkuran (ANC)

Untuk kebanyakan sistem *pasca* tarik, pada saat tendon ditarik sampai nilai yang penuh dongkrak dilepas dan gaya prategang dialihkan ke angkur.

Perlengkapan di dalam angkur yang mengalami tegangan pada saat peralihan cenderung untuk berdeformasi, jadi tendon dapat tergelincir sedikit. Baji gesekan yang dipakai untuk menahan kabel akan sedikit tergelincir sebelum kabel dijepit dengan kokoh. Besarnya gelincir ini tergantung dari jenis baji dan tegangan pada kawat, nilai rata-rata sekitar 2,5 mm. Untuk perletakan pengankuran langsung, kepala dan mur mengalami sedikit deformasi pada waktu pelepasan dongkrak.

Nilai rata-rata untuk deformasi semacam itu hanya sekitar 0,8 mm. Jika pengganjal panjang dibutuhkan untuk menahan kawat yang diperpanjang di tempatnya, akan ada deformasi pada pengganjal pada saat peralihan gaya prategang. Sebagai contoh, sebuah pengganjal sepanjang 0,3 m boleh berdeformasi sebesar 0,3 mm. Rumus umum untuk menghitung kehilangan gaya prategang akibat deformasi pengankuran Δa adalah:

$$ANC = \Delta f_s = \frac{\Delta a E_s}{L} \quad (2.19)$$

2.4.6.5 Kehilangan Akibat Rangkak Pada Beton (CR)

Rangkak dianggap terjadi dengan beban mati permanen yang ditambahkan pada komponen struktur setelah beton diberi gaya prategang. Kehilangan gaya prategang akibat rangkak untuk komponen struktur dengan tendon terekat dihitung dari Persamaan 2.20, sedangkan kehilangan gaya prategang akibat rangkak untuk komponen struktur dengan tendon tidak terekat dihitung dari persamaan berikut:

$$CR = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} f_{cir} - f_{csd} \quad (2.20)$$

Sedangkan kehilangan gaya prategang akibat rangkak untuk komponen struktur dengan tendon tidak terekat dihitung dari Persamaan 2.21:

$$CR = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} f_{cpa} \quad (2.21)$$

Dimana, f_{cpa} adalah tegangan tekan rata-rata pada beton sepanjang komponen struktur pada titik berat tendon (c.g.s)

2.4.6.6 Kehilangan Tegangan akibat Relaksasi Baja (R)

Balok prategang mengalami perubahan regangan baja yang konstan di dalam tendon bila terjadi rangkak yang tergantung pada waktu. Akibat perpendekan

elastis (ES), serta kehilangan gaya pratekan yang tergantung pada waktu yaitu CR dan SH, maka akan mengakibatkan terjadi pengurangan yang kontinu pada tegangan tendon. Oleh karena itu untuk memperkirakan kehilangan gaya pratekan akibat pengaruh tersebut digunakan Persamaan 2.22:

$$RE = (K_{re} - J (SH + CR + ES)) \times C \quad (2.22)$$

Tabel 2.11: Nilai KRE dan J.

Jenis tendon	K _{RE}	J
<i>Strand</i> atau kawat <i>stress-relieved</i> derajat 1860 MPa	138	0,15
<i>Strand</i> atau kawat <i>stress-relieved</i> derajat 1720 MPa	128	0,14
Kawat <i>stress-relieved</i> derajat 1655 MPa atau 1620 MPa	121	0,13
<i>Strand</i> relaksasi-rendah derajat 1860 MPa	35	0,040
Kawat relaksasi-rendah derajat 1720 MPa	32	0,037
Kawat relaksasi-rendah derajat 1655 MPa atau 1620 MPa	30	0,035
Batang <i>stress-relieved</i> derajat 1000 MPa atau 1100 MPa	41	0,05

Tabel 2.12: Nilai C.

f _{pi} /f _{pu}	Kawat atau <i>strand stress relieved</i>	Kawat atau <i>strand</i> relaksasi rendah atau batang <i>stress-relieved</i>
0,80		1,28
0,79		1,22
0,78		1,16
0,77		1,11
0,76		1,05
0,75	1,45	1,00
0,74	1,36	0,95
0,73	1,27	0,90
0,72	1,18	0,85
0,71	1,09	0,80
0,70	1,00	0,75
0,69	0,94	0,70
0,68	0,89	0,66
0,67	0,83	0,61
0,66	0,78	0,57
0,65	0,73	0,53
0,64	0,68	0,49

0,63	0,63	0,45
0,62	0,58	0,41
0,61	0,53	0,37

2.5 Persyaratan pada Sistem *Fly Over Kereta Api Double Track*

2.5.1 Beban Gandar

Beban gandar adalah beban yang diterima oleh jalan rel dari satu gandar. Beban gandar untuk lebar jalan rel 1067 mm pada semua kelas jalur maksimum sebesar 18 ton. Beban gandar untuk lebar jalan rel 1435 mm pada semua kelas jalur maksimum sebesar 22,5 ton.

2.5.2 Lentutan

Lentutan didefinisikan sebagai besaran penyimpangan (*deflection*) yang tidak boleh melebihi persyaratan koefisien terhadap panjang teoritis.

1. Koefisien lentutan maksimum jembatan baja, sebagaimana tersebut dalam Tabel 2.13

Tabel 2.13: Koefisien lentutan maksimum jembatan baja.

Jenis	Gelagar			Rangka Batang
Jenis Kereta	L (m)	L < 50	L ≥ 50	Seluruh Rangka
Lokomotif		L / 800	L/700	L /1000
Kereta Listrik dan/ atau Kerta	V (km/h)	V < 100	L/700	
		100 < V ≤ 130	L/800	L/700
		100 < V ≤ 160	L/1100	L/900

2. Koefisien lentutan maksimum jembatan beton, sebagaimana tersebut dalam Tabel 2.14

Tabel 2.14: Koefisien lentutan maksimum jembatan beton.

Beban Lokomotif	Bentang L (m)		L < 50		L ≥ 50	
			L / 800		L/700	
Kereta penumpang dan kereta diesel	Untuk satu kereta	Kecepatan maksimum V (km/jam)	Bentang L (m)			
			V < 100	L/700		
			100 < V ≤ 130	L/800	L/700	
		100 < V ≤ 160	L/1100	L/900		

	Untuk dua rangkaian atau lebih	Kecepatan Maksimum V (Km/ jam)	V < 100	L/ 800	L/ 850	L/ 700
			100 < V ≤ 130	L/ 1000	L/ 1100	L/ 900
			100 < V ≤ 160	L/ 1300	L/ 1400	L/ 1200

2.5.3 Stabilitas Konstruksi

Stabilitas konstruksi untuk jembatan bagian atas adalah kekuatan konstruksi yang diperhitungkan dari jumlah pembebanan dan kombinasi pembebanan.

Stabilitas konstruksi untuk jembatan bagian bawah adalah kapasitas daya dukung tanah dan kekuatan konstruksi yang diperhitungkan dari jumlah kombinasi pembebanan yang terdiri dari beban-beban vertikal jembatan bagian atas, beban horisontal (gempa, angin, tekanan tanah, tekanan air), dan momen guling.

Metode perhitungan desain struktur jembatan dapat menggunakan salah satu dari 2 (dua) metode berikut:

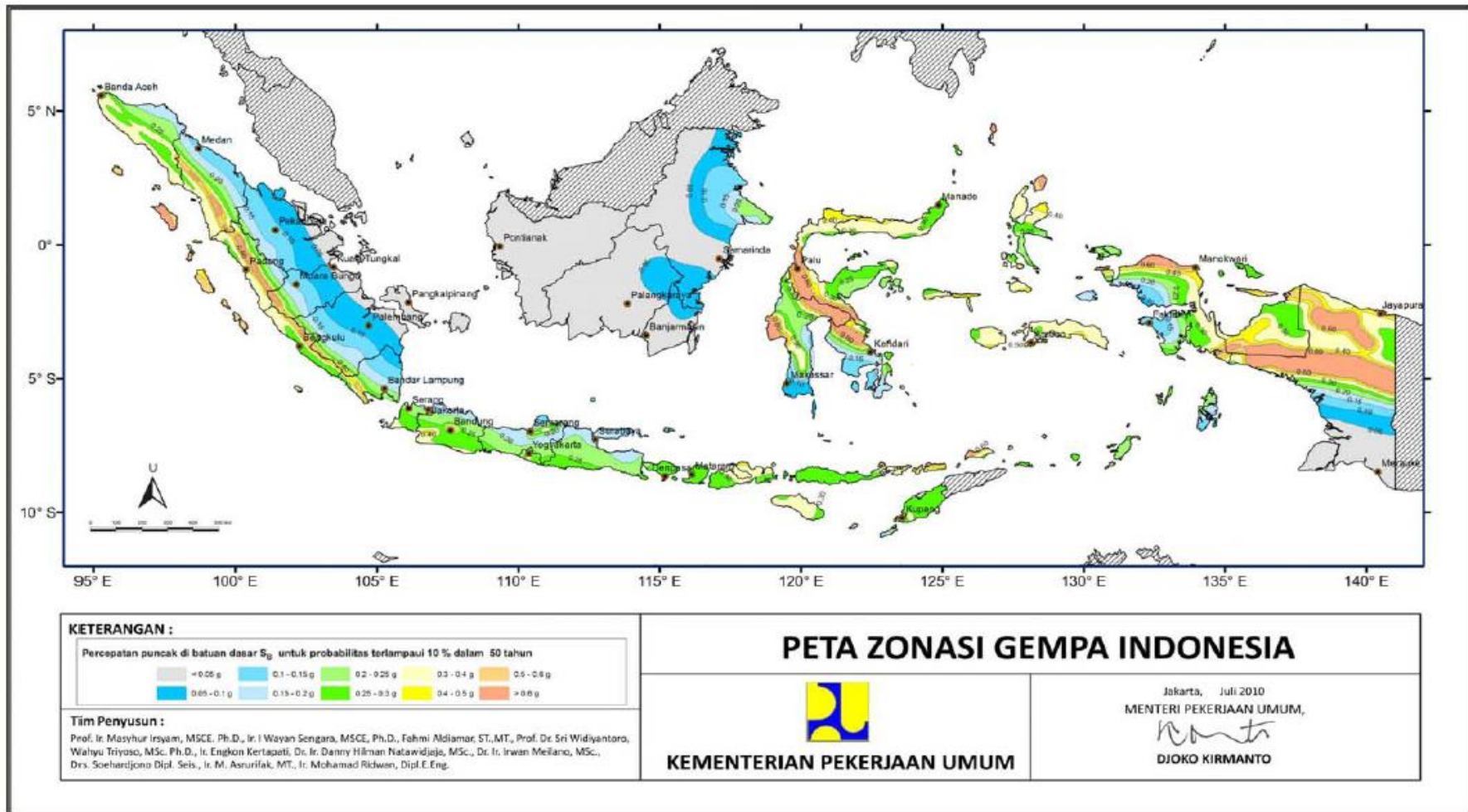
- a) Metode desain tegangan izin (*Allowable Stress Design*)
- b) Metode faktor beban (*Limit State Design*)

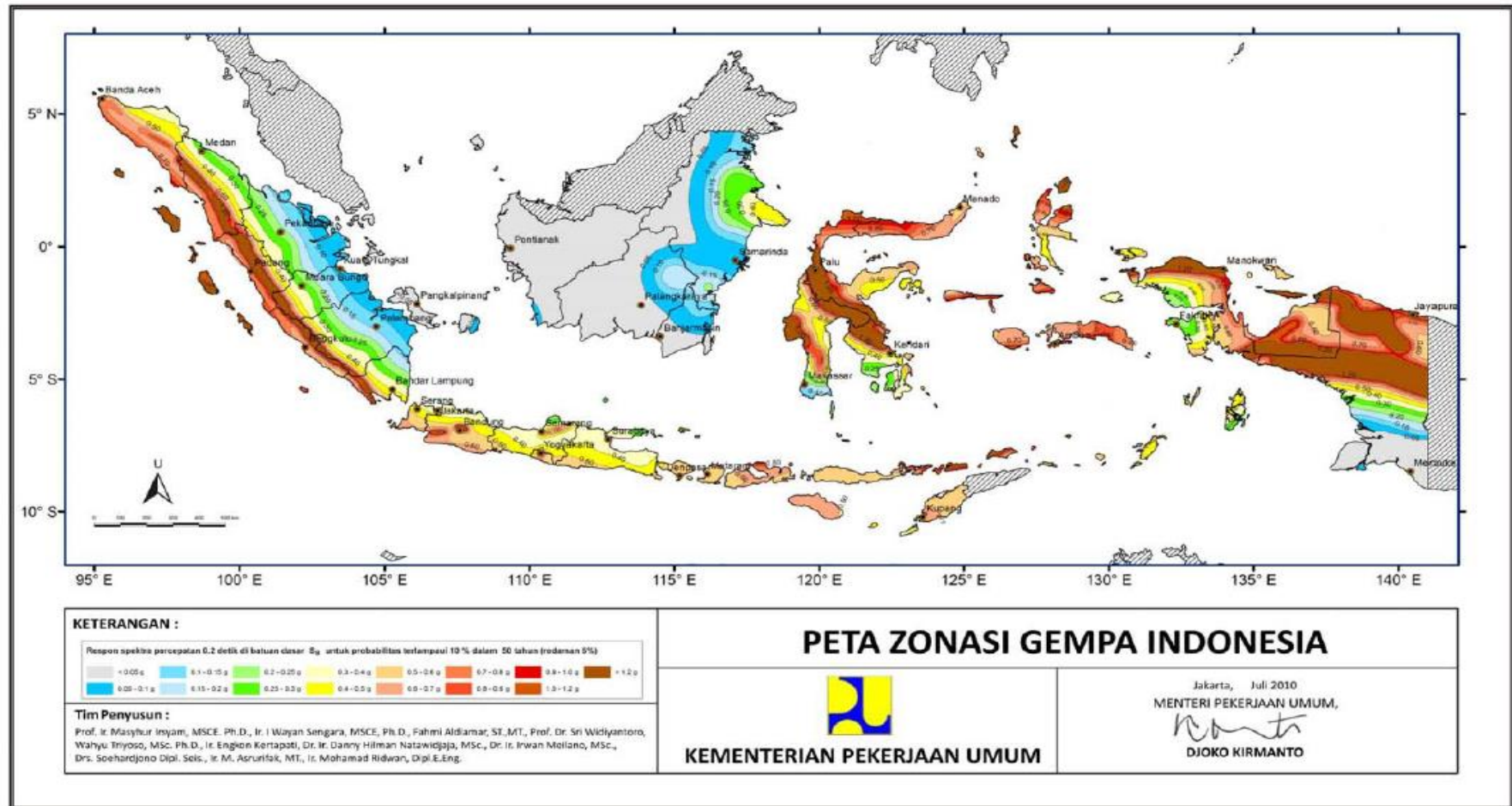
2.6 Beban Gempa (EQ)

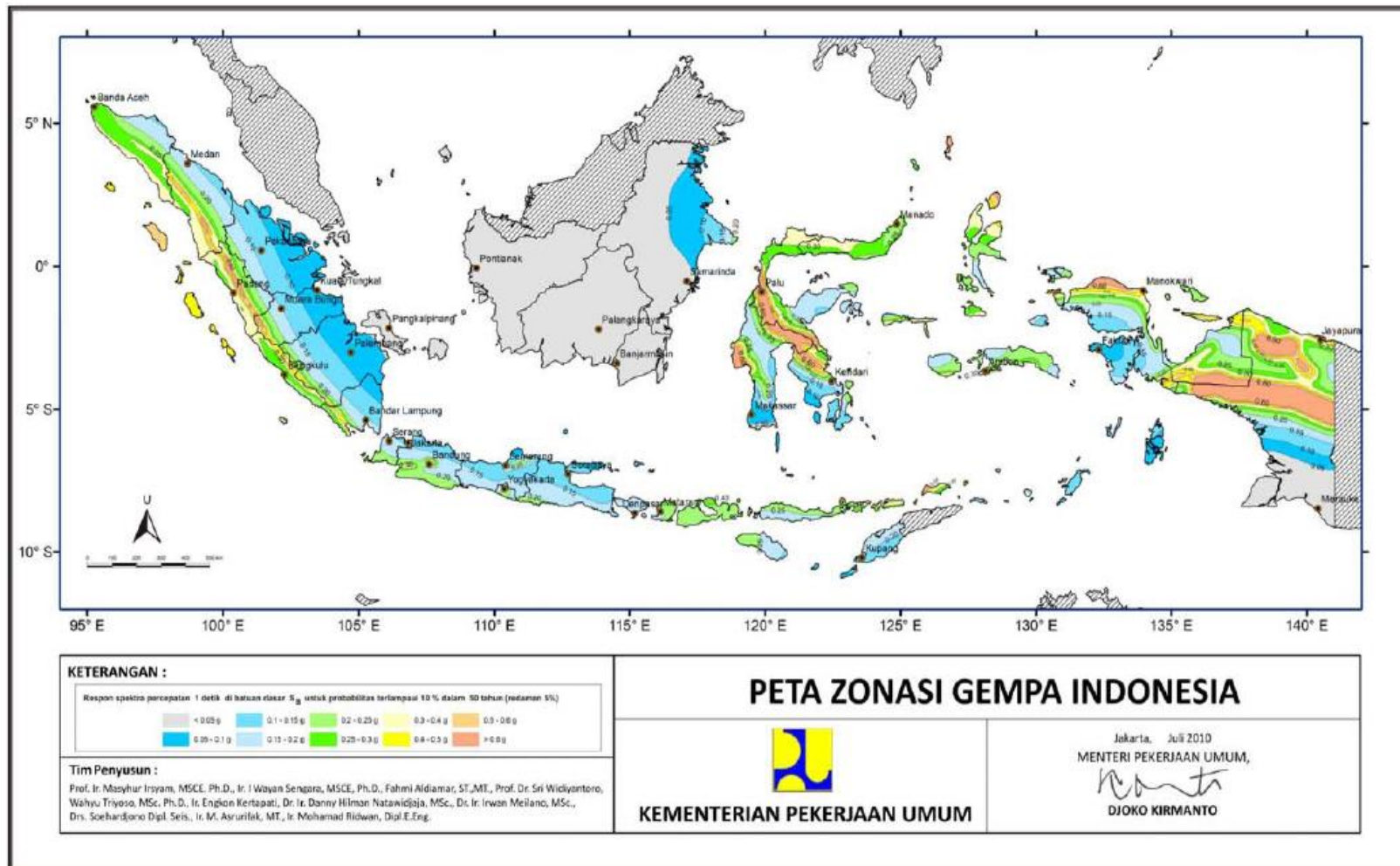
Berdasarkan peraturan SNI-2833-2013 Perancangan Gempa, jembatan harus direncanakan agar memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh namun dapat mengalami kerusakan yang signifikan dan gangguan terhadap pelayanan akibat gempa dengan kemungkinan terlampaui 10% dalam 50 tahun. Penggantian secara parsial atau lengkap pada struktur diperlukan untuk beberapa kasus. Kinerja yang lebih tinggi seperti kinerja operasional dapat ditetapkan oleh pihak yang berwenang. Beban gempa diambil sebagai gaya horizontal yang ditentukan berdasarkan perkalian antara koefisien respons elastik (C_{sm}) dengan berat struktur ekuivalen yang kemudian dimodifikasi dengan faktor modifikasi respons (R) dengan formulasi sebagai berikut:

$$EQ = \frac{C_{sm}}{R} \times W_t \quad (2.23)$$

Koefisien respons elastik C_{sm} diperoleh dari peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan sesuai dengan daerah gempa dan periode ulang gempa rencana.







Gambar 2.20: Peta respons spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 5% dalam 50 tahun

a. Penentuan faktor situs

Untuk penentuan respons spektra di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi pada periode nol detik, periode pendek ($T = 0,2$ detik) dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode nol detik ($FPGA$), faktor amplifikasi periode pendek (Fa) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (Fv). Tabel 2.15 dan Tabel 2.16 memberikan nilai-nilai $FPGA$, Fa , dan Fv untuk berbagai klasifikasi jenis tanah.

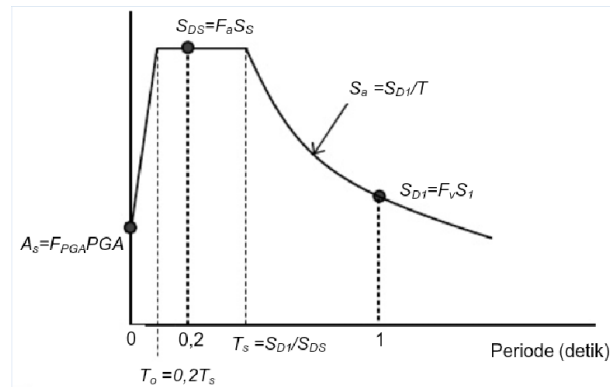
Tabel 2.15: Faktor amplifikasi periode 0 detik dan 0,2 detik ($FPGA/FA$).

Kelas situs	$PGA \leq 0,1$ 1 $Ss \leq 0,25$	$PGA = 0,2$ $Ss = 0,5$	$PGA = 0,3$ $Ss = 0,75$	$PGA = 0,4$ $Ss = 1$	$PGA > 0,5$ $Ss \geq 1,25$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1	1	1	1	1
Tanah Keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah Sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah Lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Tabel 2.16: Nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (Fv).

Kelas situs	$S1 \leq 0,1$	$S1 \leq 0,2$	$S1 \leq 0,3$	$S1 \leq 0,4$	$S1 \leq 0,5$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1	1	1	1	1
Tanah Keras (SC)	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
Tanah Sedang (SD)	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
Tanah Lunak (SE)	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

b. Respon Spektrum Rencana



Gambar 2.21: Spektrum rencana gempa (2013)

Perumusan desain respon spektrum adalah sebagai berikut:

$$A_s = F_{PGA} \times PGA \tag{2.24}$$

$$SDS = F_a \times SS \tag{2.25}$$

$$SDI = F_v \times S_I \tag{2.26}$$

c. Koefisien Respon Gempa *Elastic*

Untuk periode lebih kecil dari T_0 , koefisien respons gempa elastik (CSM) didapatkan dari persamaan berikut:

$$C_{SM} = (S_{DS} - A_s) \frac{T}{T_0} + A_s \tag{2.27}$$

Untuk periode lebih besar atau sama dengan T_0 , dan lebih kecil atau sama dengan T_s , respons *spectra* percepatan, C_{sm} adalah sama dengan SDS . Untuk periode lebih besar dari T_s , koefisien respons gempa elastik (CSM) didapatkan dari persamaan berikut:

$$C_{SM} = \frac{SDI}{T} \tag{2.28}$$

SDS = nilai *spectra* permukaan tanah pada periode pendek ($T = 0,2$ detik)

SDI = nilai *spectra* permukaan tanah pada periode 1 detik

$$T_0 = 0,2 T_s \tag{2.29}$$

$$T_s = \frac{SDI}{SDS} \tag{2.30}$$

d. Faktor Modifikasi Respons

Struktur *fly over* kereta api diklasifikasikan dalam kategori jembatan lainnya (*other bridges*). Berdasarkan tabel nilai R yang digunakan untuk

kolom tunggal pada kategori jembatan adalah 1,5. Jadi nilai R untuk *pier* (struktur atas) dapat diambil 1,5, baik untuk arah longitudinal maupun transversal. Sedangkan untuk desain pondasi (struktur bawah) nilai R diambil 1.

Tabel 2.17: Faktor modifikasi respon (R).

Bangunan bawah	Kategori kepentingan		
	1,5	1,5	2,0
Pilar tipe dinding	1,5	1,5	2,0
Tiang/Kolom beton bertulang			
-Tiang vertikal	1,5	2,0	3,0
-Tiang miring	1,5	1,5	2,0
Kolom tunggal	1,5	2,0	3,0
Tiang baja dan komposit			
-Tiang vertikal	1,5	3,5	5,0
-Tiang miring	1,5	2,0	3,0
Kolom majemuk	1,5	3,5	5,0

2.7 Pembebanan pada *Fly Over Kereta Api Double Track*

2.7.18 Berat Sendiri (MS)

Berat sendiri atau beban mati adalah beban yang berasal dari jembatan itu sendiri yang di tinjau dan termaksud segala unsur tambahan tetap yang merupakan satu kesatuan dengan jembatan. Untuk menemukan besar seluruhnya di tentukan berdasarkan berat volume beban. Berdasarkan peraturan pemerintah No.60 Tahun 2012 berat jenis bahan yang biasanya digunakan dalam perhitungan beban mati sebagaimana tersebut dalam Tabel 2.18.

Tabel 2.18: Berat jenis bahan.

Baja, baja cor	78.50 kN/m ³
Besi cor	72.50 kN/m ³
Kayu	8.00 kN/m ³
Beton	24.00 kN/m ³

Aspal anti air	11.00 kN/m ³
Ballast gravel atau batu pecah	19.00 kN/m ³

Berdasarkan SNI 1725:2016 faktor beban yang digunakan untuk berat sendiri dapat dilihat pada Tabel 2.19.

Tabel 2.19: Faktor beban akibat berat sendiri.

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ^s_{MS})		Keadaan Batas Ultimit (γ^u_{MS})	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Aluminium	1,00	1,10	0,90
	Beton pracetak	1,00	1,20	0,85
	Beton cor di tempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,70

Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012, konstruksi jalan rel adalah sebagai berikut:

Spesifikasi bahan penyusun badan jalan rel kereta api menggunakan PM. No. 60 Tahun 2012 beserta peraturan lain yang memberikan detail spesifikasi bahan penyusun badan jalan rel kereta api.

2.7.19 Beban Mati Tambahan/Utilitas (MA)

Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur perencanaan. Beban mati tambahan pada jembatan jalan rel umumnya terdiri berat rel, bantalan, *ballast*, kerikil dll.

Dalam hal tertentu, nilai faktor beban mati tambahan yang berbeda dengan ketentuan pada Tabel 2.20 boleh digunakan dengan persetujuan instansi yang berwenang. hal ini bias dilakukan apabila instansi tersebut melakukan pengawasan terhadap beban mati pada jembatan sehingga tidak di lampau selama umur jembatan.

Tabel 2.20: Faktor beban untuk beban mati tambahan.

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MA})	
	Keadaan batas layan (γ^s_{MA})	Keadaan batas ultimit (γ^u_{MA})

	Keadaan		Biasa	Terkurangi
	Tetap	Umum	1,00 ⁽¹⁾	2,00
Khusus (terawasi)		1,00	1,40	0,80
Catatan ⁽¹⁾ : Faktor beban layan sebesar 1,3 digunakan untuk berat utilitas				

2.7.20 Pengaruh Tetap Pelaksanaan (PL)

Pengaruh tetap pelaksanaan adalah beban yang disebabkan oleh metode dan urutan pelaksanaan pekerjaan jembatan. Beban ini biasanya mempunyai kaitan dengan aksi-aksi lainnya, seperti pra-penegangan dan berat sendiri. Dalam hal ini, pengaruh faktor ini tetap harus dikombinasikan dengan aksi-aksi tersebut dengan faktor beban yang sesuai.

Bila pengaruh tetap yang terjadi tidak begitu terkait dengan rencana lainnya, maka pengaruh tersebut harus dimaksudkan dalam batas layan dan batas ultimit menggunakan faktor beban sesuai dengan Tabel 2.21.

Tabel 2.21: Faktor beban akibat pengaruh pelaksanaan.

Tipe beban	Faktor beban (γ_{PL})		
	Keadaan Batas Layan (γ^s_{PL})	Keadaan Batas Ultimit (γ^u_{PL})	
		Biasa	Terkurangi
Tetap	1,00	1,00	1,00

2.7.21 Pengaruh Prategang (PR)

Prategang akan menyebabkan pengaruh sekunder pada komponen-komponen yang terkekang pada bangunan statik tidak tentu. Pengaruh sekunder tersebut harus diperhitungkan baik pada batas daya layan ataupun batas ultimit.

Prategang harus diperhitungkan sebelum (selama pelaksanaan) dan sesudah kehilangan tegangan dalam kombinasinya dengan beban-beban lainnya.

Tabel 2.22: Faktor beban akibat pengaruh prategang.

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{PR})	
	Keadaan Batas Layan (γ^s_{PR})	Keadaan Batas Layan (γ^u_{PR})
Tetap	1,0	1,0

2.7.22 Pengaruh Susut dan Rangkak (SH)

Pengaruh rangkak dan penyusutan harus diperhitungkan dalam perencanaan jembatan beton. pengaruh ini di hitung menggunakan beban mati jembatan, apabila rangkak dan penyusutan bisa mengurangi pengaruh muatan lainnya, maka nilai dari rangkak dan penyusutan tersebut harus diambil minimum (misalnya pada waktu transfer dari beton prategang).

Tabel 2.23: Faktor beban akibat susut dan rangkak.

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{SH})	
	Keadaan Batas Layan (γ^s_{SH})	Keadaan Batas Layan (γ^u_{SH})
Tetap	1,0	0,5

2.7.23 Beban Pengereman dan Traksi (TB)

Beban pengereman dan traksi masing-masing adalah 25% dari beban kereta, bekerja pada pusat gaya berat kereta ke arah rel (secara longitudinal).

2.7.24 Beban Horizontal

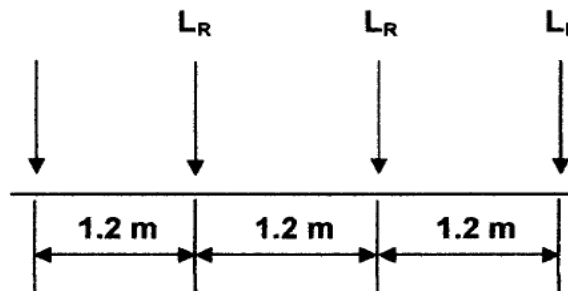
2.7.24.1 Beban Sentrifugal (TR)

Beban sentrifugal diperoleh dengan mengalikan faktor α terhadap beban kereta, beban bekerja pada pusat gaya berat kereta pada arah tegak lurus rel secara horisontal.

$$\alpha = \frac{v^2}{127R} \quad (2.31)$$

2.7.24.2 Beban Lateral Kereta (LR)

Beban bekerja pada bagian atas dan tegak lurus arah rel, secara horizontal. Besaran adalah 15% atau 20% dari beban gandar untuk masing-masing lokomotif atau kereta listrik/diesel.



Gambar 2.22: Beban lateral kereta.

2.7.25 Gesekan Pada Perletakan (BF)

Gesekan pada perletakan termasuk pengaruh kekakuan geser dari perletakan *elastomer*. Gaya akibat gesekan pada perletakan dihitung menggunakan hanya beban tetap, dan nilai rata-rata dari koefisien gesekan (atau kekakuan geser apabila menggunakan perletakan *elastomer*).

Tabel 2.24: Faktor beban akibat gesekan pada perletakan.

Jangka waktu	Faktor beban		
	(γ_{BF}^S)	(γ_{BF}^U)	
		Biasa	Terkurangi
Transien	1,0	1,3	0,8

2.7.26 Beban Lalu Lintas (TD)

Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri dari beban lajur “D” dan beban kendaraan “T”. beban lajur “D” bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu iring-iringan kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur “D” yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri, sedangkan beban kendaraan “T” yang digunakan pada perencanaan ini adalah kereta api.

2.7.27 Beban Lokomotif dan Tender (TT)

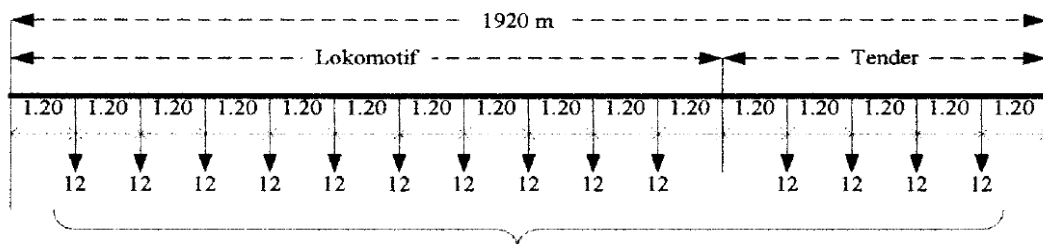
Beban kendaraan yang digunakan adalah beban gandar terbesar sesuai rencana

sarana perkereta apian yang dioperasikan atau skema dari rencana muatan. Untuk beban gandar sampai dengan 18 ton dapat digunakan skema rencana muatan 1921 (RM 21) pada peraturan pemerintah. Untuk beban gandar lebih besar dari 18 ton, rencana muatan disesuaikan dengan kebutuhan tekanan gandar.

Rencana Muatan 1921

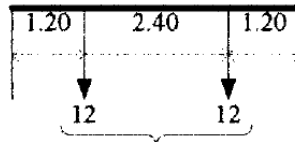
Muatan Gerak

- a. Sebagai muatan gerak di anggap suatu susunan kereta api terdiri dari 2 Lokomotif pakai tender, serupa demikian:



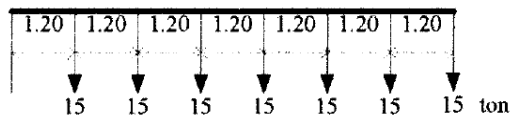
Jumlah berat 168 ton atau 87,5 ton/m

- b. Bila dengan kereta/gerobak yang banyaknya tidak tertentu, serupa demikian:

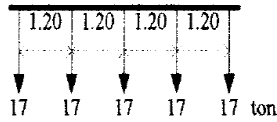


Jumlah 24 ton atau 5 ton/m

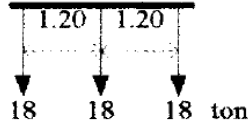
- c. Susunan kereta itu selalu dibikin sehingga bagian yang harus dihitung kekuatannya paling berbahaya, jika ada 6 atau 7 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 15 ton.



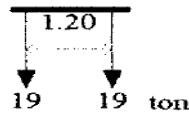
- d. Jika hanya ada 5 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 17 ton.



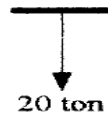
e. Jika hanya ada 3 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 18 ton



f. Jika hanya ada 2 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 19 ton.



g. Jika hanya ada 1 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 20 ton



Dari rencana-rencana muatan tersebut, selalu dipilih rencana yang pendapatnya paling berbahaya bagi yang dihitungnya.

2.7.28 Beban Akibat Penurunan (SE)

Jembatan harus direncanakan untuk bisa menahan terjadinya penurunan yang diperkirakan, termasuk perbedaan penurunan, sebagai aksi daya layan. pengaruh penurunan dapat dikurangi dengan adanya rangkai dan interaksi pada struktur tanah. faktor beban untuk penurunan dapat digunakan sesuai Tabel 2.25.

Tabel 2.25: Faktor beban akibat penurunan.

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{ES})	
	Keadaan Batas Layan (γ^s_{ES})	Keadaan Batas Ultimit (γ^u_{ES})
Permanen	1,0	N/A

2.7.29 Beban Kejut (i)

Beban kejut diperoleh dengan mengalikan faktor i terhadap beban kereta. Perhitungan paling sederhana untuk faktor i adalah dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{a) Untuk rel pada alas balas, } i = 0.1 + \frac{25}{50+L} \quad (2.32)$$

$$\text{b) Untuk rel pada Perletakan kayu, } i = 0.2 + \frac{25}{50+L} \quad (2.33)$$

$$\text{c) Untuk rel secara langsung pada baja, } i = 0.3 + \frac{25}{50+L} \quad (2.34)$$

2.7.30 Beban Rel Panjang Longitudinal (L_F)

Beban rel panjang *longitudinal* pada dasarnya adalah 10 kN/m, maksimum 2.000 kN.

2.7.31 Gaya akibat Temperatur Seragam (EUn)

Deformasi akibat perubahan temperatur yang merata dapat dihitung dengan menggunakan prosedur seperti yang dijelaskan pada pasal ini dapat digunakan untuk perencanaan jembatan yang menggunakan gelagar yang terbuat dari beton atau baja. Rentang temperatur harus seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.26. perbedaan antara temperatur minimum dengan temperatur maksimum dengan temperatur nominal yang diasumsikan dalam perencanaan harus digunakan untuk menghitung pengaruh akibat deformasi yang terjadi akibat perbedaan suhu tersebut. Temperatur minimum dan maksimum yang ditentukan dalam Tabel 2.26 harus digunakan sebagai $T_{mindesign}$ dan $T_{maxdesign}$ pada Persamaan 2.35.

Besaran rentang simpang akibat beban temperatur (ΔT) harus berdasarkan temperatur maksimum dan minimum yang didefinisikan dalam desain sebagai berikut:

$$\Delta T = \alpha L (T_{max design} - T_{min design}) \quad (2.35)$$

Tabel 2.26: Temperatur jembatan rata-rata nominal.

Tipe bangunan atas	Temperatur jembatan rata-rata minimum (1)	Temperatur jembatan rata-rata maksimum
Lantai beton diatas gelagar atau boks beton.	15 °C	40 °C
Lantai beton diatas gelagar, boks atau rangka baja.	15 °C	40 °C
Lantai pelat baja diatas gelagar, boks atau rangka baja.	15 °C	40 °C
Catatan: temperatur jembatan rata-rata minimum bisa dikurangi 5 °C untuk lokasi yang terletak pada ketinggian lebih besar dari 500 m diatas permukaan laut.		

Tabel 2.27: Sifat bahan rata-rata akibat pengaruh temperatur.

Bahan	Koefisien perpanjangan akibat suhu (α)	Modulus Elastisitas (MPa)
Baja	12×10^{-6} per °C	200.000
Beton:		
Kuat tekan < 30 MPa	10×10^{-6} per °C	$4700\sqrt{f_c'}$
Kuat tekan > 30 MPa	11×10^{-6} per °C	$4700\sqrt{f_c'}$

2.7.32 Temperatur Gradien

Variasi temperatur (EG) di dalam bangunan atas jembatan atau perbedaan temperatur disebabkan oleh pemanasan langsung dari sinar matahari di waktu siang pada bagian atas permukaan lantaidan pelepasan kembali radiasi dari seluruh permukaan jembatan di waktu malam. Gradien temperatur nominal arah vertikal untuk bangunan atas beton dan baja diberikan dalam Gambar 2.23. Parameter yang digunakan mencakup T_1 , T_2 , dan T_3 dengan nilai sesuai pada Tabel 2.28. Untuk tipe jembatan yang lebar diperlukan perhitungan untuk meninjau gradien perbedaan temperatur dalam arah melintang. Nilai A dapat diambil sebagai berikut:

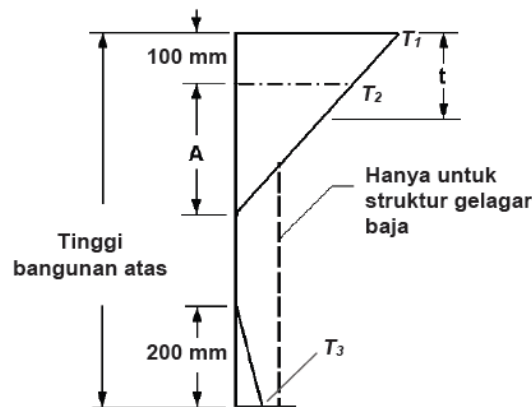
- Untuk bangunan atas terbuat dari beton dengan tinggi gelagar sebesar 400 mm atau lebih nilai A sama dengan 200 mm
- Untuk bangunan atas terbuat dari beton dengan tinggi gelagar lebih rendah dari 400 mm nilai A diambil lebih kecil 100 mm dari tinggi aktual.

- Untuk bangunan atas terbuat dari baja, nilai A diambil sebesar 200 mm dan jarak t diambil sebagai ketebalan plat lantai.

Tabel 2.28: Parameter T_1 dan T_2 .

Lokasi jembatan	T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	T_3 ($^{\circ}\text{C}$)
< 500 m di atas permukaan laut	12	8	$0 \leq T_3 < 5$
> 500 m di atas permukaan laut	17	11	

Nilai T_3 dapat diambil sebesar 0 kecuali bila dilakukan kajian spesifikasi situs, tetapi nilai T_3 diambil tidak melebihi 5°C .



Gambar 2.23: Gradien temperatur vertikal pada bangunan atas beton dan baja.

2.7.33 Beban Angin (EW)

Beban angin bekerja tegak lurus rel, secara horizontal, tipikal nilainya adalah:

- 3,0 kN/m^2 pada areal proyeksi vertikal jembatan tanpa kereta di atasnya. Namun demikian, 2,0 kN/m^2 , pada areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin, tidak termasuk areal sistem lantai.
- 1,5 kN/m^2 pada areal kereta dan jembatan, dengan kereta di atasnya, pengecualian 1,2 kN/m^2 untuk jembatan selain gelagar dek/rasuk atau jembatan komposit, sedangkan 0,8 kN/m^2 untuk areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin.

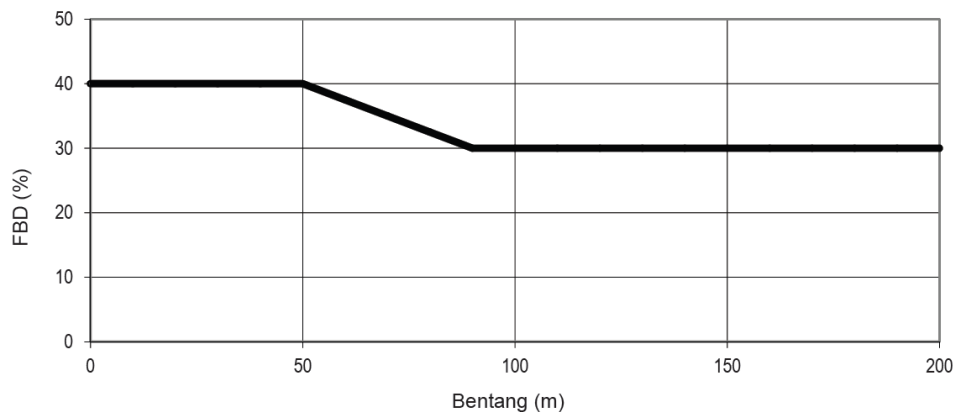
2.7.34 Faktor Beban Dinamis

Faktor beban dinamis (FBD) merupakan hasil interaksi antara kendaraan yang bergerak dan jembatan. Besarnya FBD tergantung pada frekuensi dasar dari

suspense kendaraan. Biasanya antara 2 Hz sampai 5 Hz untuk kendaraan berat, dan frekuensi dari getaran lentur jembatan. Untuk perencanaan, FBD dinyatakan sebagai beban statis ekuivalen.

Faktor beban dinamis tidak perlu ditetapkan untuk:

- Dinding penahan yang tidak memikul reaksi vertikal dari struktur atas jembatan, dan
- Komponen pondasi yang seluruhnya berada dibawah permukaan tanah.



Gambar 2.24: Faktor beban dinamis untuk beban hidup kendaraan.

2.8 Kombinasi Pembebanan

Berdasarkan SNI 1725-2016 jembatan harus direncanakan sesuai dengan keadaan batas yang disyaratkan untuk mencapai target pembangunan, keamanan, dan aspek layan, dengan memperhatikan kemudahan inspeksi, faktor ekonomi, dan estetika.

Komponen dan sambungan pada jembatan harus memenuhi persamaan 1 untuk kombinasi beban-beban ekstrem seperti yang ditentukan pada setiap keadaan batas sebagai berikut:

Kuat I : Kombinasi pembebanan yang memperhitungkan gaya-gaya yang timbul pada jembatan dalam keadaan normal tanpa memperhitungkan beban angin. Pada keadaan batas ini, semua gaya nominal yang terjadi dikalikan dengan faktor beban yang sesuai.

Kuat II : Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan penggunaan jembatan untuk memikul beban kendaraan khusus yang

- ditentukan pemilik tanpa memperhitungkan beban angin.
- Kuat III : Kombinasi pembebanan dengan jembatan dikenal beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.
- Kuat IV : Kombinasi pembebanan untuk memperhitungkan kemungkinan adanya rasio beban mati dengan beban hidup yang besar.
- Kuat V : Kombinasi pembebanan berkaitan dengan operasional normal jembatan dengan memperhitungkan beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.
- Ekstrem I : Kombinasi pembebanan gempa. Faktor beban hidup γ_{EQ} yang mempertimbangkan bekerjanya beban hidup pada saat gempa berlangsung harus ditentukan berdasarkan kepentingan jembatan.

Faktor beban untuk setiap beban untuk setiap kombinasi pembebanan harus diambil seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.29. Perencana harus menyelidiki bagian parsial dari kombinasi pembebanan yang dapat terjadi harus di investigasi dimana setiap beban yang di indikasikan untuk diperhitungkan dalam kombinasi pembebanan harus dikalikan dengan faktor beban yang sesuai.

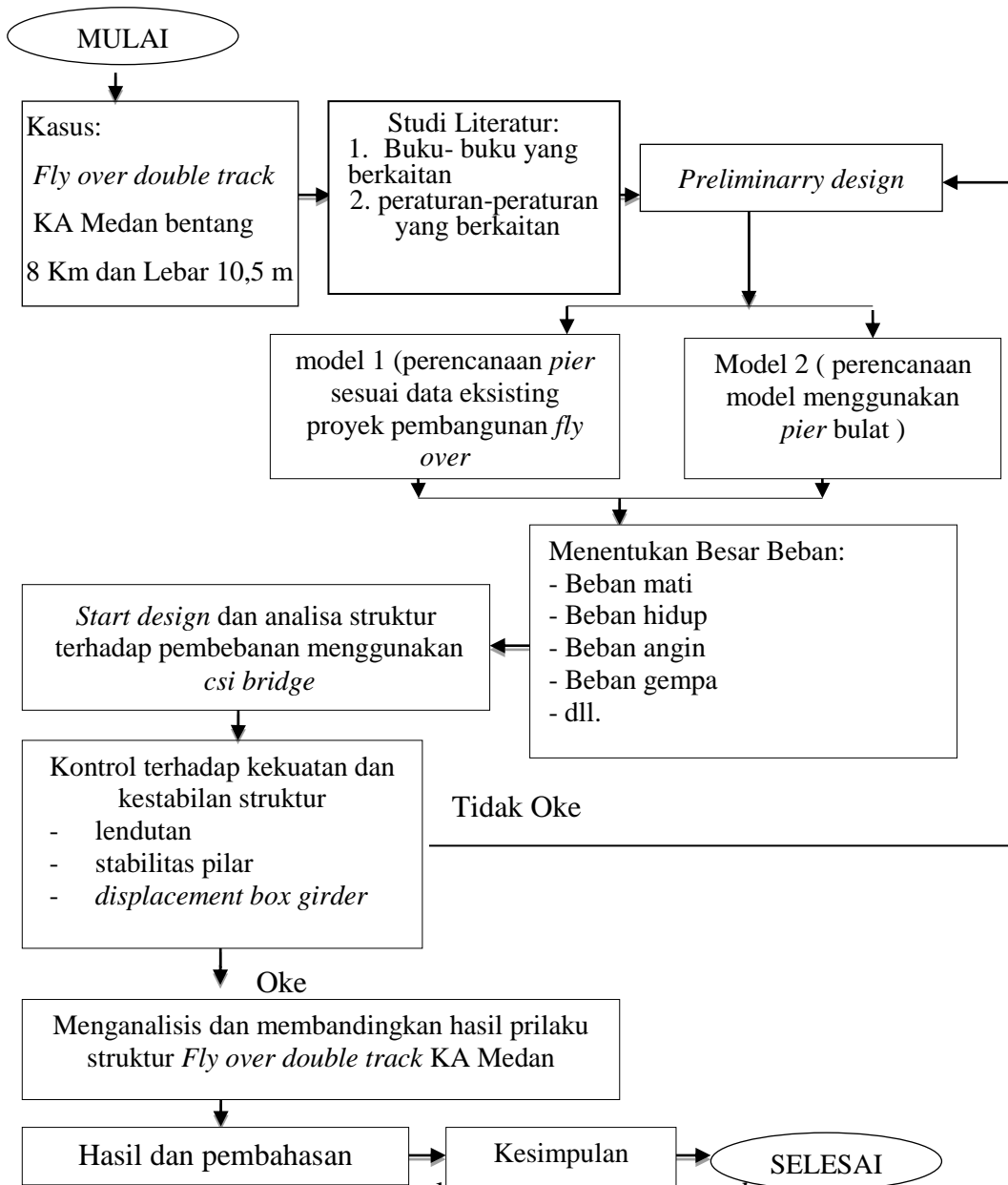
Tabel 2.29: Kombinasi Beban dan Faktor Beban.

Keadaan Batas	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EW _s	EW _L	BF	EU _n	TG	ES	Gunakan Salah Satu		
										EQ	TC	TV
Kuat I	$\gamma\rho$	1,8	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	$\gamma\rho$	1,4	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat III	$\gamma\rho$	-	1,00	1,40	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat IV	$\gamma\rho$	-	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	-	-	-	-	-
Kuat V	$\gamma\rho$	-	1,00	0,40	1,00	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Ekstrem I	$\gamma\rho$	γ_{EQ}	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,00	-	-
Ekstrem II	$\gamma\rho$	0,50	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,00	1,00
Daya Layan I	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Layan II	1,00	1,30	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	-	-	-	-	-
Daya Layan III	1,00	0,80	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Layan IV	1,00	-	1,00	0,70	-	1,00	1,00/1,20	-	1,00	-	-	-
Fatik (TD dan TR)	-	0,75	-	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Langkah-langkah dalam perencanaan dan analisis struktur jembatan pada tugas akhir ini dilakukan dengan beberapa tahapan seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1: Diagram alir perencanaan *fly over double track*

3.2 Metode Analisis

- a) Pengumpulan data
- b) *Preliminary design*
- c) Pemodelan struktur
- d) Analisis pembebanan
 - Beban-beban
 - Kombinasi pembebanan
- e) Analisa gaya dalam dan perhitungan struktur
- f) Cek desain

3.3 Uraian Metode

3.3.1 Pengumpulan Data

1. Data Primer

Tidak dilakukan pengamatan langsung ke lokasi

2. Data Sekunder

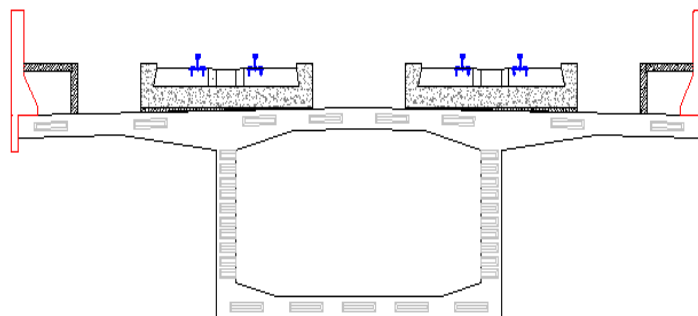
- a. Gambar rencana bangunan eksisting proyek
- b. Data gempa

3. Peraturan-peraturan dan penunjang lain sebagai dasar teori

3.3.2 Preliminary Design

A. *Box girder*

Potongan melintang *box girder* yang akan digunakan pada perencanaan ini sesuai dengan data eksisting proyek pembangunan *fly over double track* kereta api Medan seperti terlihat pada Gambar 3.2 dibawah ini.



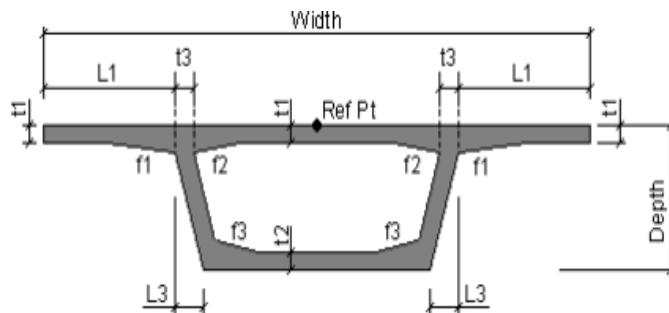
Gambar 3.2: Potongan melintang *box girder*.

- Panjang *box girder* (L) = 40 m

- Jumlah *box girder* (n) = 1 bh
- Lebar pengaman tepi (bt) = 1 m

Dimana pada kondisi lapangan, panjang *box girder* bervariasi setiap span nya mulai dari 4 m sampai dengan 2,3 m sehingga pada bentang span 40 m terdapat 10-11 *box girder*.

untuk dimensi *box girder* yang akan di gunakan dalam design struktur *fly over* ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3: Dimensi *box girder prestress*.

Data dimensi *box girder*

- | | |
|-------------------------|--------------------------|
| - <i>Width</i> = 10,5 m | - F1 horizontal = 1,45 m |
| - t1 = 0,25 m | - F1 vertikal = 0,171 m |
| - t2 = 0,25 m | - F2 horizontal = 0,85 m |
| - t3 = 0,3 m | - F2 vertikal = 0,217 m |
| - <i>Depth</i> = 2,4 m | - F3 horizontal = 0,6 m |
| - L1 = 3 m | - F3 vertikal = 0,15 m |
| - L3 = 0,3 m | |

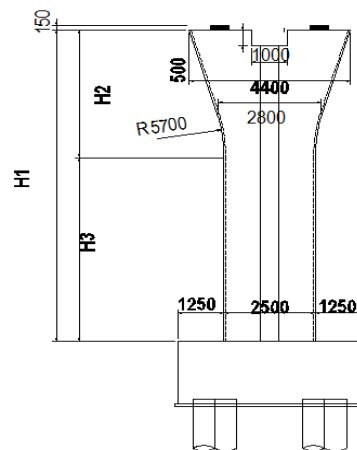
B. Kolom (*Pier*)

Pada tugas akhir ini akan digunakan *pier* yang berbeda untuk membandingkan dua pemodelan.

a. Tipe *pier* pertama

Pada pemodelan pertama digunakan *pier* dengan dimensi seperti yang telah

didapatkan pada proyek pembangunan *fly over* Medan, *pier* ini berbentuk persegi dan memiliki *pier head* yang berbentuk trapesium seperti pada Gambar 3.4, mempunyai ketinggian 9 m mulai dari stasiun Medan menuju ke stasiun Bandar khalifah.



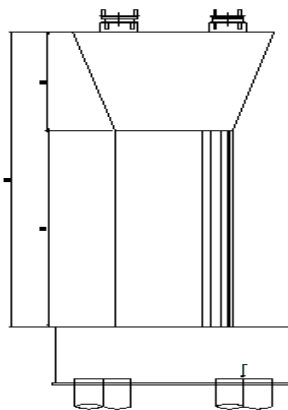
Gambar 3.4: Potongan melintang *pier* kotak

Data dimensi kolom:

- H1 = 9 m
- H2 = 3 m
- H3 = 6 m

b. Type *pier* kedua

Pemodelan kedua menggunakan *pier* bulat dengan diameter 2,5 m seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5: Potongan melintang *pier* bulat

Data dimensi kolom:

- H1 = 9 m
- H2 = 2,5 m
- H3 = 6,5 m
- Diameter *pier* = 2,5 m

C. Springs Constant

Menurut Bowles, untuk menentukan besarnya modulus reaksi tanah dasar didasarkan pada daya dukung tanah dengan penurunan tanah (δ) 1 inci = 0,0254 m

$$K_s = \frac{q_{ult}}{\delta}$$

$$= \frac{0,0254}{\delta}$$

$$= 40 \times q_{ult}$$

q_{ult} = daya dukung tanah

$$= c.N_c + D.\gamma.N_q + 0,5 \cdot \gamma.B.N_\gamma$$

Tabel 3.1: Nilai-nilai faktor kapasitas daya dukung Terzaghi (1943).

Φ	Keruntuhan geser umum			Keruntuhan geser lokal		
	N_c	N_q	N_r	N_c'	N_q'	N_r'
0	5,7	1,0	0,0	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8,0	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5,0	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19,0	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35,0	23,7	11,7	9,0
35	57,8	41,4	42,4	25,5	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50	347,6	415,1	1153,2	81,3	65,5	87,1

Untuk: $\Phi = 15^\circ \rightarrow N_c = 12,9 \quad N_q = 4,4 \quad N_\gamma = 2,5$

$\Phi = 15^\circ$

$\gamma = 1,6272 \text{ ton/m}^3$

$$\begin{aligned}
C &= 1,8 \text{ ton/m}^2 \\
q_{ult} &= (1,8 \times 12,9) + (0,85 \times 1,6272) + (0,5 \times 1,6272 \times 2 \times 2,5) \\
&= 28,668 \text{ t/m}^2 \\
K_s &= 40 \times q_{ult} \\
&= 40 \times 28,668 \\
&= 1146,72 \text{ t/m}^3
\end{aligned}$$

D. Perletakan (*Bearing*)

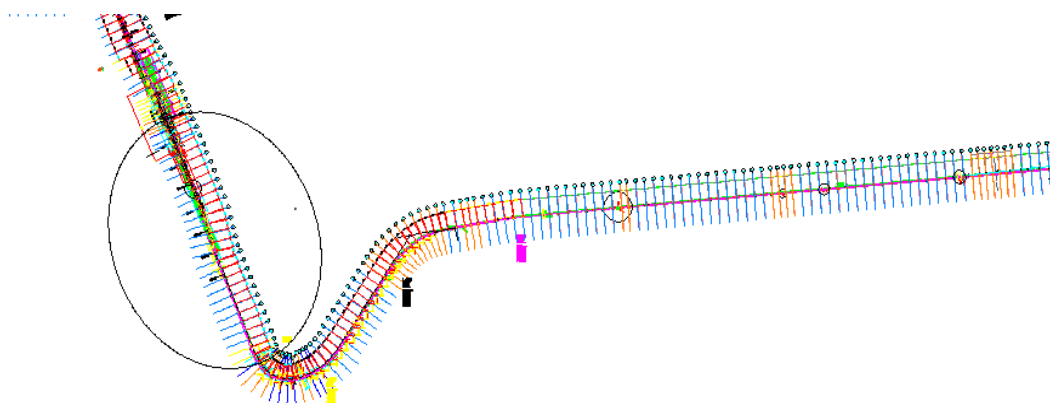
Pada perencanaan ini digunakan spesifikasi perletakan yang mengacu pada *bridge bearing* bs 5400, seperti pada Tabel 3.2 dibawah ini.

Tabel 3.2 Spesifikasi *elastomeric bearing pad*.

Dimensi	Tinggi (mm)	Berat (Kg)	Kc (kN/mm)	Ks (kN/mm)	SLS Vertical loads (kN)
500 × 400	69	41,1	1536	3,67	4559

E. Layout *Fly Over Double Track*

Dalam tugas akhir ini akan diambil kasus pada 22 bentang lurus, dimana pada setiap bentang mempunyai panjang 40 m dimulai dari stasiun Medan menuju ke stasiun Bandar khalifah seperti terlihat pada Gambar 3.6.



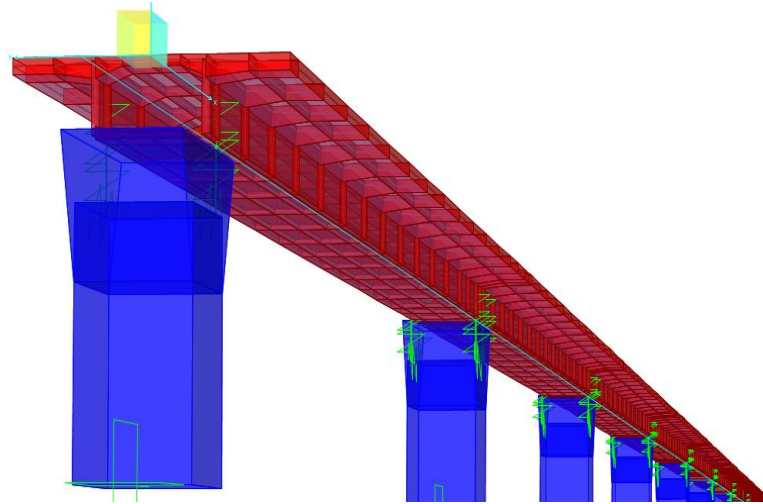
Gambar 3.6: Peta lintas kereta api dari stasiun Medan menuju Bandar Khalifah.

3.3.9 Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur menggunakan bantuan program komputer *csi bridge*.

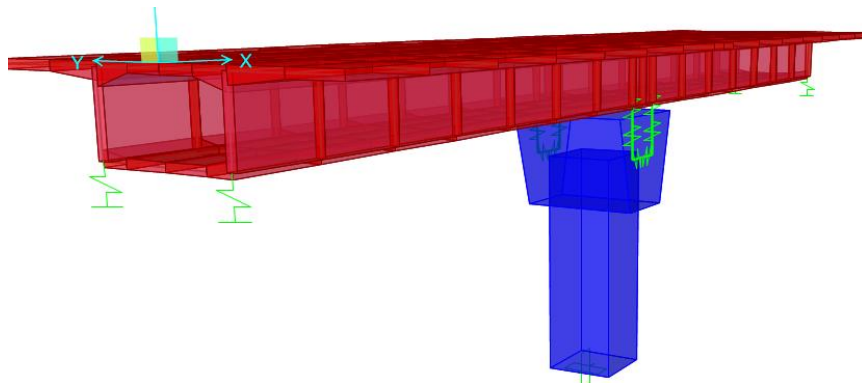
a. Pemodelan I

Struktur pada tugas akhir ini dimodelkan menggunakan *box girder* sebagai struktur atas dengan bentang total 8 Km, *elastomeric bearing pads* sebagai tumpuannya dan *pier* persegi dengan ketinggian total 9 m.



Gambar 3.7: Tampak 3D struktur *fly over double track*.

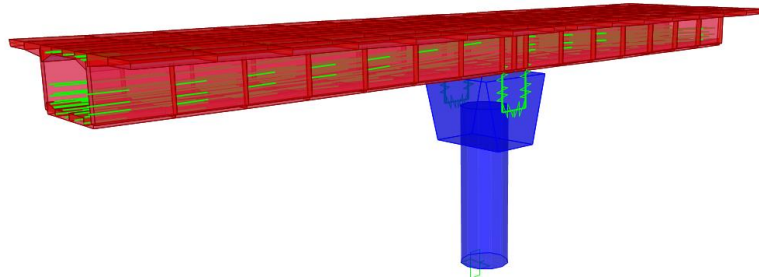
Dikarenakan struktur *fly over* bersifat *discontinious* maka pemodelan struktur dapat dianggap seperti Gambar 3.8, dimana dilakukan asumsi pemutusan setengah bentang pada girder dengan anggapan bahwa satu pilar menahan beban *box girder* dengan masing-masing panjang 40 m, kemudian setiap ujung bentang diberi perletakan *spring constant*.



Gambar 3.8: Tampak 3D struktur jembatan model 1 pada *software*.

b. Pemodelan II

Pemodelan ke dua yang akan digunakan pada tugas akhir ini adalah jembatan dengan penampang *pier* berbentuk bulat berdiameter 2,5 m dan memiliki bentuk girder yang sama dengan pemodelan 1 seperti terlihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9: Tampak 3D struktur jembatan model 2 pada *software*.

3.3.10 Data- Data Bahan Untuk Perencanaan

a. Berat Jenis Bahan

Pada umumnya berat jenis bahan yang digunakan dalam perencanaan jembatan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.3: Berat jenis bahan

Jenis Bahan	Berat (Kn/m ³)
Beton Bertulang (w'c)	25,00
Beton <i>Pre-stress</i> (w'c)	25,50
Beton (w'c)	24,00
Baja, Baja Cor (w'c)	78,50

b. Beton (*box girder*)

Box girder yang digunakan mempunyai mutu kuat tekan 41,50 MPa berikut adalah spesifikasi nya:

- Kuat tekan beton *box girder* ($f'c$) = 41,50 MPa
- Modulus elastik balok beton (E_c) = $(Wc)^{1.5} (0,043 \times \sqrt{f'c})$
= 3.57E+04 MPa
- Angka *poisson* (μ) = 0,2
- Modulus geser (G) = $E_c/[2 \times (1 + \mu)] = 1490$ MPa

- Koefisien muai panjang untuk beton (ϵ) = $1.00 \text{ e-}05/^{\circ}\text{C}$
- Kuat tekan beton pada keadaan awal (f_{ci}') = $0,80 \times f_c' = 33,20 \text{ MPa}$
- Tegangan ijin beton saat penarikan
 - a. Tegangan ijin tekan = $0,55 \times f_{ci}' = 18,26 \text{ MPa}$
 - b. Tegangan ijin tarik = $0,25 \times \sqrt{f_{ci}'} = 1,44 \text{ MPa}$
- Tegangan ijin beton keadaan akhir
 - a. Tegangan ijin tekan = $0,40 \times f_{ci}' = 16,60 \text{ MPa}$
 - b. Tegangan ijin tarik = $0,50 \times \sqrt{f_{ci}'} = 3,22 \text{ MPa}$

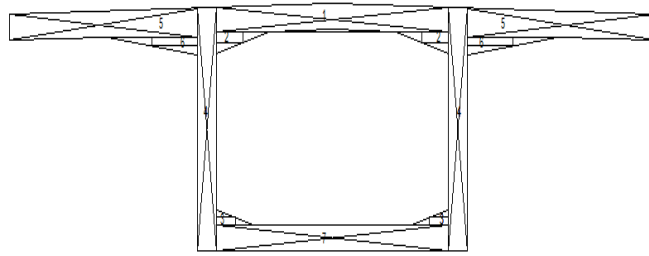
c. Beton (*pier*)

Untuk struktur tiang (*pier*) digunakan beton dengan mutu kuat tekan 29,05 MPa, dimana:

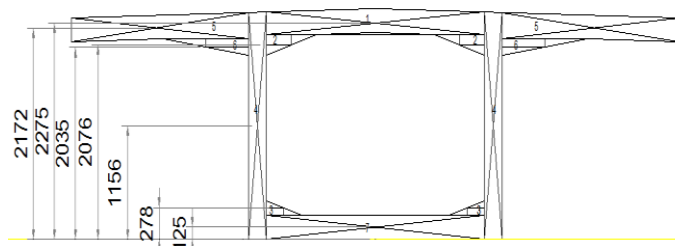
- Kuat tekan beton *pier* (f_c') = 29.05 MPa
- Modulus elastik balok beton (E_c) = $(W_c)^{1.5} (0,043 \times \sqrt{f_c'})$
= 2,897E+04 MPa
- Angka *poisson* (μ) = 0,2
- Modulus geser (G) = $E_c/[2 \times (1 + \mu)] = 7079.16 \text{ MPa}$
- Koefisien muai panjang untuk beton (ϵ) = $1.00 \text{ e-}05/^{\circ}\text{C}$
- Kuat tekan beton pada keadaan awal (f_{ci}') = $0,80 \times f_c' = 23,24 \text{ MPa}$
- Tegangan ijin beton saat penarikan
 - a. Tegangan ijin tekan = $0,55 \times f_{ci}' = 12,782 \text{ MPa}$
 - b. Tegangan ijin tarik = $0,25 \times \sqrt{f_{ci}'} = 1,205 \text{ MPa}$
- Tegangan ijin beton keadaan akhir
 - a. Tegangan ijin tekan = $0,40 \times f_{ci}' = 9,296 \text{ MPa}$
 - b. Tegangan ijin tarik = $0,50 \times \sqrt{f_{ci}'} = 2,41 \text{ MPa}$

3.3.11 Perhitungan *Section Properties Box Girder Prestress*

Untuk melakukan analisis *box girder* dilakukan pembagian penampang seperti terlihat pada Gambar 3.10 dan Gambar 3.11 dibawah ini.



Gambar 3.10: *Section properties* gelagar jembatan.



Gambar 3.11: Jarak terhadap alas “y”.

Tabel 3.4: Analisa section properties *box girder*.

No	Luas Tampang A (m ²)	Jarak Terhadap Alas y (m)	Statis Momen A×y (m ³)	Inersia Momen A×y ² (m ⁴)	Inersia Momen I ₀ (m ⁴)
1	0.925	2.275	2.104	4.787	0.0048
2	0.184	2.076	0.383	0.795	0.0007
3	0.090	0.278	0.025	0.007	0.0002
4	1.418	1.156	1.639	1.895	0.6597
5	1.500	2.172	3.258	7.076	0.0078
6	0.248	2.035	0.505	1.027	0.0006
7	0.925	0.125	0.116	0.014	0.0048
∑	5.2902		8.029	15.602	0.679

➤ Perhitungan Letak Titik Berat

$$\begin{aligned} \text{Tinggi } box \text{ girder } prestress (H) &= 2,4 \text{ m} \\ \text{Luas penampang } box \text{ girder } prestress (A) &= 5,2902 \text{ m}^2 \\ \text{Letak titik berat:} & \end{aligned}$$

$$\bullet Y_b = \frac{\sum A_x Y}{\sum A} = \frac{8.029}{5.2902} = 1.52 \text{ m}$$

- $Y_a = H - Y_b = 2.4 - 1,52 = 0.88 \text{ m}$

➤ Perhitungan Momen Tahanan

- Momen inersia terhadap alas balok:

$$\begin{aligned} I_b &= \sum A \times Y^2 + \sum I_o \\ &= 15,602 \text{ m}^4 + 0,679 \text{ m}^4 \\ &= 16,280 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- Momen inersia terhadap titik berat balok:

$$\begin{aligned} I_x &= I_b - (A \times Y_b^2) \\ &= 16,280 \text{ m}^4 - (5,2902 \text{ m}^2 \times 1,52^2) \\ &= 4,093 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

➤ Tahanan momen sisi atas:

- $W_a = \frac{I_x}{Y_a} = \frac{4.093}{0.88} = 4.639 \text{ m}^3$

➤ Tahanan momen sisi bawah:

- $W_b = \frac{I_x}{Y_b} = \frac{4.093}{1.52} = 2.696 \text{ m}^3$

3.3.6 Analisis Pembebanan

Pembebanan pada jembatan terdiri dari:

1. Beban berat sendiri (beban mati).

2. Beban mati tambahan

a. Rel

b. Bantalan

c. Ballast

d. Pengaman tepi

4. Gaya rem

5. Beban pelaksanaan

6. Beban angin.

a. Angin struktur

b. Angin kendaraan

7. Pengaruh temperatur

8. Beban akibat tumbukan

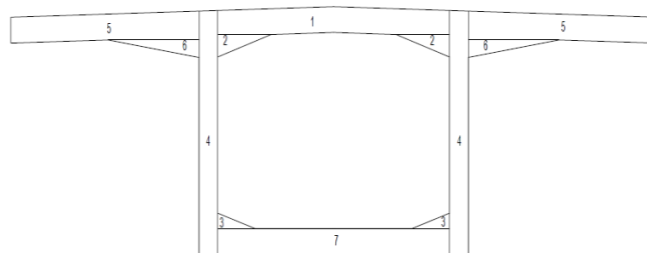
9. Beban gempa.

Berikut merupakan perhitungan dari pembebanan:

3.3.6.1 Beban Mati (MS)

Beban mati berasal dari berat struktur itu sendiri, dimana struktur yang di tinjau adalah *box girder*.

1. Berat *Box Girder*



Gambar 3.12: Pembagian segmen *box girder*.

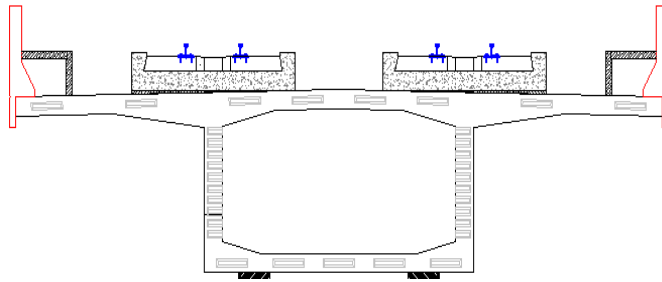
Tabel 3.5: Berat *box girder*.

No	Dimensi		Jumlah Tampang	Luas (A) m ²	Berat Jenis (kN/m ³)	Berat (kN/m)
	Lebar (m)	Tinggi (m)				
1	3,7	0,25	1	0,925	25,5	23,588
2	0,85	0,217	2	0,184	25,5	4,7035
3	0,6	0,15	2	0,09	25,5	2,295
4	0,3	2,363	2	1,418	25,5	36,154
5	3	0,25	2	1,5	25,5	38,25
6	1,45	0,171	2	0,248	25,5	6,3227
7	3,7	0,25	1	0,925	25,5	23,588
Total				5,29		134,9

3.3.6.2 Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan (*superimposed dead load*), adalah berat seluruh bahan yang menimbulkan suatu beban pada girder jembatan yang merupakan elemen non-struktural, dan mungkin besarnya berubah selama umur jembatan girder jembatan direncanakan mampu memikul beban mati tambahan berupa:

- Rel untuk kereta api jalur ganda dengan R54
- Bantalan untuk jalan rel dengan lebar 1067 mm
- Ballast* untuk rel digunakan *precast plint* yang terbuat dari beton
- Perlengkapan pengaman tepi



Gambar 3.13: Beban mati tambahan pada *box girder*.

Beban mati tambahan yang digunakan pada *fly over* kereta api ini adalah rel dengan jalur ganda.

a. Berat Rel

Batangan besi baja (R 54) = 54,43 Kg/m = 0,534 kN/m

b. Berat Bantalan

Untuk jalan rel 1067 mm

Panjang = 2000 mm

Lebar maksimum = 260 mm

Tinggi maksimum = 220 mm

Berat bantalan = $0,0572 \times 1 \times 25 \times 2 = 2,86$ kN/m

Untuk 2 jalur = 5,72 kN/m

c. Berat *Ballast*

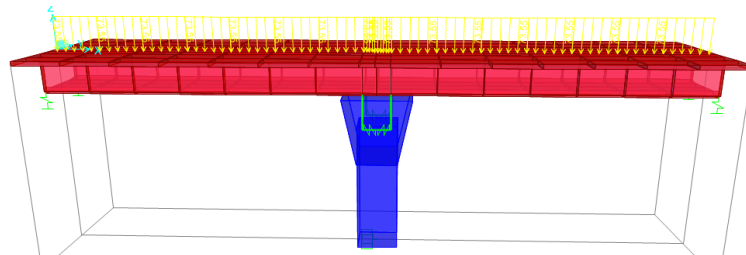
Ballast yang digunakan adalah *Precast plint* dengan material beton.

Berat *precast plint* untuk 2 jalur = $0,763 \times 1 \times 25 \times 2 = 38,15$ kN/m

d. Pengaman Tepi

Berat pengaman tepi = $0,583 \times 25 \times 2 = 29,15$ kN/m

Total beban mati tambahan = 73,55 kN/m

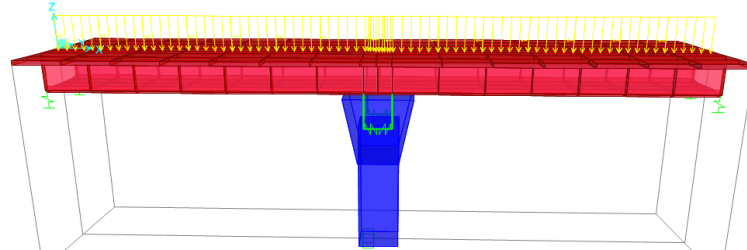


Gambar 3.14: Pemodelan beban mati tambahan pada *software*.

3.3.6.3 Beban Pelaksanaan (PL)

Beban pekerja menurut PPUIG = 100 kg/m

Beban pelaksanaan pada struktur = 1 kN/m



Gambar 3.15: Pemodelan beban pelaksanaan pada *software*.

3.3.6.4 Pengaruh Susut dan Rangkak (SH)

a. Pengaruh Susut

Berdasarkan SNI T-12-2004 diasumsikan pada kondisi standar nilai koefisien susut bisa dilihat pada Tabel 2.5 dan diambil koefisien susut maksimum ($\epsilon_{cs,t} = 0,000153$)

b. Pengaruh rangkak

Berdasarkan SNI T-12-2004 rangkak merupakan regangan jangka panjang yang tergantung waktu pada suatu kondisi tegangan tetap, dan yang mengakibatkan suatu tambahan regangan terhadap regangan elastis beton. Bisa dihitung dalam perbandingannya terhadap regangan elastis, melalui suatu koefisien rangkak $\varphi_{cc}(t)$

$$\epsilon_{cc,t} = \varphi_{cc}(t) \cdot \epsilon_e$$

$$\epsilon_e = 0,003$$

$$c_u = 2,0$$

$$\varphi_{cc}(t) = (28^{0,6} / (10 + 28^{0,6})) \cdot 2,0$$
$$= 0,8495$$

$$\epsilon_{cc,t} = 0,8495 \times 0,003$$

$$= 0,00254$$

$$\text{Susut} + \text{Rangkak} = 0,000153 + 0,00254$$

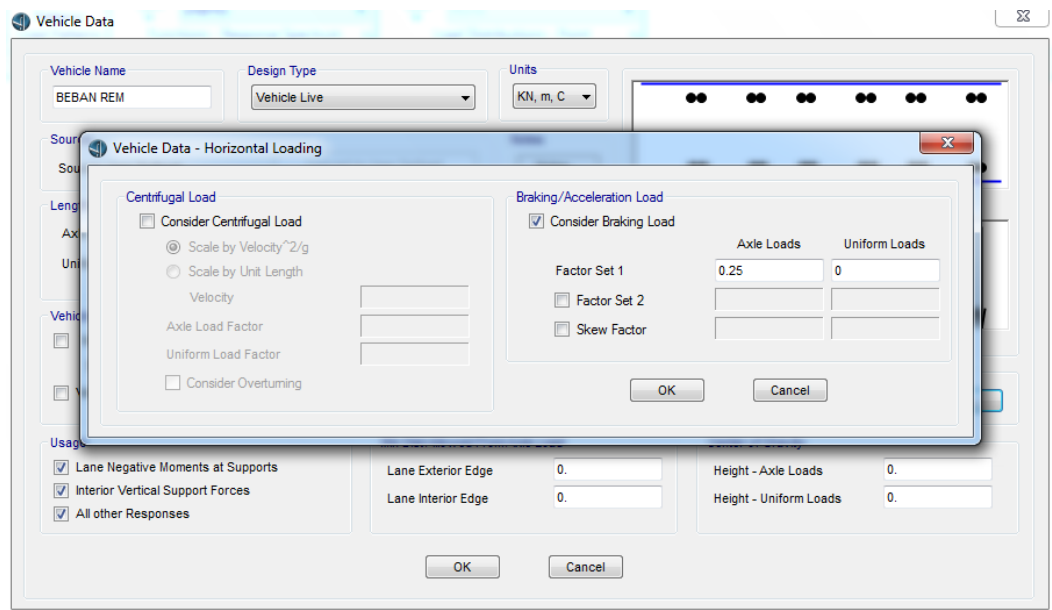
$$= 0,00270$$

3.3.6.5 Gaya akibat Rem (TB)

Pengaruh pengereman dari lalu-lintas diperhitungkan sebagai gaya dalam arah memanjang, dan dianggap bekerja pada jarak 1,80 m di atas permukaan lantai jembatan. Besarnya gaya rem arah memanjang jembatan tergantung panjang total jembatan (L_t) sebagai berikut:

Beban pengereman adalah 25% dari berat total kereta api.

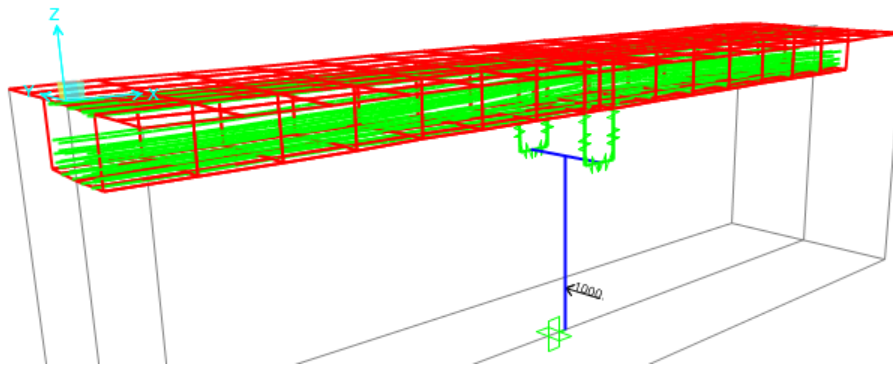
$$T_{TB} = 25 \% \times 138950 = 34737,5 \text{ kg} = 340 \text{ kN}$$



Gambar 3.16: *Input beban TB pada software.*

3.3.6.6 Gaya Akibat Tumbukan Kendaraan

Beban akibat tumbukan kendaraan pada *pier* jembatan jalan layang ditetapkan sebesar 1000 kN pada arah tegak lurus jembatan dan sebesar 500 kN pada arah memanjang jembatan. Keduanya bekerja pada tinggi 1,8 m dari permukaan jalan dibawah jembatan seperti terlihat pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17: *Input* beban tumbukan pada *software*.

3.3.6.7 Beban Hidup/ Lokomotif dan Tender (TT)

Struktur akan direncanakan agar dapat menahan beban hidup yang diperoleh dari spesifikasi kereta api.

a. Standart Beban Kereta Api

Fly over KA didesain dengan beban maksimum bekerja pada as kendaraan (*axle load*), dimana beban maksimum yang terjadi adalah beban kereta ditambah dengan beban penumpang yang berada. Struktur di rencanakan dapat memikul 3 gerbong kereta:



Gambar 3.18: Ilustrasi kereta 3 gerbong.

Gerbong tengah disebut T car, sedangkan gerbong lainnya disebut MC car. Karakteristik dan dimensi kereta dapat dilihat pada Tabel 3.6 dan Tabel 3.7.

Tabel 3.6: Komposisi pembebanan.

Kondisi	Defenisi
AW0	Maksimum beban operasi untuk kereta tanpa penumpang

AW1	Beban ketika semua kursi penumpang terpenuhi + AW0
AW2 (normal)	Beban ketika 4 orang penumpang berdiri/m ² + AW1
AW3	Beban ketika 6 orang penumpang berdiri/m ² + AW1
AW4 (<i>crush load</i>)	Beban ketika 8 orang penumpang berdiri/m ² + AW1

Beban penumpang, unit –org

Tabel 3.7: Beban penumpang.

Beban	Kapasitas penumpang		
	MC	T	Total
AW1	32	32	96
AW2 (normal)	131	138	400
AW3	181	191	553
AW4 (<i>crush load</i>)	231	244	706

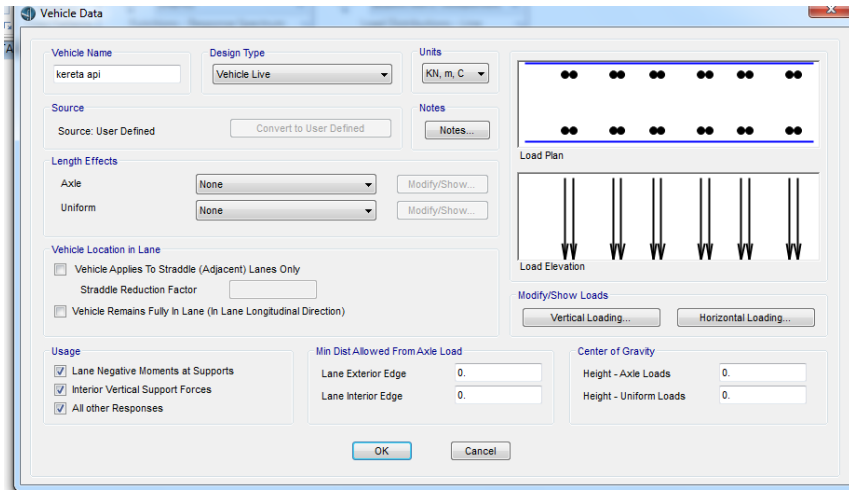
Berat penumpang/orang diasumsikan 75 kg. Beban kereta + penumpang (sesuai dengan kondisi pembebanan sebelumnya), unit = kg

Tabel 3.8: Beban kereta dan penumpang.

Beban	Kapasitas penumpang		
	MC	T	Total
AW1	2900	2800	86000
AW2 (normal)	31400	30400	116000
AW3	42575	42325	127475
AW4 (<i>crush load</i>)	46325	46300	138950

Pada Tabel 3.8 beban kereta dan penumpang dapat dilihat bahwa beban maksimum untuk tipe kereta MC adalah 46325 Kg (46 Ton). Beban maksimum yang terjadi pada 1 *axle* untuk kereta tipe MC adalah $46352/4 = 11581$ Kg (11,5 Ton). Pembulatan keatas digunakan untuk beban maksimum *axle load* adalah 12 Ton.

Beban hidup *fly over* kereta api didesain dengan beban maksimum bekerja pada as kendaraan (*axle load*). Beban pada as kendaraan diatur seperti Gambar 3.19 dimana di setiap as kendaraan mendistribusikan beban sebesar 12 ton dengan jarak antar rel adalah 1067 mm.



Gambar 3.19: Pemodelan beban hidup kereta pada *software*.

b. Kecepatan Rencana Kereta Api

Berdasarkan peraturan menteri No.60 tahun 2012, kecepatan rencana kereta api adalah sebagai berikut:

$$V_{rencana} = 1,25 V_{maks}$$

Dimana, V_{maks} untuk KA memiliki kecepatan maksimum 80 km/jam

$$V_{rencana} = 1,25 \times 80 = 100 \text{ Km/jam}$$

c. Beban Kejut (i)

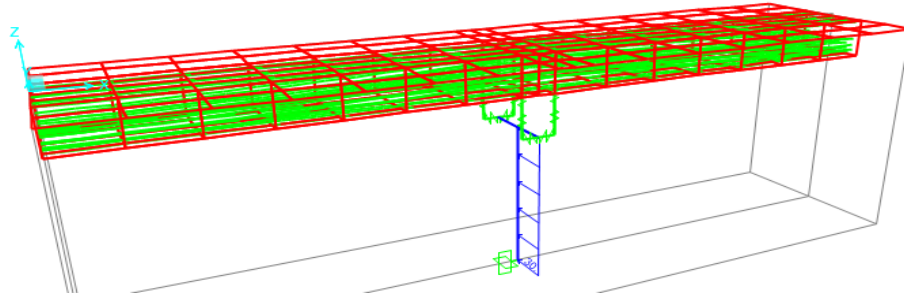
Untuk rel pada alas balas (i) pada bentang 40 m/span

$$\begin{aligned} i &= 0,1 + \frac{22,5}{50 + L} \\ &= 0,35 \end{aligned}$$

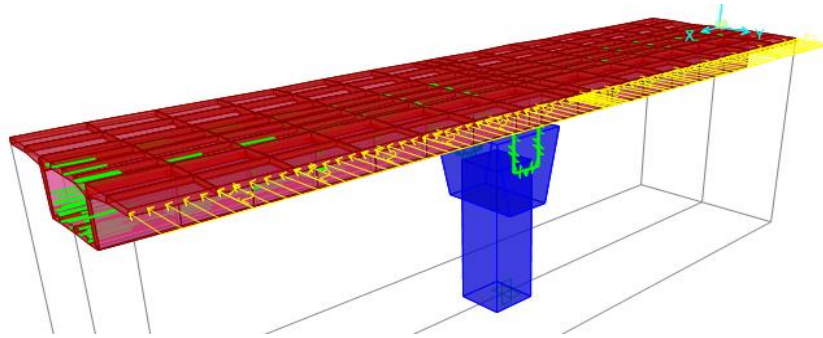
$$\text{Beban Kejut} = 0,35 \left(\frac{12 \text{ Ton} \times 12 \text{ Gandar}}{39,6} \right) = 1,27 \text{ Ton} = 12,481 \text{ kN/m}$$

3.3.6.8 Beban Angin Pada Struktur (EWs)

Menurut peraturan menteri Nomor 60 tahun 2012 beban angin bekerja pada struktur secara merata sebesar $3,0 \text{ kN/m}^2$ seperti terlihat pada Gambar 3.20 dan Gambar 3.21.



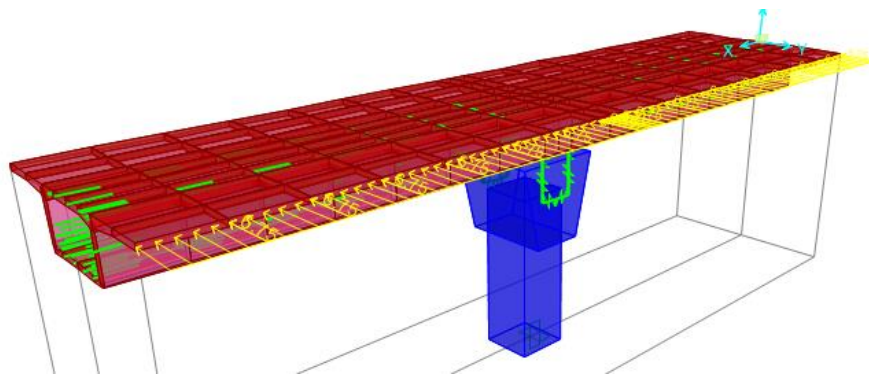
Gambar 3.20: *Input* beban angin pier pada *software*.



Gambar 3.21: *Input* beban angin struktur pada *software*.

3.3.6.9 Angin pada kendaraan (EW_L)

Menurut peraturan menteri Nomor 60 tahun 2012 beban angin bekerja pada struktur secara merata sebesar $1,5 \text{ kN/m}^2$ seperti terlihat pada Gambar 3.22



Gambar 3.22: *Input* beban angin kendaraan pada *software*.

3.3.6.10 Gaya akibat Temperatur Seragam (EUn)

Besaran rentang simpangan akibat beban temperatur (ΔT) harus berdasarkan temperatur maksimum dan minimum yang didefinisikan dalam desain sebagai berikut:

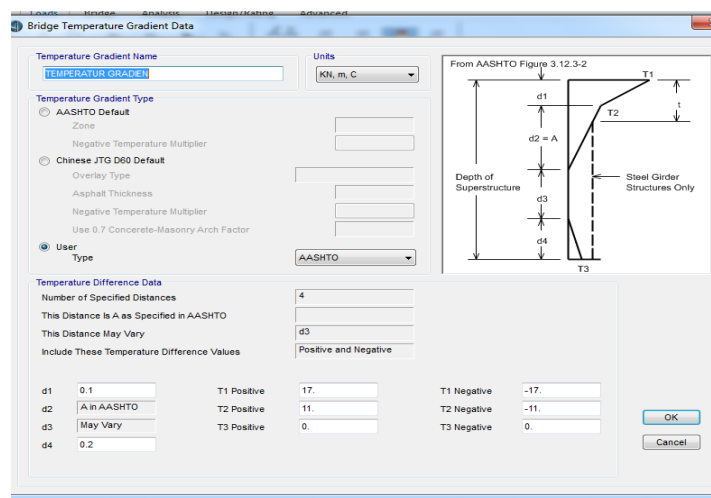
Temperatur maksimum : 40°C

Temperatur minimum : 15°C

$$\begin{aligned} \Delta_T &= \alpha L (T_{\max \text{ desain}} - T_{\min \text{ desain}}) \\ &= (0,0000011 \times 100.000 (40 - 15)) = 27,5^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

3.3.6.11 Temperatur Gradien (TG)

Berdasarkan Tabel 2.28 dengan lokasi jembatan berada > 500 m diatas permukaan laut maka *input* temperatur gradien dapat dilihat seperti pada Gambar 3.23 dibawah ini.



Gambar 3.23: *Input* temperatur gradien pada software.

3.3.6.12 Beban Friksi (BF)

Gesekan pada perletakan termasuk pengaruh kekakuan geser dari perletakan elastomer. Gaya akibat gesekan pada perletakan dihitung dengan menggunakan hanya beban tetap.

Ditentukan koefisien elastomer = 0,15

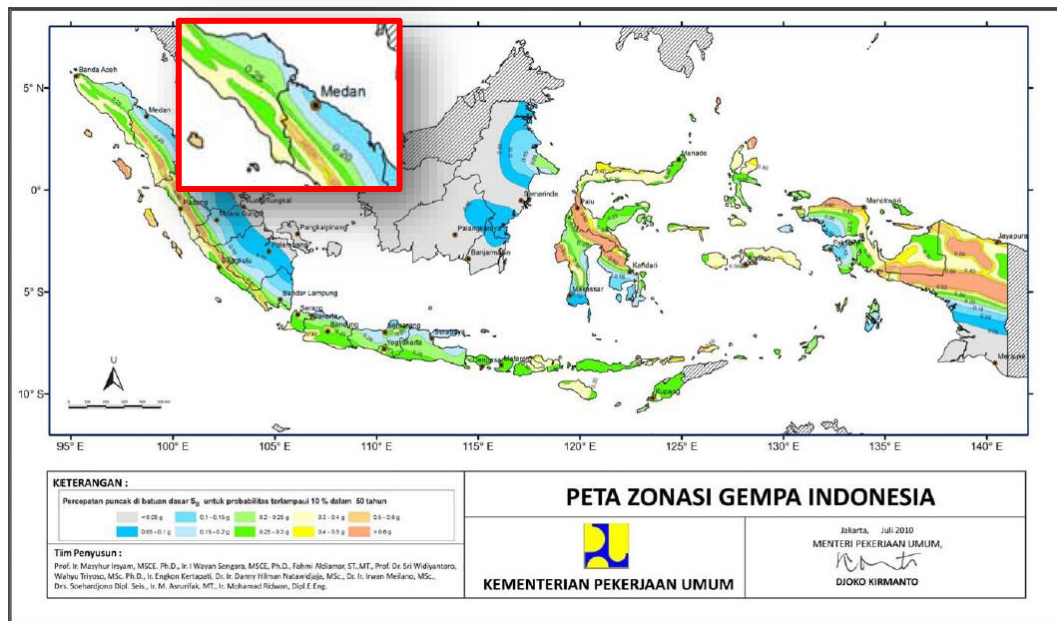
Beban friksi = $0,15 \times 208,4 = 31,26$

3.3.6.13 Beban Gempa

Metode yang digunakan dalam perhitungan beban gempa ini yaitu metode analisis respon spektrum. Beban gempa diperhitungkan berdasarkan RSNI 17-2013 dengan probabilitas 10% dalam 50 tahun atau periode ulang 1000 tahun. Berdasarkan peraturan SNI-2833-2013 perancangan gempa terhadap beban jembatan, perencanaan beban rencana akibat gempa minimum ditentukan beberapa hal:

- a. Lokasi desain : Medan
- b. Penentuan kelas situs : Diasumsikan struktur berada diatas tanah sedang
- c. Penentuan beban gempa
- Nilai PGA

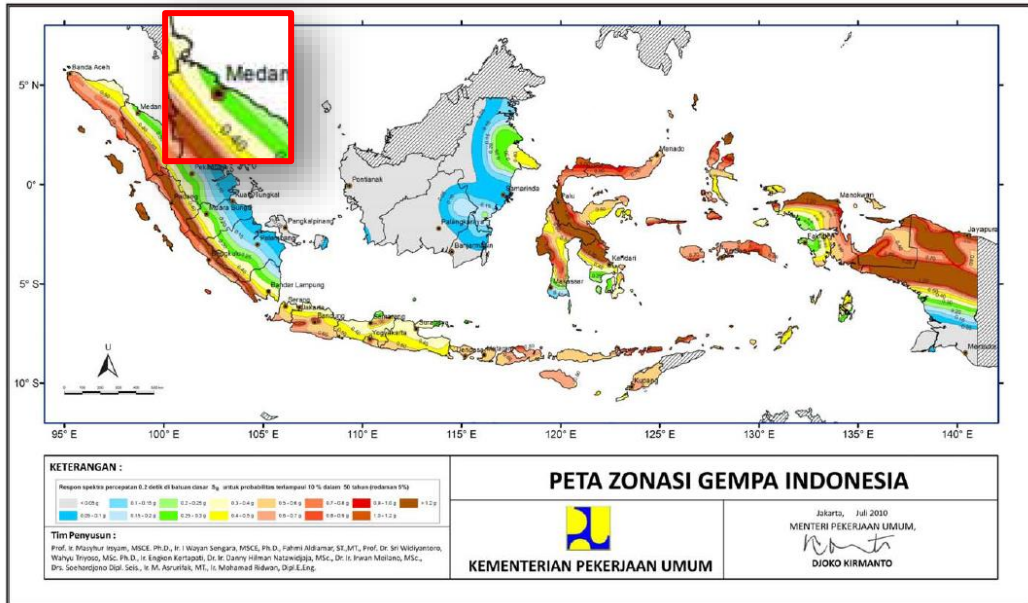
Berdasarkan Gambar 3.24 peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun maka nilai PGA adalah 0,13g.



Gambar 3.24: Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk kota medan.

- c. Nilai S_s (respon spektra 0.2 detik)

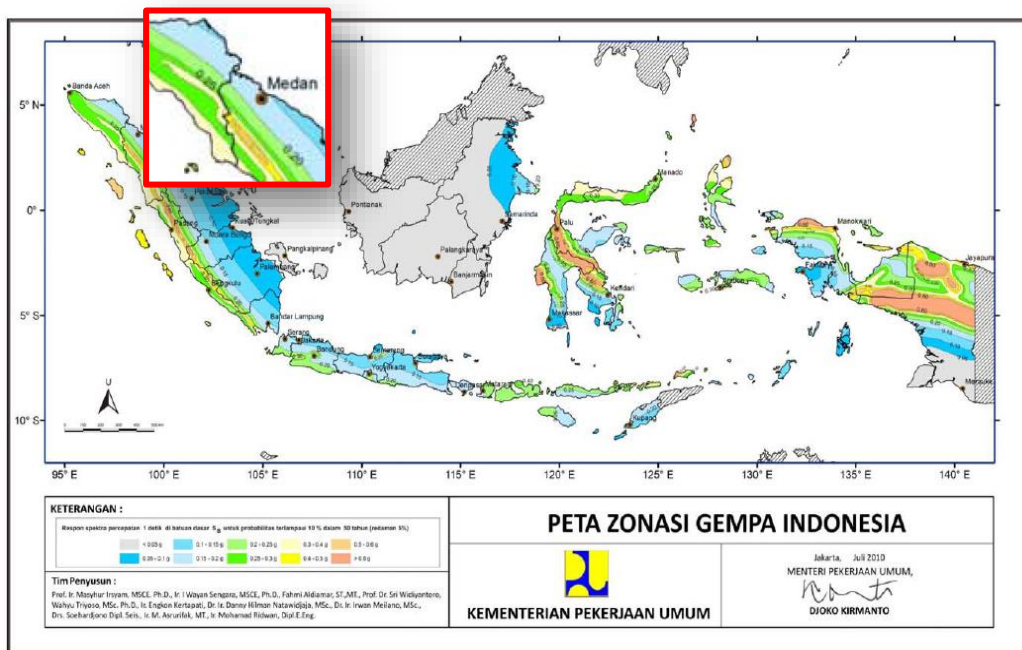
Berdasarkan Gambar 3.25 peta respon spectra percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun maka nilai S_s adalah 0,27g.



Gambar 3.25: Peta respon spektra percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk kota Medan.

d. Nilai S_1 (respons spektra 1 detik)

Berdasarkan Gambar 3.26 peta respon spectra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun ditentukan nilai S_1 adalah 0,17g.



Gambar 3.26: Peta respon spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk kota Medan.

e. Menentukan koefisien situs FPGA, Fa, dan Fv.

Berdasarkan nilai PGA, S1, dan Ss yang telah diperoleh dibaca pada Tabel 2.16 faktor amplifikasi periode 1 detik dan 0,2 detik (FPGA/FA) dan Tabel 2.17 nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (Fv) untuk situs tanah sedang (SD) diperoleh hasil sebagai berikut:

Nilai FPGA adalah 0,13

Nilai Fa adalah 1,54

Nilai Fv adalah 2,12

f. Menentukan Parameter Spektral As, SDS dan SD₁

$$\begin{aligned} A_s &= F_{PGA} \times PGA \\ &= 0,13 \times 1,54 = 0,2002 \end{aligned}$$

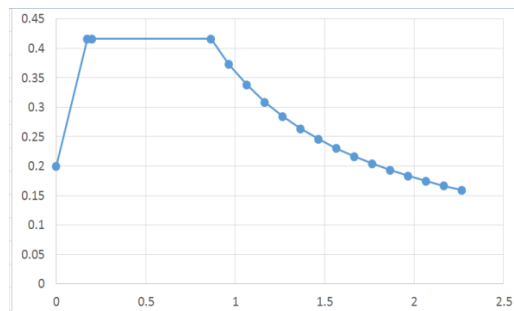
$$\begin{aligned} SDS &= F_a \times S_s \\ &= 1,54 \times 0,27 = 0,4158 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SDI &= F_v \times S_I \\ &= 2,12 \times 0,17 = 0,3604 \end{aligned}$$

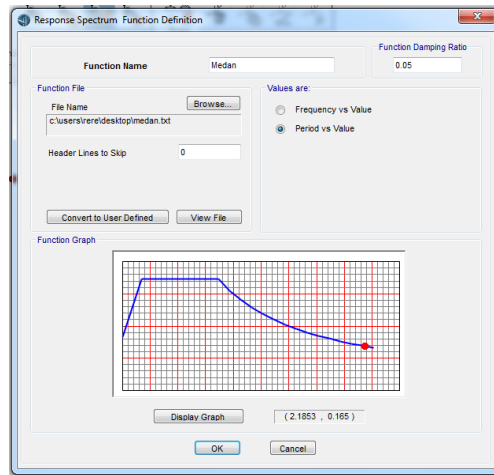
$$\begin{aligned} T_0 &= 0,2 \frac{SDI}{SDS} \\ &= 0,2 \frac{0,3604}{0,4158} = 0,126 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{SDI}{SDS} \\ &= \frac{0,3604}{0,4158} = 0,867 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan parameter spektra dapat digambarkan dalam sebuah grafik respon spektrum seperti dalam Gambar 3.27.



Gambar 3.27: Grafik respon spectrum.



Gambar 3.28: Pemodelan respon spectrum pada *software*.

3.3.7 Kombinasi Pembebanan

a. Kombinasi pembebanan

$$\text{Kuat I} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL} + \text{BF} + \text{TG}) + 0.5 \text{ SH} + 1.8 (\text{TT} + \text{TD} + \text{TB}) + 0.5 \text{ EUN}$$

$$\text{Kuat II} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL} + \text{BF}) + 0.5 \text{ SH} + 1.4 (\text{TT} + \text{TD} + \text{TB}) + 0.5 \text{ EUN} + 0.5 \text{ TG}$$

$$\text{Kuat III} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL} + \text{BF}) + 0.5 \text{ SH} + 1.4 \text{ EWS} + 0.5 \text{ EUN} + 0.5 \text{ TG}$$

$$\text{Kuat IV} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL} + \text{BF}) + 0.5 \text{ SH} + 0.5 \text{ EUN}$$

$$\text{Kuat V} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL} + \text{EWL} + \text{BF}) + 0.5 (\text{SH} + \text{EUN} + \text{TG}) + 0.4 \text{ EWS}$$

$$\text{Ekstrem I A} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL} + \text{BF}) + 0.5 \text{ SH} + 0.3 (\text{TT} + \text{TD} + \text{TB}) + 1 \text{ Eqx}$$

$$\text{Ekstrem I B} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL}) + 0.5 \text{ SH} + 1 \text{ BF} + 0.3 (\text{TT} + \text{TD} + \text{TB}) + 1 \text{ EqY}$$

$$\text{Ekstrem I C} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL} + \text{BF}) + 0.5 \text{ SH} + 0.3 (\text{TT} + \text{TD} + \text{TB}) + 1 \text{ Eqx} + 0.3 \text{ Eqy}$$

$$\text{Ekstrem I D} = 1.2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 (\text{PR} + \text{PL}) + 0.5 \text{ SH} + 1 \text{ BF} + 0.3 (\text{TT} + \text{TD} + \text{TB}) + 1 \text{ EqY} + 0.3 \text{ eqx}$$

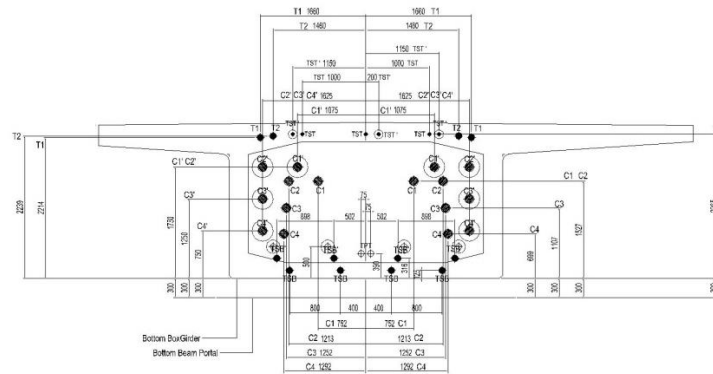
$$\text{Layan I} = 1 (\text{MS} + \text{MA} + \text{PR} + \text{PL} + \text{SH} + \text{BF}) + 1 (\text{TT} + \text{TD} + \text{TB}) + 0.3 \text{ EWS} + 1 \text{ EWL} + 1 \text{ EUN} + 0.5 \text{ TG}$$

$$\text{Layan III} = 1 (\text{MS} + \text{MA} + \text{PR} + \text{PL} + \text{SH}) + 0.8 (\text{TT} + \text{TD} + \text{TB}) + 1 \text{BF} + 1 \text{EUN} + 0.5 \text{TG}$$

$$\text{Layan IV} = 1 (\text{MS} + \text{MA} + \text{PR} + \text{PL} + \text{SH}) + 0.7 \text{EWS} + 1 \text{BF} + 1 \text{EUN}$$

3.3.8 Perencanaan Prategang *Box girder*

Dalam tugas akhir ini perletakan titik tendon dibuat sesuai data eksisting proyek *fly over* kereta api Medan seperti pada Gambar 3.29.



Gambar 3.29: Detail perletakan kabel tendon

Prategang direncanakan menggunakan tendon/kabel jenis *strand seven wire stress relieved* (7 kawat untaian) dengan mengacu pada OVM seperti terdapat pada Gambar 3.30.

Main Data										
Type	13mm (0.5")				15mm (0.6")			18mm	22mm	28mm
Designation	prEN 10138-3 (2006) Y1860S7	ASTM416-06 Grade 270	GB/T 5224-2003	prEN 10138-3 (2006) Y1860S7	ASTM416-06 Grade 270	GB/T 5224-2003	JIS G3536 -2008	JIS G3536 -2008	JIS G3536 -2008	
Nom. Dia. (mm)	12.5	12.9	12.7	12.7	15.3	15.7	15.2	17.8	21.8	28.6
Nom. Cross Section (mm ²)	93	100	98.7	98.7	140	150	140	208.4	312.9	532.4
Nom. Mass (Kg/m)	0.726	0.781	0.775	0.775	1.093	1.172	1.102	1.101	1.652	2.429
Nom. Yield Strength (MPa)	1634	1640	1675		1636	1640	1676			
Nom. Tensile Strength (MPa)	1860	1860	1860	1860	1860	1860	1860			
Min. Breaking Load (kN)	173	186	183.7	184	260	279	260.7	260	387	573
Young's Modulus (Gpa)	Approx. 195									
Relaxation after 1,000h at 20° C at 70% breaking load	Max. 2.5									

Gambar 3.30: Tabel jenis dan karakteristik tendon *box girder*.

3.3.8.1 Kondisi Awal Saat Transfer

Untuk *box girder* dengan mutu f_c' 41,5 MPa yang memiliki spesifikasi yang telah dijelaskan sebelumnya maka:

Kuat tekan beton (f_c')	= 41500 KPa
Kuat tekan beton keadaan awal (f_{ci}')	= 33200 KPa
Section properties (W_a)	= 4,64 m ³
W_b	= 2,70 m ³
Luasan (A)	= 5,29 m ²
Letak titik berat <i>box girder</i> (Y_b)	= 1,52 m
Jarak pusat tendon ke sisi bawah (z_o)	= 0,45 m
Eksentrisitas tendon ($E_s = y_b - z_o$)	= 1,07 m
Momen akibat berat sendiri (<i>output csi</i>)	= 6254,80 kN

Tegangan pada serat atas:

$$0.25 \times \sqrt{f_{ci}} = -pt/A + Pt \times E_s/W_a - M_{bs}/W_a \quad (3.1)$$

Tegangan pada serat bawah:

$$-0.6 \times f_{ci}' = -pt/A - Pt \times E_s/W_b - M_{bs}/W_b \quad (3.2)$$

Besarnya gaya prategang awal ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Tegangan serat atas} = Pt &= (0.25 \times \sqrt{f_{ci}} + M_{bs}/W_a) / (E_s/W_a - 1/A) \\ &= 33896,6286 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Serat Bawah} = Pt &= (0.6 \times f_{ci}' + M_{bs}/W_b) / (E_s/W_b + 1/A) \\ &= 38016,97016 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{Diambil gaya prategang awal} = 33896,6286 \text{ kN}$$

Berdasarkan tabel OVM dengan untuk jenis kabel 0.6" maka digunakan Jenis *strand uncoated 7 wire strands ASTM A-416 grade 270*.

Diameter	= 15,4 mm
Luas nominal (A_{ps})	= 140 mm ²
Minimum breaking load	= 260,7 kN
Modulus elastisitas (E_s)	= 200.000 MPa.

Untuk jumlah kawat untai 22 kawat untai tendon:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah } strands \text{ minimum yang diperlukan (ns)} &= pt / 0,8 \times pbs \\ &= 162,52 \text{ strands} \end{aligned}$$

Tabel 3.9: Pemakaian jumlah *strands* tendon.

n_{s1}	4	Tendon	22	<i>Strands</i> /tendon	88	<i>Strand</i> dg.	85	mm
----------	---	--------	----	------------------------	----	-------------------	----	----

				=		Selubung tendon		
n_{s2}	4	Tendon	22	<i>Strands/tendon</i> =	88	<i>Strand dg.</i> Selubung tendon	85	mm
n_{s3}	4	Tendon	22	<i>Strands/tendon</i> =	88	<i>Strand dg.</i> Selubung tendon	85	mm
n_{s4}	4	Tendon	22	<i>Strands/tendon</i> =	88	<i>Strand dg.</i> Selubung tendon	85	mm

$$\begin{aligned}
 N_t &= 16 \text{ tendon} \\
 N_s &= 352 \text{ strands} \\
 \text{Beban satu strands (Pbs)} &= P_t / n_s \\
 &= 96,2972 \text{ kN} \\
 \text{Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (po)} &= P_t / (n_s \times pbs) \\
 &= 36,9\% < 80\% \text{ (oke)} \\
 \text{Gaya prestress yang terjadi akibat jacking (pj)} &= P_o \times n_s \times pbs \\
 &= 12520,72 \text{ kN} \\
 \text{Untuk jumlah kawat untaian 12 kawat untaian tendon:} \\
 \text{Diameter nominal strands} &= 0,0154 \text{ m} \\
 \text{Luas tampang satu strands (Ast)} &= 0,00014 \text{ m}^2 \\
 \text{Beban putus minimal satu strands (Pbs)} &= 260,7 \text{ kN} \\
 \text{Jumlah strands minimum yang diperlukan (ns)} &= p_t / 0,8 \times pbs \\
 &= 168,67 \text{ strands}
 \end{aligned}$$

Tabel 3.10: Pemakaian jumlah strands.

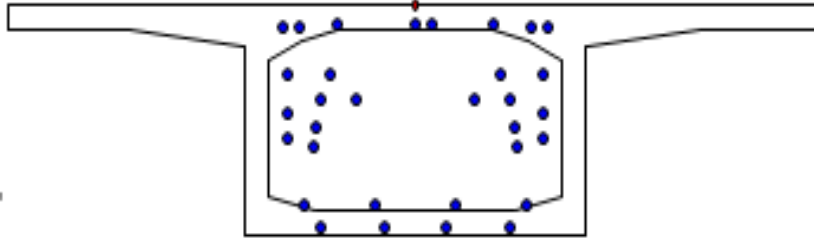
n_{s1}	8	Tendon	12	<i>Strands/</i> tendon =	96	<i>Strand dg.</i> Selubung tendon	85	mm
n_{s2}	8	Tendon	12	<i>Strands /</i> tendon=	96	<i>Strand dg.</i> Selubung tendon	85	mm

$$\begin{aligned}
 N_t &= 16 \text{ tendon} \\
 N_s &= 192 \text{ strands} \\
 \text{Beban satu strands (Pbs)} &= P_t / n_s \\
 &= 176,544 \text{ kN} \\
 \text{Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (po)} &= P_t / (n_s \times pbs) \\
 &= 67,7\% < 80\% \text{ (oke)}
 \end{aligned}$$

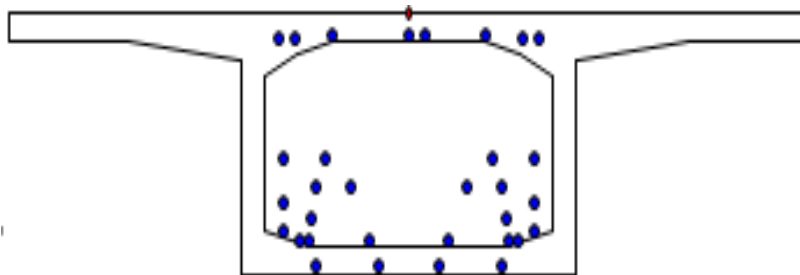
Gaya prestress yang terjadi akibat jacking (p_j)

$$= P_o \times n_s \times p_{bs}$$

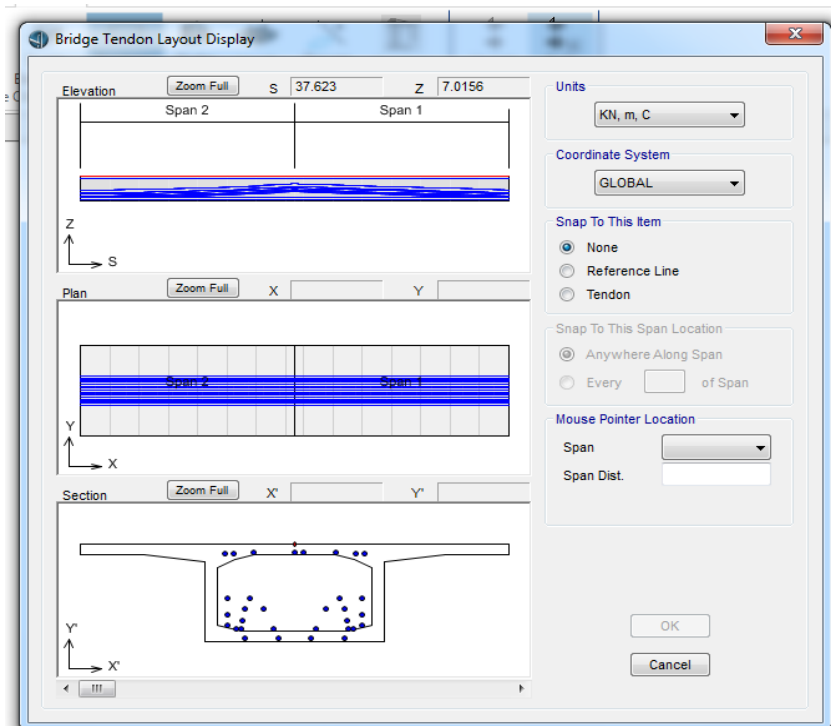
$$= 22954,65 \text{ kN}$$



Gambar 3.31: Posisi tendon pada tumpuan tengah.



Gambar 3.32: Posisi tendon pada tumpuan tepi.



BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Tinjauan Umum

Pada bab ini penulis akan membahas tentang hasil studi dan membandingkan hasil analisis dari program *csi bridge* berdasarkan data *existing* proyek *fly over* kereta api *double track* Medan dengan perencanaan bentuk *pier* yang berbeda.

4.2 Hasil Analisa

Dari hasil analisa jembatan beton prategang menggunakan profil *box girder* akan dilakukan pengecekan lendutan yang dibatasi dengan Peraturan Menteri No. 60 tahun 2012 terhadap kedua penampang girder dengan *pier* yang berbeda, pembatasan deformasi pada kondisi batas layan yang mengacu pada standar pembebanan SNI 1725-2016 akan didapatkan nilai perioda getar yang berbeda, dan dari hasil perhitungan dengan perbandingan penampang *pier* di dapat perbedaan yang cukup signifikan dari segi kestabilan struktur.

4.2.1 Kontrol Lendutan

Lendutan pada saat beban penuh adalah lendutan jangka panjang akibat kombinasi beban ijin baik beban prategang, beban mati maupun beban hidup. Lendutan tersebut tidak boleh melampaui lendutan yang di ijin, berdasarkan PM No. 60 Tahun 2012 pada Tabel 4.1 lendutan tidak boleh melampaui $L/1100$.

$$\Delta \text{ ijin} = \frac{1}{1100} L = \frac{1}{1100} 40000 \text{ mm} = 36,36 \text{ mm}$$

Tabel 4.1: Nilai lendutan maksimum akibat kombinasi pada model 1.

<i>Output Case</i> (Kombinasi)	Lendutan (U3) (mm)
Kombinasi daya layan 1	-28,6569
Kombinasi daya layan 3	-27,6758
Kombinasi daya layan 4	-23,7615

Dari hasil analisa dengan program *csi bridge* untuk model 1 didapat lendutan maksimum saat *service* yaitu sebesar -28,6569 mm.

Δ terjadi < Δ ijin

-28,66 mm < 36,36 mm (memenuhi syarat)

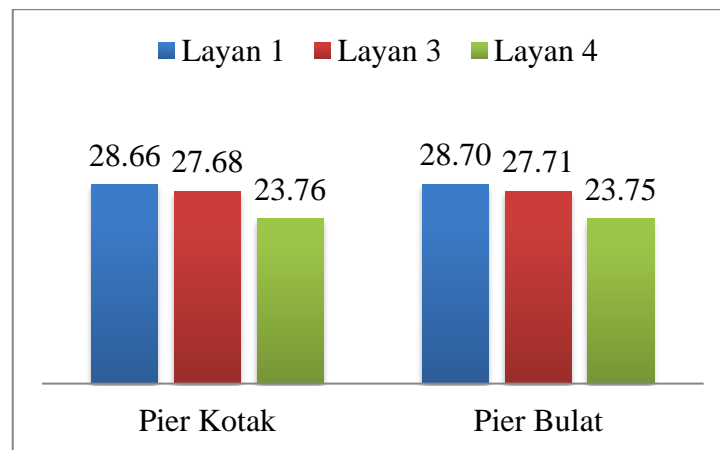
Tabel 4.2: Nilai lendutan maksimum akibat kombinasi pada model 2.

Output Case (Kombinasi)	Lendutan (U3) (mm)
Kombinasi daya layan 1	-28,7014
Kombinasi daya layan 3	-27,7144
Kombinasi daya layan 4	-23,7516

Dari hasil analisa dengan program *CSI Bridge* untuk model 2 didapat lendutan maksimum saat *service* yaitu sebesar -28,7014 mm.

Δ terjadi < Δ ijin

-28,70 mm < 36,36 mm (*memenuhi syarat*).



Gambar 4.1: Grafik perbandingan nilai lendutan.

Dari grafik diatas diketahui bahwa nilai lendutan pada model 2 lebih besar dibandingkan dengan model 1 hal ini terjadi karena semakin besar nilai inersia pada suatu bangunan (struktur) maka semakin besar nilai kekakuan dan kemampuan struktur untuk menahan gaya yang terjadi.

4.2.2 Hasil Analisis Perioda Getar

Hasil analisis perioda getar menggunakan *software* pada struktur jembatan beton prategang dengan menggunakan *pier* kotak dapat dilihat pada Tabel 4.3.

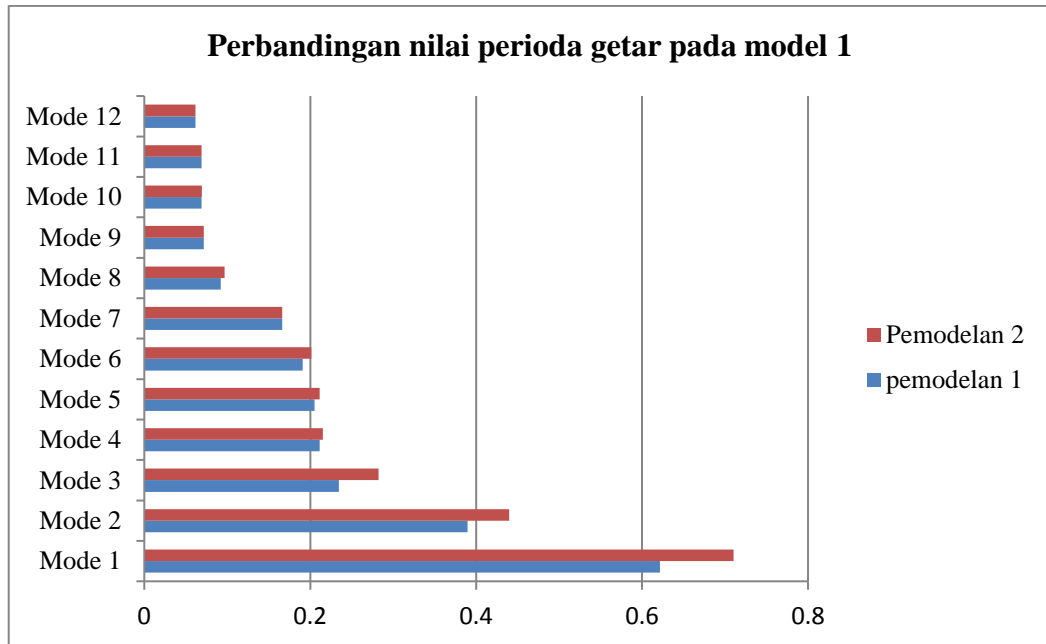
Tabel 4.3: Nilai perioda getar (T) pada model 1 *pier* kotak.

Case	Mode	Periode (T) Sec
Modal	Mode 1	0,62142
Modal	Mode 2	0,38976
Modal	Mode 3	0,23457
Modal	Mode 4	0,21151
Modal	Mode 5	0,20518
Modal	Mode 6	0,19085
Modal	Mode 7	0,16625
Modal	Mode 8	0,092
Modal	Mode 9	0,07173
Modal	Mode 10	0,06916
Modal	Mode 11	0,06886
Modal	Mode 12	0,06184

Hasil analisis perioda getar menggunakan aplikasi *software* pada struktur jembatan beton prategang dengan menggunakan *pier* bulat dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4: Nilai perioda getar (T) pada model 2 *pier* bulat.

Case	Mode	Periode (T) Sec
Modal	Mode 1	0,71021
Modal	Mode 2	0,43966
Modal	Mode 3	0,28241
Modal	Mode 4	0,21532
Modal	Mode 5	0,21154
Modal	Mode 6	0,20152
Modal	Mode 7	0,16633
Modal	Mode 8	0,09661
Modal	Mode 9	0,07186
Modal	Mode 10	0,06925
Modal	Mode 11	0,0689
Modal	Mode 12	0,06185



Gambar 4.2: Grafik perbandingan nilai perioda getar T pada model 1 dan 2.

Dari grafik diatas diperoleh perbedaan nilai perioda getar (T) antara model 1 dengan model 2 dimana nilai perioda getar pada perioda 1 lebih kecil dibandingkan dengan nilai perioda getar pada perioda 2, hal ini disebabkan karena semakin tinggi inersia penampang kolom (struktur) semakin tinggi pula kekakuan struktur tersebut yang pastinya mempengaruhi nilai perioda getar alami struktur itu pula.

4.2.3 Hasil Analisis Prategang Awal dan Jumlah Strand

Dari hasil perhitungan gaya prategang awal yang diperlukan pada *box girder* dengan mutu beton 41,5 MPa adalah sebesar 33896,6286 kN jumlah *strand* minimal 162,52 *strand*.

4.2.4 Hasil Analisis Tegangan Akibat Kombinasi Layan

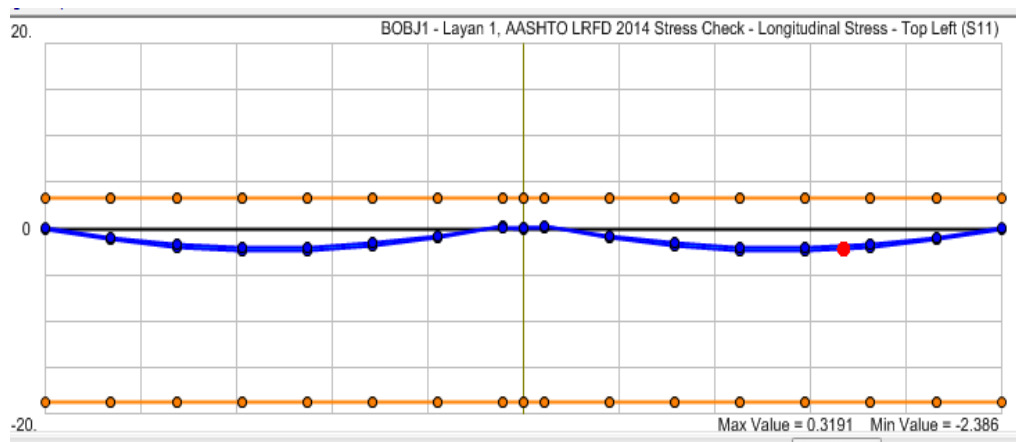
Analisis tegangan di lakukan pengecekan melalui kombinasi pada layan 1 dan layan 3 pada kedua model seperti terlihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5: Tegangan (σ) akibat kombinasi layan pada pemodelan girder.

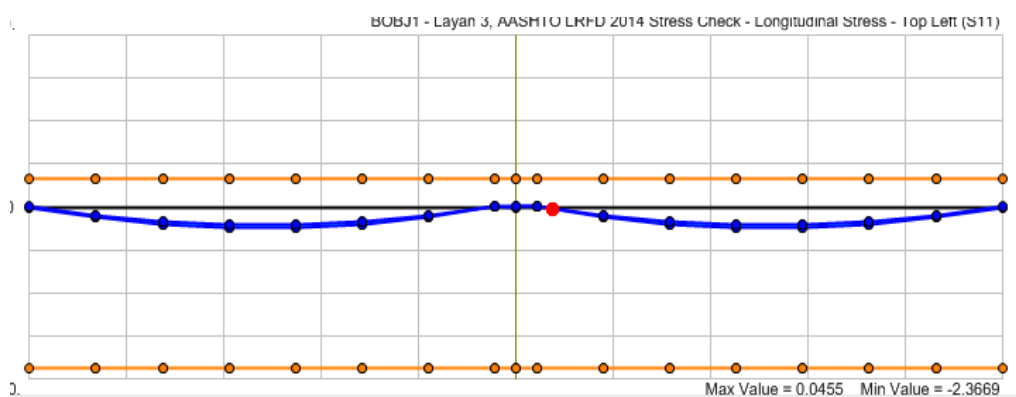
Output Case / Combo (Kombinasi)	Tegangan (σ) (MPa)	
	σ Tekan	σ Tarik
Kombinasi daya layan 1	2,386	0,3191
Kombinasi daya layan 3	2,3669	0,0455

Menurut RSNI T-12-2004 - perencanaan struktur beton untuk jembatan, pada pasal 4.4.1.2 dimana tegangan ijin tekan yang terjadi akibat kombinasi daya layan tidak boleh melampaui $0,45 \times f_c'$ dan tegangan ijin tarik yang terjadi akibat kombinasi daya layan tidak boleh melampaui $0,5 \times \sqrt{f_c'}$.

$$\begin{aligned} \text{Kontrol} = \quad \sigma \text{ tekan} &< 0,45 \times f_c' &= 2,386 < 18,675 & \quad (\text{OKE}) \\ \sigma \text{ tarik} &< 0,5 \times \sqrt{f_c'} &= 0,3191 < 3,221 & \quad (\text{OKE}) \end{aligned}$$



Gambar 4.3: Tegangan pada kombinasi Layan 1.



Gambar 4.4: Tegangan pada kombinasi Layan 3.

Berdasarkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 dapat disimpulkan bahwa tegangan longitudinal pada girder berada di dalam garis izin tegangan tekan (*compression limit*) dan tegangan tarik (*tension limit*) sesuai dengan *stress check* pada peraturan AASHTO LRFD 2014.

4.2.5 Hasil Analisis Nilai Gaya Geser Arah X (V2)

Dari hasil analisis *software* didapat nilai gaya geser arah Y (V3) pada pemodelan 1 dan 2 untuk kombinasi ekstrem I seperti pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6: Nilai gaya geser (V2) maksimum.

Gaya Geser	Kombinasi Ekstrem 1 (kN)
Model 1	3386,2097
Model 2	3366,094

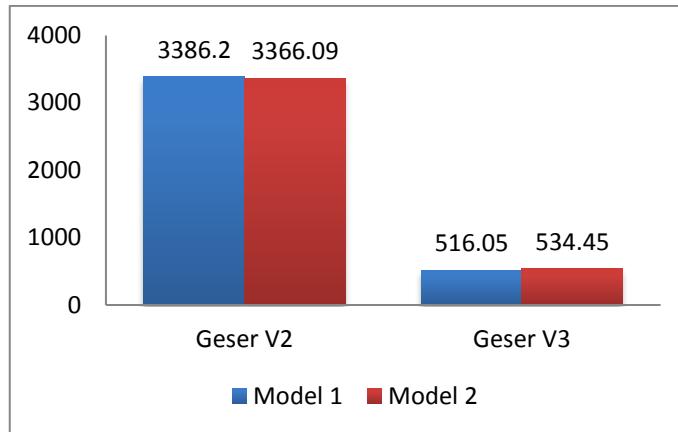
4.2.6 Hasil Analisis Nilai Gaya Geser Arah Y (V3)

Dari hasil analisis *software* didapat nilai gaya geser arah Y (V3) pada pemodelan 1 dan 2 untuk kombinasi ekstrem I seperti pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7: Nilai gaya geser (V3) maksimum.

Gaya Geser	Kombinasi Ekstrem 1 (kN)
Model 1	516,05
Model 2	534,45

Perbandingan nilai gaya geser arah X, dan arah Y pada kedua model dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5: Grafik Perbandingan V2 dan V3.

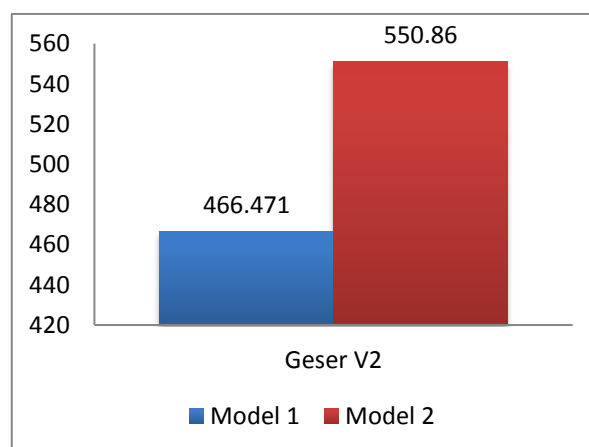
4.2.7 Hasil Analisis Nilai Gaya Aksial (P) Pada Model 1 Dan Model 2

Hasil analisis gaya aksial (P) pada model 1 dan model 2 dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8: Nilai gaya aksial (P) maksimum.

Mutu beton (f_c') (MPa)	Kombinasi Ekstrem I (kN)
Model 1	466,471
Model 2	550,86

Berdasarkan hasil analisis struktur ternyata penampang *pier* berbentuk persegi lebih kuat menahan gaya aksial dari pada kolom bulat, grafik perbandingan nilai gaya aksial yang diterima struktur seperti terlihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6: Grafik perbandingan gaya aksial.

4.2.8 Kehilangan Prategang pada Box Girder

Pengaruh gaya prategang dibagi menjadi dua yaitu sebelum dan sesudah kehilangan gaya prategang. Kehilangan gaya prategang (*loss of prestressed*) dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu:

1. Kehilangan gaya prategang langsung yaitu kehilangan gaya prategang yang terjadi segera setelah peralihan gaya prategang (waktu jangka pendek) yang meliputi:
 - a. Perpendekan elastis
 - b. Gesekan kabel
 - c. Slip pada ankur
2. Kehilangan prategang berdasarkan fungsi waktu yaitu kehilangan gaya prategang yang tergantung pada waktu (jangka waktu tertentu) yang meliputi:
 - a. Rangkak beton (*creep*)
 - b. Susut beton (*shrinkage*)
 - c. Relaksasi baja (*relaxation*)

1. Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang Langsung (Pemodelan I)

- a. Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis beton (ΔES)

Untuk sistem *pasca* tarik beton memendek saat tendon diangkurkan terhadap beton, karena gaya pada kabel dihitung setelah perpendekan elastis terhadap beton terjadi. Jika tendon yang dimiliki lebih dari satu, tendon-tendon tersebut ditarik secara berurutan, maka gaya prategang secara bertahap bekerja pada tendon dihitung menggunakan Persamaan 2.16.

$$ES = 0,5 \frac{E_s}{E_c} f_{cir}$$

Dimana:

$$E_s = 200.000 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \sqrt{f_c} \\ &= 4700 \sqrt{41,5} \\ &= 30277,63 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{cir} &= \text{tegangan awal/ luas penampang} \\ &= \frac{33.896.628,6}{5.290.200} \\ &= 6,407 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ES &= 0,5 \frac{200.000}{30.277,63} 6,407 \\
 &= 21,16 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

b. Kehilangan Tegangan Akibat Friksi/ Gesekan (F)

Pada saat dilakukan stressing (penarikan kabel prategang) dengan menggunakan dongkrak *jack hidrolis*. Kabel prategang mengalami kehilangan sebagian gaya prategang yang diakibatkan oleh gesekan kabel dan efek kelengkungan tendon, sehingga tegangan yang ada pada tendon atau kabel prategang menjadi lebih kecil dari pada bacaan pada alat *pressure gauge*.

Sehingga perlu dihitung besar kehilangan gaya prategangnya. Kehilangan akibat gesekan ini dapat dipertimbangkan pada dua bagian yaitu pengaruh panjang dan kelengkungan sehingga dapat dijelaskan:

$$\frac{F_2 - F_1}{F_1} = -KL - \mu\alpha$$

Dengan mengambil nilai pada Tabel 2.10 untuk *strand* dengan untaian 7 kawat, didapat data sebagai berikut:

$$K = 0,0041$$

$$L = 40 \text{ m}$$

$$\mu = 0,2$$

$$\alpha = 0$$

$$\frac{F_2 - F_1}{F_1} = -KL - \mu\alpha$$

$$\frac{F_2 - F_1}{F_1} = -0,0041 (40) - (0,2 \times 0)$$

$$= -0,082$$

$$\Delta fs_1 = \frac{F_2 - F_1}{F_1} \times F_{ci}$$

$$F_{ci} = \frac{F_0}{A_{ps}}$$

$$= \left(\frac{176,544}{140} \right) \times 1000$$

$$= 1201,035$$

$$\Delta fs_1 = -0,082 \times 1201,035$$

$$= 103,4049 \text{ MPa}$$

c. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Slip Pada Angkur (ANC)

Kehilangan gaya prategang ini terjadi pada saat transfer gaya pendongkrak ke angkur. Tarikan mesin pendongkrak akan mendorong baji masuk ke dalam konus dan setelah *jacking* dilepas, kabel akan menarik baji lebih rapat ke dalam konus. Panjang atau besar slip tergantung pada tipe baji dan tegangan pada kawat tendon. Harga rata-rata panjang slip akibat pengangkuran adalah 2,5 mm, dapat dihitung dengan Persamaan 2.19 sebagai berikut:

$$\text{ANC} = \Delta f_s = \frac{\Delta a E_s}{L}$$

Dimana:

$$\Delta a = 2,5 \text{ mm}$$

$$E_s = 200.000 \text{ MPa}$$

$$L = 40.000 \text{ mm}$$

$$\text{ANC} = \Delta f_s = \frac{2,5 \times 200.000}{40.000}$$

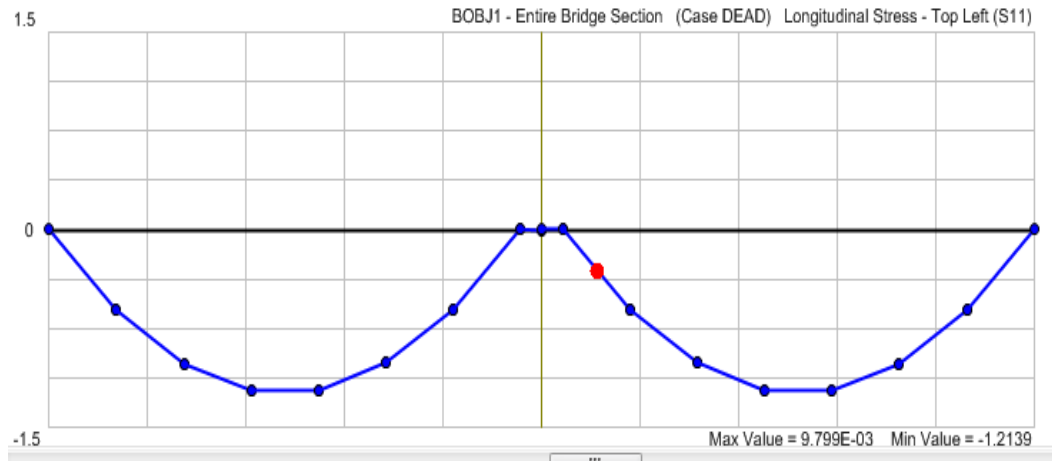
$$= 12,5 \text{ MPa}$$

2. Kehilangan Prategang Berdasarkan Fungsi Waktu

a. Kehilangan gaya prategang akibat rangkai beton (CR)

Prategang yang terus menerus pada beton suatu batang prategang dapat mengakibatkan rangkai pada beton yang secara efektif mengurangi tegangan pada baja bermutu tinggi. Kehilangan tegangan pada baja prategang akibat rangkai dapat ditentukan dengan dua cara, yaitu cara regangan rangkai batas dan cara koefisien rangkai. Dengan koefisien rangkai, besarnya kehilangan tegangan pada baja prategang akibat rangkai dapat ditentukan dengan mangacu pada Persamaan 2.21 seperti berikut:

$$\text{CR} = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} f_{cir} - f_{csd}$$



Gambar 4.7: Output nilai Fcsd pada software.

Dimana:

K_{cr} = 1,6 untuk komponen struktur *pasca* tarik

E_s = 200.000 MPa

E_c = 30277,63 MPa

f_{cir} = 6,407 MPa

f_{csd} = 1,2139 MPa (*Output csi bridge*)

$$CR = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} f_{cir} - f_{csd}$$

$$CR = 1,6 \frac{200.0000}{30277,63} (6,407 - 1,2139)$$

$$= 54,8897 \text{ MPa}$$

b. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Susut Beton (SH)

Susut pada beton merupakan suatu proses kimia dalam beton yang terjadi karena berkurangnya kadar air di dalam beton. Seperti halnya pada rangkai beton, besarnya susut beton ini dipengaruhi oleh beberapa faktor meliputi proposi campuran, tipe agregat, tipe semen, waktu perawatan, dan kondisi lingkungan. Besarnya kehilangan prategang akibat susut pada beton dapat dihitung dengan Persamaan 2.17 seperti berikut:

$$\Delta f_{pSH} = 8,2 \times 10^{-6} K_{SH} E_s \left(1 - 0,06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH)$$

Dimana:

K_{SH} = 0,77 (Tabel 2.9)

E_s = 200.000 MPa

$$\begin{aligned}
V &= 211,61 \text{ m}^3 \text{ (Volume } \textit{box girder}) \\
S &= 35,45 \text{ m}^2 \text{ (Keliling tampang basah } \textit{box girder}) \\
RH &= 70 \% \\
SH &= 8,2 \times 10^{-6} K_{SH} E_s \left(1 - 0,06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) \\
&= 8,2 \times 10^{-6} 0,77 \times 200.000 (1 - 0,06 \times 0,00597) (100 - 70) \\
&= 37,870 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

c. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Relaksasi Baja (RE)

Kehilangan gaya prategang ini disebabkan oleh karena tendon yang terus-menerus menahan tegangan, dengan durasi tegangan yang terjadi pada tendon akan mengurangi tegangan yang dapat dipikul oleh tendon itu sendiri. Tidak hanya tergantung pada durasi gaya prategang, besarnya relaksasi baja ini juga tergantung pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang. Besarnya relaksasi tendon baja ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.22 sebagai berikut:

$$RE = (K_{re} - J (SH + CR + ES)) \times C$$

Dimana:

$$K_{re} = 138 \text{ (Tabel 2.11)}$$

$$J = 0,15 \text{ (Tabel 2.11)}$$

$$f_{pi}/f_{pu} = \frac{1308,753}{1860} = 0,7$$

$$C = 1 \text{ (Tabel 2.12)}$$

$$\begin{aligned}
RE &= (138 - 0,15 (37,870 + 54,8897 + 21,16)) \times 1 \\
&= 120,911 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

3. Kehilangan Gaya Prategang Total

Berdasarkan T.Y Lin hal kehilangan prategang total pada beton *pretension* maks 20 %

$$\begin{aligned}
\text{Kehilangan total} &= ES + CR + SH + RE \\
&= 21,162 + 54,8897 + 37,875 + 120,911 \\
&= 234,838 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Kehilangan total} &= \frac{234,838}{1261,035} \times 100\% \\ &= 18,622 \% < 20\% \text{ (memenuhi syarat)} \end{aligned}$$

4.2.9 Analisis Kekuatan *Pier* Pemodelan 1

Untuk memperhitungkan sebuah analisis *pier*, ada beberapa pertimbangan yang harus di evaluasi dalam analisa *pier* diantaranya stabilitas struktur *pier*, dan pengaruh deformasi, terdapat 12 kombinasi yang dilakukan untuk analisa beban aksial dan momen pada *pier* seperti terlihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9: Beban ultimit pada pemodelan 1 pada *pier*.

No	Beban ultimit kolom	Pu	Mux	Δ
1	kombinasi 1	63,5471	163,0936	0,0399
2	kombinasi 2	49,4253	126,8506	0,038
3	kombinasi 3	2,63E-10	2,44E-09	0,0311
4	kombinasi 4	2,619E-10	1,872E-09	0,0311
5	kombinasi 5	2,655E-10	1237,6884	0,0311
6	kombinasi 6	27,28	585	0,0343
7	kombinasi 7	10,59	6115,4811	0,0326
8	kombinasi 8	466,471	1853,67	0,0351
9	kombinasi 9	147,531	6115,4811	0,0333
10	kombinasi 10	35,3039	90,6076	0,026
11	kombinasi 11	28,2423	72,486	0,025
12	kombinasi 12	3,77E-10	924,14	0,0211

- Tinggi kolom *pier* = 6 m
- Ukuran penampang, B = 2,5 m
- H = 2,5 m
- Luas (A= P x L) = 6,25 m²
- Beban ultimit pada kolom *pier* (Pu) = 147,531 kN
- Momen ultimit pada kolom *pier* (Mu) = 6115,4811 kNm

4.2.9.1 Pengaruh Berat Struktur

Dalam perhitungan pilar kombinasi yang dipakai pada jembatan ada 12 kombinasi dan untuk beban persen yang diizinkan untuk perhitungan Stabilitas *pier* adalah $> 20\%$.

- Berat sendiri struktur atas (PMS)	= 5396,004 kN
- Beban mati tambahan (PMA)	= 2942 kN
- Berat <i>pier head</i> (WH)	= 1420,075 kN
- Berat kolom <i>pier</i> (WC)	= 937,5 kN
- Berat total struktur atas (Wa = PMS+ PMA)	= 8338,004 kN
- Berat struktur bawah (Wb = WH + WC/2)	= 1888,825 kN
- Perbandingan berat (Wb/ Wa)	= 22,65 % > 20 % (Oke)

4.2.9.2 Analisis Deformasi Struktur

Dalam perhitungan pilar kombinasi yang dipakai pada jembatan ada 12 kombinasi dan untuk beban persen yang diizinkan untuk perhitungan deformasi adalah $M_d < 5\% M_u$.

- Beban ultimit pada kolom <i>pier</i> (Pu)	= 147,531 kN
- Momen ultimit pada kolom <i>pier</i> (Mu)	= 6115,4811 kNm
- Inersia penampang kolom (Ic)	= $\frac{1}{12} \times 2,5 \times (2,5^3)$ = 3,255 m ⁴
- Mutu beton (fc')	= 35 MPa
- Modulus elastisitas (Ec)	= $4700 \sqrt{35}$ = 27805,57Mpa
- Tinggi kolom <i>pier</i> (Lc)	= 6 m
- Lendutan (Δ)	= 0,0334
- Momen akibat P-delta (Md =Δ×Pu)	= $0,0334 \times 147,531$ = 4,9127 kNm
- 5 % Mu	= 5% (6115,4811) = 305,77 kN

$M_d < 5\% M_u$ (memenuhi syarat)

4.2.10 Analisis Kekuatan *Pier* Pemodelan 2

Untuk memperhitungkan sebuah analisis *pier*, ada beberapa pertimbangan yang harus di evaluasi dalam analisa *pier* diantaranya stabilitas struktur *pier*, dan pengaruh deformasi, terdapat 12 kombinasi yang dilakukan untuk analisa beban aksial dan momen pada *pier* seperti terlihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10: Beban ultimit pada pemodelan 2 pada *pier*.

No	Beban ultimit kolom	Pu	Mux	Δ
1	kombinasi 1	63,5471	163,0936	0,04
2	kombinasi 2	49,4253	126,8506	0,038
3	kombinasi 3	3,01E-10	1,545E-09	0,0311
4	kombinasi 4	2,829E-10	1,49E-09	0,0311
5	kombinasi 5	2,813E-10	1237,688	0,0311
6	kombinasi 6	27,18	550,85	0,0326
7	kombinasi 7	10,5915	6064,3056	0,0346
8	kombinasi 8	550,89	1838,91	0,0343
9	kombinasi 9	183,79	6025,17	0,0311
10	kombinasi 10	35,3039	90,676	0,0261
11	kombinasi 11	28,243	72,486	0,0251

- Tinggi kolom *pier* (H_p) = 6,5 m
- Diameter, D = 2,5 m
- Luas ($A=1/4 \pi D^2$) = 4,90625 m²
- Tinggi *pier head* (h_h) = 3,5 m
- Lebar atas (l_a) = 4,3 m
- Lebar bawah (l_b) = 2,5 m
- Luasan *pier head* ($A= (1/2 l_a + l_b) \times h_h$) = 11,9 m²
- Beban ultimit pada kolom *pier* (Pu) = 10,5915 kN
- Momen ultimit pada kolom *pier* (Mu) = 6064,3056 kNm

4.2.10.1 Pengaruh Berat Struktur

Dalam perhitungan pilar kombinasi yang dipakai pada jembatan ada 12 kombinasi dan untuk beban persen yang diizinkan untuk perhitungan stabilitas *pier* adalah > 20%.

- Berat sendiri struktur atas (PMS)	= 5396,004 kN
- Beban mati tambahan (PMA)	= 2942 kN
- Berat <i>Pier head</i> (WH)	= 1279,25 kN
- Berat kolom <i>pier</i> (WC)	= 797,26 kN
- Berat total struktur atas (Wa = PMS+ PMA)	= 8338,004 kN
- Berat struktur bawah (Wb = WH + WC/2)	= 2076,51 kN
- Perbandingan berat (Wb/ Wa)	= 24,91% > 20 % (<i>Oke</i>)

4.2.10.2 Analisis Deformasi Struktur

Dalam perhitungan pilar kombinasi yang dipakai pada jembatan ada 12 kombinasi dan untuk beban persen yang diizinkan untuk perhitungan pengaruh deformasi adalah $M_d < 5\% M_u$.

- Beban ultimit pada kolom <i>pier</i> (Pu)	= 10,5915 kN
- Momen ultimit pada kolom <i>pier</i> (Mu)	= 6064,3056 kNm
- Inersia penampang kolom (Ic)	= $\frac{1}{12} \times 2,5 \times (2,5^3)$ = 1,9165 m ⁴
- Mutu beton f_c' 35	= 35 MPa
- Modulus elastisitas (Ec)	= $4700 \sqrt{35}$ = 27805,57 MPa
- Tinggi kolom <i>pier</i> (Lc)	= 6,5 m
- Lendutan(Δ)	= 0,0346
- Momen akibat P-delta (Md = $\Delta \times P_u$)	= $0,0346 \times 10,5915$ = 0,366 kNm
- 5 % Mu	= 5% (6064,3056) = 301,2585 kN

$M_d < 5\% M_u$ (*memenuhi syarat*)

4.2.11 Diagram Interaksi

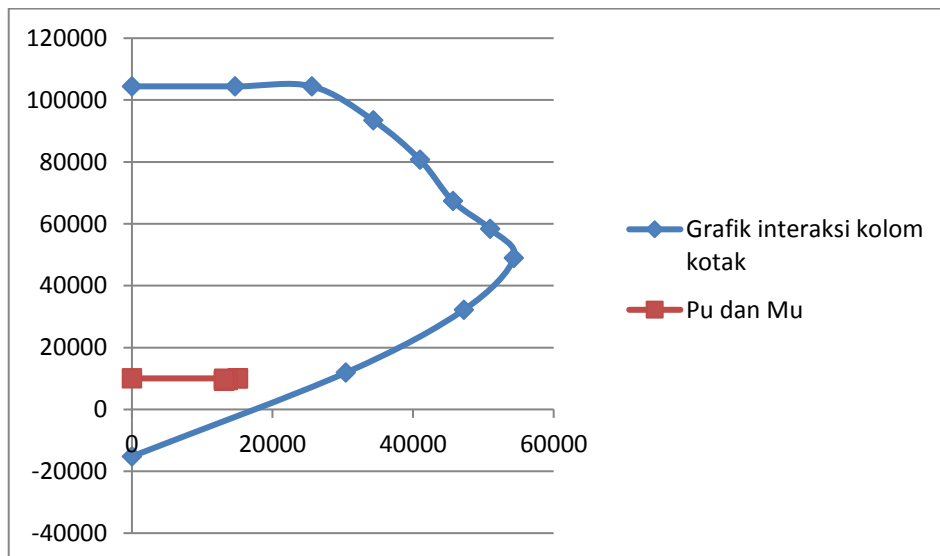
Desain maupun analisis pada kolom ditempuh dengan cara membuat suatu diagram interaksi antara momen pada ordinat dan gaya aksial pada aksis. Diagram interaksi menggambarkan interaksi antara momen dan aksial dalam berbagai variasi sehingga membentuk suatu grafik.

a. Diagram interaksi pada *pier* kotak

Kekuatan kolom yang dihitung menggunakan *csi bridge* diwakilkan setiap 15° , sehingga untuk 360° terdapat 24 kurva diagram interaksi untuk satu kolom, dikarenakan kolom memiliki bentuk simetris maka digunakan saja kurva dengan sudut 0° seperti terlihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11: *Output* gaya momen dan aksial *pier* kotak.

P	M3	M2
-104422	0	0
-104422	14646.82	0
-104422	25607.12	0
-93401.5	34350.2	0
-80700.8	40979.88	0
-67321	45669.92	0
-58350.8	50962.65	0
-48966.8	54339.89	0
-32160.5	47208.92	0
-11863.5	30425.58	0
15195.6	0	0



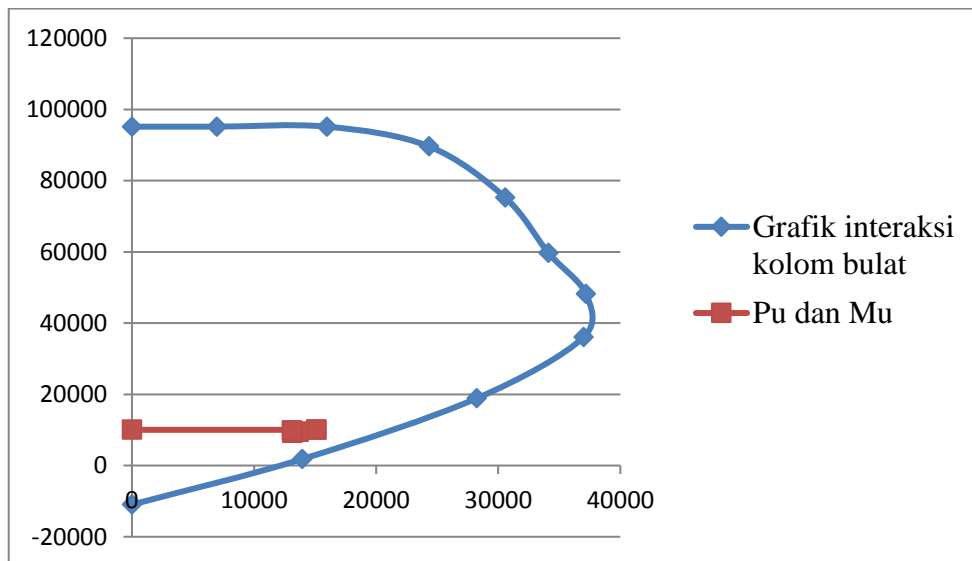
Gambar 4.8: Diagram interaksi *pier* kotak.

b. Diagram interaksi pada *pier* bulat

Kekuatan kolom yang dihitung menggunakan *Csi bridge* diwakilkan setiap 15° , *sehingga* untuk 360° terdapat 24 kurva diagram interaksi untuk satu kolom, dikarenakan kolom memiliki bentuk simetris maka digunakan saja kurva dengan sudut 0° seperti terlihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12: Output gaya momen dan aksial *pier* bulat.

P	M3	M2
-95155,08	0	0
-95155,08	6933,6968	0
-95155,08	15969,107	0
-89626,55	24320,236	0
-75286,14	30555,553	0
-59695,81	34115,27	0
-48169,38	37178,53	0
-36017,51	36982,56	0
-18869,912	28236,229	0
-1826,0754	13955,332	0
10973,83	0	0



Gambar 4.9: Diagram interaksi *pier* bulat.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan data yang diperoleh dari proyek pembangunan *fly over* kereta api *double track* di dapatkan hasil analisa terhadap kehilangan prategang sebagai berikut:

- % Kehilangan total $= \frac{234,838}{1261,035} \times 100\% = 18,622\% < 20\%$

2. Struktur suatu jembatan yang memiliki penampang *pier* yang berbeda memiliki perilaku struktur yang berbeda pula, baik dari segi nilai perioda getar alami, maupun ketahanan struktur tersebut untuk menahan deformasi, hal ini dapat dibuktikan dari hasil analisis yang didapat sebagai berikut:

- Nilai periode getar
 - Model 1 *pier* kotak : 0,62142 detik
 - Model 2 *pier* bulat : 0,71021 detik
- Nilai lendutan maksimum
 - Model 1 *pier* kotak : -28,6569 mm
 - Model 2 *pier* bulat : -28,7014 mm
- Perbandingan berat struktur
 - Model 1 *pier* kotak : 22,65 %
 - Model 2 *pier* bulat : 24,91%
- Nilai deformasi
 - Model 1 *pier* kotak : 0,0344 mm
 - Model 2 *pier* bulat : 0,0346 mm

5.2 Saran

Berikut ini adalah beberapa saran yang dapat penulis sampaikan setelah melakukan pengerjaan tugas akhir ini, yaitu:

1. Untuk melakukan desain struktur *discontinuous* dengan pemutusan setengah bentang pada girder dan penggunaan *spring constant* pada kedua ujungnya tidak dianjurkan.
2. Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat sebaiknya tanah yang ditinjau ada 3 jenis yaitu tanah keras, tanah sedang dan tanah lunak. Disini penulis hanya meninjau pada 1 jenis tanah yaitu tanah sedang.
3. Untuk melakukan evaluasi struktur pada suatu proyek yang sedang berjalan hendaknya harus memiliki data yang lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim (2004) Peraturan Menteri Perhubungan. *Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*, PM.60:2012.
- Anonim (2004) Rancangan Standar Nasional Indonesia. *Perancangan jembatan terhadap beban gempa*, SNI 2833:2004.
- Anonim (2016) Standar Nasional Indonesia. *Standar Pembebanan Untuk Jembatan*, SNI 1725:2016.
- Anonim (2004) Standar Nasional Indonesia. *Perencanaan struktur beton untuk jembatan*, SNI T-12:2004.
- Supriyadi,B dan Muntohar, A.S. (2007), *jembatan*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Borsak,Y,B, dkk. (2016), *Jembatan box girder segmental*, Semarang.
- Budiadi,A. (2008), *Desain Praktis Beton Prategang*, Andi,Yogyakarta.
- Hapsoro,S. (2009), *jalan rel*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Ir. Ilham,N, MT. (2008), *Perhitungan box girder prestress*. Yogyakarta.
- Iqbal, M. (2018), *Studi Perencanaan Fly Over Menggunakan Profil Box Girder dengan Perbandingan Kuat Tekan Beton Box Material*. Medan.
- Jatu,H,Wr. (2017), *Desain Struktur dan Metode Pelaksanaan Light Rail Transit LRT Jakarta dengan Prestress U-Shape Girder*. Surabaya.
- Kementrian Pekerjaan Umum. (2010), *Perencanaan Teknik Jembatan*. Jakarta.
- Lin,T.Y, dan Burns,N.H. (1993), *Desain Struktur Beton Prategang Jilid I Edisi Ketiga*. Jakarta:Erlangga.
- Meidiansyah,F,A. dkk.(2016). *Analisis Struktur Box Girder Jembatan Fly Over Rawa Buaya Sisi Barat Terhadap Gempa*, IPB, Bogor.
- Nawy, E.G. (2001), *Beton Prategang Suatu pendekatan Mendasar Jilid I Edisi Ketiga*. Jakarta:Erlangga.

LAMPIRAN

Tabel L1: Lendutan Layan 1 Pemodelan 1

Layout Line Distance	Item Type	Sect Vert	Sect Tran	Sect Long	Sect RLong
mm		mm	mm	mm	Degrees
0	Max	-23.48737	4.376406	-3.418544	1.74E-04
0	Min	-28.62063	2.293599	-4.590503	1.74E-04
2735.71	Max	-21.40101	3.984929	-3.325514	1.75E-04
2735.71	Min	-26.13312	2.125715	-4.500121	1.75E-04
5471.43	Max	-19.15578	3.718009	-3.328044	1.73E-04
5471.43	Min	-23.45661	1.832773	-4.519651	1.73E-04
8207.14	Max	-16.45221	3.506562	-3.365945	1.65E-04
8207.14	Min	-20.20406	1.486052	-4.583396	1.65E-04
10942.86	Max	-13.19551	3.304276	-3.415947	1.51E-04
10942.86	Min	-16.27654	1.134712	-4.656424	1.51E-04
13678.57	Max	-9.387987	3.108876	-3.452277	1.34E-04
13678.57	Min	-11.69126	0.783471	-4.717623	1.34E-04
16414.29	Max	-5.127988	2.92035	-3.44931	1.25E-04
16414.29	Min	-6.511954	0.433169	-4.735553	1.25E-04
19150	Max	-0.604711	2.787071	-3.357576	1.56E-04
19150	Min	-1.178884	0.033484	-4.648708	1.56E-04
20000	Max	0.847112	2.779067	-3.317236	1.71E-04
20000	Min	0.272199	-0.122292	-4.609206	1.71E-04
20000	Max	1.023968	2.752112	5.210148	1.71E-04
20000	Min	0.472455	-0.095338	3.91895	1.71E-04
20850	Max	-0.642287	2.764235	5.209639	1.56E-04
20850	Min	-1.213465	0.05632	3.919074	1.56E-04
23585.71	Max	-5.734017	2.90559	5.170722	1.25E-04
23585.71	Min	-7.096582	0.44793	3.886157	1.25E-04

Tabel L1: *lanjutan*

26321.43	Max	-10.3806	3.092454	5.028796	1.34E-04
26321.43	Min	-12.65294	0.799893	3.765878	1.34E-04
29057.14	Max	-14.38691	3.285823	4.843908	1.51E-04
29057.14	Min	-17.42697	1.153166	3.606417	1.51E-04
31792.86	Max	-17.65348	3.486023	4.647079	1.65E-04
31792.86	Min	-21.3566	1.506591	3.433475	1.65E-04
34528.57	Max	-20.17907	3.695341	4.459802	1.73E-04
34528.57	Min	-24.42396	1.85544	3.272345	1.73E-04
37264.29	Max	-22.05771	3.960104	4.316591	1.75E-04
37264.29	Min	-26.72884	2.15054	3.146257	1.75E-04
40000	Max	-23.58903	4.347685	4.28065	1.74E-04
40000	Min	-28.65687	2.322319	3.112987	1.74E-04

Tabel L2: Lendutan Layan 3 Pemodelan 1

Layout Line Distance	Item Type	Sect Vert	Sect Tran	Sect Long	Sect RLong
mm		mm	mm	mm	Degrees
0	Max	-23.532331	0.833123	-3.469271	5.00E-16
0	Min	-27.638939	-0.833123	-4.406838	2.89E-16
2735.71	Max	-21.446335	0.743685	-3.376368	4.71E-16
2735.71	Min	-25.232029	-0.743685	-4.316054	2.46E-16
5471.43	Max	-19.200816	0.754094	-3.379098	4.50E-16
5471.43	Min	-22.641478	-0.754094	-4.332384	2.28E-16
8207.14	Max	-16.495653	0.808204	-3.417247	3.84E-16
8207.14	Min	-19.497133	-0.808204	-4.391207	1.77E-16
10942.86	Max	-13.236095	0.867826	-3.467481	2.86E-16
10942.86	Min	-15.70092	-0.867826	-4.459863	1.02E-16
13678.57	Max	-9.424238	0.930162	-3.504102	1.90E-16
13678.57	Min	-11.266858	-0.930162	-4.516379	3.72E-17
16414.29	Max	-5.158891	0.994872	-3.501419	1.33E-16
16414.29	Min	-6.266063	-0.994872	-4.530413	-2.17E-17
19150	Max	-0.648806	1.101435	-3.410059	1.16E-16
19150	Min	-1.108144	-1.101435	-4.442964	-3.70E-17
20000	Max	0.779267	1.160544	-3.369814	6.74E-17
20000	Min	0.319336	-1.160544	-4.40339	-1.71E-17
20000	Max	0.955517	1.13898	5.005992	5.24E-16
20000	Min	0.514307	-1.13898	3.973034	4.16E-16
20850	Max	-0.686536	1.083166	5.005544	7.26E-16
20850	Min	-1.143479	-1.083166	3.973092	5.25E-16
23585.71	Max	-5.76348	0.983064	4.967445	1.39E-15
23585.71	Min	-6.853532	-0.983064	3.939793	1.13E-15

Tabel L2: *lanjutan*

26321.43	Max	-10.412616	0.917024	4.829532	1.78E-15
26321.43	Min	-12.230489	-0.917024	3.819197	1.53E-15
29057.14	Max	-14.42076	0.853063	4.649421	1.99E-15
29057.14	Min	-16.852807	-0.853063	3.659428	1.75E-15
31792.86	Max	-17.688237	0.791773	4.457087	2.04E-15
31792.86	Min	-20.650732	-0.791773	3.486204	1.82E-15
34528.57	Max	-20.213802	0.73596	4.274787	1.95E-15
34528.57	Min	-23.609715	-0.73596	3.324821	1.76E-15
37264.29	Max	-22.091548	0.723826	4.134802	1.81E-15
37264.29	Min	-25.828451	-0.723826	3.198535	1.66E-15
40000	Max	-23.621478	0.810146	4.099269	1.66E-15
40000	Min	-27.675757	-0.810146	3.165139	1.49E-15

Tabel L3: Lendutan Layan 4 Pemodelan 1

Layout Line Distance	Sect Vert	Sect Tran	Sect Long	Sect RLong
mm	mm	mm	mm	Degrees
0	-23.7516	1.88647	-3.37629	9.86E-05
2735.71	-22.22229	1.72826	-3.4093	9.92E-05
5471.43	-20.34492	1.56992	-3.53534	9.79E-05
8207.14	-17.81785	1.41205	-3.69665	9.33E-05
10942.86	-14.54673	1.25547	-3.86992	8.53E-05
13678.57	-10.5329	1.10087	-4.02984	7.60E-05
16414.29	-5.876762	0.94847	-4.15064	7.10E-05
19150	-0.863718	0.79773	-4.18451	8.81E-05
20000	0.679516	0.75141	-4.18447	9.70E-05
20000	0.679516	0.75141	4.18447	9.70E-05
20850	-0.863718	0.79773	4.18451	8.81E-05
23585.71	-5.876762	0.94847	4.15064	7.10E-05
26321.43	-10.5329	1.10087	4.02984	7.60E-05
29057.14	-14.54673	1.25547	3.86992	8.53E-05
31792.86	-17.81785	1.41205	3.69665	9.33E-05
34528.57	-20.34492	1.56992	3.53534	9.79E-05
37264.29	-22.22229	1.72826	3.4093	9.92E-05
40000	-23.7516	1.88647	3.37629	9.86E-05

Tabel L4: Lendutan Layan 1 Pemodelan 2

Layout Line Distance	Item Type	Sect Vert	Sect Tran	Sect Long	Sect RLong
mm		mm	mm	mm	Degrees
0	Max	-23.439062	5.487166	-3.257851	2.44E-04
0	Min	-28.663545	2.669438	-4.733858	2.44E-04
2735.71	Max	-21.356713	5.190313	-3.164829	2.49E-04
2735.71	Min	-26.188769	2.396146	-4.643493	2.49E-04
5471.43	Max	-19.116382	4.940768	-3.167388	2.50E-04
5471.43	Min	-23.525687	2.075957	-4.663069	2.50E-04
8207.14	Max	-16.41611	4.712141	-3.205309	2.44E-04
8207.14	Min	-20.286641	1.737104	-4.726841	2.44E-04
10942.86	Max	-13.163673	4.484132	-3.25533	2.32E-04
10942.86	Min	-16.371117	1.402423	-4.799875	2.32E-04
13678.57	Max	-9.361538	4.262911	-3.291694	2.17E-04
13678.57	Min	-11.798425	1.067844	-4.860934	2.17E-04
16414.29	Max	-5.095184	4.048164	-3.288776	2.11E-04
16414.29	Min	-6.633243	0.734199	-4.878566	2.11E-04
19150	Max	-0.551476	3.871927	-3.197189	2.44E-04
19150	Min	-1.349658	0.367246	-4.790816	2.44E-04
20000	Max	0.882512	3.863915	-3.156903	2.61E-04
20000	Min	0.107814	0.208057	-4.750855	2.61E-04
20000	Max	1.06074	3.843081	5.342271	2.61E-04
20000	Min	0.302478	0.228891	3.752421	2.61E-04
20850	Max	-0.587427	3.855161	5.341758	2.44E-04
20850	Min	-1.384175	0.384011	3.752545	2.44E-04
23585.71	Max	-5.698918	4.033414	5.302849	2.11E-04
23585.71	Min	-7.219036	0.748948	3.719629	2.11E-04

Tabel L4: *lanjutan*

26321.43	Max	-10.351635	4.246384	5.160947	2.17E-04
26321.43	Min	-12.759197	1.084371	3.59937	2.17E-04
29057.14	Max	-14.353021	4.46558	4.976073	2.32E-04
29057.14	Min	-17.520557	1.420974	3.439923	2.32E-04
31792.86	Max	-17.614456	4.691508	4.779239	2.44E-04
31792.86	Min	-21.438253	1.757737	3.266977	2.44E-04
34528.57	Max	-20.134852	4.918005	4.591937	2.50E-04
34528.57	Min	-24.493813	2.098721	3.105829	2.50E-04
37264.29	Max	-22.009001	5.165387	4.44868	2.49E-04
37264.29	Min	-26.785834	2.421072	2.979699	2.49E-04
40000	Max	-23.537207	5.460045	4.412726	2.44E-04
40000	Min	-28.701369	2.696559	2.946411	2.44E-04

Tabel L5: Lendutan Layan 3 Pemodelan 2

Layout Line Distance	Item Type	Sect Vert	Sect Tran	Sect Long	Sect RLong
mm		mm	mm	mm	Degrees
0	Max	-23.493687	1.127091	-3.339319	-2.69E-16
0	Min	-27.673274	-1.127091	-4.520125	-6.24E-16
2735.71	Max	-21.41251	1.117667	-3.246422	-3.13E-16
2735.71	Min	-25.278154	-1.117667	-4.429353	-7.20E-16
5471.43	Max	-19.172518	1.145925	-3.249176	-3.63E-16
5471.43	Min	-22.699962	-1.145925	-4.445721	-7.80E-16
8207.14	Max	-16.471604	1.190015	-3.28734	-4.47E-16
8207.14	Min	-19.568028	-1.190015	-4.504566	-8.60E-16
10942.86	Max	-13.217063	1.232684	-3.33759	-5.75E-16
10942.86	Min	-15.783019	-1.232684	-4.573225	-9.62E-16
13678.57	Max	-9.411127	1.278027	-3.374239	-6.70E-16
13678.57	Min	-11.360638	-1.278027	-4.62963	-1.06E-15
16414.29	Max	-5.142307	1.325586	-3.371594	-7.12E-16
16414.29	Min	-6.372754	-1.325586	-4.643426	-1.17E-15
19150	Max	-0.617487	1.401873	-3.280352	-8.75E-16
19150	Min	-1.256032	-1.401873	-4.555253	-1.16E-15
20000	Max	0.795818	1.462343	-3.24015	-9.01E-16
20000	Min	0.176059	-1.462343	-4.515312	-1.19E-15
20000	Max	0.973165	1.445676	5.110292	-1.95E-16
20000	Min	0.366556	-1.445676	3.838412	-9.90E-16
20850	Max	-0.653917	1.38846	5.109841	-9.93E-17
20850	Min	-1.291315	-1.38846	3.838471	-7.26E-16
23585.71	Max	-5.74506	1.313787	5.071749	3.95E-16
23585.71	Min	-6.961154	-1.313787	3.805173	7.72E-17

Tabel L5: *lanjutan*

26321.43	Max	-10.397498	1.264805	4.933855	7.76E-16
26321.43	Min	-12.323547	-1.264805	3.684594	6.11E-16
29057.14	Max	-14.400088	1.217842	4.753755	1.02E-15
29057.14	Min	-16.934117	-1.217842	3.524835	7.83E-16
31792.86	Max	-17.661851	1.173509	4.561417	1.09E-15
31792.86	Min	-20.720888	-1.173509	3.351608	8.63E-16
34528.57	Max	-20.181649	1.127714	4.379097	1.05E-15
34528.57	Min	-23.668818	-1.127714	3.190211	8.13E-16
37264.29	Max	-22.054192	1.097726	4.239076	9.58E-16
37264.29	Min	-25.875659	-1.097726	3.063891	7.32E-16
40000	Max	-23.580023	1.105394	4.203532	9.22E-16
40000	Min	-27.711353	-1.105394	3.030481	6.47E-16

Tabel L6: Lendutan Layan 4 Pemodelan 2

Layout Line Distance	Sect Vert	Sect Tran	Sect Long	Sect RLong
mm	mm	mm	mm	Degrees
0	-23.751596	2.306918	-3.369301	1.38E-04
2735.71	-22.230342	2.145665	-3.402312	1.41E-04
5471.43	-20.361022	1.984528	-3.528349	1.41E-04
8207.14	-17.841993	1.824029	-3.689665	1.38E-04
10942.86	-14.578927	1.664884	-3.862932	1.31E-04
13678.57	-10.573149	1.507688	-4.022853	1.23E-04
16414.29	-5.925058	1.352587	-4.143654	1.19E-04
19150	-0.920064	1.198958	-4.177525	1.38E-04
20000	0.620669	1.151669	-4.177477	1.47E-04
20000	0.620669	1.151669	4.177477	1.47E-04
20850	-0.920064	1.198958	4.177525	1.38E-04
23585.71	-5.925058	1.352587	4.143654	1.19E-04
26321.43	-10.573149	1.507688	4.022853	1.23E-04
29057.14	-14.578927	1.664884	3.862932	1.31E-04
31792.86	-17.841993	1.824029	3.689665	1.38E-04
34528.57	-20.361022	1.984528	3.528349	1.41E-04
37264.29	-22.230342	2.145665	3.402312	1.41E-04
40000	-23.751596	2.306918	3.369301	1.38E-04

Tabel L7: Tegangan Layan 1

TABLE: Bridge Super Design - Design Result Status		
DesReqName	BridgeObj	Station
Text	Text	mm
Layan 1	BOBJ1	0
Layan 1	BOBJ1	2735.71
Layan 1	BOBJ1	2735.71
Layan 1	BOBJ1	5471.43
Layan 1	BOBJ1	5471.43
Layan 1	BOBJ1	8207.14
Layan 1	BOBJ1	8207.14
Layan 1	BOBJ1	10942.86
Layan 1	BOBJ1	10942.86
Layan 1	BOBJ1	13678.57
Layan 1	BOBJ1	13678.57
Layan 1	BOBJ1	16414.29
Layan 1	BOBJ1	16414.29
Layan 1	BOBJ1	19150
Layan 1	BOBJ1	19150
Layan 1	BOBJ1	20000
Layan 1	BOBJ1	20000
Layan 1	BOBJ1	20850
Layan 1	BOBJ1	20850
Layan 1	BOBJ1	23585.71
Layan 1	BOBJ1	23585.71
Layan 1	BOBJ1	26321.43
Layan 1	BOBJ1	26321.43
Layan 1	BOBJ1	29057.14
Layan 1	BOBJ1	29057.14
Layan 1	BOBJ1	31792.86
Layan 1	BOBJ1	31792.86
Layan 1	BOBJ1	34528.57
Layan 1	BOBJ1	34528.57
Layan 1	BOBJ1	37264.29
Layan 1	BOBJ1	37264.29
Layan 1	BOBJ1	40000

Tabel L8: Tegangan Layan 3

TABLE: Bridge Super Design - Design Result Status		
DesReqName	BridgeObj	Station
Text	Text	mm
Layan 3	BOBJ1	0
Layan 3	BOBJ1	2735.71
Layan 3	BOBJ1	2735.71
Layan 3	BOBJ1	5471.43
Layan 3	BOBJ1	5471.43
Layan 3	BOBJ1	8207.14
Layan 3	BOBJ1	8207.14
Layan 3	BOBJ1	10942.86
Layan 3	BOBJ1	10942.86
Layan 3	BOBJ1	13678.57
Layan 3	BOBJ1	13678.57
Layan 3	BOBJ1	16414.29
Layan 3	BOBJ1	16414.29
Layan 3	BOBJ1	19150
Layan 3	BOBJ1	19150
Layan 3	BOBJ1	20000
Layan 3	BOBJ1	20000
Layan 3	BOBJ1	20850
Layan 3	BOBJ1	20850
Layan 3	BOBJ1	23585.71
Layan 3	BOBJ1	23585.71
Layan 3	BOBJ1	26321.43
Layan 3	BOBJ1	26321.43
Layan 3	BOBJ1	29057.14
Layan 3	BOBJ1	29057.14
Layan 3	BOBJ1	31792.86
Layan 3	BOBJ1	31792.86
Layan 3	BOBJ1	34528.57
Layan 3	BOBJ1	34528.57
Layan 3	BOBJ1	37264.29
Layan 3	BOBJ1	37264.29
Layan 3	BOBJ1	40000

Tabel L9: Ekstrim 1 D Model 1

Layout Line Distance	Item Type	P	V2	V3	T	M2	M3
m		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
0.00	Max	5.11	-3123.72	19.70	240.50	9.67	1.41
0.00	Min	-5.11	-3386.34	-19.70	-240.50	-9.67	-1.41
2.74	Max	20.27	-2357.47	94.10	251.33	189.10	8122.59
2.74	Min	-20.27	-2572.86	-94.10	-251.33	-189.10	7504.94
2.74	Max	26.97	-2203.08	129.10	248.06	198.73	8122.27
2.74	Min	-26.97	-2396.01	-129.10	-248.06	-198.73	7505.26
5.47	Max	40.36	-1432.44	194.77	257.26	660.45	13486.30
5.47	Min	-40.36	-1585.95	-194.77	-257.26	-660.45	12507.15
5.47	Max	47.79	-1275.59	225.45	280.59	671.76	13484.91
5.47	Min	-47.79	-1412.97	-225.45	-280.59	-671.76	12508.54
8.21	Max	63.95	-496.55	282.55	365.31	1391.73	16167.79
8.21	Min	-63.95	-612.96	-282.55	-365.31	-1391.73	15000.62
8.21	Max	70.63	-332.03	309.01	382.19	1400.94	16167.37
8.21	Min	-70.63	-444.99	-309.01	-382.19	-1400.94	15001.04
10.94	Max	83.98	460.33	357.82	415.10	2329.65	16158.64
10.94	Min	-83.98	343.70	-357.82	-415.10	-2329.65	14970.23
10.94	Max	90.66	629.35	380.22	430.39	2338.60	16158.16
10.94	Min	-90.66	506.93	-380.22	-430.39	-2338.60	14970.70
13.68	Max	104.91	1428.12	421.17	472.15	3451.54	13470.47
13.68	Min	-104.91	1287.76	-421.17	-472.15	-3451.54	12404.34
13.68	Max	112.77	1597.39	439.78	505.73	3463.29	13469.11
13.68	Min	-112.77	1447.81	-439.78	-505.73	-3463.29	12405.70
16.41	Max	127.46	2397.24	473.48	557.08	4727.01	8146.31
16.41	Min	-127.46	2227.92	-473.48	-557.08	-4727.01	7283.50
16.41	Max	134.10	2568.17	488.68	565.85	4735.31	8145.84

Tabel L9: lanjutan

16.41	Min	-134.10	2389.22	-488.68	-565.85	-4735.31	7283.97
19.15	Max	147.36	3367.40	516.05	579.72	6115.48	143.74
19.15	Min	-147.36	3170.05	-516.05	-579.72	-6115.48	-420.55
19.15	Max	4.85	-216.53	7.25	50.23	11.27	-122.11
19.15	Min	-4.85	-251.71	-7.25	-50.23	-11.27	-154.71
20.00	Max	4.85	-73.96	7.25	50.23	8.71	1.54
20.00	Min	-4.85	-109.14	-7.25	-50.23	-8.71	-1.54
20.00	Max	3.08	74.79	7.25	6.15	4.18	0.28
20.00	Min	-3.08	73.96	-7.25	-6.15	-4.18	-0.28
20.85	Max	3.08	217.36	7.25	6.15	6.74	-123.37
20.85	Min	-3.08	216.53	-7.25	-6.15	-6.74	-124.25
20.85	Max	147.36	-3170.17	516.05	579.07	6115.48	141.27
20.85	Min	-147.36	-3367.27	-516.05	-579.07	-6115.48	-388.89
23.59	Max	134.10	-2389.35	488.68	565.79	4735.31	8144.98
23.59	Min	-134.10	-2568.05	-488.68	-565.79	-4735.31	7309.85
23.59	Max	127.46	-2228.04	473.48	557.02	4727.01	8145.46
23.59	Min	-127.46	-2397.11	-473.48	-557.02	-4727.01	7309.38
26.32	Max	112.77	-1447.94	439.78	505.27	3463.29	13467.61
26.32	Min	-112.77	-1596.31	-439.78	-505.27	-3463.29	12428.06
26.32	Max	104.91	-1287.89	421.17	471.39	3451.54	13468.71
26.32	Min	-104.91	-1426.53	-421.17	-471.39	-3451.54	12426.96
29.06	Max	90.66	-507.05	380.22	430.33	2338.60	16158.01
29.06	Min	-90.66	-629.22	-380.22	-430.33	-2338.60	14987.54
29.06	Max	83.98	-343.83	357.82	415.04	2329.65	16158.48
29.06	Min	-83.98	-460.20	-357.82	-415.04	-2329.65	14987.07
31.79	Max	70.63	444.86	309.01	381.99	1400.94	16167.26
31.79	Min	-70.63	333.31	-309.01	-381.99	-1400.94	15013.66
31.79	Max	63.95	612.83	282.55	365.14	1391.73	16167.68

Tabel L9: *lanjutan*

31.79	Min	-63.95	497.58	-282.55	-365.14	-1391.73	15013.24
34.53	Max	47.79	1412.84	225.45	279.93	671.76	13484.17
34.53	Min	-47.79	1275.72	-225.45	-279.93	-671.76	12517.62
34.53	Max	40.36	1585.83	194.77	256.35	660.45	13485.35
34.53	Min	-40.36	1432.57	-194.77	-256.35	-660.45	12516.44
37.26	Max	26.97	2395.88	129.10	247.98	198.73	8122.27
37.26	Min	-26.97	2203.41	-129.10	-247.98	-198.73	7509.43
37.26	Max	20.27	2572.74	94.10	251.12	189.10	8122.59
37.26	Min	-20.27	2358.80	-94.10	-251.12	-189.10	7509.11
40.00	Max	5.11	3386.21	19.70	239.85	9.67	1.41
40.00	Min	-5.11	3125.37	-19.70	-239.85	-9.67	-1.41

Tabel L10: Ekstrim 1 D Model 2

Layout Line Distance	Item Type	P	V2	V3	T	M2	M3
m		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
0.00	Max	5.73	-3143.83	18.49	350.12	8.52	1.41
0.00	Min	-5.73	-3366.22	-18.49	-350.12	-8.52	-1.41
2.74	Max	23.34	-2370.07	89.11	354.17	174.88	8077.97
2.74	Min	-23.34	-2560.26	-89.11	-354.17	-174.88	7549.57
2.74	Max	31.26	-2212.19	122.76	343.32	182.23	8077.67
2.74	Min	-31.26	-2386.89	-122.76	-343.32	-182.23	7549.86
5.47	Max	47.11	-1435.29	186.74	329.65	619.87	13426.01
5.47	Min	-47.11	-1583.11	-186.74	-329.65	-619.87	12567.44
5.47	Max	55.77	-1275.84	217.08	339.91	628.97	13424.66
5.47	Min	-55.77	-1412.72	-217.08	-339.91	-628.97	12568.79
8.21	Max	74.39	-493.86	274.52	399.41	1322.31	16116.08
8.21	Min	-74.39	-615.66	-274.52	-399.41	-1322.31	15052.33
8.21	Max	82.30	-329.88	301.62	405.56	1329.34	16115.73
8.21	Min	-82.30	-447.13	-301.62	-405.56	-1329.34	15052.68
10.94	Max	98.13	456.85	352.69	420.70	2237.16	16133.33
10.94	Min	-98.13	347.18	-352.69	-420.70	-2237.16	14995.54
10.94	Max	106.03	622.31	376.67	428.81	2244.01	16132.94
10.94	Min	-106.03	513.97	-376.67	-428.81	-2244.01	14995.93
13.68	Max	122.76	1415.23	421.63	458.38	3349.66	13480.11
13.68	Min	-122.76	1300.66	-421.63	-458.38	-3349.66	12394.70
13.68	Max	131.86	1582.42	442.65	486.83	3359.39	13478.84
13.68	Min	-131.86	1462.78	-442.65	-486.83	-3359.39	12395.98
16.41	Max	149.04	2379.60	481.93	530.35	4636.74	8185.53
16.41	Min	-149.04	2245.55	-481.93	-530.35	-4636.74	7244.28
16.41	Max	156.92	2549.82	500.25	536.03	4643.10	8185.09

Tabel L10: *lanjutan*

16.41	Min	-156.92	2407.58	-500.25	-536.03	-4643.10	7244.72
19.15	Max	172.67	3348.64	534.45	544.83	6064.31	188.88
19.15	Min	-172.67	3188.80	-534.45	-544.83	-6064.31	-465.70
19.15	Max	5.43	-216.51	8.09	51.30	10.63	-122.30
19.15	Min	-5.43	-251.72	-8.09	-51.30	-10.63	-154.52
20.00	Max	5.43	-73.94	8.09	51.30	7.74	1.49
20.00	Min	-5.43	-109.16	-8.09	-51.30	-7.74	-1.49
20.00	Max	3.67	74.81	8.09	7.22	3.21	0.23
20.00	Min	-3.67	73.94	-8.09	-7.22	-3.21	-0.23
20.85	Max	3.67	217.37	8.09	7.22	6.10	-123.55
20.85	Min	-3.67	216.51	-8.09	-7.22	-6.10	-124.06
20.85	Max	172.67	-3188.93	534.45	544.18	6064.31	186.42
20.85	Min	-172.67	-3348.51	-534.45	-544.18	-6064.31	-434.03
23.59	Max	156.92	-2407.71	500.25	535.96	4643.10	8184.23
23.59	Min	-156.92	-2549.69	-500.25	-535.96	-4643.10	7270.60
23.59	Max	149.04	-2245.68	481.93	530.29	4636.74	8184.67
23.59	Min	-149.04	-2379.47	-481.93	-530.29	-4636.74	7270.17
26.32	Max	131.86	-1462.91	442.65	486.40	3359.39	13477.34
26.32	Min	-131.86	-1581.35	-442.65	-486.40	-3359.39	12418.33
26.32	Max	122.76	-1300.78	421.63	457.66	3349.66	13478.35
26.32	Min	-122.76	-1413.64	-421.63	-457.66	-3349.66	12417.32
29.06	Max	106.03	-514.09	376.67	428.75	2244.01	16132.79
29.06	Min	-106.03	-622.18	-376.67	-428.75	-2244.01	15012.77
29.06	Max	98.13	-347.31	352.69	420.64	2237.16	16133.17
29.06	Min	-98.13	-456.72	-352.69	-420.64	-2237.16	15012.38
31.79	Max	82.30	447.00	301.62	405.42	1329.34	16115.62
31.79	Min	-82.30	331.16	-301.62	-405.42	-1329.34	15065.30
31.79	Max	74.39	615.53	274.52	399.28	1322.31	16115.98

Tabel L10: *lanjutan*

31.79	Min	-74.39	494.88	-274.52	-399.28	-1322.31	15064.95
34.53	Max	55.77	1412.59	217.08	339.25	628.97	13423.92
34.53	Min	-55.77	1275.97	-217.08	-339.25	-628.97	12577.87
34.53	Max	47.11	1582.98	186.74	328.74	619.87	13425.06
34.53	Min	-47.11	1435.42	-186.74	-328.74	-619.87	12576.73
37.26	Max	31.26	2386.76	122.76	343.25	182.23	8077.67
37.26	Min	-31.26	2212.53	-122.76	-343.25	-182.23	7554.04
37.26	Max	23.34	2560.13	89.11	354.03	174.88	8077.97
37.26	Min	-23.34	2371.41	-89.11	-354.03	-174.88	7553.74
40.00	Max	5.73	3366.09	18.49	350.00	8.52	1.41
40.00	Min	-5.73	3145.49	-18.49	-350.00	-8.52	-1.41

Tabel L11: Ekstrim 1 C Model 1

Layout Line Distance	Item Type	P	V2	V3	T	M2	M3
m		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
0.00	Max	12.93	-2964.06	5.91	125.62	6.07	1.78
0.00	Min	-12.93	-3545.99	-5.91	-125.62	-6.07	-1.78
2.74	Max	59.34	-2234.76	28.23	150.41	63.07	8506.54
2.74	Min	-59.34	-2695.57	-28.23	-150.41	-63.07	7120.99
2.74	Max	81.66	-2097.78	38.73	148.50	65.96	8505.48
2.74	Min	-81.66	-2501.30	-38.73	-148.50	-65.96	7122.06
5.47	Max	126.28	-1359.12	58.43	149.37	204.48	14108.96
5.47	Min	-126.28	-1659.27	-58.43	-149.37	-204.48	11884.49
5.47	Max	149.32	-1216.28	67.64	164.32	209.21	14106.72
5.47	Min	-149.32	-1472.28	-67.64	-164.32	-209.21	11886.73
8.21	Max	196.69	-458.04	84.77	227.80	430.21	16902.51
8.21	Min	-196.69	-651.48	-84.77	-227.80	-430.21	14265.91
8.21	Max	218.96	-297.84	92.70	233.12	432.97	16901.11
8.21	Min	-218.96	-479.18	-92.70	-233.12	-432.97	14267.31
10.94	Max	263.47	500.15	107.35	243.20	711.58	16903.45
10.94	Min	-263.47	303.88	-107.35	-243.20	-711.58	14225.42
10.94	Max	285.71	675.93	114.07	247.79	714.27	16901.88
10.94	Min	-285.71	460.35	-114.07	-247.79	-714.27	14226.99
13.68	Max	331.06	1489.19	126.35	270.51	1049.81	14157.42
13.68	Min	-331.06	1226.69	-126.35	-270.51	-1049.81	11717.39
13.68	Max	354.45	1665.00	131.93	295.96	1055.51	14154.90
13.68	Min	-354.45	1380.20	-131.93	-295.96	-1055.51	11719.92
16.41	Max	400.16	2475.24	142.04	334.07	1437.13	8754.79
16.41	Min	-400.16	2149.92	-142.04	-334.07	-1437.13	6675.02
16.41	Max	422.28	2649.77	146.60	337.69	1439.62	8753.22

Tabel L11: *lanjutan*

16.41	Min	-498.35	2368.81	-150.07	-329.32	-1411.96	6545.75
19.15	Max	550.86	3390.17	160.34	333.67	1838.32	862.42
19.15	Min	-550.86	3147.28	-160.34	-333.67	-1838.32	-1139.24
19.15	Max	13.99	-215.50	2.43	46.25	6.36	-121.70
19.15	Min	-13.99	-252.73	-2.43	-46.25	-6.36	-155.11
20.00	Max	13.99	-72.93	2.43	46.25	5.49	2.03
20.00	Min	-13.99	-110.17	-2.43	-46.25	-5.49	-2.03
20.00	Max	12.22	75.82	2.43	2.17	0.96	0.77
20.00	Min	-12.22	72.93	-2.43	-2.17	-0.96	-0.77
20.85	Max	12.22	218.38	2.43	2.17	1.83	-122.96
20.85	Min	-12.22	215.50	-2.43	-2.17	-1.83	-124.66
20.85	Max	550.86	-3147.40	160.34	333.01	1838.32	859.96
20.85	Min	-550.86	-3390.04	-160.34	-333.01	-1838.32	-1107.58
23.59	Max	498.35	-2368.94	150.07	329.26	1411.96	8883.20
23.59	Min	-498.35	-2588.46	-150.07	-329.26	-1411.96	6571.64
23.59	Max	472.08	-2208.84	144.58	326.59	1410.05	8884.65
23.59	Min	-472.08	-2416.31	-144.58	-326.59	-1410.05	6570.19
26.32	Max	418.09	-1430.21	132.80	290.69	1024.34	14185.80
26.32	Min	-418.09	-1614.04	-132.80	-290.69	-1024.34	11709.87
26.32	Max	390.56	-1269.79	126.49	266.85	1019.25	14187.79
26.32	Min	-390.56	-1444.63	-126.49	-266.85	-1019.25	11707.88
29.06	Max	336.96	-483.94	113.00	248.91	685.89	16817.64
29.06	Min	-336.96	-652.33	-113.00	-248.91	-685.89	14327.91
29.06	Max	310.61	-315.60	105.81	246.49	683.83	16818.94
29.06	Min	-310.61	-488.43	-105.81	-246.49	-683.83	14326.61
31.79	Max	257.87	486.20	90.49	241.66	411.49	16728.87
31.79	Min	-257.87	291.97	-90.49	-241.66	-411.49	14452.06
31.79	Max	231.49	660.34	82.36	239.58	409.38	16730.05

Tabel L11: *lanjutan*

31.79	Min	-231.49	450.07	-82.36	-239.58	-409.38	14450.88
34.53	Max	175.92	1471.30	65.12	183.61	196.37	13905.15
34.53	Min	-175.92	1217.26	-65.12	-183.61	-196.37	12096.64
34.53	Max	148.78	1649.64	56.02	172.51	192.31	13907.04
34.53	Min	-148.78	1368.75	-56.02	-172.51	-192.31	12094.75
37.26	Max	95.97	2470.79	36.83	179.73	61.01	8356.80
37.26	Min	-95.97	2128.50	-36.83	-179.73	-61.01	7274.90
37.26	Max	69.56	2653.42	26.73	183.81	58.81	8357.79
37.26	Min	-69.56	2278.12	-26.73	-183.81	-58.81	7273.92
40.00	Max	14.97	3478.81	5.55	160.98	5.73	1.76
40.00	Min	-14.97	3032.77	-5.55	-160.98	-5.73	-1.76

Tabel L12: Ekstrim 1 C Model 2

Layout Line Distance	Item Type	P	V2	V3	T	M2	M3
m		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
0.00	Max	14.97	-3031.11	5.55	161.11	5.73	1.76
0.00	Min	-14.97	-3478.94	-5.55	-161.11	-5.73	-1.76
2.74	Max	69.56	-2276.78	26.73	183.95	58.81	8357.79
2.74	Min	-69.56	-2653.55	-26.73	-183.95	-58.81	7269.75
2.74	Max	95.97	-2128.16	36.83	179.81	61.01	8356.80
2.74	Min	-95.97	-2470.92	-36.83	-179.81	-61.01	7270.73
5.47	Max	148.78	-1368.62	56.02	173.42	192.30	13907.99
5.47	Min	-148.78	-1649.77	-56.02	-173.42	-192.30	12085.46
5.47	Max	175.92	-1217.13	65.12	184.27	196.37	13905.89
5.47	Min	-175.92	-1471.43	-65.12	-184.27	-196.37	12087.56
8.21	Max	231.49	-449.04	82.36	239.70	409.38	16730.16
8.21	Min	-231.49	-660.47	-82.36	-239.70	-409.38	14438.26
8.21	Max	257.87	-290.68	90.49	241.80	411.49	16728.97
8.21	Min	-257.87	-486.33	-90.49	-241.80	-411.49	14439.44
10.94	Max	310.61	488.56	105.81	246.55	683.83	16819.09
10.94	Min	-310.61	315.47	-105.81	-246.55	-683.83	14309.78
10.94	Max	336.96	652.46	113.00	248.97	685.89	16817.80
10.94	Min	-336.96	483.81	-113.00	-248.97	-685.89	14311.07
13.68	Max	390.56	1446.22	126.49	267.56	1019.25	14189.55
13.68	Min	-390.56	1269.67	-126.49	-267.56	-1019.25	11685.26
13.68	Max	418.09	1615.12	132.80	291.12	1024.34	14187.30
13.68	Min	-418.09	1430.08	-132.80	-291.12	-1024.34	11687.51
16.41	Max	472.08	2416.44	144.58	326.66	1410.05	8885.50
16.41	Min	-472.08	2208.71	-144.58	-326.66	-1410.05	6544.31
16.41	Max	498.35	2588.59	150.07	329.32	1411.96	8884.05

Tabel L11: *lanjutan*

16.41	Min	-422.28	2307.63	-146.60	-337.69	-1439.62	6676.59
19.15	Max	466.47	3452.68	154.82	343.61	1853.67	711.94
19.15	Min	-466.47	3084.76	-154.82	-343.61	-1853.67	-988.75
19.15	Max	12.05	-215.56	2.18	45.93	6.55	-121.08
19.15	Min	-12.05	-252.67	-2.18	-45.93	-6.55	-155.74
20.00	Max	12.05	-72.99	2.18	45.93	5.78	2.19
20.00	Min	-12.05	-110.10	-2.18	-45.93	-5.78	-2.19
20.00	Max	10.28	75.75	2.18	1.85	1.25	0.93
20.00	Min	-10.28	72.99	-2.18	-1.85	-1.25	-0.93
20.85	Max	10.28	218.32	2.18	1.85	2.02	-122.33
20.85	Min	-10.28	215.56	-2.18	-1.85	-2.02	-125.28
20.85	Max	466.47	-3084.89	154.82	342.96	1853.67	709.47
20.85	Min	-466.47	-3452.55	-154.82	-342.96	-1853.67	-957.09
23.59	Max	422.28	-2307.76	146.60	337.63	1439.62	8752.36
23.59	Min	-422.28	-2649.64	-146.60	-337.63	-1439.62	6702.47
23.59	Max	400.16	-2150.05	142.04	334.01	1437.13	8753.93
23.59	Min	-400.16	-2475.11	-142.04	-334.01	-1437.13	6700.90
26.32	Max	354.45	-1380.33	131.93	295.49	1055.51	14153.40
26.32	Min	-354.45	-1663.93	-131.93	-295.49	-1055.51	11742.27
26.32	Max	331.06	-1226.82	126.35	269.74	1049.81	14155.66
26.32	Min	-331.06	-1487.60	-126.35	-269.74	-1049.81	11740.01
29.06	Max	285.71	-460.47	114.07	247.73	714.27	16901.73
29.06	Min	-285.71	-675.80	-114.07	-247.73	-714.27	14243.83
29.06	Max	263.47	-304.01	107.35	243.14	711.58	16903.30
29.06	Min	-263.47	-500.02	-107.35	-243.14	-711.58	14242.26
31.79	Max	218.96	479.05	92.70	232.92	432.97	16901.00
31.79	Min	-218.96	299.12	-92.70	-232.92	-432.97	14279.93
31.79	Max	196.69	651.35	84.77	227.63	430.20	16902.40

Tabel L11: *lanjutan*

31.79	Min	-196.69	459.07	-84.77	-227.63	-430.20	14278.53
34.53	Max	149.32	1472.15	67.64	163.65	209.21	14105.98
34.53	Min	-149.32	1216.41	-67.64	-163.65	-209.21	11895.81
34.53	Max	126.28	1659.14	58.43	148.46	204.48	14108.01
34.53	Min	-126.28	1359.25	-58.43	-148.46	-204.48	11893.78
37.26	Max	81.66	2501.18	38.73	148.42	65.96	8505.48
37.26	Min	-81.66	2098.12	-38.73	-148.42	-65.96	7126.23
37.26	Max	59.34	2695.44	28.23	150.20	63.07	8506.54
37.26	Min	-59.34	2236.09	-28.23	-150.20	-63.07	7125.16
40.00	Max	12.93	3545.87	5.91	124.98	6.07	1.78
40.00	Min	-12.93	2965.72	-5.91	-124.98	-6.07	-1.78

Tabel L12: Tegangan akibat Beban mati

Layout Line distance	S11
mm	N/mm ²
0	5.20E-15
2735.71	-0.608
2735.71	-0.608
5471.43	-1.012
5471.43	-1.012
8207.14	-1.214
8207.14	-1.214
10942.86	-1.212
10942.86	-1.212
13678.57	-1.008
13678.57	-1.008
16414.29	-0.601
16414.29	-6.01E-01
19150	9.80E-03
19150	9.80E-03
20000	-5.72E-15
20000	1.56E-14
20850	9.80E-03
20850	9.80E-03
23585.71	-0.601
23585.71	-0.601
26321.43	-1.008
26321.43	-1.008
29057.14	-1.212
29057.14	-1.212
31792.86	-1.214
31792.86	-1.214
34528.57	-1.012
34528.57	-1.012
37264.29	-0.608
37264.29	-6.08E-01
40000	5.81E-15

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DAFTAR DIRI PESERTA

Nana Lengkap : Retno Friana Dewi
Panggilan : Rere
Tempat/Tanggal Lahir : Medan, 24 April 1996
Jenis Kelamin : Perempuan
Alamat : Desa Sialang Lama, Kec. Bangun Purba, Kab. Deli
Serdang
Agama : Islam
Nama Orang Tua
Ayah : Nasib Syahputra
Ibu : Halimah
No. HP : 082361793609
E-mail : frianaretno@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

Nomor Pokok Mahasiswa : 1407210013
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Alamat Perguruan Tinggi : Jln.Kaptan Muchtar Basri BA. No. 3 Medan 20238

No.	Tingkat Pendidikan	Nama dan Tempat
1.	Sekolah Dasar	SD Swasta Sialang
2.	SMP	MTSs Al-Wasliyah Bangun Purba
3.	SMA	SMAN 1 Bangun Purba
4.	Melanjutkan Kuliah di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Tahun 2014	

