

TUGAS AKHIR

**ANALISIS JEMBATAN GELAGAR *BOX GIRDER* BAJA
UNTUK KERETA API DENGAN MENGGUNAKAN
PERATURAN MENTERI NO. 60 TAHUN 2012 DAN SNI
2833-2016 TIPE REL R33
(LITERATUR)**

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

Disusun Oleh:

**AZURA
1507210148**



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2019**



MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK

Jl. Kapten Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6623301
Website: <http://www.umsu.ac.id> Email: rektor@umsu.ac.id

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Azura

NPM : 1507210148

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Skripsi : Analisis Jembatan Gelagar *Box Girder* Baja Untuk Kereta Api
Dengan Menggunakan Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 Dan
SNI 2833:2016 Tipe Rel R33

Bidang Ilmu : Struktur.

Disetujui Untuk Disampaikan Kepada
Panitia Ujian

Medan, 26 September 2019

Pembimbing I


Tondi Amir Syah Putera P, ST, MT.

Pembimbing II


Dr. Fahrizal Zulkarnain, ST, MSc.

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Azura

NPM : 1507210148

Program Studi: Teknik Sipil

Judul Skripsi : Analisis Jembatan Gelagar *Box Girder* Baja Untuk Kereta Api
Dengan Menggunakan Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 Dan
SNI 2833:2016 Tipe Rel R33

Bidang Ilmu : Struktur

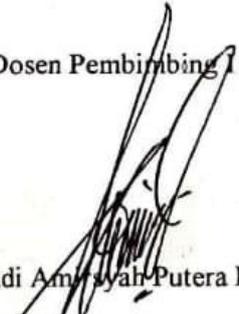
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 26 September 2019

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I / Penguji

Dosen Pembimbing II / Penguji


Tondi Amriyah Putera P, ST, MT.


Dr. Fahrizal Zulkarnain, ST, MSc.

Dosen Pembimbing I / Penguji

Dosen Pembimbing II / Penguji


Dr. Ade Faisal, ST, MSc.


Rizki Efrida, ST, M.T

Program Studi Teknik Sipil
Ketua

Dr. Fahrizal Zulkarnain, ST, MSc.



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Azura
Tempat/Tanggal Lahir : Kolam/08 Agustus 1997
NPM : 1507210148
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil,

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

“Analisis Jembatan Gelagar *Box Girder* Baja Untuk Kereta Api Dengan Menggunakan Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 Dan SNI 2833:2016 Tipe Rel R33”.

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 ketidaksesuaian antara fakta dengan 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 akademik di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 26 September 2019
Saya yang menyatakan


Azura

ABSTRAK

ANALISIS JEMBATAN GELAGAR *BOX GIRDER* BAJA UNTUK KERETA API DENGAN MENGGUNAKAN PERATURAN MENTERI NO. 60 TAHUN 2012 DAN SNI 2833-2016 TIPE REL R33 (STUDI LITERATUR)

Azura

1507210148

Tondi Amirsyah Putera P, ST, MT.

Dr. Fahrizal Zulkarnain, ST, MSc.

Jembatan adalah struktur yang dibangun dengan tujuan menghubungkan jalan yang terputus karena rintangan seperti sungai, lembah, atau laut khususnya Indonesia merupakan wilayah yang terdiri dari beberapa pulau sehingga dibutuhkan suatu struktur yang dapat menghubungkan jalan antar pulau. Dalam penelitian ini, penulis akan merencanakan struktur jembatan untuk kereta api dengan *box girder* dengan membandingkan kedua jenis situs tanah yaitu, tanah sedang dan tanah keras pada daerah Kota Padang. Perencanaan akan mengacu pada SNI 1725-2016 untuk pembebanan, Peraturan Menteri No. 60 tahun 2012 dan SNI 2833-2016. Struktur jembatan yang direncanakan adalah jembatan dengan bentang 40 m. Analisa struktur jembatan menggunakan alat bantu *software* CSI Bridge versi 20. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur jembatan dengan jenis tanah sedang memiliki nilai lendutan terbesar yaitu sebesar 0,001909 m dibandingkan dengan jenis tanah keras yang memiliki nilai lendutan 0,001673 m, hal ini disebabkan karena struktur jembatan dengan jenis tanah sedang memiliki nilai perioda yang besar dibandingkan dengan jenis tanah keras sehingga struktur lebih fleksibel.

Kata kunci: Jembatan kereta api, *box girder*, lendutan, perioda, tanah sedang dan tanah keras.

ABSTRACT

STEEL GIRDER BOX BRIDGE ANALYSIS FOR RAILWAY USING REGULATION OF THE MINISTER NO. 60 OF 2012 AND SNI 2833-2016 REL TYPE R33 (LITERATURE STUDY)

Azura

1507210148

Tondi Amirsyah Putera P, ST, MT.

Dr. Fahrizal Zulkarnain, ST, MSc.

Bridge are structures that are built with the aim of connecting roads that are cut off due to obstacles such as rivers, valleys, or the sea, especially Indonesia, which is an area consisting of several islands, so that a structure that can connect inter-island roads is needed. In this study, the author will plan the bridge structure for railway with box girder by comparing the two types of land sites that is medium and hard soils in Padang City area. Planning will refer to SNI 1725-2016 for loading, Ministerial Regulation No. 60 of 2012 and SNI 2833-2016. The planned bridge structure is a bridge with a span of 40 m. Analysis of the bridge structure using CSI Bridge software version 20. The results of the study showed that the structure of the bridge with medium soil types has the largest deflection value is 0.001909 m compared to the type of hard soil whis has a deflection calue of 0,001673 m, this cause the structure bridges with medium soil types have a large period value compared to hard soil types so the structure is more flexible.

Keywords: railway bridge, box girder, deflection, periode, medium soil and hard soil.

KATA PENGANTAR

Assalamu'Alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillahirabil'alamin, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisis Jembatan Gelagar *Box Girder* Baja Untuk Kereta Api Dengan Menggunakan Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 Dan SNI 2833-2016 Tipe Rel R33” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Tondi Amirsyah Putera P, ST, MT selaku Dosen Pembimbing I dan Penguji yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Fahrizal Zulkarnain, ST, MSc selaku Dosen Pembimbing II dan Penguji sekaligus sebagai Ketua Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ade Faisal, ST, MSc selaku Dosen Pembimbing I dan Penguji sekaligus sebagai Wakil Dekan I Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Rizki Efrida, ST, MT selaku Dosen Pembimbing II dan Penguji yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Munawar Alfansury Siregar, ST, MT selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu ketekniksipilan kepada penulis.

7. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Terimakasih yang istimewa sekali kepada Ayahanda tercinta Yusman dan Ibunda tercinta Supriati yang telah bersusah payah mendidik dan membiayai saya serta menjadi penyemangat saya serta senantiasa mendoakan saya sehingga penulis dapat menyelesaikan studinya.
9. Terimakasih kepada kakak saya Dini Harsely SPd, dan Habibika SE, serta keponakan pertama saya yang alhamdulillah baru lahir tanggal 13 september 2019 yang telah menjadi motivasi saya hingga selesainya Tugas Akhir ini.
10. Sahabat-sahabat penulis: Rizky Juanda, Desy Liansa, Alprida Ginting, Maimuna Zebua, Fadhillah Khairul Rizal serta keluarga besar Teknik Sipil 2015, 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.

Saya menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan.

Akhir kata saya 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, 26 September 2019

Azura

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR NOTASI	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	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	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Umum	5
2.2 Jembatan Kereta Api	5
2.2.1 Elemen Struktur Atas	6
2.2.2 Struktur Bawah (<i>Substructure</i>)	16
2.3 Konsep Dasar Hubungan Komposit Jembatan	16
2.4 Perencanaan <i>Box Girder</i> Baja	17
2.5 Persyaratan Pada Sistem Jembatan	32
2.5.1 Ketentuan Umum	32
2.5.2 Keadaan Batas Layanan	32
2.5.3 Keadaan Batas Fatik dan Fraktur	32
2.5.4 Keadaan Batas Kekuatan	33
2.5.5 Keadaan Batas Ekstrim	33

2.6	Persyaratan Pembebanan Pada Sistem Jembatan Kereta Api	33
2.6.1	Beban Gandar	33
2.6.2	Lendutan	33
2.6.3	Stabilitas Konstruksi	34
2.6.4	Tinggi Jagaan (Tiang Tepi)	35
2.7	Pembebanan Pada Jembatan Kereta Api	35
2.7.1	Beban Primer	35
2.7.2	Beban Angin	41
2.7.3	Beban Akibat Tumbukan Kendaraan	42
2.7.4	Beban Gempa	42
2.7.5	Gaya Akibat Temperatur	49
2.8	Faktor Kombinasi Pembebanan	52
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Bagan Alir	56
3.2	Metode Analisis	57
3.3	Uraian Metode	57
3.3.1	Data Perencanaan Struktur Jembatan	57
3.3.2	Data Material Struktur Jembatan	58
3.4	Konfigurasi Struktur Jembatan	58
3.5	Desain <i>Box Girder</i> Baja	58
3.5.1	Penentuan Dimensi <i>Box Girder</i> Baja	58
3.5.2	Dimensi Kolom (<i>Pier</i>)	61
3.5.3	Perletakan (<i>Bearing</i>)	62
3.6	Pemodelan Struktur	62
3.7	Pembebanan	63
3.7.1	Berat Jenis Bahan	63
3.7.2	Analisa Pembebanan	64
3.8	Perhitungan Beban	64
3.8.1	Beban Sendiri (MS)	64
3.8.2	Beban Mati Tambahan (MA)	66
3.8.3	Beban Hidup (TD)	69
3.8.4	Beban Kejut	69

3.8.5	Beban Pengereman (TB)	70
3.8.6	Beban Angin	70
3.8.7	<i>Temperature Gradient</i> (TG)	72
3.8.8	Analisis Respon Spektrum	72
3.9	Kombinasi Pembebanan	77
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Tinjauan Umum	78
4.2	Hasil Analisa	78
4.2.1	Respon Analisis Perioda Getar	78
4.2.2	Pemeriksaan Konstruksi Kondisi Batas Ultimit	79
4.2.3	Kontrol Lendutan	84
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	86
5.2	Saran	86
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		
DAFTAR RIWAYAT HIDUP		

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Dimensi penampang rel	7
Tabel 2.2	Pembagian kelas jalan rel 1435 mm	9
Tabel 2.3	Koefisien lendutan maksimum jembatan baja	34
Tabel 2.4	Koefisien lendutan maksimum jembatan baja	34
Tabel 2.5	Berat jenis bahan	36
Tabel 2.6	Faktor beban akibat berat sendiri	36
Tabel 2.7	Faktor beban untuk beban mati tambahan (SNI 1725:2016)	37
Tabel 2.8	Faktor beban akibat pengaruh pelaksanaan	38
Tabel 2.9	Penjelasan peta gempa (SNI 2833:2016)	43
Tabel 2.10	Faktor amplifikasi untuk PGA dan 0,2 detik (F_{PGA}/F_a)	45
Tabel 2.11	Faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v)	46
Tabel 2.12	Zona gempa (SNI 2833:2016)	48
Tabel 2.13	Faktor modifikasi respon (R)	49
Tabel 2.14	Faktor modifikasi respon (R) untuk antara elemen struktur (SNI 2833:2016)	49
Tabel 2.15	Temperatur jembatan rata-rata nominal	49
Tabel 2.16	Sifat bahan rata-rata akibat pengaruh temperatur	49
Tabel 2.17	Parameter T_1 dan T_2	51
Tabel 2.18	Kombinasi beban dan faktor beban (SNI 1725:2016)	54
Tabel 3.1	Spesifikasi <i>elastromeric bearing pad</i>	62
Tabel 3.2	Berat isi untuk beban mati (SNI 1725:2016)	63
Tabel 3.3	Berat dinding tepi/pembatas	65
Tabel 3.4	Tipe rel dan dimensi penampang rel (PM No. 60 Tahun 2012)	67
Tabel 3.5	Parameter T_1 dan T_2	72
Tabel 3.6	Zona gempa	74
Tabel 4.1	Nilai perioda getar (T) pada situs tanah sedang	78
Tabel 4.2	Nilai perioda getar (T) pada situs tanah keras	79
Tabel 4.3	Hasil analisis nilai momen (M3) maksimum jembatan pada situs tanah sedang	81

Tabel 4.4	Hasil analisis nilai momen (M3) maksimum jembatan pada situs tanah keras	81
Tabel 4.5	Nilai lendutan akibat kombinasi pada situs tanah sedang	84
Tabel 4.6	Nilai lendutan akibat kombinasi pada situs tanah keras	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Potongan melintang penyusun again atas jalan rel konvensional	6
Gambar 2.2	Struktur bagian atas komponen penyusunan	7
Gambar 2.3	Dimensi rel (PM No. 60 Tahun 2012)	8
Gambar 2.4	Jarak bebas lateral ke temok pembatas	11
Gambar 2.5	Macam-macam tipe <i>steel box girder</i> berdasarkan bentang	12
Gambar 2.6	Bentuk anatomi jembatan <i>box girder</i>	13
Gambar 2.7	Potongan melintang dari 3 bagian desain pada jembatan kereta api	14
Gambar 2.8	<i>Elastomeric bridge bearing</i> (bantalan karet)	15
Gambar 2.9	Skema pembebanan rencana muatan 1921 (RM 21)	39
Gambar 2.10	Beban lateral kereta (PM No. 60 Tahun 2012)	40
Gambar 2.11	Faktor beban dinamis untuk beban hidup kendaraan (SNI 1725:2016)	41
Gambar 2.12	Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (SNI 2833:2016)	44
Gambar 2.13	S_s , peta respon spektrum percepatan 0,2 detik di batuan dasar S_B untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (SNI 2833:2016)	44
Gambar 2.14	S_1 , peta respon spektrum percepatan 1 detik di batuan dasar S_B untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (SNI 2833:2016)	45
Gambar 2.15	Respon spektrum desain (SNI 2833:2016)	47
Gambar 2.16	Gradien temperatur vertikal pada bangunan atas beton dan baja	51
Gambar 3.1	Bagan alir perencanaan	56
Gambar 3.2	Data dimensi <i>box girder</i> dalam bentuk trapesium	59
Gambar 3.3	Potongan melintang <i>pier</i>	62
Gambar 3.4	Tampak 3D struktur jembatan kereta api	63
Gambar 3.5	Potongan melintang <i>box girder</i>	65
Gambar 3.6	Dimensi dinding pembatas	65
Gambar 3.7	<i>Input</i> beban dinding tepi pada <i>software</i>	66

Gambar 3.8	Dimensi rel (PM No. 60 Tahun 2012)	67
Gambar 3.9	<i>Input</i> beban genangan air pada <i>software</i>	68
Gambar 3.10	Rencana muatan kereta api yang disesuaikan dengan tekanan gandar maksimum 22,5 ton	69
Gambar 3.11	Pemodelan beban hidup kereta pada <i>software</i>	69
Gambar 3.12	<i>Input</i> beban angin struktur pada <i>software</i>	71
Gambar 3.13	<i>Input</i> beban angin kendaraan pada <i>software</i>	71
Gambar 3.14	<i>Input</i> temperatur gradien pada <i>software</i>	72
Gambar 3.15	Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun	73
Gambar 3.16	Peta respon spektrum percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun	73
Gambar 3.17	Peta respon spektrum percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun	74
Gambar 3.18	Grafik respon spektrum untuk tanah sedang	75
Gambar 3.19	Grafik respon spektrum untuk tanah keras	76
Gambar 4.1	Perbandingan nilai momen ultimit (M_u) pada jembatan situs tanah sedang dan situs tanah keras	82
Gambar 4.2	Perbandingan nilai gaya geser ultimit (V_u)	83
Gambar 4.3	Grafik perbandingan nilai lendutan pada jembatan situs tanah sedang dan situs tanah keras	85

DAFTAR NOTASI

V	= Kecepatan maksimum kereta pada tikungan (km/jam)
R	= Radius tikungan (m)
E_s	= Modus elastisitas baja(MPa)
E_c	= Modulus elastis beton (MPa)
G	= Modulus geser (MPa)
t_w	= ketebalan pelat badan profil pelat baja (m)
T_p	= Ketebalan pelat lantai, dinyatakan dalam millimeter (m)
H	= Tinggi total girder (m)
b_p	= Lebar pelat lantai efektif (m)
y	= Garis netral dari serat atasprofil baja (m)
t_f	= Ketebalan pelat baja pada serat atas (m)
D	= Tinggi bersih badan profil baja(m)
M_p	= Kekuatan lentur nominal (kN-m)
M_s	= M_p
M_y	= Momen kapasitas pada saat terjadi leleh (kN-m)
M_{D1}	= Momen gelagar baja (kN.m)
M_{D2}	= Momen komposit jangka panjang (kN.m)
M_{AD}	= Momen komposit jangka pendek (kN.m)
S_{NC}	= Modulus penampang gelagar (m^3)
S_{LT}	= Modulus penampang komposit untuk beban jangka panjang (m^3)
S_{ST}	= Modulus penampang komposit untuk beban jangka pendek (m^3)
ΔV_v	= Gaya geser vertikal (kN/m)
ΔV_H	= Gaya geser horizontal (kN/m)
M_{LAT}	= Momen lentur lateral (kN/m)
s	= Jarak pengikat (m)
f_{LAT}	= Tegangan lentur lateral (MPa)
C_b	= Faktor momen gradient
R_b	= Faktor beban pelat badan
f_{bu}	= Tegangan total (MPa)
F_{cr}	= Tegangan tekuk torsi lateral elastis (MPa)

AF	= Faktor amplifikasi
λ	= Parameter kelangsingan
λ_r	= Batas maksimum parameter kelangsingan penampang tidak kompak
λ_p	= Batas maksimum parameter kelangsingan penampang kompak
V	= Gaya geser rencana untuk keadaan batas sesuai akibat lentur (KN)
A_t	= Luas transformasi dari lantai beton (mm^2)
Y_c	= Jarak garis netral penampang komposit terhadap titik berat luas A_t (mm^2)
I_t	= Momen kedua dari luas penampang komposit transformasi
\emptyset	= Faktor reduksi
n	= Jumlah penghubung geser persatuan panjang
A_{ts}	= Luas penampang dari tulangan melintang (m^2)
b_{sh}	= Lebar bidang geser yang ditinjau (mm)
f_{ry}	= Kekuatan leleh karakteristik tulangan (MPa)
f_c'	= Kekuatan karakteristik beton (MPa)
f_y	= Kekuatan karakteristik baja (MPa)
A	= Percepatan/akselerasi puncak PGA di batuan dasar (g)
R	= Respon batuan dasar
T	= Periode alami struktur (detik)
K	= Konstanta kekakuan (tf/m)
g	= Gaya gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)
γ_i	= Faktor beban ke-i
η_I	= Faktor pengubah respon berkaitan dengan klasifikasi operasional
η_D	= Faktor pengubah respon berkaitan dengan daktilitas
η_R	= Faktor pengubah respon berkaitan dengan redundansi
Q_i	= Pengaruh gaya
R_n	= Tahanan nominal
R_r	= Tahanan terfaktor
MS	= Beban mati komponen struktural dan non struktural jembatan
MA	= Beban mati perkerasan dan utilitas
TA	= Gaya horizontal akibat tekanan tanah
PL	= Gaya akibat proses pelaksanaan
SH	= Gaya akibat susut/rangkak

TB	= Gaya akibat rem
TR	= Gaya sentrifugal
TC	= Gaya akibat tumbukan kendaraan
TV	= Gaya akibat tumpukan kapal
EQ	= Gaya gempa
Csm	= Koefisien respon gempa elastis
Rd	= Faktor modifikasi respon
S_a	= Faktor respon gempa
S_{D1}	= Spektra permukaan tanah pada periode 1,0 detik
S_{DS}	= Spektra permukaan tanah pada periode pendek ($T=0,2$ detik)
S_B	= Batuan dasar
S_{PGA}	= Nilai PGA di batuan dasar (S_B) mengacu pada peta gempa Indonesia 2010
S_s	= Parameter percepatan respon spektral MCE dari peta gempa pada periode pendek, redam 5%
T_0	= $0,2 S_{D1} / S_{DS}$, detik
EW_S	= Beban angin struktural
EW_L	= Beban angin pada kendaraan
ET	= Gaya akibat temperatur gradien
EU _n	= Gaya akibat temperatur seragam
EF	= Gaya apung
BF	= Gaya friksi
EU	= Beban arus dan hanyutan
L	= Panjang total jembatan yang dibebani (m)
Pb	= Tekanan angin dasar
Wt	= Berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup (kN)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan dibidang transportasi merupakan sebagian prioritas penting bagi pemerintah dalam menentukan kemajuan daerah atau negara untuk mempercepat perkembangan daerah tertinggal. Khususnya di Indonesia yang merupakan negara berkembang yang sedang meningkatkan perekonomiannya. Perekonomian akan meningkat dan berjalan lancar jika didukung dengan sarana transportasi yang baik, nyaman, dan aman. Terhambatnya kegiatan transportasi seperti daerah yang terputus oleh sungai, lembah bahkan laut dibutuhkan suatu struktur yang dapat menghubungkan daerah tersebut agar kegiatan transportasi dapat berjalan lancar.

Jembatan adalah struktur yang dibangun dengan tujuan menghubungkan jalan yang terputus karena rintangan seperti sungai, lembah atau laut. Pada awalnya jembatan dibangun dengan sederhana menggunakan material kayu. Namun seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, jembatan mulai dibangun dengan menggunakan material beton yang dikompositkan dengan baja, dan material baja. Teknologi baja juga terus dikembangkan sehingga para ahli mulai menemukan konsep baru dan terbaik untuk menganalisis perencanaan sebuah jembatan. Untuk itu, perlu dipahami adanya suatu proses desain sebelum melakukan penghitungan dan pemilihan bentuk struktur.

Menurut Gere Timoshenko, konstruksi jembatan harus memenuhi persyaratan kekuatan yaitu mampu menahan beban yang menimbulkan *bending moment* pada konstruksi dan juga harus memenuhi syarat kestabilan perubahan kelurusan gelagar yaitu lendutan yang terjadi tidak boleh lebih dari persyaratan. Kekuatan dan lendutan jembatan tersebut ditentukan oleh besarnya momen inersia penampang komposit.

Pada penelitian ini, akan diperlihatkan analisa perencanaan jembatan gelagar *box girder* baja untuk kereta api berdasarkan Peraturan Menteri No. 60 tahun 2012 dan “Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan” SNI 2833:2016.

Beban yang diperhitungkan adalah beban sesuai fungsi *box girder* baja untuk jembatan kereta api.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, adapun yang menjadi rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana menganalisis besar gaya geser ultimit, momen lentur ultimit dan besar lendutan dengan membandingkan pada dua jenis situs tanah di Kota Padang ?
2. Bagaimana perbandingan perilaku jembatan yang didisain pada tanah sedang dan jembatan yang didisain pada tanah keras di Kota Padang ?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Struktur yang di evaluasi adalah pelat lantai, dimensi profil *box girder* baja, gelagar komposit dan perletakan.
2. Struktur dilaksanakan di daerah Kota Padang pada jenis situs tanah sedang dan tanah keras.
3. Perencanaan hanya menghitung struktur atas.
4. Perencanaan jalur kereta api dilakukan dengan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 tahun 2012 tentang persyaratan teknis jalur kereta api.
5. Analisis perilaku struktur dilakukan berdasarkan standar perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan SNI 2833:2013 serta peta wilayah gempa Indonesia.
6. Analisa struktur jembatan kereta api yang ditinjau menggunakan bantuan perangkat lunak.
7. Tidak melakukan analisa dari segi biaya dan waktu.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Untuk mengetahui besar gaya geser ultimit, momen lentur ultimit dan besar lendutan dengan membandingkan pada dua jenis situs tanah yaitu tanah sedang dan tanah keras di Kota Padang.
2. Untuk mengetahui perbandingan perilaku jembatan yang didisain pada tanah sedang dan jembatan yang didisain pada tanah keras di Kota Padang.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari hasil perencanaan pada pemodelan struktur jembatan dengan gelagar *box girder* baja maka diharapkan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat untuk mengetahui bagaimana cara merencanakan struktur jembatan dengan gelagar *box girder* pada jenis situs tanah sedang dan tanah keras di daerah Kota Padang.

1.6 Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN

Didalam Bab ini akan menguraikan latar belakang permasalahan, identifikasi dan rumusan permasalahan, ruang lingkup pembahasan, tujuan dilakukannya penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan laporan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini akan menguraikan teori-teori tentang jembatan gelagar *box girder* baja untuk kereta api, metode analisa yang akan digunakan serta ketentuan dalam desain yang harus dipenuhi sesuai syarat.

BAB III PEMODELAN STRUKTUR

Bab ini akan menjelaskan rencana atau prosedur yang dilakukan penulis memperoleh jawaban yang sesuai dengan kasus permasalahan dan bagaimana memodelkan struktur dengan *software*.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menyajikan hasil pembahasan analisis desain, kinerja struktur, grafik atau tabel serta pembahasannya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini akan menyajikan penjelasan mengenai kesimpulan yang 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 Umum

Jembatan secara umum adalah suatu konstruksi yang berfungsi untuk menghubungkan dua bagian jalan atau daerah yang terputus karena adanya halangan atau rintangan seperti lembah, alur sungai, danau, saluran irigasi jalan kereta, jalan raya yang tidak sebidang dan lain-lain. Dalam perencanaan dan perancangan jembatan sebaiknya mempertimbangkan fungsi kebutuhan transportasi atau aspek lalu lintas, persyaratan teknis dan estetika arsitektural (Supriyadi dan Munthor, 2007).

Jenis jembatan sekarang ini telah mengalami perkembangan pesat sesuai dengan kemajuan zaman dan teknologi berdasarkan fungsi, lokasi, bahan konstruksi dan struktur. Jembatan terbagi menjadi 3 bagian struktur yaitu struktur atas (*super structure*), struktur bawah (*sub structure*), dan pondasi. Bagian yang menghubungkan rintangan kereta api adalah struktur atasnya.

Konstruksi bagian atas pada jembatan kereta api terdiri dari tiang pembatas, rel, *ballast*, bantalan, *slab* lantai kendaraan, gelagar *box girder*, balok diafragma, ikatan pengaku dan tumpuan (*bearing*). Bagian bawah terdiri dari *abutment* dan pilar (*pier*) yang seluruhnya berada diatas pondasi.

Umur rencana dari suatu konstruksi jembatan biasanya relatif panjang, dan karena pemilihan materialnya juga yang akan mendukung umur rencana jembatan tersebut. Material baja telah digunakan dalam konstruksi jembatan kereta api sejak zaman Victoria, baik dalam struktur bentang panjang maupun bentang yang lebih sederhana. Banyak dari jembatan baja yang lebih tua masih beroperasi, karena adanya program pemeliharaan, perbaikan dan peningkatan sesuai dengan kebutuhan, kemajuan zaman dan teknologi.

2.2 Jembatan Kereta Api

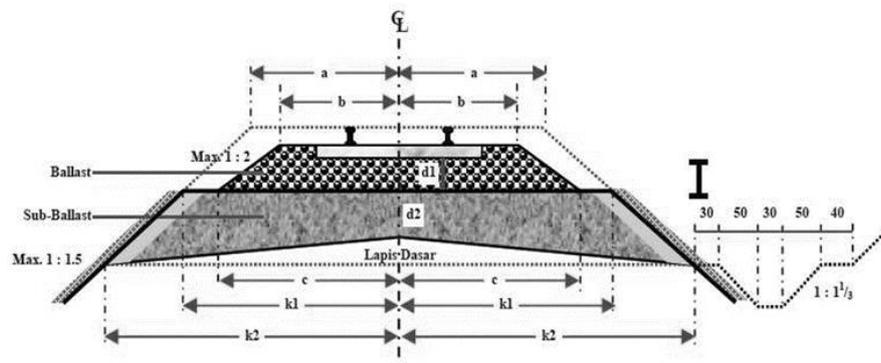
Desain jembatan kereta api mengharuskan perencana untuk memberikan pertimbangan terperinci terhadap metode konstruksi serta material yang digunakan

yang berhubungan dengan lokasi yang telah ditentukan. Hal ini sebagai persyaratan mendasar untuk menghasilkan solusi desain untuk direncanakan pada waktu yang lebih efisien dan biaya perencanaan seekonomis mungkin. Khususnya dalam perencanaan jembatan kereta api, jembatan harus mampu mendukung muatan beban kereta api yang bebannya akan disalurkan ke struktur jembatan.

2.2.1 Elemen Struktur Atas

Siswanto M.F, (1999) mengatakan bahwa struktur atas jembatan adalah bagian-bagian jembatan yang memindahkan beban-beban jembatan ke arah perletakan struktur atas, yang terdiri dari gelagar-gelagar induk, struktur tumpuan atau perletakan, struktur lantai jembatan/kendaraan, pertambahan arah melintang dan memanjang.

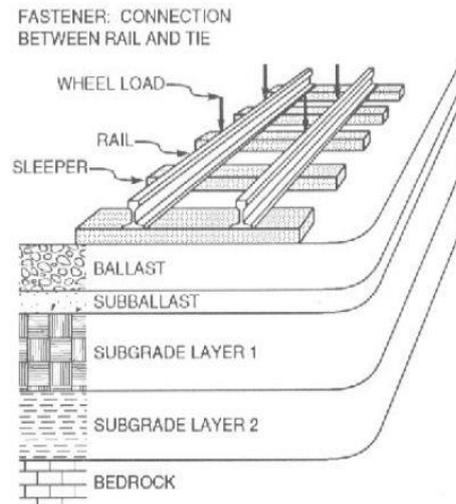
Struktur atas jembatan merupakan bagian yang menerima beban langsung yang meliputi berat sendiri, beban mati, beban mati tambahan, beban lalu-lintas kendaraan, gaya rem, beban kejut, dll.



Gambar 2.1: Potongan melintang penyusun bagian atas jalan rel konvensional.

Kereta api dalam menjalankan fungsinya sebagai sarana transportasi bergerak dari suatu tempat ke tempat lainnya berjalan di atas jalan rel. Secara umum, pada teknologi konvensional berupa teknologi dua rel sejajar, jalan rel terbentuk dari dua batang rel baja diletakkan di atas balok-balok melintang. Balok-balok melintang ini disebut bantalan. Untuk menjaga agar rel tetap pada kedudukannya, rel tersebut ditambatkan pada bantalan dengan menggunakan penambat rel. Dengan susunan dan tambatan yang demikian maka susunan dan struktur rel, bantalan, penambat rel

menjadi suatu rangka yang kokoh disebut bersambungan secara memanjang membentuk jalur yang disebut sepur (*track*). Sepur diletakkan di atas suatu alas disebut balas (*ballast*), yang selanjutnya dibawah balas terdapat slab lantai kendaraan.



Gambar 2.2: Struktur bagian atas komponen penyusunan.

Struktur atas jembatan umumnya meliputi:

1. Rel

Jalan rel harus memenuhi persyaratan berikut:

- a. Minimum perpanjangan (*elongation*) 10%.
- b. Kekuatan tarik (*tensile strength*) minum 1175 N/mm^2 .
- c. Kekerasan kepala rel tidak boleh kurang dari 320 BHN.

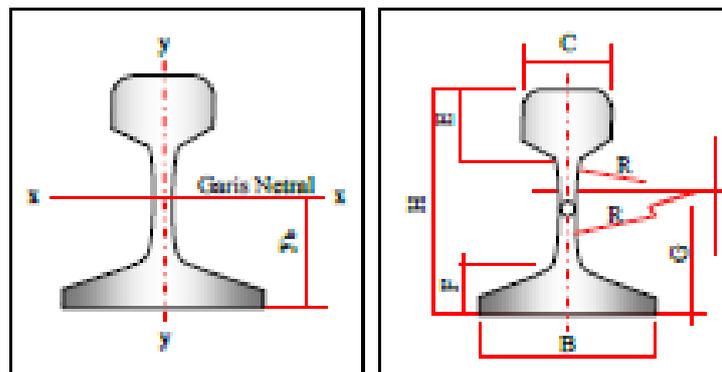
Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 tahun 2012 tentang perencanaan teknis jalur kereta api diperoleh dimensi penampang rel sesuai tipe rel dan kelas jalan rel yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1 sampai Tabel 2.2.

Tabel 2.1: 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

Tabel 2.1: *Lanjutan.*

Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R 42	R 50	R 54	R 60
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				



Gambar 2.3: Dimensi rel (PM. Nomor 60 Tahun 2012).

Tabel 2.2: Pembagian kelas jalan rel 1435 mm.

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)	Kecepatan Maksimum (km/jam)	Tipe Rel	Jenis Bantalan/Jarak (mm)	Jenis Penambat	Tebal Balas Atas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
I	> 20	160	R 60	BETON/600	Elastis Ganda	30	60
II	10 – 20	140	R 60	BETON/600	Elastis Ganda	30	50
III	5 – 10	120	R 60/ R 54	BETON/600	Elastis Ganda	30	40
IV	<5	100	R 60/ R 54	BETON/600	Elastis Ganda	25	40

2. Bantalan

Bantalan berfungsi untuk meneruskan beban kereta api, berat konstruksi jalan rel dan stabilitas ke arah luar jalan rel. Bantalan dapat terbuat dari kayu, baja/besi, ataupun beton. Pemilahan jenis bantalan didasarkan pada kelas kondisi lapangan serta ketersediaan. Spesifikasi masing-masing tipe bantalan harus mengacu kepada persyaratan teknis yang berlaku. Bantalan harus memenuhi persyaratan berikut:

a. Bantalan beton struktur prategang

- 1) 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 didukung rel dan -930 kgm pada bagian tengah bantalan.

Dimensi bantalan untuk lebar jalan rel 1067 mm:

- a) Panjang : 2.000 mm
- b) Lebar maksimum : 260 mm
- c) Tinggi maksimum : 220 mm

- 2) 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 kg/cm^2

(1.655 MPa). Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum dengan sesuai desain beban gandar dan kecepatan.

Dimensi bantalan untuk lebar jalan rel 1435 mm:

a) Panjang : - 2.440 mm untuk beban gandar sampai dengan 22,5 ton.

- 2.740 mm untuk

beban gandar di atas

22,5 ton.

b) Lebar maksimum : 330 mm.

c) Tinggi bawah dudukan : 220 mm.

b. Bantalan kayu, harus memenuhi persyaratan kayu mutu A kelas 1 dengan *modulus elastisitas* (E) minimum 125.000 kg/cm². 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.

c. 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, tegang tarik 88-103 kg-m. *Elongation* A1 > 10%.

3. Alat penambat

Alat penambat yang digunakan adalah alat penambat jenis elastis yang terdiri dari sistem elastis tunggal dan sistem elastis ganda. Pada bantalan beton terdiri dari *shoulder/insert, clip, insulator*, dan *rail pad*. Pada bantalan kayu dan baja terdiri dari pelat landas (*beseplate*), *clip, tripon (screw spike)*/baut dan cincin per (*lock washer*).

4. Balas

Fungsi utama balas adalah untuk meneruskan dan menyebarkan beban bantalan ke tanah dasar atau *deck box girder* pada jembatan, mengkokohkan kedudukan bantalan dan meluruskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air di sekitar bantalan rel. Kemiringan lereng lapisan balas atas tidak boleh lebih curam 1:2.

Bahan balas atas dihampar hingga mencapai sampai dengan elevasi bantalan. Material pembentuk balas harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

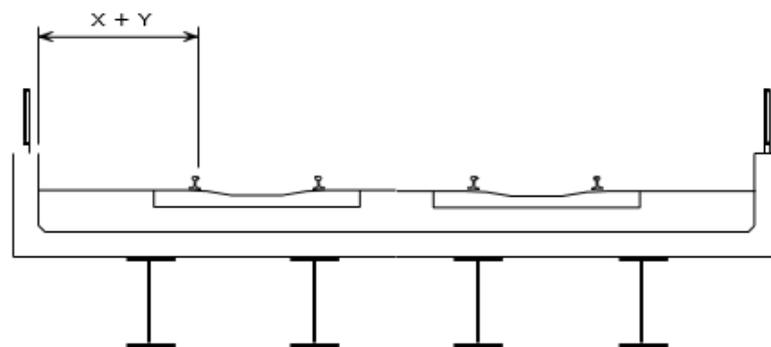
- a. Balas harus terdiri dari batu pecah (25-60) mm dan memiliki kapasitas ketahanan yang baik, ketahanan gesek yang tinggi dan mudah dipadatkan.
- b. Material balas harus bersudut banyak dan tajam.
- c. Porositas maksimum 3%.
- d. Kuat tekan rata-rata maksimum 1000 kg/cm^2 .
- e. *Specific gravity* minimum 2,6.
- f. Kandungan tanah, lumpur dan organik maksimum 0,5%.
- g. Kandungan minyak maksimum 0,2%.
- h. Keausan balas sesuai dengan test *Lost Angeles* tidak boleh lebih dari 25%.

5. Trotoar

Trotoar pada jembatan kereta api berfungsi sebagai ruang bebas sebagai tempat keselamatan yang berbatasan langsung dengan trek. Dimensi dan jarak bebas minum dari jalur kereta.

6. Tiang sandaran (*rail post*)

Tiang pembatas biasanya dibuat dari beton bertulang untuk jembatan *box girder* beton, sedangkan untuk jembatan rangka tiang sandaran dengan struktur rangka tersebut. Untuk jembatan tipe *slab* komposit lebar ruang bebas minimum adalah 700 mm, jarak antara lintasan dan struktur adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4: Jarak bebas lateral ke tembok pembatas.

7. Plat lantai kendaraan (*slab*)

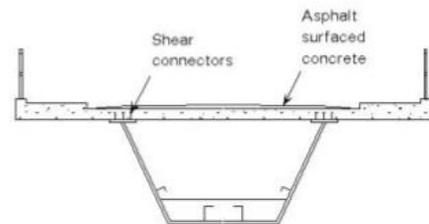
Deck berfungsi sebagai penahan lapisan perkerasan yang menahan beban langsung lalu lintas yang melewati jembatan itu.

8. Gelagar box baja (*steel box girder*)

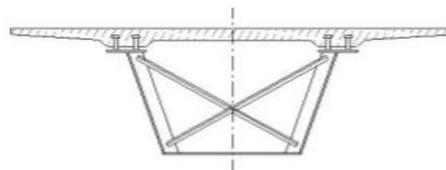
Gelagar terdiri atas gelagar induk memanjang merupakan komponen jembatan yang letaknya melintang arah jembatan atau tegak lurus arah penghalang. Sedangkan gelagar melintang merupakan komponen jembatan yang letaknya melintang arah jembatan terbuat dari pelat-pelat berbentuk kotak empat persegi atau berbentuk trapesium. Jembatan dapat terdiri dari gelagar kotak tunggal (*single box*) maupun tersusun dari beberapa gelagar (*multi span*).

Jembatan *steel box girder* merupakan alternatif jembatan untuk bentang panjang dan bergeometri lengkung, umumnya digunakan dengan bentang panjang 30 meter sampai dengan 60 meter. Jembatan ini memiliki daya tahan sangat tinggi terhadap lentur dan puntiran hingga 100 sampai 1000 kali lipat ketahanan gelagar girder tipe I (Helwig dkk, 2007).

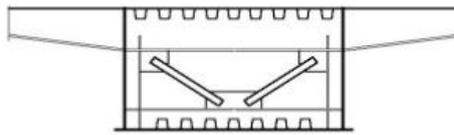
Conrad (1983), menjelaskan, ada 3 elemen penting yang terdapat dalam *steel box girder* yaitu flens atas (*top flange*), flens bawah (*bottom flange*) dan badan (*web*). Memahami tentang *steel box girder*, adapun bentuk gelagar memiliki tiga macam jenis berdasarkan klasifikasi bentang dapat dilihat pada Gambar 2.5.



(a) *Box Composite*



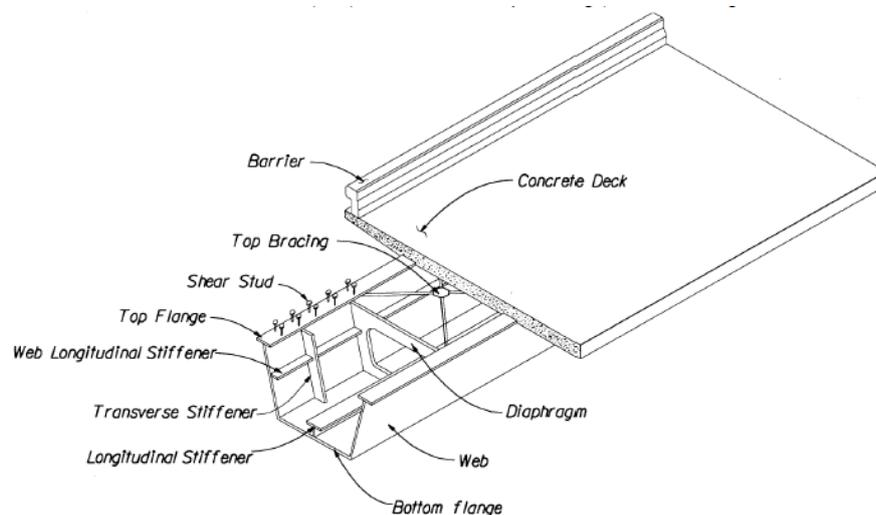
(b) *Longer Span Composite*



(c) *Long Span Ortho-Tropic Deck*

Gambar 2.5: Macam-macam tipe *steel box girder* berdasarkan bentang.

Dilihat pada Gambar 2.5, tipe (a) adalah *box girder* untuk tipe bentang pendek ke menengah dengan perpaduan pelat beton. Tipe (b) adalah *box girder* komposit untuk bentang panjang. Dan tipe (c) adalah *box girder* yang benar-benar murni memakai baja atau tidak dipadukan dengan beton (Wolchuk, 1981).



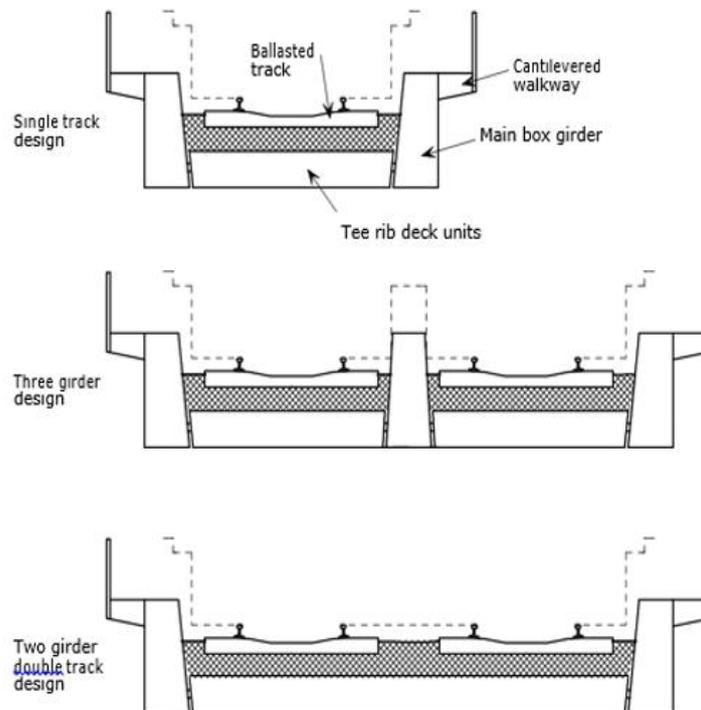
Gambar 2.6: Bentuk anatomi jembatan *box girder*.

Desain jembatan *box girder* dikembangkan pertama kali oleh *British Rail and Railtrack*. Konsep ini bertujuan sebagai alternatif perancangan agar lebih mudah dan efisien. Ada beberapa tahap suatu konstruksi *box girder* dapat sukses dibangun atau tidak. Untuk mendapatkan kualitas yang terjaga maka diusahakan elemen-elemen pada *box* baja dibuat dengan proses pabrikasi. Karena ukuran elemen-elemen pabrikasi umumnya lebih kecil dari ukuran bangunan rencana maka diperlukan sistem sambungan, yang dipilih sesuai dengan kemudahan dalam pelaksanaan dan harus konsisten dengan perilaku pemodelan untuk analisa struktur pada tahap perencanaan.

Jika tahapan pabrikasi selesai dan selanjutnya transportasi tidak menimbulkan masalah, dalam arti elemen struktur *box girder* berhasil diangkut ke lapangan

(*project site*), maka tahapan berikutnya adalah *erection* yaitu suatu proses bagaimana elemen-elemen struktur tadi dirangkai atau dirakit dan adanya unsur pengangkatan dan pemasangan.

Hal yang utama dari perilaku *box girder* adalah bahwa lantai jembatan hanya didukung antar *box girder* untuk menghindari tekukan yang kemudian akan di *transfer* ke bagian *web box girder*. Pada sambungan ini ditambahkan ikatan pengaku yang memungkinkan sedikitnya rotasi antar ujung silang dengan balok kotak. Serta manfaat untuk kinerja kelelahan struktur. *Box girder* memiliki kekakuan torsional dan distorsi untuk membawa muatan beban yang tidak wajar yang diterapkan melalui pelat geser dan *box girder*.



Gambar 2.7: Potongan melintang dari 3 bagian desain pada jembatan kereta api.

9. Balok diafragma

Balok diafragma berfungsi mengkekalkan PCI *girder* dari pengaruh gaya melintang. Diafragma harus disediakan pada daerah perletakan dari gelagar *box* untuk memindahkan beban yang ada ke pemikul. Diafragma harus digunakan bila gaya luar vertikal dan melintang akan di salurkan dari satu unsur ke unsur lain. Diafragma pada perletakan harus di dimensi sebanding untuk membagi gaya-gaya

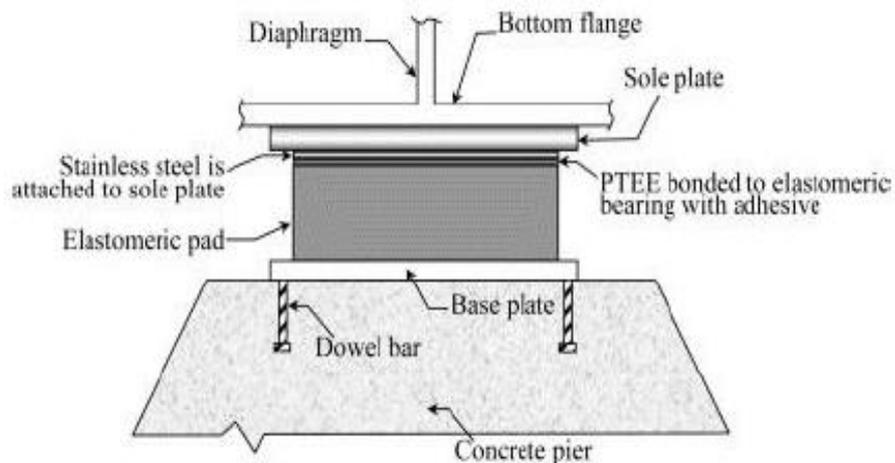
yang bekerja padanya dan sebagai gaya tambahan untuk menahan gaya melintang rencana harus terbagi sama antara diafragma-diafragma.

10. *Bracing* pada *steel box girder*

Bracing adalah ikatan pengaku pada struktur. Ukuran *flange* atas di daerah lentur positif biasanya lebih kecil dan *slab* beton yang berada di atas *flange* merupakan elemen meningkatkan lentur dan kekuatan torsional. Di wilayah moment negatif, daerah *flange* atas juga mempengaruhi *flange* bawah karena tegangan yang terjadi pada *gelagar box girder* tidak efektif sehingga diperlukan adanya *bracing* (pengaku) untuk meningkatkan kinerja gelagar. Adapun tiga pilihan tipe *bracing* rangka pada *steel box girder* yaitu *bracing v*, *bracing v* terbalik, dan *bracing x* adalah bentuk percobaan untuk meminimalisir berat dari pengikat yang di pakai.

11. Tumpuan (*bearing*)

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 di dalamnya 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 dowel untuk memudahkan pemasangan. Lapisan baja dan karet memberikan kekuatan fleksibilitas ke arah vertikal dan mendukung fleksibilitas. Penyebab energi dan redaman pada arah horizontal LRB dapat berbentuk persegi panjang atau lingkaran seperti terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8: *Elastomeric bridge bearing* (bantalan karet).

2.2.2 Struktur Bawah (*Substructure*)

Menurut Departemen Pekerjaan Umum (Modul Pengantar dan Prinsip-Prinsip Perencanaan Bangunan Bawah/Pondasi Jembatan 1988), fungsi utama bangunan bawah adalah memikul beban-beban pada bangunan atas dan pada bangunan bawahnya sendiri untuk disalurkan ke pondasi yang selanjutnya beban-beban tersebut oleh pondasi di salurkan ke tanah. Struktur bawah jembatan kereta api ini umumnya meliputi:

1. Pangkal jembatan (*abutment*)

Abutment merupakan bangunan bawah jalan layang yang terletak pada kedua ujung jalan layang yang berfungsi memikul reaksi beban pada ujung jembatan dan dapat berfungsi sebagai dinding penahan tanah.

2. Pilar jembatan (*pier*)

Terletak di tengah bentang jembatan atau memberikan dukungan vertikal untuk rentang di antara dua poin. *Pier* jembatan memiliki dua fungsi utama yaitu mentransfer beban bangunan atas vertikal ke pondasi dan menahan kekuatan horizontal yang bekerja pada jembatan. Meskipun *pier* dirancang untuk menahan beban vertikal dan struktur di atasnya, *pier* juga didesain untuk menahan beban lateral yang disebabkan oleh gaya seismik.

2.3 Konsep Dasar Hubungan Komposit Jembatan

Patel (2009), menyatakan bahwa jika ada pemakaian pelat beton bertulang di *slab* kendaraan dengan struktur baja di bawahnya, perlu adanya pertimbangan bahwa penampang tersebut telah kompak yaitu penampang tetap mampu bekerja hingga mencapai kondisi leleh pertama atau biasa disebut plastis.

Salah satu aplikasi dari jembatan gelagar adalah jembatan gelagar komposit baja dan beton. Jembatan gelagar baja yang dihubungkan dengan pelat lantai beton bertulang dan menggunakan alat penyambung geser mekanis (*shear connector*) yang akan mentransfer gaya geser longitudinal akibat pembebanan dari pelat ke gelagar dan menahan pelat yang tidak terangkat dengan struktur seperti gelagar baja dan pelat beton bertulang pada penggunaan jembatan kereta api ini yang menjadi kesatuan kompak saling mendukung beban secara bersama-sama sebagai kesatuan struktur (Siswanto M.F, 1999).

Menurut Siswanto M.F (1999), aksi komposit terjadi apabila dua komponen struktural pendukung beban misalnya konstruksi pelat lantai beton dengan balok baja dihubungkan secara menyeluruh dan mengalami lendutan sebagai kesatuan. Aksi komposit ini dapat diterapkan apabila memenuhi ketentuan-ketentuan yang mendekati keadaan sebenarnya seperti kondisi lantai beton dengan balok baja dihubungkan secara tepat pada seluruh bentang dengan penghubung geser yang besar dan gaya gesernya sebanding dengan bebannya. Distribusi tegangan adalah linier di setiap penampang dalam lantai pelat beton dengan balok baja tidak terpisah secara vertikal di bagian manapun sepanjang bentang.

Pemasangan jembatan komposit merupakan hal penting dan memerlukan tahapan-tahapan yang harus dilakukan, yaitu:

Keuntungan material komposit:

1. Dapat mengurangi berat baja.
2. Dapat mengurangi tinggi profil.
3. Kekakuan lantai lebih besar.
4. Untuk profil yang lebih ditetapkan dapat mencapai bentang yang lebih besar.
5. Kemampuan menerima beban lebih besar.

Kelemahan material komposit:

1. Kekuatan tidak konstan untuk daerah momen negatif, dan pelat beton dianggap tidak bekerja.
2. Pada jangka panjang ada kemungkinan untuk terjadi defleksi yang cukup besar.

2.4 Perencanaan *Box Girder* Baja

Dalam *AASHTO 2012 6th EDITION* perencanaan *box girder* baja memiliki langkah-langkah sebagai berikut:

- Menentukan tinggi atau kedalaman *box girder*.
 - Menentukan dimensi *box girder*.
 - Menghitung rasio modular.
 - Menghitung properti potongan melintang gelagar baja dan struktur komposit untuk beban jangka pendek dan jangka panjang.
 - Menghitung kondisi batas ultimit *box girder*.
 - Menghitung momen lentur yang terjadi pada gelagar dan membandingkan dengan gaya geser ultimit akibat pembebanan.
 - Menghitung kombinasi dari momen lentur dan gaya geser pada gelagar.
 - Menghitung lendutan yang terjadi.
 - Menghitung batas leleh atau *fatigue*.
 - Merencanakan sambungan geser (*shear connector*), sambungan, dan pengikat (*bracing*) pada gelagar.
1. Penentuan tinggi *box girder*

Dalam penentuan tinggi *box girder* telah dilakukan banyak studi dan penelitian untuk memenuhi syarat kinerja dalam menahan momen dan gaya yang terjadi tinggi *box girder* mempengaruhi berat keseluruhan. Penentuan tinggi *box girder* sangat menentukan untuk biaya desain. Dalam *AASHTO* dijelaskan untuk menentukan tinggi *box girder* yaitu sebesar:

$$D = 0,333 L \tag{2.1}$$

dengan:

L = bentang terpanjang dari jembatan.

2. Penentuan dimensi *box girder*

Penentuan dimensi *box girder* dalam *AASHTO 6th EDITION 2012* terdapat dalam artikel 6.11.2 yang terpapar di bawah ini:

- a. Untuk *web*:

Ketebalan *web* minimal

$$\frac{D}{t_w} \leq 15 \quad (2.2)$$

dengan :

D = tinggi *web*.

t_w = tebal *web*.

- b. Untuk *flange*:

Lebar *flange* yang digunakan:

$$b_{tf} \geq \frac{D}{t_w} \quad (2.3)$$

atau digunakan rumus perbandingan yang lain

$$b_{tf} \geq \frac{D}{85} \quad (2.4)$$

- c. Lebar *flange* minimum yang digunakan

$$t_{tf} \geq 1.1 t_w \quad (2.5)$$

dengan:

t_{tf} = tebal *web*.

- d. Untuk pengecekan struktur gelagar digunakan rumus

$$\frac{b_{tf}}{2t_{tf}} \leq 12 \quad (2.6)$$

dengan:

b_{tf} = lebar pelat sayap atas (Mpa).

t_{tf} = tebal pelat sayap atas (Mpa)

3 Menentukan rasio modular

Slab pada penampang komposit ditransformasikan menjadi baja ekuivalennya. Proses transformasi ini dengan menggunakan suatu nilai rasio modular (n) yang didefinisikan sebagai perbandingan antara modulus elastisitas baja (E) dengan modulus elastis beton (E_c) yang dapat dilihat dalam *AASHTO 6th EDITION 2012* artikel 6.10.1.1.lb.

Analisis penampang *box girder* baja dihitung dengan kondisi komposit untuk beban jangka pendek ($k = 1$) dan komposit untuk beban jangka panjang ($k = 3$).

Aksi komposit dipengaruhi oleh nilai rasio modular yang diperoleh dari perbandingan antara modulus elastisitas baja dengan modulus elastis beton. Untuk kondisi komposit untuk beban jangka pendek, nilai rasio modular ditentukan sebagai berikut:

$$n = \frac{E}{E_C} \quad (2.7)$$

dengan:

n = nilai rasio modular.

E = modulus elastisitas baja (MPa).

E_C = modulus elastisitas beton (MPa).

Dalam perencanaan jembatan diperlukan perhitungan analisis penampang untuk mendapatkan momen inersia dan modulus penampang. Perhitungan analisis penampang terdiri dari kondisi gelagar baja, komposit untuk beban jangka pendek dan komposit jangka panjang.

a. Analisis penampang gelagar baja

Penampang di analisis dalam kondisi *non*-komposit yaitu hanya penampang gelagar baja tanpa rasio modular.

b. Analisis penampang komposit untuk beban jangka pendek, $k = 1$

Penampang di analisis dalam kondisi komposit untuk beban jangka pendek dengan rasio modular sebesar (n).

c. Analisis penampang komposit beban jangka panjang $k = 3$

Penampang di analisis dalam kondisi komposit untuk beban jangka panjang dengan rasio modular sebesar ($3n$).

4 Momen Plastis

Momen plastis merupakan besaran momen yang dihitung dari kekuatan yang dihasilakn oleh *web*, *flange*, dan tulangan beton. Gaya plastis yang terjadi pada penampang *slab* beton. Gaya plastis yang terjadi pada penampang slab beton diasumsikan besarnya sama dengan $0.85 f'c$. Momen plastis pada bagaian komposit lentur positif dapat ditentukan dengan:

a. Menghitung kekuatan elemen pada jembatan untuk menentukan letak sumbu netral plastis.

b. Menentukan lokasi sumbu netral plastis dalam elemen.

- c. Menghitung momen plastis (Mp) untuk berbagi lokasi potensial sumbu netral plastis yang terdapat pada Pers 2.8 dan Pers.2.9.

$$\bar{Y} = \left(\frac{t_c}{2}\right) \left[\frac{P_w + P_t - P_s - P_{rt} - P_{rb}}{P_c} + I \right] \quad (2.8)$$

$$M_v = \frac{P_c}{2t_c} \left[\bar{Y}^2 + (t_c - \bar{Y})^2 \right] + [P_s d_s + P_{rt} d_{rt} + P_{rb} d_{rb} + P_w d_w + P_t d_t] \quad (2.9)$$

5 Momen Leleh

Momen leleh adalah momen lentur yang menyebabkan penampang mulai mencapai kuat leleh yaitu diambil sama dengan kuat leleh dikalikan dengan modulus penampang. Momen leleh diperoleh dari Pers. 2.10 sebagai berikut:

$$M_y = M_{D1} + M_{D2} + M_{AD} \quad (2.10)$$

dengan:

F_y = kuat leleh baja (MPa).

M_y = momen leleh (kNm).

M_{D1} = momen gelagar baja (kNm).

M_{D2} = momen komposit jangka panjang (kNm).

M_{AD} = momen komposit jangka pendek (kNm).

S_{NC} = modulus penampang gelagar (m^3).

S_{LT} = modulus penampang komposit untuk beban jangka panjang (m^3).

S_{ST} = modulus penampang komposit untuk beban jangka pendek (m^3).

6 Kondisi batas ultimit *box girder* baja

Pemeriksaan struktur gelagar seperti pelat sayap atas, pelat badan dan pelat sayap bawah perlu diperiksa dalam kondisi batas ultimit untuk menghindari kegagalan masing-masing komponen tersebut dalam menahan gaya ultimit yang terjadi. Pemeriksaan tersebut dilakukan dengan mencari tegangan total yang terjadi pada struktur gelagar.

Menurut pedoman *AASHTO LRFD* 2012, untuk mencari tegangan total pada masing-masing struktur gelagar ditentukan dengan Pers. 2.11a, 2.11b, 2.11c dan Pers. 2.12a, 2.12b, 2.12c sebagai berikut:

- a. Pelat sayap atas

$$f = \frac{M_{D1}}{S_{NC}} + \frac{M_{D2}}{S_{LT}} + \frac{M_{D3}}{S_{ST}} \quad (2.11a)$$

$$(f_{bu})_{CLL} = \frac{\gamma M_{CLL}}{S_{ST}} \quad (2.11b)$$

$$f_{bu} = f + (f_{bu})_{CLL} \quad (2.11c)$$

b. Pelat sayap bawah

$$f = \frac{M_{D1}}{S_{NC}} + \frac{M_{D2}}{S_{LT}} + \frac{M_{D3}}{S_{ST}} \quad (2.12a)$$

$$(f_{bu})_{CLL} = \frac{\gamma M_{CLL}}{S_{ST}} \quad (2.12b)$$

$$f_{bu} = f + (f_{bu})_{CLL} \quad (2.12c)$$

dengan:

f_{bu} = tegangan total (MPa).

f = tegangan lentur (MPa).

$(f_{bu})_{CLL}$ = tegangan akibat beban konstruksi (MPa).

M_{D1} = momen non-komposit/gelagar baja (kNm).

M_{D2} = momen komposit jangka panjang (kNm).

M_{D3} = momen komposit jangka pendek (kNm).

M_{CLL} = momen akibat beban konstruksi (kNm).

S_{NC} = modulus penampang gelagar baja (m³).

S_{LT} = modulus penampang komposit untuk beban jangka panjang (m³).

S_{ST} = modulus penampang komposit untuk beban jangka pendek (m³).

γ = faktor beban.

7 Lentur lateral pelat sayap

Untuk memperhitungkan tegangan lentur lateral pada pelat sayap atas dilakukan dengan cara merubah gaya geser vertikal menjadi gaya lateral pada pelat sayap atas dengan menggunakan Pers. 2.13 sampai 2.17 sebagai berikut:

Gaya geser vertikal:

$$\Delta V_u = \frac{V_u}{\frac{1}{2}L} \quad (2.13)$$

Gaya geser horizontal setiap pelat badan:

$$\Delta V_H = \frac{1}{2} \Delta V_u \tan(\theta_{web}) \quad (2.14)$$

Moemen lentur lateral:

$$M_{LAT} = \frac{\Delta V_H s^2}{12} \quad (2.15)$$

Modulus penampang pelat sayap atas:

$$S_f = \frac{t_{tf} b_{tf}^2}{6} \quad (2.16)$$

Tegangan lentur lateral:

$$f_{LAT} = \frac{M_{LAT}}{S_f} \quad (2.17)$$

dengan:

ΔV_u = gaya geser vertikal (kN/m).

V_V = gaya geser ultimit (kN).

L = panjang bentang (m).

ΔV_H = gaya geser horizontal (kN/m).

M_{LAT} = momen lentur lateral (kN/m).

s = jarak pengikat (m).

S_f = modulus penampang pelat sayap (m³).

t_{tf} = tebal pelat sayap atas (m).

b_{tf} = lebar pelat sayap atas (m).

f_{LAT} = tegangan lentur lateral (MPa).

8 Faktor implifikasi lentur lateral pelat sayap atas

Untuk menentukan faktor amplifikasi lentur lateral pelat sayap atas dijelaskan sebagai berikut. Tinggi elastis pelat badan diperoleh dengan menggunakan Pers. 2.18 sebagai berikut:

$$D_c = (Y_t - Y_f) \sqrt{\frac{s^2 + 1}{s^2}} \quad (2.18)$$

Jari-jari girasi tekuk torsi lateral diperoleh dengan menggunakan Pers. 2.19 sebagai berikut:

$$r_t = \frac{b_{tf}}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{D_c t_w}{b_{tf} t_f} \right)}} \quad (2.19)$$

Batas panjang maksimum tanpa pengikat lateral diperoleh dengan menggunakan Pers. 2.20 dan Pers. 2.21 sebagai berikut:

$$L_p = 1,0 r_t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.20)$$

Tegangan tekuk torsi lateral elastis pelat sayap atas ditentukan dengan Pers. 2.21 sebagai berikut:

$$F_{cr} = \frac{C_b R_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \quad (2.21)$$

Faktor amplifikasi ditentukan dengan Persamaan 2.22 sebagai berikut:

$$AF = \frac{0,85}{\left(1 - \frac{f_{bu}}{F_{cr}}\right)} \geq 1,0 \quad (2.22)$$

dengan:

D_c = tinggi elastis pelat badan (m).

Y_t = tinggi dari penampang atas ke sumbu netral (m).

t_f = tebal pelat sayap (m).

S = kemiringan pelat badan.

r_t = jari-jari girasi (m).

b_{tf} = lebar pelat sayap atas (m).

t_w = tebal pelat badan (m).

L_p = batas panjang maksimum tanpa pengikat lateral (m).

L_b = panjang antar pengikat lateral (m).

E = modulus elastisitas baja (MPa).

F_y = tegangan leleh baja (MPa).

C_b = faktor momen gradien.

R_b = faktor beban pelat badan.

f_{bu} = tegangan total (MPa).

F_{cr} = tegangan tekuk torsi lateral elastis (MPa).

AF = faktor amplifikasi.

Menurut *Steel Bridge Design Handbook* (2012), tegangan lentur lateral total pada pelat sayap atas dengan nilai faktor amplifikasi sesuai dengan Pers. 2.22 dijelaskan menurut Pers. 2.23 sebagai berikut:

$$f_{lat} = AF (f_{LAT} + f_t) \quad (2.23)$$

dengan:

f_{lat} = tegangan lentur lateral total (MPa).

AF = faktor amplifikasi.

f_{LAT} = tegangan lentur lateral (MPa).

f_t = tegangan lentur lateral akibat beban kantilever (MPa).

9 Pelat sayap atas dalam menerima lentur

Pelat sayap dalam menahan lentur harus memenuhi persyaratan yang dijelaskan dalam Pers. 2.24 sebagai berikut:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.24)$$

dengan:

D_{cp} = tinggi netral plastis (MPa).

t_w = tebal pelat badan (m)

E = modulus elastisitas baja (MPa).

f_y = tegangan lentur lateral akibat beban kantilever (MPa).

a. Ketahanan tekuk lokal sayap atas

Tekuk lokal atau *local buckling* dapat terjadi jika perbandingan lebar dengan ketebalan dari elemen yang mengalami tekanan terlalu besar, sehingga diperlukan adanya pembatasan rasio antara lebar dengan ketebalan dari elemen yang mengalami tekanan tersebut. Perbandingan antara lebar dengan ketebalan pada sayap atas dinyatakan dengan (λ_f), yang merupakan perbandingan antara lebar sayap atas dengan tebal sayap atas yang mengalami tekan. Untuk menentukan besarnya nilai (λ_f) digunakan Pers. 2.26 sebagai berikut:

$$\lambda_f = \frac{b_{tf}}{2t_{tf}} \quad (2.25)$$

Rasio kelangsingan sayap kompak ditentukan dengan Pers. 2.27 sebagai berikut: $AF = \frac{0,85}{\left(1 - \frac{f_{bu}}{F_y}\right)} \geq 1,0$

$$\lambda_{pf} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.26)$$

Rasio kelangsingan sayap tidak kompak ditentukan dengan Pers. 2.29 sebagai berikut:

$$\lambda_{rf} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.27)$$

dengan:

λ_f = rasio kelangsingan pelat sayap atas.

λ_{pf} = rasio kelangsingan sayap kompak.

λ_{rf} = rasio kelangsingan sayap tidak kompak.

E = modulus elastisitas baja (MPa).

F_y = tegangan leleh baja (MPa).

b_{tf} = lebar pelat sayap atas (MPa).

t_{tf} = tebal pelat sayap atas (m).

b. Tekuk torsi lateral sayap atas

Pada struktur yang menerima lentur, tekuk global dapat terjadi apabila tidak ada dukungan lateral sehingga struktur akan terpelintir ketika sayap bagian tekan (sayap atas) bergerak secara lateral. Perilaku ini didefinisikan sebagai tekuk torsi lateral atau *lateral torsional buckling*. Persyaratan gelagar dalam menerima lentur harus juga memperhatikan tekuk torsi lateral yang ditentukan dengan Pers. 2.28 dan 2.29 sebagai berikut:

$$L_p = 1,0 r_t \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} \quad (2.28)$$

$$L_r = \pi r_t \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} \quad (2.29)$$

dengan:

L_p = batas panjang maksimum tanpa pengikat lateral (m).

L_r = batas panjang minimal tanpa pengikat lateral (m).

r_t = jari-jari girasi (m).

F_y = tegangan leleh baja (MPa).

F_{yr} = tegangan tekan pelat sayap (MPa).

E = modulus elastisitas baja (MPa).

c. Ketahanan tekuk pada pelat badan

Selain pada bagian pelat sayap, nilai kelangsingan juga harus ditinjau pada pelat badan karena akibat lentur pelat badan akan mengalami tekan. Untuk menentukan besarnya nilai tegangan yang terjadi akibat tekuk pada bagian pelat badan, digunakan Pers. 2.30 dan 2.31 sebagai berikut:

$$k = \frac{9}{\left(\frac{D_c}{D}\right)^2} \quad (2.30)$$

$$F_{crw} = \frac{0,9 E k}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \quad (2.31)$$

dengan:

k = koefisien tekuk.

D_c = tinggi elastisitas pelat badan (m).

D = tinggi pelat badan (m).

F_{crw} = tegangan tekuk pada pelat badan (MPa).

t_w = tebal pelat badan (m).

E = modulus elastisitas baja (MPa).

d. Konstruksi pelat sayap atas

Konstruksi pelat sayap atas harus memenuhi Pers. 2.32a, 2.32b, dan 2.32c sebagai berikut:

Tegangan leleh

$$f_{bu} + f_{lat} \leq \phi_f R_h F_{nc} \quad (2.32a)$$

Tegangan lentur

$$f_{bu} + f_{lat} \leq \phi_f F_{nc} \quad (2.32b)$$

Tegangan tekuk lentur pada pelat badan

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{crw} \quad (2.32c)$$

dengan:

f_{bu} = tegangan total sayap atas (MPa).

f_i = tegangan lentur lateral akibat beban kantilever (MPa).

ϕ_f = faktor reduksi kekuatan lentur.

R_h = faktor hybrid.

F_{vc} = tegangan leleh baja (MPa).

F_{nc} = tahanan lentur nominal daerah tekan (MPa).

F_{crw} = tegangan tekuk pada pelat badan (MPa).

e. Konstruksi pelat sayap bawah

Konstruksi pelat sayap bawah harus memenuhi persyaratan tegangan leleh nominal pelat daerah tarik.

$$f_{bu} \leq \phi_f F_y \Delta \quad (2.33)$$

dengan:

f_{bu} = tegangan total sayap bawah (MPa).

ϕ_f = faktor reduksi kekuatan lentur.

F_y = tegangan leleh baja (MPa).

Δ = faktor St. Venant.

f_v = tegangan geser St. Venant.

10 Kapasitas momen gelagar

Box girder baja dalam menerima lentur didefinisikan sebagai anggota struktural yang menyangga beban-beban transversal tegak lurus terhadap sumbu netral plastis dengan beban yang bekerja merupakan kombinasi dari momen dan gaya geser.

Setelah dilakukan perhitungan lentur (*flexure*) pada elemen-elemen pada *box girder* baja berupa pelat sayap atas (*top flange*) dan pelat sayap bawah (*bottom flange*), maka perlu dilakukan pengecekan terhadap momen yang dihasilkan dari lentur (*flexure*). Syarat yang harus dipenuhi agar gelagar *box girder* baja memenuhi lentur yaitu:

- a. Menentukan persyaratan kelangsingan pelat badan ditentukan dengan Pers. 2.34 sebagai berikut:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.34)$$

dengan:

D_{cp} = tinggi netral plastis (m).

t_w = tebal pelat badan (m).

f_y = tegangan leleh baja (MPa).

E = modulus elastisitas baja (MPa).

- b. Menentukan momen lentur nominal ditentukan dengan Pers. 2.35a dan 2.35b sebagai berikut:

Jika $D_p \leq 0,1D_t$ maka,

$$M_n = M_p \quad (2.35a)$$

Jika $D_p \leq 0,42D_t$ maka,

$$M_n = M_p \left(1,07 - 0,7 \frac{D_p}{D_t} \right) \quad (2.35b)$$

dengan:

D_t = tinggi bagian komposit.

D_p = jarak dari bagian atas slab beton ke garis netral.

M_p = momen plastis.

M_n = momen lentur.

Kemudian kita membandingkan antara nilai Momen ultimate dengan Momen nominal yang dihasilkan dengan Pers. 2.36 berikut:

$$M_u \leq \phi_f \cdot M_n \quad (2.36)$$

dengan:

M_u = momen ultimit.

M_n = momen nominal.

ϕ_f = faktor reduksi kekuatan lentur.

11 Gaya geser (*shear*)

Gaya geser ultimit dalam struktur gelagar komposit didukung oleh pelat badan. Nilai kuat geser nominal pelat badan (*web*) dipengaruhi oleh adanya pengaku vertikal. Apabila pelat badan (*web*) diberikan pengaku dengan jarak antar pengaku a dan nilai a tersebut kecil maka kuat geser pelat badan yang diperoleh dari kuat geser murni dan kuat geser setelah mengalami tekuk. namun apabila jarak antar pengaku cukup lebar atau tanpa pengaku vertikal maka kuat geser hanya diperoleh dari kuat geser murni saja.

Kekuatan pelat badan dalam menahan gaya geser ditentukan oleh keadaan leleh pelat badan dan tekuk lokal pada pelat badan. Tekuk pada pelat badan (*web*) harus memenuhi persyaratan seperti Persamaan 2.37 berikut:

$$V_u \leq \phi_v V_n \quad (2.37)$$

dengan:

V_u = gaya geser ultimit.

V_n = gaya geser nominal.

ϕ_v = faktor resistance untuk gaya geser.

Dalam menentukan gaya geser nominal yang terjadi pada pelat badan dihitung menggunakan Pers. 2.38a dan 2.38b berikut ini:

$$V_n = V_{cr} = C V_p \quad (2.38a)$$

$$V_p = 0,58 F_{yw} D t_w \quad (2.38b)$$

dengan:

C = rasio gaya geser yang terdiri dari 3 kondisi.

V_p = gaya geser plastis.

V_{cr} = gaya geser resistensi.

Nilai C terdiri dari 3 kondisi yaitu:

a. Jika,

$$\frac{D}{t_w} \leq 1,12 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}} \text{ maka} \quad (2.39a)$$

$$C = 1,00$$

b. Jika,

$$1,12 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}} < \frac{D}{t_w} \leq 1,12 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}} \text{ maka,} \quad (2.39b)$$

$$C = \frac{1,12}{\frac{D}{t_w}} \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

c. Jika,

$$\frac{D}{t_w} \geq 1,4 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}} \text{ maka,} \quad (2.39c)$$

$$C = \frac{1,57}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \left(\frac{E_k}{F_{yw}}\right)$$

dengan:

k = koefisien geser tekuk.

$$5 + \frac{5}{\left(\frac{d_o}{D}\right)^2} \quad (2.40)$$

Dalam persyaratan gelagar box girder menerima gaya geser juga harus diperhatikan gaya geser yang terjadi pada panel interior dan ujung panel pada pelat badan (*web*). Untuk menghitung gaya geser yang terjadi pada panel interior dan ujung panel digunakan Persamaan 2.41a, 2.42b, dan 2.43c berikut:

d. Untuk panel interior *web*

$$V_n = V_p \left[C + \frac{0,87(1-C)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{D}\right)^2}} \right] \quad (2.41a)$$

dengan:

d_o = jarak pengaku melintang.

C = rasio gaya geser yang terdiri dari 3 kondisi.

V_p = gaya geser plastis.

V_n = gaya geser nominal.

e. Untuk ujung panel *web*

$$V_n = V_{cr} = CV_p \quad (2.41b)$$

$$V_p = 0,85 F_{yw} D t_w \quad (2.41c)$$

dengan:

C = rasio gaya geser yang terdiri dari 3 kondisi.

V_p = gaya geser plastis.

V_{cr} = gaya geser resistensi.

12 Metode pelaksanaan

Dalam perencanaan gelagar *box girder* komposit ada dua macam metode pelaksanaan yang biasa digunakan, yaitu dengan penunjang (*shored construction*) dan tanpa penunjang (*unshored construction*). Perbedaan kedua metode pelaksanaan sangat berpengaruh pada dukungan beban.

a. Metode pelaksanaan dengan penunjang (*shored construction*)

Dalam metode ini dapat mengurangi tegangan beban daya layan, dengan menumpukkan balok-balok baja pada perancah (*shoring*), sehingga berat balok, bekisting, dan beton basah dipikul oleh perancah. Setelah beton mengeras dan

perancah dilepas, penampang akan berperilaku secara komposit mendukung beban.

b. Metode pelaksanaan tanpa penunjang (*unshored construction*)

Dalam metode ini, gelagar baja ditempatkan terlebih dahulu dan akan mendukung berat sendiri, berat *slab* beton, dan berat bekisting selama beton belum mengeras. Setelah beton mengeras dan perancah dilepas, penampang akan berperilaku secara komposit dalam mendukung beban.

2.5 Persyaratan pada Sistem Jembatan

2.5.1 Ketentuan Umum

Berdasarkan SNI 1725:2016 jembatan harus direncanakan sesuai dengan keadaan batas yang disyaratkan untuk mencapai target pembangunan, keamanan, dan aspek layanan, dengan memperhatikan kemudahan inspeksi, faktor ekonomi dan estetika. Peraturan ini berisi ketentuan teknis untuk menghitung aksi nominal, definisi tipe aksi, serta faktor beban yang digunakan untuk menghitung besarnya aksi rencana.

Faktor beban harus dipilih sedemikian rupa untuk menghasilkan kondisi ekstrim maksimum dan minimum. Dalam kombinasi pembebanan dimana efek salah satu gaya mengurangi gaya lain, maka digunakan faktor beban permanen, harus dipilih faktor beban yang menghasilkan kombinasi pembebanan kritis. Jika terpengaruhi beban permanen adalah meningkatkan stabilitas atau kekuatan komponen jembatan, maka perencanaan harus memperhitungkan pengaruh faktor beban terkurangi (minimum).

2.5.2 Keadaan Batas Layanan

Keadaan batas layanan disyaratkan dalam perencanaan dengan melakukan pembatasan tegangan, deformasi, dan lebar retak pada kondisi pembebanan layan agar jembatan mempunyai kinerja yang baik selama umur rencana.

2.5.3 Keadaan Batas Fatik dan Fraktur

Keadaan batas fatik disyaratkan agar jembatan tidak mengalami kegagalan akibat fatik selama umur rencana. Untuk tujuan ini, perencanaan harus membatasi rentangan tegangan akibat satu beban rencana pada jumlah siklus pembebanan yang dianggap dapat terjadi selama umur rencana jembatan. Keadaan batas fraktur disyaratkan dalam perencanaan dengan menggunakan persyaratan kekuatan material sesuai spesifikasi keadaan batas fatik dan fraktur dimaksudkan untuk membatasi penjalaran akibat beban siklik yang ada pada akhirnya yang akan menyebabkan terjadinya kegagalan fraktur selama umur rencana.

2.5.4 Keadaan Batas Kekuatan

Keadaan batas kekuatan disyaratkan dalam perencanaan untuk memastikan adanya kekuatan dan stabilitas jembatan yang memadai, baik yang bersifat lokal maupun global, untuk memikul kombinasi pembebanan yang secara statik mempunyai kemungkinan cukup besar untuk terjadi selama masa layanan jembatan. Pada keadaan batas ini, dapat terjadi kelebihan tegangan ataupun kerusakan struktur, tetapi integritas struktur secara keseluruhan masih terjaga.

2.5.5 Keadaan Batas Ekstrim

Keadaan batas ekstrim diperhitungkan untuk memastikan struktur jembatan dapat bertahan akibat gempa besar. Keadaan batas ekstrim merupakan kejadian dengan frekuensi kemunculan yang unik dengan periode ulang yang lebih besar secara signifikan dibandingkan dengan umur rencana jembatan.

2.6 Persyaratan Pembebanan pada Sistem Jembatan Kereta Api

2.6.1 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 kelas jalur maksimum sebesar 22.5 ton.

2.6.2 Lendutan

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

1. Koefisien lendutan maksimum jembatan baja, sebagaimana tersebut dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3: Koefisien lendutan maksimum jembatan baja.

Jenis Kereta	Gelagar				Rangka Batang
	L(m)				
Lokomotif			L < 50	L ≥ 50	Seluruh rangka L/1000
			L/800	L/700	
Kereta listrik Atau Kereta disel	V (km/h)	V < 100	L/700		
		100 < V ≤ 130	L/800	L/700	
		100 < V ≤ 160	L/1100	L/900	

2. Koefisien lendutan maksimum jembatan beton, sebagaimana tersebut dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4: Koefisien lendutan maksimum jembatan beton.

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

disel			$100 < V \leq 160$	L/1100		L/900
	Untuk dua rangkaiian atau lebih	Kecepatan maksimum V (Km/ jam)	$V < 100$	L/ 800	L/ 850	L/ 700
			$100 < V \leq 130$	L/ 1000	L/ 1100	L/ 900
			$100 < V \leq 160$	L/ 1300	L/ 1400	L/ 1200

3. Koefisien lendutan maksimum jembatan komposit adalah 1/1000 panjang teoritis.

2.6.3 Stabilitas Konstruksi

Stabilitas 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:

1. Metode desain tegangan izin (*Allowable Stress Design*).
2. Metode faktor beban (*Limit State Design*).

2.6.4 Tinggi Jagaan (Tiang Tepi)

Untuk perencanaan jembatan di atas sungai, harus memperhitungkan tinggi jagaan minimal 1,00 meter dibawah gelagar jembatan paling bawah terhadap muka air banjir rencana.

2.7 Pembebanan pada Jembatan Kereta Api

Pembebanan yang digunakan pada perencanaan jembatan ini yaitu peraturan pembebanan kereta api. Standar pembebanan yang digunakan berdasarkan pada (SNI 1725-2016) Tentang Pembebanan untuk Jembatan dan (Peraturan Menteri Perhubungan No.60 Tahun 2012 tentang Perencanaan Teknis Jalur Kereta Api.

Standar ini menetapkan dan mengatur ketentuan pembebanan dan aksi-aksi lainnya yang akan digunakan dalam perencanaan teknis jalur kereta api.

2.7.1 Beban Primer

Beban yang merupakan beban utama dalam perhitungan tegangan pada perencanaan jembatan:

1. Beban mati (MS)

Beban mati atau beban sendiri adalah beban yang berasal dari jembatan itu sendiri yang ditinjau dan termaksud segala unsur tambahan tetap yang merupakan satu kesatuan dengan jembatan. Untuk menemukan besar seluruhnya di tentukan berdasarkan berat volume beban. Berdasarkan Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012, berat jenis bahan yang biasanya digunakan dalam perhitungan beban mati dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5: Berat jenis bahan.

No.	Bahan	Berat isi (kN/m ³)	Kerapatan massa (kg/m ³)
1	Lapisan permukaan beraspal (<i>bituminous wearing surfaces</i>)	22,0	2245
2	Besi tuang (cast iron)	71,0	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan (<i>compacted sand, silt or clay</i>)	17,2	1755
4	Kerikil dipadatkan (<i>rolled gravel, macadam or ballast</i>)	18,8-22,7	1920-2315
5	Beton aspal (<i>asphalt concrete</i>)	22,0	2245
6	Beton ringan (<i>low density</i>)	12,25-25,0	1250-2000
7	Beton $f_c' < 35$ MPa	22,0–25,0	2320
	$35 < f_c' < 105$ Mpa	$22+0,022 f_c'$	$2240+2,29 f_c'$
8	Baja (<i>steel</i>)	78,5	7850

Berdasarkan SNI 1725-2016 faktor beban yang digunakan untuk berat sendiri dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6: Faktor beban akibat berat sendiri.

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ^s_{MS})		Keadaan Batas Limit (γ^u_{MS})	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,0	1,1	
	Alumunium	1,0	1,1	0,90
Tetap	Beton Pracetak	1,0	1,2	0,85
	Beton dicor ditempat	1,0	1,3	0,75
	Kayu	1,0	1,4	0,7

Berdasarkan Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012, konstruksi jalan rel adalah spesifikasi bahan penyusun badan jalan jembatan rel kereta api menggunakan PM NO.60 Tahun 2012 beserta peraturan lain yang memberikan detail spesifik bahan penyusun badan jalan rel kereta api.

2. Beban mati tambahan (MA)

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

Dalam hal ini tentu, nilai faktor beban mati tambahan yang berbeda dengan ketentuan pada Tabel 2.7 boleh digunakan dengan persetujuan instansi yang berwenang. Hal ini bisa dilakukan apabila instansi tersebut melakukan pengawasan terhadap beban mati pada jembatan sehingga tidak melampaui selama umur jembatan.

Tabel 2.7: Faktor beban untuk beban mati tambahan (SNI 1725:2016).

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ^s_{MA})		Keadaan Batas Limit (γ^u_{MS})	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1,0	2,0	0,7

	Khusus (Terawasi)	1,0	1,4	0,8
--	-------------------	-----	-----	-----

Catatan : faktor beban sebesar 1,3 digunakan untuk berat utilitas.

3. 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 aksi rencana lainnya, maka pengaruh tersebut harus dimaksudkan dalam batas daya layan dan batas ultimit menggunakan faktor beban sesuai Tabel 2.8.

Tabel 2.8: 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

4. Beban kendaraan kereta api (beban gandar)

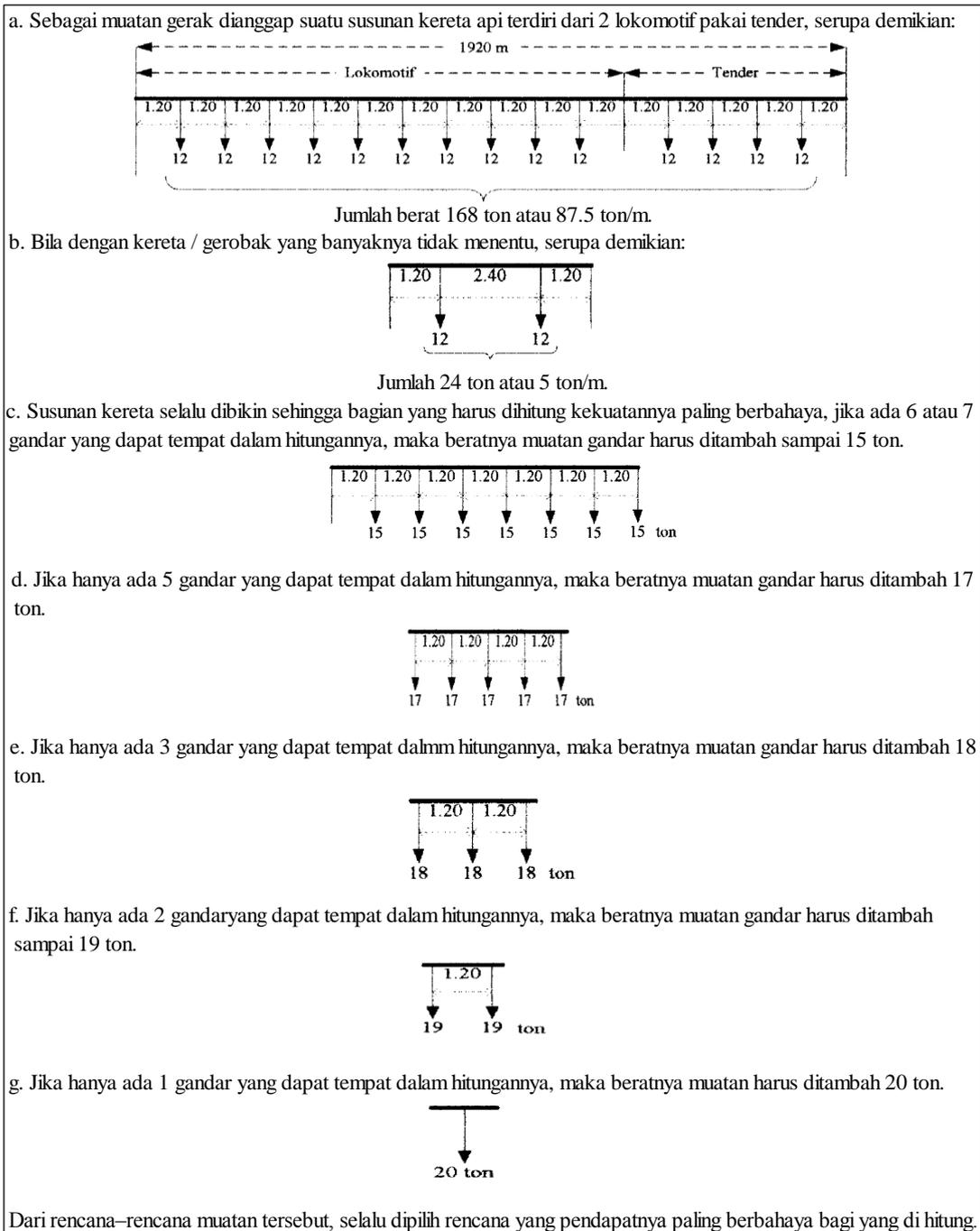
Semua beban yang berasal dari kereta api harus berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012. Perencanaan jalan rel merupakan suatu konstruksi yang direncanakan sebagai perasarana atau infrastruktur perjalanan kereta api. Struktur jalan rel merupakan suatu rangkaian yang menjadi suatu komponen yang saling mendukung sehingga mampu mendistribusikan beban kereta api secara menyeluruh dan rata terhadap tanah dasar tanpa merubah bentuk tanah (Rosyidi, 2015).

Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012. Beban gandar adalah beban yang diterima oleh jalan rel dari satu gandar, untuk lebar jalan

rel 1067 mm pada semua kelas jalur maksimum 18 ton dan beban gandar untuk lebar jalan rel 1435 mm pada semua kelas jalur maksimum sebesar 22.5 ton.

Beban hidup yang digunakan adalah beban gandar terbesar sesuai rencana sarana perkeretaapian yang dioperasikan atau skema dari rencana muatan 1991 (RM 21).

Untuk beban gandar sampai dengan 18 ton dapat digunakan skema rencana muatan 1921 (RM 21) sebagaimana terlihat pada Gambar 2.9 untuk beban gandar yang lebih besar dari 18 ton, rencana muatan disesuaikan dengan kebutuhan tekanan gandar.



Gambar 2.9: Skema pembebanan rencana muatan 1921 (RM 21).

5. 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:

$$a. \text{ Untuk rel pada balas, } i = 0.1 + \frac{25}{50+L} \quad (2.42)$$

b. Untuk rel pada perletakan kayu, $i = 0.2 + \frac{25}{50+L}$ (2.43)

c. Untuk rel secara langsung pada baja, $i = 0.3 + \frac{25}{50+L}$ (2.44)

6. Beban horizontal

a. Beban sentrifugal

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

$$\alpha = \frac{V^2}{127 R} \quad (2.45)$$

dimana:

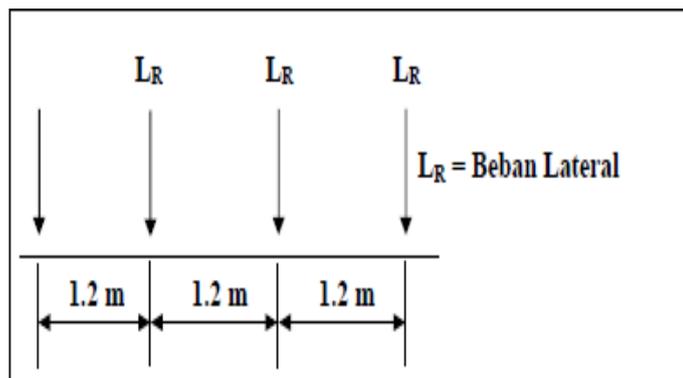
α = koefisien beban sentrifugal.

V = kecepatan maksimum kereta pada tikungan (km/jam).

R = radius tikungan (m).

b. Beban lateral kereta (LR)

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



Gambar 2.10: Beban lateral kereta (PM. Nomor 60 Tahun 2012).

c. Beban Pengereman dan Traksi

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

d. Beban Rel Panjang longitudinal (LF)

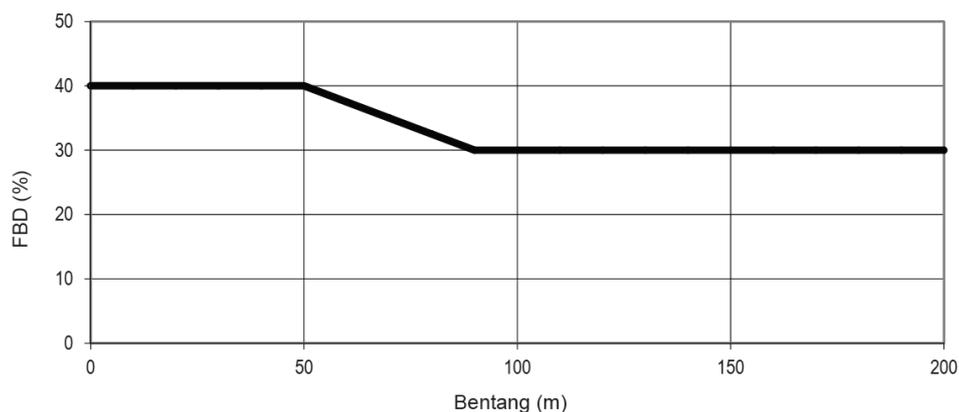
Beban rel panjang longitudinal pada dasarnya adalah 10 kN/m, maksimum 2000 kN.

7. Faktor Beban Dinamis

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

- a. Dinding penahan yang tidak memikul reaksi vertikal dari struktur atas jembatan.
- b. Komponen pondasi yang seluruhnya berada diwilayah permukaan tanah.



Gambar 2.11: Faktor beban dinamis untuk beban hidup kendaraan (SNI 1725:2016).

2.7.2 Beban Angin

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

1. 3.0 kN/m² pada areal proyeksi vertikal jembatan tanpa kereta di atasnya. Namun demikian 2.0 kN/m², pada areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin, tidak termasuk areal sistem lantai.
2. 1.5 kN/m² pada areal kereta dan jembatan, dengan kereta di atasnya, pengecualian 1,2 kN/m² untuk jembatan selain gelagar dek/rasuk atau jembatan

komposit, sedangkan 0.8 kN/m^2 untuk areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin.

2.7.3 Beban Akibat Tumbukan Kendaraan

Menurut buku perencanaan teknik jembatan Direktorat Jendral Bina Marga beban akibat tumbukan kendaraan pada pilar jembatan ditentukan sebesar 1000 kN pada arah tegak lurus jembatan sebesar 500 kN pada arah memanjang jembatan. Keduanya bekerja pada tinggi 1.8 m dari permukaan jalan dibawah jembatan.

2.7.4 Beban Gempa

Standar perencanaan jembatan terhadap beban gempa pada (SNI 2833:2016), standar ini menetapkan dan mengatur ketentuan perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan. Jembatan harus direncanakan agar memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh namun dapat mengalami kerusakan signifikan dan gangguan terhadap pelayanan akibat gempa dengan kemungkinan terlampaui 7% dalam 75 tahun. Penggantian secara parsial atau lengkap pada struktur diperlakukan 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 respon elastik (C_{sm}) dengan berat struktur ekuivalen yang kemudian dimodifikasi dengan faktor modifikasi respon (R) dengan formulasi Persamaan 2.46 sebagai berikut:

$$EQ = \frac{C_{sm}}{R_d} W_t \quad (2.46)$$

Keterangan:

EQ = Gaya gempa horizontal statis (kN).

C_{sm} = Koefisien respon gempa elastic.

R_d = Faktor modifikasi respon.

W_t = Berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup yang sesuai (kN).

Koefisien respon elastik C_{sm} diperoleh dari peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan sesuai dengan daerah gempa dan periode ulang gempa rencana. Koefisien percepatan yang diperoleh berdasarkan pada peta gempa dikalikan

dengan satu faktor amplifikasi sesuai dengan keadaan tanah sampai kedalaman 30 m dibawah struktur jembatan.

1. Bahaya Gempa

Bahaya gempa pada jembatan harus dikarakterisasi dengan menggunakan respon spektra percepatan dan faktor situs untuk kelas situs yang sesuai. Respon spectra percepatan dapat ditentukan baik dengan prosedur umum atau berdasarkan spesifik situs. Prosedur spesifik- situs jika terdapat kondisi sebagai berikut:

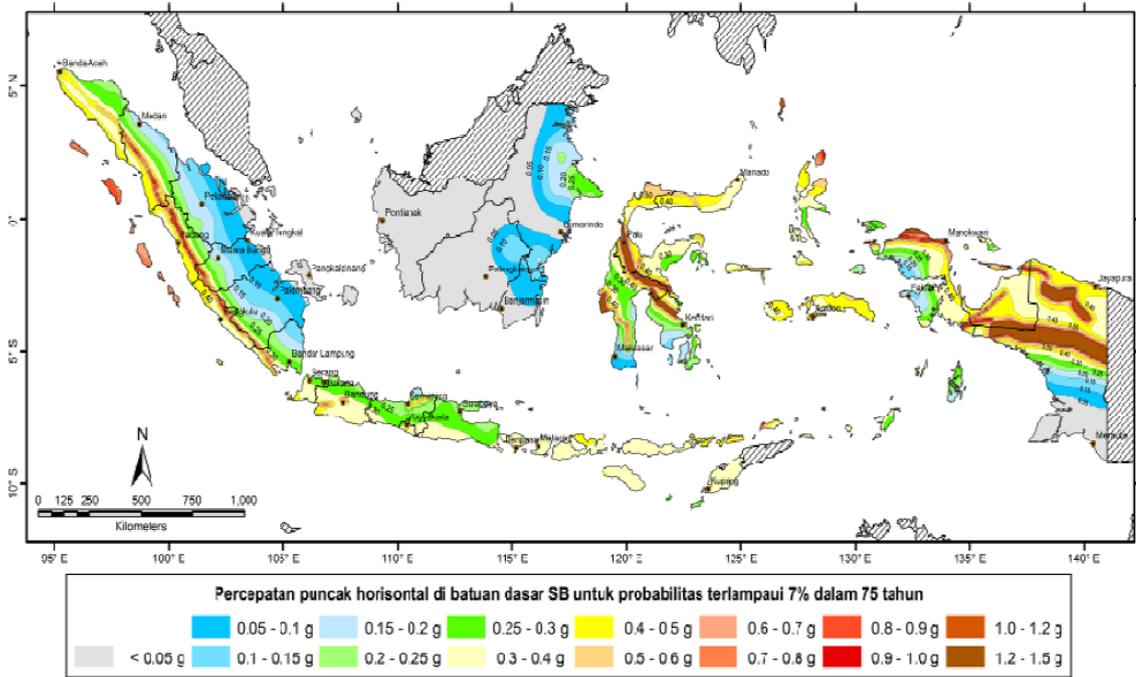
- a. Jembatan berada dalam jarak 10 km dari patahan aktif.
- b. Situs termasuk dalam kategori kelas F yaitu kelas situs lokasi yang membutuhkan penyelidikan geoteknik dan analisis respon dinamik spesifik. Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik seperti:
 - 1) Rentan dan berpotensi gagal terhadap beban gempa seperti likuifaksi, tanah lempung, sangat sensitif, tanah tersementasi lemah.
 - 2) Lempung organik tinggi atau gambut (dengan ketebalan > 3 m).
 - 3) Plastisitas tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan $PI > 75$).
 - 4) Lapisan lempung lunak/medium kaku dengan ketebalan $H > 35$ m).

2. Prosedur Umum

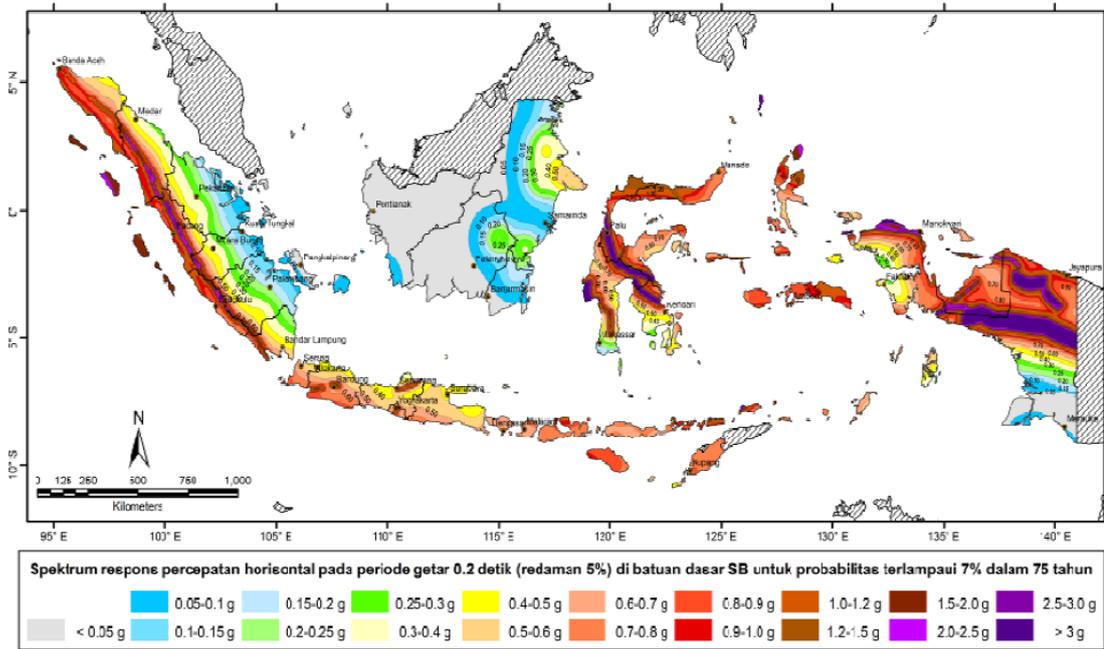
Peta gempa dalam ketentuan ini meliputi peta percepatan puncak di batuan dasar (*PGA*) dan respon spektra percepatan 0,2 detik dan 1 detik di batuan dasar yang mewakili *level hazard* (potensi bahaya gempa) gempa 1000 tahun dengan kemungkinan terlampaui 7% dalam 75 tahun. Dapat dilihat pada tabel

Tabel 2.9: Penjelasan peta gempa (SNI 2833:2016)

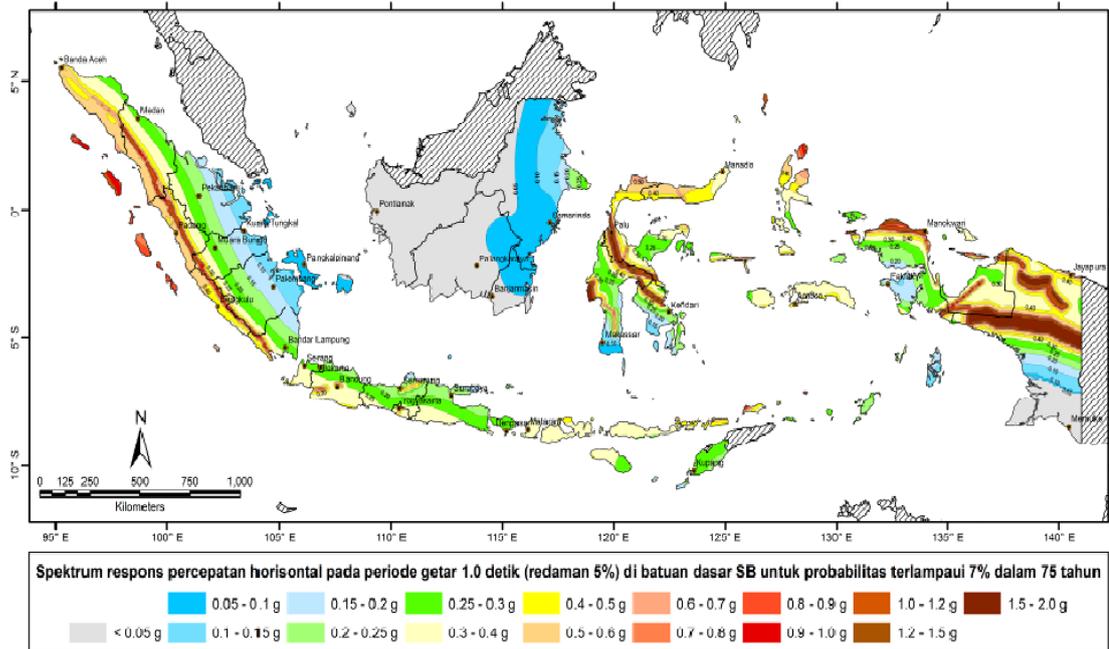
No	No Gambar	Level Gempa	Keterangan
1	Gambar 1	7% dalam 75 tahun (gempa \approx 1000 tahun)	Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA)
2	Gambar 2		Peta respons spectra percepatan 0,2 detik di batuan dasar (Ss)
3	Gambar 3		Peta respons spectra percepatan 1,0 detik di batuan dasar (S1)



Gambar 2.12: Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (SNI 2833:2016).



Gambar 2.13: Ss, Peta respon spektrum percepatan 0.2 detik di batuan dasar S_B untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (SNI 2833:2016).



Gambar 2.14: S₁, Peta respon spektrum percepatan 1 detik di batuan dasar S_B untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (SNI 2833:2016).

3. Penentuan faktor situs

Untuk penentuan respon 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 (F_{PGA}), faktor amplifikasi periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Tabel 2.10-2.11 memberikan nilai F_{PGA} , F_a , F_v untuk berbagai klasifikasi kelas situs berdasarkan jenis tanah.

Tabel 2.10: Faktor amplifikasi untuk PGA dan 0.2 detik (F_{PGA}/F_a).

Kelas situs	PGA<0,1 S _s ≤0,25	PGA=0,2 S _s =0,5	PGA=0,3 S _s =0,75	PGA=0,4 S _s =1	PGA>0,5 S _s ≥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

Catatan: Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linier.

Tabel 2.11: Faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v).

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

Catatan: Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linier.

Keterangan:

PGA = Percepatan puncak batuan dasar sesuai peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (Gambar 2.12)

$S1$ = Parameter respon spectra percepatan gempa periode pendek ($T=0.2$ detik) dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (Gambar 2.13)

SS = Lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisa respon spesifik spesifik pecepatan tanah puncak.

$$PGA_M = F_{PGA} \cdot PGA.$$

dimana:

PGA_M = Nilai percepatan tanah puncak yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs.

F_{PGA} = Nilai koefisien situs untuk PGA.

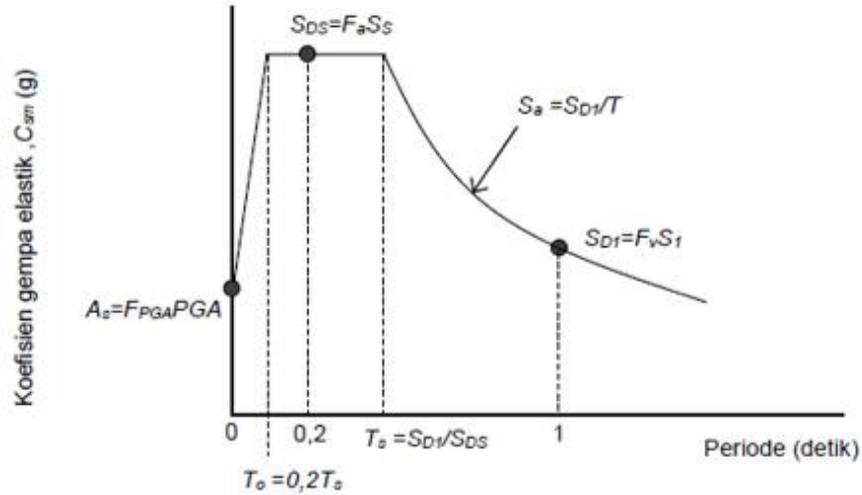
4. Karakteristik bahaya gempa

a. Respon spektrum rencana

Menurut teori dinamika struktur (*structural dynamics*) salah satu cara untuk menghitung/menentukan simpangan gaya-gaya dinamik pada struktur derajat kebebasan banyak (*Multi Degree of Freedom*) adalah dengan menggunakan respon spektrum.

Respon spektra adalah nilai yang menggambarkan respon maksimum dari sistem berderajat kebebasan tunggal pada berbagai frekuensi alami (periode alami) teredam akibat goyangan tanah disajikan dalam bentuk plot/grafik antara periode getar struktur T , lawan respons-respons maksimumnya untuk rasio redaman dan beban gempa tertentu. Untuk kebutuhan praktis, maka

respon spektra dibuat dalam bentuk respon spektra yang sudah disederhanakan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15: Respon spektrum desain (SNI 2833:2016).

Respon spektra di permukaan tanah ditentukan dari 3 (tiga) nilai percepatan puncak yang mengacu pada peta gempa Indonesia dengan probabilitas terlamapui 7% dalam 75 tahun (P_{GA} , S_s , S_1), serta nilai faktor amplifikasi F_{PGA} , F_a , dan F_v . Perumusan respon spektra adalah sebagai berikut:

$$A_s = F_{PGA} \times PGA \tag{2.47}$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s \tag{2.48}$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1 \tag{2.49}$$

b. Koefisien respon gempa elastic

Untuk periode lebih besar atau sama dengan T_0 , dan lebih kecil atau sama dengan T_s , respon spektra percepatan, C_{sm} adalah sama dengan S_{DS} . Untuk periode lebih besar dari T_s , koefisien respon gempa elastik (C_{sm}) didapatkan dari persamaan berikut:

$$C_{sm} = \frac{S_{D1}}{T} \tag{2.50}$$

$$T_0 = 0.2 \times T_s \tag{2.51}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{2.52}$$

Keterangan :

S_{DS} = adalah nilai spektra permukaan tanah dasar periode pendek

($T = 0.2$ detik).

S_{D1} = adalah nilai spektra permukaan tanah pada periode 1.0 detik.

5. Kategori kinerja seismik

Setiap jembatan harus ditetapkan dalam salah satu dari ke empat zona gempa berdasarkan spektra percepatan periode 1 detik (S_{D1}) sesuai Tabel 2.12. kategori tersebut menggambarkan variasi resiko seismik dan digunakan untuk penentuan zona gempa, dapat dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12: Zona gempa (SNI 2833:2016).

Koefisien percepatan (S_{D1})	Zona gempa
$S_{D1} \leq 0.15$	1
$0.15 < S_{D1} \leq 0.30$	2
$0.30 < S_{D1} \leq 0.50$	3
$S_{D1} > 0.50$	4

Catatan:

$$S_{D1} = F_v \times S_1$$

S_{D1} = adalah nilai spektra permukaan tanah pada periode 1.0 detik

F_v = adalah nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v)

S_1 = adalah parameter respon spektra percepatan gempa untuk periode 1.0 detik mengacu pada Peta Gempa Indonesia dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (Gambar 2.14).

6. Faktor modifikasi respon

Gaya gempa rencana pada bangunan bawah dan hubungan antara elemen struktur ditentukan dengan cara membagi gaya gempa elastis dengan faktor modifikasi respon (R). Sebagai alternatif penggunaan faktor R untuk hubungan struktur, sambungan monolit antara elemen struktur atau struktur, seperti hubungan

kolom ke fondasi telapak dapat direncanakan untuk menerima gaya maksimum akibat plastifikasi kolom, atau kolom majemuk yang berhubungan.

Struktur jembatan kereta api diklasifikasikan dalam kategori jembatan lainnya (*other bridge*). Berdasarkan tabel nilai R yang digunakan 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 2.13: Faktor modifikasi respon (R).

Bangunan bawah	Kategori kepentingan		
	Sangat penting	Penting	Lainnya
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

Tabel 2.14: Faktor modifikasi respon (R) untuk antar elemen struktur (SNI 2833:2016).

Hubungan elemen struktur	Semua kategori kepentingan
Bangunan atas dengan kepala jembatan	0,8
Sambungan muai dilatasi dengan bangunan atas	0,8
Kolom, pilar atau tiang dengan bangunan atas	1,0
Kolom, atau pilar dengan fondasi	1,0

2.7.5 Gaya Akibat Temperatur

1. 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 2.15. perbedaan antara temperatur minimum dengan temperatur maksimum dengan temperatur normal 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 2.15 Harus digunakan sebagai $T_{\text{mindesign}}$ dan $T_{\text{maxdesign}}$ pada Pers. 2.55.

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

$$\Delta T = \alpha L (T_{\text{max design}} - T_{\text{min design}}) \quad (2.53)$$

Tabel 2.15: 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
Tipe bangunan atas	Temperatur jembatan rata-rata minimum (1)	Temperatur jembatan rata-rata maksimum
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: Temperature jembatan rata-rata minimum bisa dikurangi 5 °C untuk lokasi yang terletak pada ketinggian lebih besar dari 500 m diatas permukaan laut.		

Tabel 2.16: Sifat bahan rata-rata akibat pengaruh temperatur.

Bahan	Koefisien perpanjangan akibat suhu (α)	Modulus Elastis (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. Temperatur Gradien

Variasi temperatur (EG) di dalama bangunan atas jembatan atau perbedaan temperatur disebabkan oleh pemanasan langsung dari sinar matahari di waktu siang

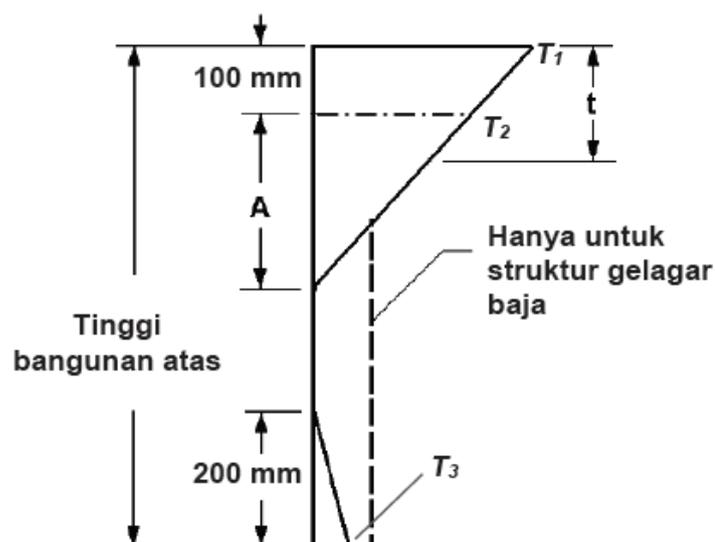
bagian atas permukaan lantai dan pelepasan kembali radiasi dari seluruh permukaan jembatan di waktu malam. Gradien temperatur nominal arah vertical untuk bangunan atas beton dan baja diberikan dalam Gambar 2.16. parameter yang digunakan mencakup T_1 , T_2 , dan T_3 dengan nilai sesuai pada Tabel 2.19. untuk tipe jembatan yang lebar diperlukam 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 pelat lantai.

Tabel 2.17: 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 2.16: Gradien temperatur vertikal pada bangunan atas beton dan baja.

2.8 Faktor Kombinasi Pembebanan

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

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

Gaya total terfaktor yang digunakan dalam perencanaan harus dihitung menggunakan Pers. 2.54 berikut ini:

$$Q = \sum \eta_i \gamma_i Q_i \quad (2.54)$$

Keterangan :

γ_i = faktor beban.

η_i = faktor pengubah respons.

Q_i = gaya atau beban yang bekerja pada jembatan.

Komponen dan sambungan pada jembatan harus memenuhi Pers. 2.54 untuk kombinasi beban-beban ekstrem seperti yang ditentukan pada setiap keadaan batas 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.
- Kuat IV = kombinasi pembebanan memperhitungkan kemungkinan adanya rasio beban mati dengan 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 Y_{EQ} yang memperhitungkan bekerjanya beban hidup pada saat gempa berlangsung harus ditentukan berdasarkan kepentingan jembatan.
- Ekstrem II = kombinasi pembebanan yang meninjau kombinasi antara beban hidup terkurangi dengan beban yang timbul akibat tumbukan kapal, tumbukan kendaraan, banjir atau beban hidrolika lainnya, kecuali untuk kasus pembebanan akibat tumbukan kendaraan (*TC*). Kasus pembebanan akibat banjir tidak boleh dikombinasi dengan beban akibat tumbukan kendaraan dan tumbukan kapal.
- Layan I = kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan operasional jembatan dengan semua beban mempunyai nilai nominal serta memperhatikan adanya beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam/kombinasi ini juga digunakan untuk lendutan pada gorong-gorong baja, pelat pelapis terowongan, pipa termoplastik serta untuk mengontrol lebar retak struktur bertulang, dan juga untuk analisis tegangan tarik pada penampang melintang jembatan beton segmental. Kombinasi pembebanan ini juga harus digunakan untuk investigasi stabilitas lereng.
- Layan II = kombinasi pembebanan yang ditunjukkan untuk investigasi stabilitas lereng.
- Layan III = kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada arah memanjang jembatan beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak dan tegangan utama tarik pada bagian badan dari jembatan beton segmental.
- Layan IV = kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada kolom beton pratekan dengan tujuan mengontrol besarnya retak.
- Fatik = kombinasi beban fatik dan fraktur sehubungan dengan umur fatik akibat induksi beban yang waktunya tak terbatas.

Faktor beban untuk setiap beban setiap kombinasi pembebanan harus diambil seperti terlihat pada Tabel 2.18.

Tabel 2.18: Kombinasi beban dan faktor beban (SNI 1725:2016).

Keadaan Batas	MS MA TA PR SL SH	TT TD TB TR TP	EU	E _{Ws}	E _{Wl}	BF	EU _n	TG	ES	GUNAKAN SALAH SATU		
										EQ	TC	TV
Kuat I	Y _P	1,8	1,0	-	-	1,0	0,5/1,2	Y _{TG}	Y _{ES}	-	-	-
Kuat II	Y _P	1,4	1,0	-	-	1,0	0,5/1,2	Y _{TG}	Y _{ES}	-	-	-
Kuat III	Y _P	-	1,0	1,4	-	1,0	0,5/1,2	Y _{TG}	Y _{ES}	-	-	-
Kuat IV	Y _P	-	1,0	-	-	1,0	0,5/1,2	-	-	-	-	-
Kuat V	Y _P	-	1,0	0,4	1,0	1,0	0,5/1,2	Y _{TG}	Y _{ES}	-	-	-
Extrem I	Y _P	Y _{EQ}	1,0	-	-	1,0	-	-	-	1,0	-	-
Extrem II	Y _P	0,5	1,0	-	-	1,0	-	-	-	-	1,0	1,0
Daya layan I	1,0	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0	1,0/1,2	Y _{TG}	Y _{ES}	-	-	-
Daya layan II	1,0	1,3	1,0	-	-	1,0	1,0/1,2	-	-	-	-	-
Daya layan III	1,0	0,8	1,0	-	-	1,0	1,0/1,2	Y _{TG}	Y _{ES}	-	-	-
Daya layan IV	1,0	-	1,0	0,7	-	1,0	1,0/1,2	-	1,0	-	-	-
Fatik (TD dan TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Catatan = Y_P dapat berupa Y_{MS}, Y_{MA}, Y_{TA}, Y_{PR}, Y_{PL}, Y_{SH} Tergantung beban yang ditinjau.
Y_{EQ} adalah faktor beban hidup kondisi gempa.

1. Evaluasi pada keadaan batas kekuatan

Perencanaan harus menyelidiki semua kombinasi pembebanan pada keadaan batas kekuatan yang diatur pada Tabel 2.18 yang dimodifikasi pada pasal ini. Faktor beban untuk berat sendiri struktur dan kelengkapan *MS* dan *MA*, tidak boleh diambil kurang dari 1,25 pada waktu melakukan pemeriksaan keadaan batas kekuatan kombinasi I, III, dan V selama masa konstruksi. Kecuali ditentukan lain oleh pemilik pekerjaan, faktor beban untuk beban pelaksanaan dan setiap efek dinamis yang terkait harus diambil kurang dari 1,5 untuk keadaan batas kekuatan kombinasi I. Faktor beban untuk beban angin pada Keadaan Batas Kekuatan Kombinasi III tidak boleh kurang dari 1,25.

2. Evaluasi lendutan pada keadaan batas layan

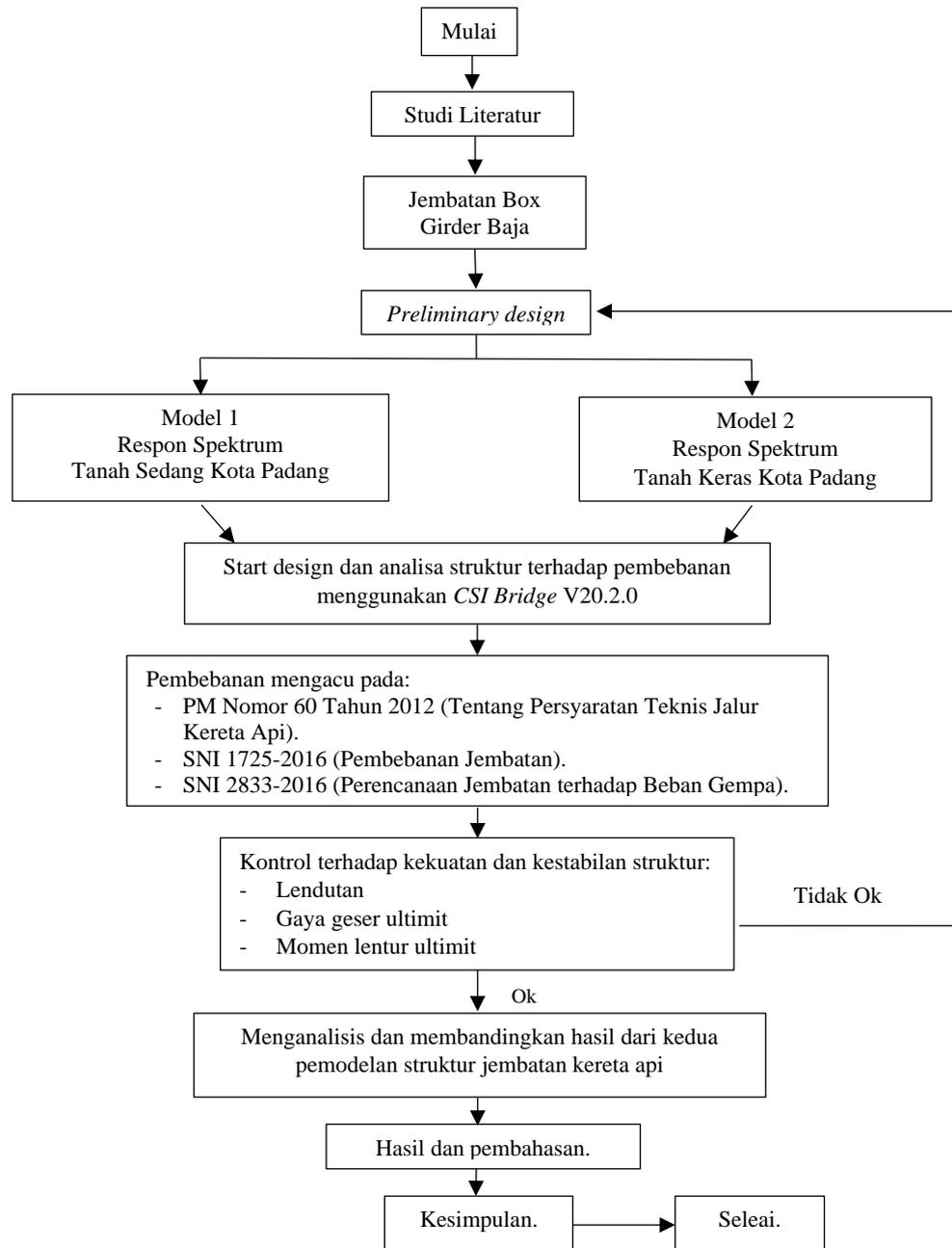
Jika di dalam kotak disebutkan bahwa harus dilakukan evaluasi lendutan selama masa pembangunan, maka harus digunakan keadaan batas daya layan kombinasi I untuk menghitung besarnya lendutan yang terjadi, kecuali ada ketentuan khusus yang merubah ketentuan ini. Beban mati akibat peralatan konstruksi harus dianggap sebagai bagian dari beban permanen dari beban hidup yang terjadi selama pelaksanaan harus dianggap sebagai bagian dari beban hidup. Besarnya lendutan yang diizinkan selama masa pembangunan harus dicantumkan di dalam dokumen kontrak.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bagan Alir

Langkah-langkah perencanaan struktur jembatan dapat dilihat pada bagan alir Gambar 3.1.



Gambar 3.1: Bagan alir perencanaan.

3.2 Metode Analisis

1. Start Analisis

Start analisis merupakan langkah awal dari analisis struktur jembatan. Dalam langkah awal ini kita melaksanakan perencanaan gambar struktur jembatan baja dengan mempertimbangkan berbagai peraturan yang harus dilaksanakan dalam desain suatu struktur jembatan.

2. Analisis Awal

Langkah selanjutnya dari gambar struktur jembatan yang ada kita bisa melanjutkan dengan analisis awal yaitu: pemilihan bahan struktur, tipe struktur jembatan, dimensi struktur dan pembebanan yang harus diterima struktur tersebut sesuai dengan peraturan yang berlaku.

3. Desain struktur *Box Girder*

Setelah diketahui kombinasi pembebanan dari jembatan kita bisa melakukan langkah selanjutnya yaitu: desain struktur *box girder* sesuai dengan bentuk dan mutu yang telah ditentukan serta penentuan respon spektrum pada struktur tanah yang berbeda.

4. Analisis kekuatan struktur *box girder*

Langkah ini mendesain *box girder* menggunakan software untuk melihat kekuatan struktur akibat beban yang diterima.

5. Hasil akhir analisis.

3.3 Uraian Metode

3.3.1 Data Perencanaan Struktur Jembatan

Data struktur jembatan yang digunakan dalam analisis ini antara lain:

1. Panjang struktur jembatan = 40 m.
2. Lebar struktur jembatan = 10 m.
3. Tebal slab = 0,2 m.
4. Lantai kendaraan = 2 jalur kereta api.
5. Tinggi tiang pembatas = 1 m.
6. Tipe rel = R60.
7. Kondisi tanah = sedang dan keras.

8. Letak geografis = kota Padang.

3.3.2 Data Material Struktur Jembatan

Data material yang digunakan dalam struktur jembatan ini antara lain:

1. Berat jenis baja = $78,5 \text{ kN/m}^3$
2. Berat jenis beton = 24 kN/m^3
3. Tegangan leleh baja (f_y) = BJ 50
4. Kuat tekan beton (f'_c) = 40 MPa
5. Modulus elastisitas balok beton (E_c) = $(4700 \times \sqrt{f'_c})$
= 29725,41 MPa

3.4 Konfigurasi Struktur Jembatan

Pada tugas akhir ini, struktur yang direncanakan adalah struktur jembatan dengan sistem komposit. Adapun model yang digunakan pada tugas akhir ini adalah Jembatan dengan 2 (dua) perbandingan respon spektrum pada struktur tanah sedang dan tanah keras.

3.5 Desain Box Girder Baja

Dalam perhitungan kekuatan gelagar *box girder* baja dilakukan dalam berbagai tahap yang dapat dilihat dalam uraian berikut ini.

3.5.1 Penentuan Dimensi *Box Girder* baja

Penentuan dimensi *box girder* sebaiknya memperhatikan berbagai variasi ketinggian *girder* dengan berat *girder* untuk menentukan dimensi yang ideal dan memberikan solusi yang ekonomis. Dalam kajian ini, untuk menentukan dimensi yang optimal dengan menggunakan AASHTO 2012 sebagai acuan, dan ditentukan sebagai berikut.

1. Ketinggian *girder*

Sesuai dengan pedoman AASHTO 2012 dalam artikel 2.5.2.6.3 yang menjelaskan bahwa untuk menentukan ketinggian *girder* minimum ditentukan

dengan menggunakan Tabel 2.5.2.6.3.1. panjang bentang yang digunakan adalah 40 m.

$$D_w = 0,33 L$$

$$D_w = 0,33 \times 40 = 1,3 \text{ m (minimum kedalaman girder yang digunakan)}$$

Dengan:

D = kedalaman girder.

L = panjang bentang jembatan.

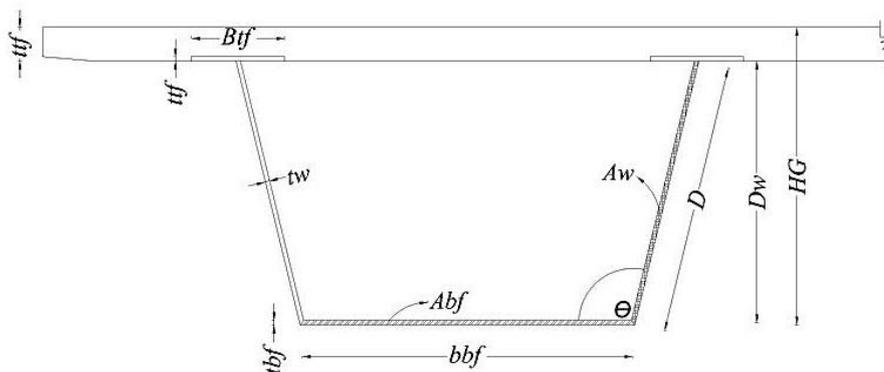
Ketinggian girder yang digunakan, $D_w = 1,5 \text{ m}$

Untuk menentukan ketebalan minimum pelat badan (t_w) digunakan persamaan:

$$\frac{D}{t_w} \leq 150$$

Dengan D adalah ketinggian pelat badan, dikarenakan *box girder* dalam bentuk trapesium yang pelat badannya memiliki kemiringan maksimal 1:4 sehingga digunakan $D = 1,55 \text{ m}$.

Dengan D adalah ketinggian pelat badan, dikarenakan *box girder* dalam bentuk trapesium yang pelat badannya memiliki kemiringan maksimal 1:4 seperti terlihat pada Gambar 3.2 dibawah ini, digunaka $D = 1,55 \text{ m}$.



Gambar 3.2: Data dimensi *box girder* dalam bentuk trapesium.

Ketebalan minimal pelat badan:

$$t_w = \frac{D}{150} = 0,0103 \text{ mm}$$

Menurut *AASHTO/NSBA Steel Bridge Collaboration Guidelines for Design and Constructibility*, menyarankan minimal ketebalan pelat badan sebesar 1/16 inchi atau 16 mm, namun ketebalan pelat yang digunakan $t_w = 25$ mm. Cek syarat:

$$\frac{D}{t_w} = \frac{1,55}{25} = 61,85 \leq 150$$

2. Pelat sayap atas

Untuk menentukan dimensi lebar pelat sayap atas digunakan persamaan:

a. Lebar sayap atas

Sesuai dengan pedoman *AASHTO* dalam artikel 6.11.2.2 digunakan persamaan:

$$b_{tf} \geq \frac{D}{6}$$

$$b_{tf} = \frac{1,55}{6} = 0,258 \text{ m.}$$

Digunakan persamaan yang lain:

$$b_{tf} \geq \frac{L}{85}$$

$$b_{tf} = \frac{40}{85} = 0,471 \text{ m.}$$

b. Tebal pelat sayap atas

Ketebalan minimal pelat sayap atas digunakan persamaan:

$$t_{tf} \geq 1,1 t_w$$

$$t_{tf} = 1,1 t_w = 1,1 \times 25 = 27,5 \text{ mm.}$$

Menurut *AASHTO/NSBA Steel Bridge Collaboration Guidelines for Design and Constructibility*, menyarankan minimal ketebalan pelat sayap atas sebesar 1 inchi atau 25 mm namun tebal pelat sayap yang digunakan $t_{tf} = 28$ mm. Cek syarat:

$$\frac{b_{tf}}{2t_{tf}} \leq 12$$

$$\frac{b_{tf}}{2t_{tf}} = \frac{0,55}{2 \times 0,028} = 9,821 \leq 12$$

Data dimensi *box girder*:

1. Kedalaman <i>web</i> ,		D_w	= 1,5 m.
2. Sudut inklasi <i>web</i> ,	θ		= 14,03°.
3. Kedalaman <i>web</i> inklasi,	D		= 1,55 m.
4. Ketebalan pelat <i>web</i> ,	t_w		= 0,025 m.
5. Luas pelat <i>web</i> , m ² .		A_w	= 0,077
6. Ketebalan sayap atas,	t_{tf}		= 0,028 m.
7. Lebar sayap atas,		b_{tf}	= 0,55 m.
8. Luas sayap atas, m.		A_{tf}	= 0,0308
9. Ketebalan sayap bawah,	t_{bf}		= 0,028 m.
10. Lebar sayap bawah,	b_{bf}		= 1,95 m.
11. Luas sayap bawah,	A_{bf}		= 0,0546 m ² .
12. Tinggi total <i>girder</i> ,	H_G		= 1,556 m.
13. Lebar pelat atas,		b_{ts}	= 10 m.
14. Ketebalan pelat atas,	t_{tf}		= 0,2 m.
15. Luas total <i>girder</i> baja,	A_s		= 0,163 m ² .

Design parameter:

1. Kuat tekan beton, MPa.		f'_c	= 40
2. Modulus elastisitas beton,	E_c		= 29725,42 MPa.
3. Tegangan leleh baja,	f_y		= 390 MPa.
4. Modulus elastisitas baja,	E_s		= 200000 MPa.

3.5.2 Dimensi Kolom (*Pier*)

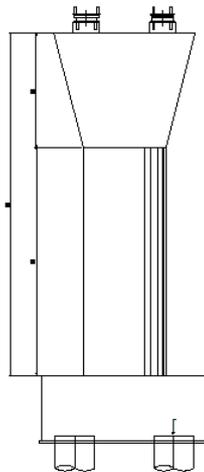
Pada Tugas Akhir ini digunakan *pier* berbentuk persegi dan memiliki *pier head* yang berbentuk trapesium seperti gambar 3.3. berikut dimensi kolom *pier* dan *pier head* yang direncanakan.

1. Dimensi *pier*:
 - a. H1 = 9 m.
 - b. H2 = 6,6 m.

- c. Tebal = 2,5 m.
- d. Lebar = 3,2 m.

2. Dimensi *pier head*:

- a. H1 = 9 m.
- b. H3 = 2,5 m.
- c. Tebal = 2,5 m.
- d. Lebar bawah = 3,2 m.
- e. Lebar atas = 6,6 m.



Gambar 3.3: Potongan melintang *pier*.

3.5.3 Perletakan (*Bearing*)

Pada perencanaan ini digunakan spesifikasi perletakan yang mengacu pada *bridge bearing* bs 5400, seperti pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1: Spesifikasi *elastomeric bearing pad* (CCL Bridge Bearings).

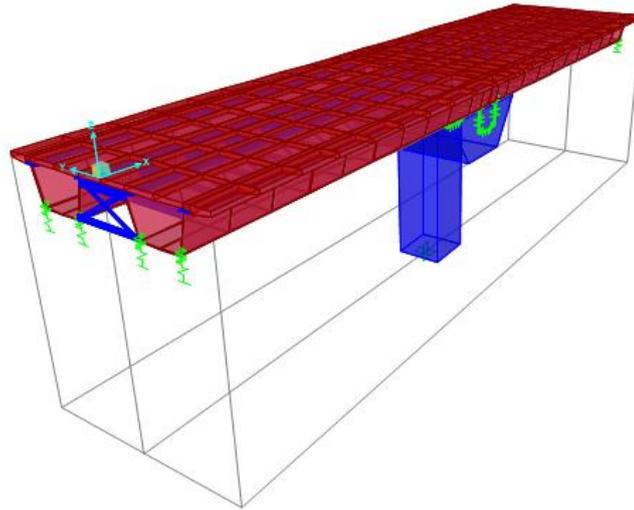
Dimensi	Tinggi (mm)	Berat (Kg)	Kc (kN/mm)	Ks (kN/mm)	SLS Vertical loads (kN)
600 × 450	24	21,19	9658	15,19	7181

3.6 Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur menggunakan bantuan program *software* pada komputer. Pada tugas akhir ini memiliki satu pemodelan 2 tinjauan respon spektrum pada situs

tanah sebagai pembanding kekuatan dan aspek lain sesuai tujuan dari tugas akhir ini.

Struktur dimodelkan menggunakan *box girder* sebagai struktur atas dengan bentang 40 m, *elestomeric bearing pads* sebagai tumpuannya dan *pier* persegi dengan ketinggian total 9 m dengan geometri lurus seperti terlihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4: Tampak 3D struktur jembatan kereta api.

3.7 Pembebanan

3.7.1 Berat Jenis Bahan

Pada umumnya berat jenis bahan yang digunakan dalam perencanaan jembatan seperti terlihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2: Berat isi untuk beban mati (SNI 1725:2016).

No.	Bahan	Berat isi (kN/m ³)	Kerapatan massa (kg/m ³)
1	Lapisan permukaan aspal (<i>bituminous wearing surfaces</i>)	22,0	2245
2	Besi tuang (cast iron)	71,0	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan (<i>compacted sand, silt or clay</i>)	17,2	1755
4	Kerikil di padatkan (<i>rolled gravel, macadam or ballast</i>)	18,8-22,7	1920-2315
5	Beton aspal (<i>asphalt concrete</i>)	22,0	2245

6	Beton ringan (<i>low density</i>)	12,25-25,0	1250-2000
7	Beton $f_c' < 35$ Mpa	22,0–25,0	2320
	$35 < f_c' < 105$ Mpa	22+0,022 f_c'	2240+2,29 f_c'
8	Baja (<i>steel</i>)	78,5	7850

3.7.2 Analisa Pembebanan

Pembebanan pada jembatan terdiri dari:

1. Beban sendiri (beban mati).
 - a. *Box girder*.
 - b. Dinding tepi/pembatas.
2. Beban mati tambahan
 - a. Bantalan.
 - b. Rel.
 - c. *Ballast*.
 - d. Genangan Air.
3. Beban Lajur
4. Beban Kejut
5. Beban Pengereman
6. Beban Angin
 - a. Beban angin struktur.
 - b. Beban angin kendaraan.
7. Beban Gempa

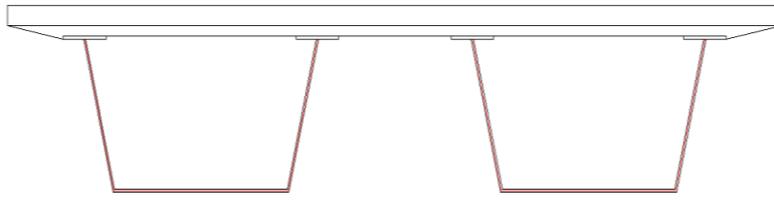
3.8 Perhitungan Beban

Pembebanan dalam perencanaan jembatan komposit box girder baja ini dihitung dengan pedoman PM 60 Tahun 2012 dan AASHTO 2012.

3.8.1 Beban Sendiri (MS)

1. Berat sendiri *box girder*

Data potongan melintang box girder yang akan digunakan perencanaan jembatan *box girder* baja untuk Kereta api pada daerah Kota Padang, seperti terlihat pada Gambar 3.5 dibawah ini:

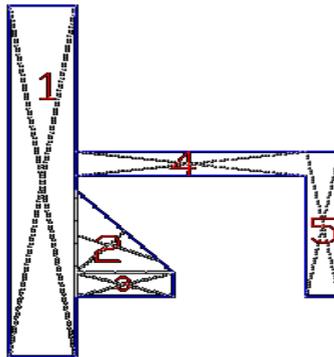


Gambar 3.5: Potongan melintang *box girder*.

Berat beban baja struktural *box girder* baja:

$$\begin{aligned}
 w_s &= 2 A_{sec} \gamma_s \\
 &= 2 \times 0,1627 \times 78,5 \\
 &= 2,5545 \text{ kN/m.}
 \end{aligned}$$

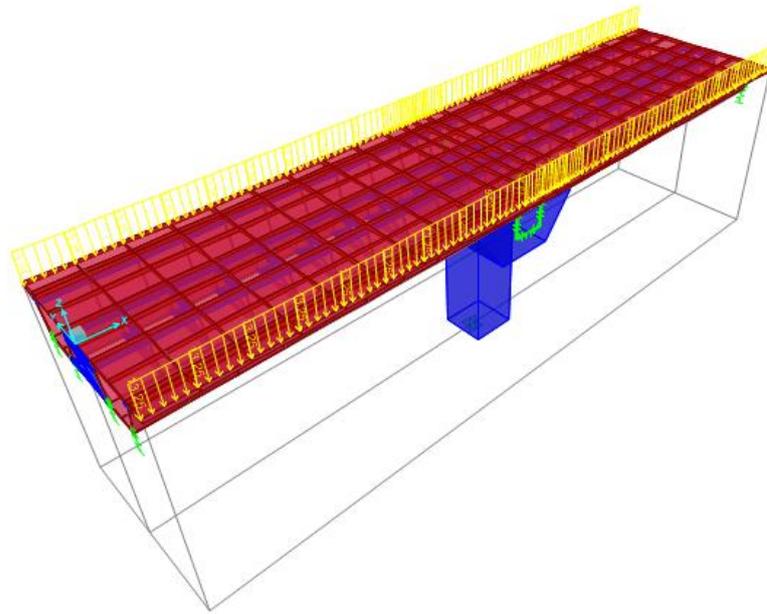
2. Dinding pembatas/tepi.



Gambar 3.6: Dimensi dinding pembatas.

Tabel 3.3: Berat dinding tepi atau pembatas.

No	Ukuran			BJ (kN/m ³)	Berat (kN/m)
	Lebar (m)	Tinggi (m)	Luas (m ²)		
1	0.2	1.45	0.29	24	6.96
2	0.3	0.34	0.102	24	2.448
3	0.3	0.1	0.03	24	0.72
4	0.7	0,1	0.07	24	1.68
5	0.1	0.6	0.06	24	1.44
Barat Total 1 Penampang (kg/m)					13.248
2 Penampang (kg/m)					26.496



Gambar 3.7: *Input beban dinding tepi pada software.*

$$\begin{aligned}
 \text{Maka, total beban mati} &= \text{berat } \textit{box girder} + \text{berat tiang sandaran} \\
 &= 2,5545 + 0,6624 \\
 &= 3,22 \text{ kN/m.}
 \end{aligned}$$

3.8.2 Beban Mati Tambahan (MA)

1. Berat bantalan

Dimensi bantalan untuk lebar jalan rel 1435 mm:

- a. Panjang = 2.44 m.
- b. Lebar = 0.33 m.
- c. Tinggi max = 0.22 m.
- d. Bj. Beton = 24 kN/m³.

$$\begin{aligned}
 \text{e. Berat bantalan} &= t \times p \times t \times \text{berat jenis.} \\
 &= 0.22 \times 0.33 \times 2.44 \times 24 = 4.251456 \\
 &\text{kN/m.}
 \end{aligned}$$

f. Jarak antar bantalan = 0,6 m.

g. Banyak bantalan = 40/0,6 = 67 bantalan.

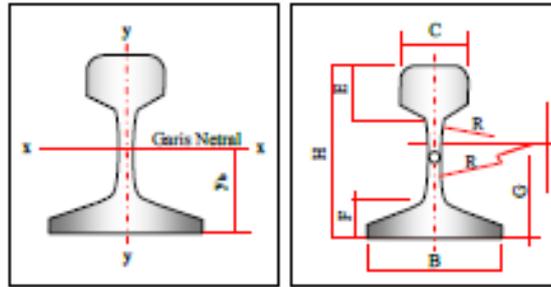
Untuk jarak bantalan 0,6 m dan lebar bantalan 0,33 m dapat digunakan 2 bantalan permeter nya. Maka didapat berat bantalan permeternya adalah $2 \times 4.251 = 8.502912$ kN/m.

2. Berat rel

Berat rel tipe R60 diperoleh sesuai dari PM. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4: Tipe rel dan dimensi penampang rel (PM. Nomor 60 Tahun 2012).

Besaran Geometrik Rel	Tipe Rel			
	R42	R50	R54	R60
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)	169	1960	2346	3055
Y _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
A (cm ²)	= luas penampang			
W (kg/m)	= berat rel permeter			
I _x (cm ⁴)	= momen inersia terhadap sumbu x			
A (cm ²)	= luas penampang			
Y _b (mm)	= jarak tepi bawah rel ke garis netral			



Gambar 3.8: Dimensi rel (PM Nomor 60 Tahun 2012).

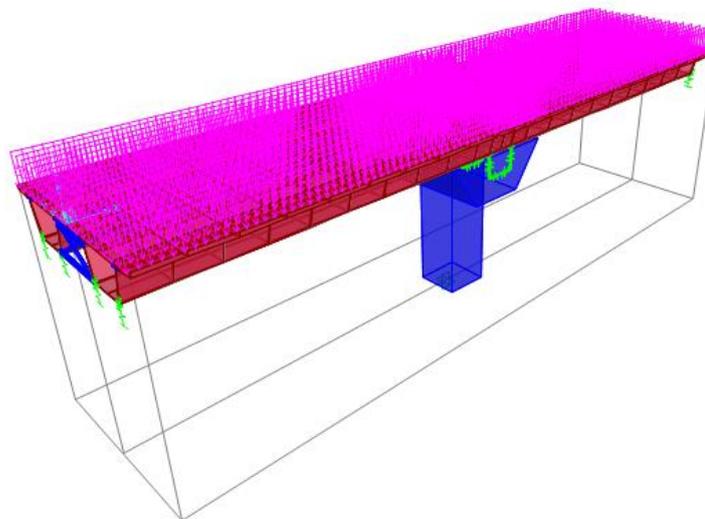
Didapat untuk berat rel tipe R60 adalah 60,34 kg/m untuk satu penampang, dalam perencanaan satu jalur memiliki 2 penampang rel maka berat rel $60.34 \times 2 = 120.68$ kg/m atau 1.18346 kN/m untuk rel satu jalur. Untuk berat rel 2 jalur adalah $= 1,18346 \times 2 = 2.36693$ kN/m.

3. Berat balas krikil

- a. Tebal = 0.5 m.
- b. Lebar = 8 m.
- c. Bj kerikil = 20 kN/m^3 .
- d. Berat kerikil ($t \times l \times B_j$) = 80 kN/m^3 .

4. Berat genangan air

- a. Bj Air = 9.8.
- b. Tinggi genangan air = 0.05 m.
- c. Lebar = 9.6.
- d. Berat genangan air ($t \times l \times B_j$) = 4.704 kN/m.



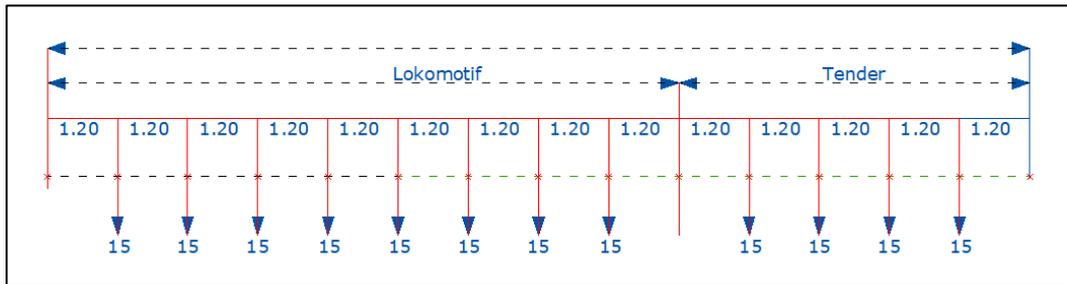
Gambar 3.9: *Input* beban genangan air pada *software*.

Dari perhitungan di dapat total berat akibat beban mati tambahan yaitu:

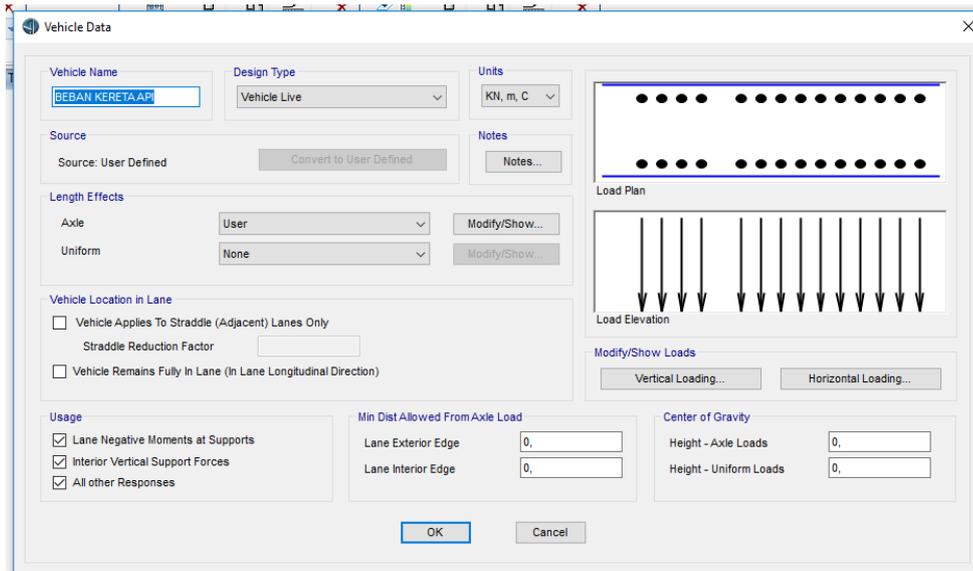
$$\begin{aligned} \text{Total B.M tambahan} &= \text{berat bantalan} + \text{berat rel} + \text{ballast} \\ &= 8.50291 + 2.36693 + 80 \\ &= 90,86985 \text{ kN/m.} \end{aligned}$$

3.8.3 Beban Hidup (TD)

Dilihat dari skema pembebanan rencana muatan 1921 PM. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api untuk beban gandar sampai 22,5 ton. Dimensi kereta api dan dalam perencanaan ini digunakan beban gandar sebagai berikut:



Gambar 3.10: Rencana muatan kereta api yang disesuaikan dengan tekanan gandar maksimum 22,5 ton.



Gambar 3.11: Pemodelan beban hidup kereta pada *software*.

3.8.4 Beban kejut

Sesuai dengan peraturan pembebanan muatan 1921 PM. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, beban kejut diperoleh dengan mengalikan faktor i terhadap beban kereta.

$$i = 0.1 + \frac{22,5}{50+L}$$

$$= 0.1 + \frac{22,5}{50+40} = 0.35.$$

$$\text{Beban kejut} = (\text{koef. faktor } i \times \frac{\text{beban kereta api}}{\text{pjpg. bentang kereta api}} \times \text{banyak jalur})$$

$$= 0.35 \times \frac{22,5}{40} \times 2$$

$$= 0.39 \text{ ton.}$$

3.8.5 Beban Pengereman (TB)

Berdasarkan PM No. 69 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, beban pengereman dan traksi masing-masing adalah 25% dari beban kereta, bekerja pada pusat gaya berat kereta ke arah rel (secara longitudinal).

$$25\% \times \text{beban kereta} = 25\% \times 22,5 \text{ ton}$$

$$= 5.63 \text{ ton}$$

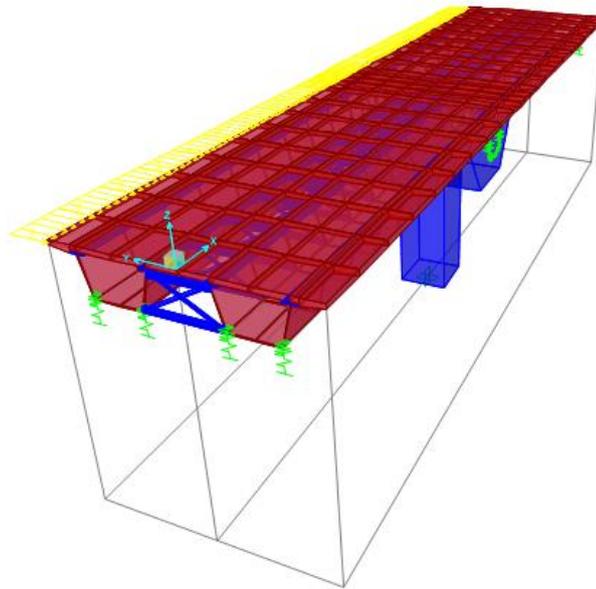
Untuk mendapatkan nilai beban rem maka nilai :

$$\begin{aligned}
 \text{beban kejut} + \text{beban rem} &= 0.39 + 5.63 \\
 &= 6.015 \text{ ton untuk 2 kereta} \\
 &= 3.0075 \text{ ton untuk 1 kereta.}
 \end{aligned}$$

3.8.6 Beban Angin

1. Beban angin pada struktur (E_{ws})

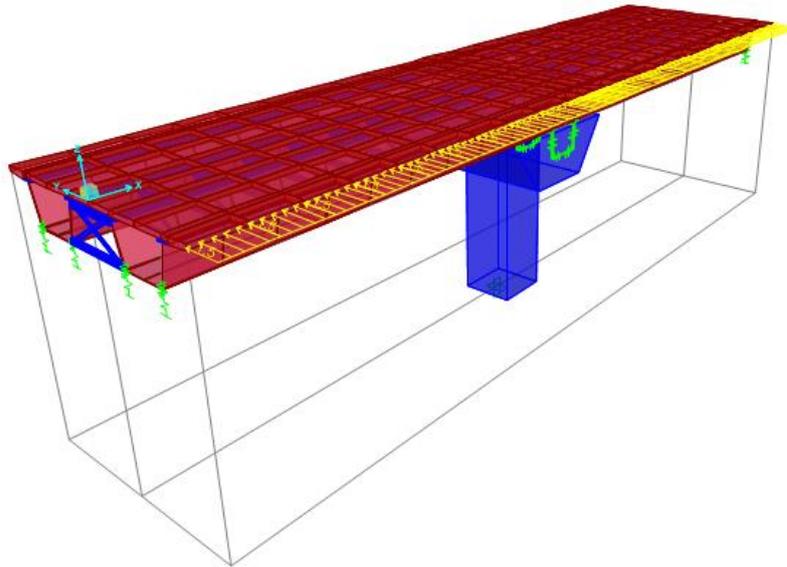
Sesuai peraturan pembebanan muatan 1921 PM. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api beban angin pada struktur 3.0 kN/m^2 pada areal proyeksi vertikal jembatan tanpa kereta di atasnya. Namun demikian, 2.0 kN/m^2 , pada areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin, tidak termasuk areal sistem lantai. Seperti terlihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12: *Input* beban angin struktur pada *software*.

2. Beban angin pada kendaraan (E_{wl})

Sesuai peraturan pembebanan muatan 1921 PM. 60 tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api beban angin bekerja pada struktur secara merata sebesar $1,5 \text{ kN/m}^2$ pada areal kereta jembatan dengan kereta di atasnya, pengecualian 1.2 kN/m^2 untuk jembatan selain gelagar, seperti terlihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13: *Input* beban angin kendaraan pada *software*.

3.8.7 Temperatur Gradient (TG)

Temperatur gradient (TG) ditunjukkan pada Tabel 3.5:

Tabel 3.5 : Parameter T1 dan T2.

Lokasi jembatan	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)
<500 m di atas permukaan laut	12	8	0<T ₃ <5
>500 m di atas permukaan laut	17	11	

Berdasarkan Tabel 3.5 dengan lokasi jembatan berada >500 m diatas permukaan laut maka *input* temperatur gradien dapat dilihat seperti Gambar 3.14.

Bridge Temperature Gradient Data

Temperature Gradient Name: Temperatur

Units: KN, m, C

Temperature Gradient Type: AASHTO Default, Chinese JTG D60 Default, User

Temperature Difference Data

Number of Specified Distances: 4

This Distance is A as Specified in AASHTO: d3

This Distance May Vary: d3

Include These Temperature Difference Values: Positive and Negative

d1	0,1	T1 Positive	12,	T1 Negative	-9,
d2	A in AASHTO	T2 Positive	8,	T2 Negative	-2,34
d3	May Vary	T3 Positive	0,	T3 Negative	0,
d4	0,2				

From AASHTO Figure 3.12.3-2

Diagram showing Depth of Superstructure, Steel Girder Structures Only, and temperature gradient points T1, T2, T3 at distances d1, d2=A, d3, d4.

Buttons: OK, Cancel

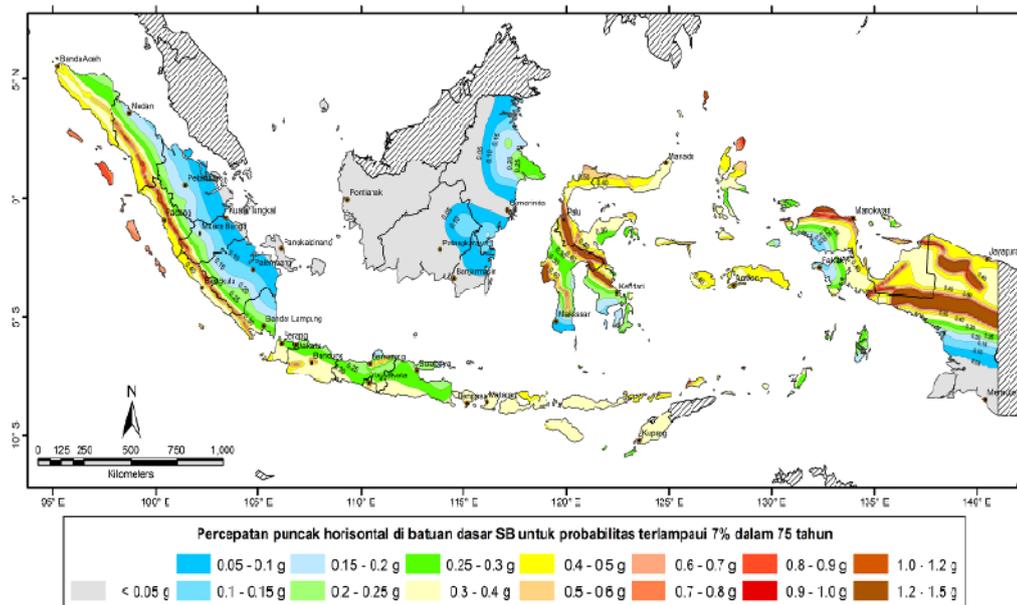
Gambar 3.14: *Input* temperatur gradien pada *software*.

3.8.8 Analisis Respon Spektrum

Metode yang digunakan dalam perhitungan beban gempa ini yaitu metode analisis respon spektrum. Beban gempa diperhitungkan berdasarkan SNI 2833-2016 dengan probabilitas 7% dalam 75 tahun periode ulang 1000 tahun. Berdasarkan peraturan SNI 2833-2016 Perencanaan Jembatan untuk Beban Gempa, perencanaan beban rencana akibat gempa minimum ditentukan beberapa hal:

1. Nilai PGA

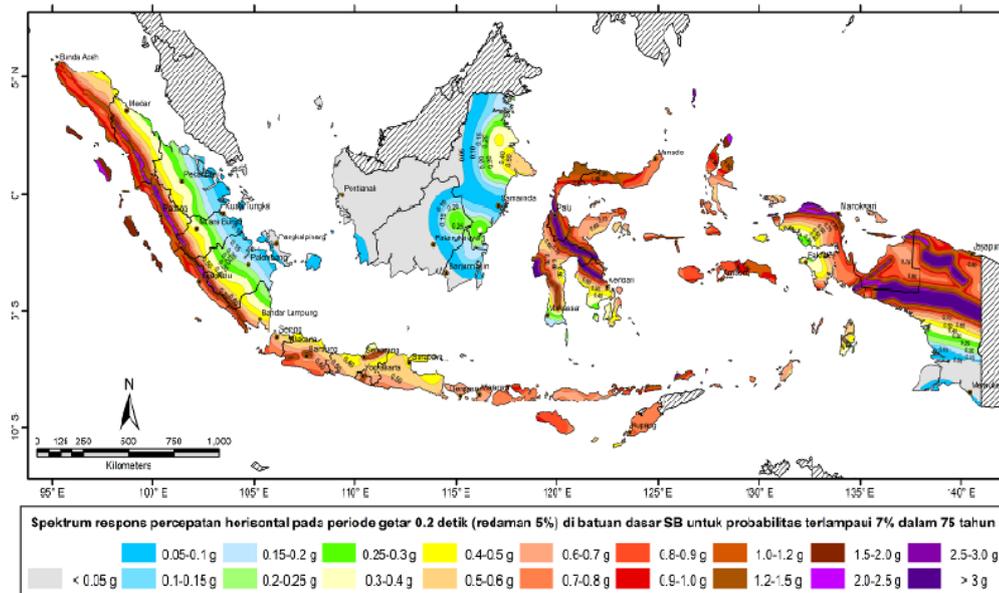
Berdasarkan Gambar 3.14 nilai PGA adalah 0.45 g.



Gambar 3.15: Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun.

2. Nilai SS (respon spektra 0.2 detik)

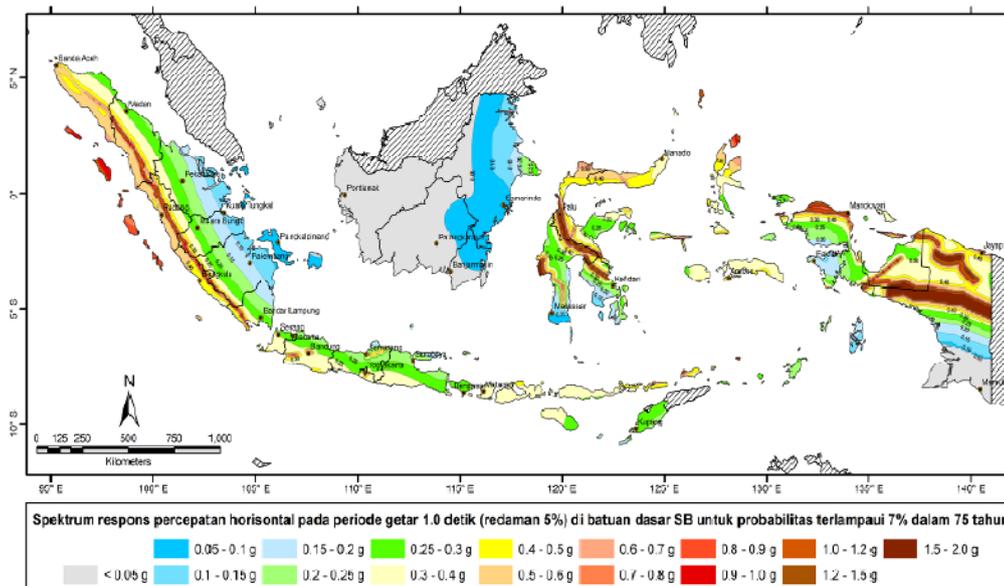
Berdasarkan Gambar 3.15 menentukan lokasi yaitu di kota Padang pada peta respon spektra percepatan 0.2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun maka nilai SS adalah 0.95 g.



Gambar 3.16: Peta respon spektra percepatan 0,2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun.

3. Nilai S1 (respon spektra 1 detik)

Berdasarkan Gambar peta 3.17 menentukan lokasi yaitu di kota Padang respon spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun maka nilai S1 adalah 0.55 g.



Gambar 3.17: Peta respon spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun.

Tabel 3.6: Zona gempa

Koefisien Percepatan SD_1	Zona gempa
$SD_1 \leq 0,15$	1
$0,15 < SD_1 \leq 0,30$	2
$0,30 < SD_1 \leq 0,50$	3
$SD_1 > 0,50$	4

4. Menentukan koefisien situs F_{pga} , F_a , dan F_v .

Berdasarkan nilai PGA , S_1 , dan S_s yang telah diperoleh di pada Tabel faktor amplifikasi periode 0 detik dan 0,2 detik (F_{pga}/F_a) dan tabel nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v) untuk perencanaan 2 situs tanah yaitu:

a. Perencanaan pada situs tanah sedang:

$$\text{Nilai } F_{pga} \text{ } 0,4-0,5 = 0.45$$

$$\text{Nilai } S_s \text{ } 0,9-1 = 0.95$$

$$\text{Nilai } F_v \text{ } 0,5-0,6 = 0.55$$

1) Menentukan faktor amplifikasi

$$\text{Koefisien situs } PGA/f_a = 1,05 \text{ (interpolasi)}$$

$$\text{Koefisien situs } f_v = 1,65 \text{ (interpolasi)}$$

2) Menentukan parameter spektra A_s , SD_s , dan SD_1 untuk tanah keras:

$$\begin{aligned} A_s &= F_{pga} \times PGA \\ &= 0,45 \times 1,05 = 0,4725 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SD_s &= F_a \times S_s \\ &= 1,05 \times 0,95 = 0,9975 \end{aligned}$$

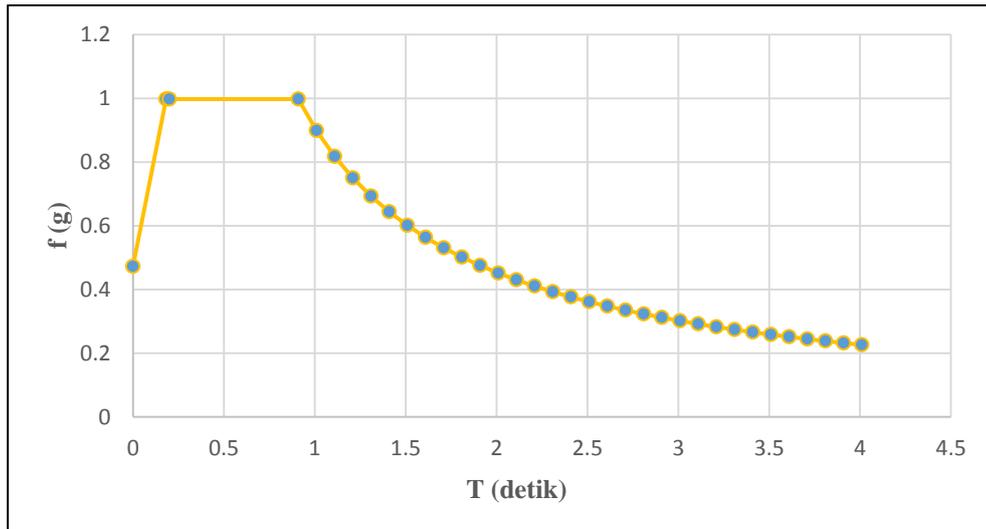
$$\begin{aligned} SD_1 &= F_v \times S_1 \\ &= 1,65 \times 0,55 = 0,9075 \end{aligned}$$

Berdasarkan spektra rencana percepatan periode 1 detik (SD_1) $> 0,50$ struktur jembatan berada pada zona 4 dapat dilihat pada Tabel 3.6.

3) Menentukan kelas situs T_s dan T_o

$$\begin{aligned} T_s &= SD_1/SD_s \\ &= 0,9075 : 0,9975 = 0,9099774 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_o &= 0,2 \times T_s \\ &= 0,2 \times 0,9099774 = 0,181955 \end{aligned}$$



Gambar 3.18: Grafik respon spektrum untuk tanah sedang.

b. Perencanaan pada situs tanah sedang

Nilai F_{pga} 0,4-0,5 = 0.45

Nilai S_s 0,9-1 = 0.95

Nilai F_v 0,5-0,6 = 0.55

1) Menentukan faktor amplifikasi pada situs tanah keras:

Koefisien situs $PGA/f_a = 1$ (interpolasi)

Koefisien situs $f_v = 1,45$ (interpolasi)

2) Menentukan parameter spektra A_s , SD_s , dan SD_1 untuk tanah keras:

$$A_s = F_{pga} \times PGA$$

$$= 0,45 \times 1 = 0,45$$

$$SD_s = F_a \times S_s$$

$$= 1 \times 0,95 = 0,95$$

$$SD_1 = F_v \times S_1$$

$$= 1,45 \times 0,55 = 0,7975$$

Berdasarkan spektra rencana percepatan periode 1 detik (SD_1) > 0,50 struktur jembatan berada pada zona 4 dapat dilihat pada Tabel 3.6.

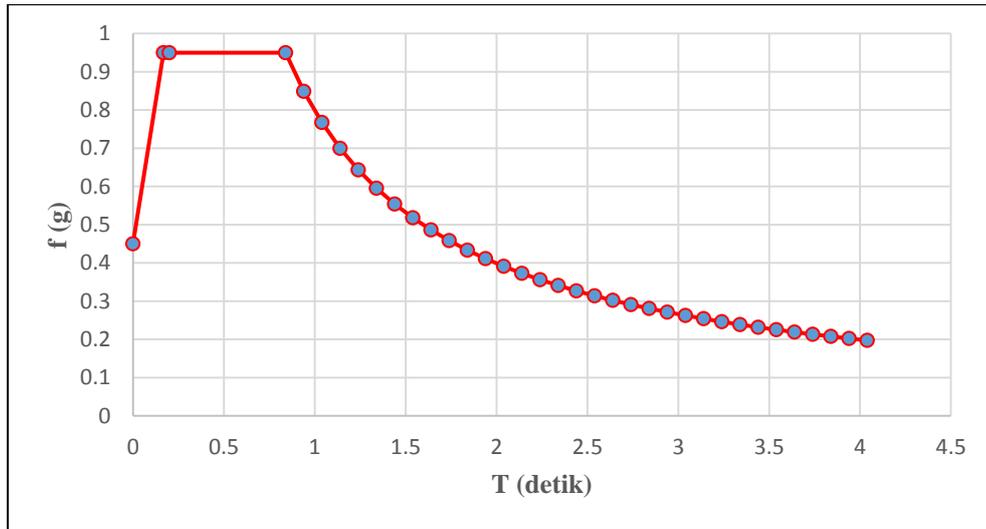
1) Menentukan kelas situs T_s dan T_o

$$T_s = SD_1 / SDS$$

$$= 0,7975 : 0,95 = 0,839474$$

$$T_o = 0,2 \times T_s$$

$$= 0,2 \times 0,839474 = 0,167895$$



Gambar 3.19: Grafik respon spektrum untuk tanah keras.

3.9 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan yang digunakan dalam perhitungan pada perencanaan jembatan kereta api *box girder* baja, yaitu:

$$\text{Kuat I} = 1,25 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1,8 \text{ TB} + 1,8 \text{ TT} + 1 \text{ PL.}$$

$$\text{Kuat II} = 1,25 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1,4 \text{ TB} + 1,4 \text{ TT} + 1 \text{ PL.}$$

$$\text{Kuat III} = 1,25 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1,4 \text{ EW}_s + 1 \text{ PL.}$$

$$\text{Kuat IV} = 1,25 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1 \text{ PL.}$$

$$\text{Kuat V} = 1,25 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 0,4 \text{ EW}_s + 1 \text{ EW}_L + 1 \text{ PL.}$$

$$\begin{aligned} \text{Ekstrem I X} &= 1,10 \text{ MA} + 1,10 \text{ MA} + 0,5 \text{ TB} + 0,5 \text{ TT} + 1 \text{ EQ}_x + 0,3 \text{ EQ}_y \\ &+ 1 \text{ PL.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ekstrem I X} &= 1,10 \text{ MA} + 1,10 \text{ MA} + 0,5 \text{ TB} + 0,5 \text{ TT} + 0,3 \text{ EQ}_x + 1 \text{ EQ}_y \\ &+ 1 \text{ PL.} \end{aligned}$$

$$\text{Ekstrem II} = 1 \text{ MS} + 1 \text{ MA} + 1 \text{ TC} + 1 \text{ PL.}$$

$$\text{Layan I} = 1 \text{ MS} + 1 \text{ MA} + 1 \text{ TB} + 1 \text{ TT} + 0,3 \text{ EW}_s + 1 \text{ EW}_L + 1 \text{ PL.}$$

$$\text{Layan II} = 1 \text{ MS} + 1 \text{ MA} + 1,3 \text{ TB} + 1,3 \text{ TT} + 1 \text{ PL.}$$

Layan III = 1 MS + 1 MA + 0,8 TB + 0,8 TT + 1 PL.

Layan IV = 1 MS + 1 MA + 0,7 EWs + 1 PL.

Fatik = 0,75 TT + 0,75 TB.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Tinjauan Umum

Pada Bab ini akan membahas hasil dari studi perencanaan jembatan kereta api menggunakan *box girder* baja sebagai struktur utamanya dan membandingkan hasil analisis dari software yang digunakan sebagai alat bantu dalam merencanakan jembatan *box girder* baja dengan dua tinjauan respon spektrum pada situs tanah sedang (model 1) dan respon spektrum pada situs tanah keras (model 2).

4.2 Hasil Analisa

Dari hasil analisa jembatan kereta api menggunakan profil box girder akan dilakukan pengecekan lendutan yang dibatasi dengan Peraturan Menteri No.60 tahun 2012. Pembatasan deformasi pada kondisi kondisi batas layan yang mengacu pada standar pembebanan SNI 1725-2016 akan didapat nilai perioda getar yang berbeda.

4.2.1 Hasil Analisis Perioda Getar

Hasil analisis perioda getar menggunakan *software* pada struktur jembatan komposit dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1: Nilai perioda getar (T) pada situs tanah sedang.

Case	Mode	Perioda (T)
Modal	Mode 1	0,144061
Modal	Mode 2	0,094027
Modal	Mode 3	0,084977
Modal	Mode 4	0,078744
Modal	Mode 5	0,070012
Modal	Mode 6	0,06198
Modal	Mode 7	0,056453
Modal	Mode 8	0,054471
Modal	Mode 9	0,054379

Tabel 4.1: *Lanjutan.*

Case	Mode	Perioda (T)
Modal	Mode 10	0,052254
Modal	Mode 11	0,050992
Modal	Mode 12	0,050588

Tabel 4.2: Nilai perioda getar (T) pada situs tanah keras.

Case	Mode	Perioda (T)
Modal	Mode 1	0,117957
Modal	Mode 2	0,095662
Modal	Mode 3	0,075629
Modal	Mode 4	0,071187
Modal	Mode 5	0,064955
Modal	Mode 6	0,053498
Modal	Mode 7	0,051692
Modal	Mode 8	0,051381
Modal	Mode 9	0,050178
Modal	Mode 10	0,046701
Modal	Mode 11	0,046362
Modal	Mode 12	0,045187

4.2.2 Pemeriksaan Konstruksi Kondisi Batas Ultimit

Pemeriksaan konstruksi pada kondisi batas ultimit ditinjau dengan analisis struktur dalam menahan momen gaya geser dan lendutan yang terjadi.

1. Perhitungan kekuatan gelagar terhadap momen

Untuk menentukan kuat lentur maka jenis penampang perlu ditinjau terlebih dahulu. Persyaratan yang perlu dipenuhi untuk menentukan jenis penampang yaitu nilai kelangsingan sayap (*flange*) dan badan (*web*). Dengan mengetahui nilai tersebut maka dapat diketahui jenis penampangnya dan ditetapkan persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai resistensi terhadap momen lentur yang bekerja.

a. Syarat kelangsingan penampang sayap (*flange*) dan badan (*web*)

Pada struktur gelagar komposit bagian gelagar baja dapat ditentukan sebagai kategori kompak jika kelangsingan sayap dan badan memenuhi persyaratan $\lambda < \lambda_p$ dan ditentukan sebagai kategori tidak kompak ditentukan jika $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$.

1) Untuk sayap atas

Kelangsingan ditentukan dengan:

$$\lambda_f = \frac{0,55}{2 \times 0,028} = 9,821$$

Nilai kelangsingan untuk penampang kompak dinyatakan:

$$\lambda_{pf} = 0,38 \sqrt{\frac{20000}{290}} = 9,979$$

Nilai kelangsingan untuk penampang kompak dinyatakan:

$$\lambda_{rf} = 0,56 \sqrt{\frac{20000}{290}} = 14,706$$

$\lambda_f < \lambda_{rf}$, penampang masuk dalam kategori tidak kompak sehingga untuk menghitung tekuk lokal pada sayap atas sebagai berikut:

$$F_{nc} = \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_y} \right) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] R_b R_h F_{yc}$$

$$= 340,2508 \text{ MPa.}$$

2) Untuk web

Sama seperti pada sayap, untuk kelangsingan pada pelat badan untuk masuk dalam kategori kompak harus memenuhi syarat.

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$69,5031 \leq 149,6893 \quad (\text{aman})$$

b. Momen nominal dan resistensi penampang

Kuat lentur nominal penampang (M_n) untuk struktur gelagar komposit *box girder* baja kompak adalah sebagai berikut:

Jika $D_p < 0,1 D_t$ digunakan persamaan:

$$M_n = M_p$$

Jika tidak memenuhi maka digunakan persamaan:

$$M_n = M_p \left(1,07 - 0,7 \frac{D_p}{D_t} \right)$$

$$D_p < 0,1 D_t$$

$$0,24 < (0,1 \times 1,76)$$

$0,24 > 0,176$ sehingga momen nominal sebesar:

$$M_n = 59383,29 \times (1,07 - 0,7(0,24/1,756))$$

$$= 57898,71 \text{ kNm.}$$

Hasil analisis nilai momen maksimum menggunakan *software* pada struktur jembatan.

Tabel 4.3: Hasil analisis nilai momen (M3) maksimum jembatan pada situs tanah sedang.

<i>Output Case</i> (Kombinasi)	Momen (.kN.m)
Kombinasi kuat 1	14457,487
Kombinasi kuat 2	13806,7
Kombinasi kuat 3	11512,267
Kombinasi kuat 4	11528,949
Kombinasi kuat 5	11530,315

Hasil analisis diatas maka, didapat nilai momen (M3) maksimum yaitu sebesar:
14457,487 kN.m

Cek syarat :

$$M_u \leq \phi_f M_n$$

$$14457,487 \leq 57898,71 \quad (\text{Ok})$$

Tabel 4.4: Hasil analisis nilai momen (M3) maksimum jembatan pada situs tanah keras.

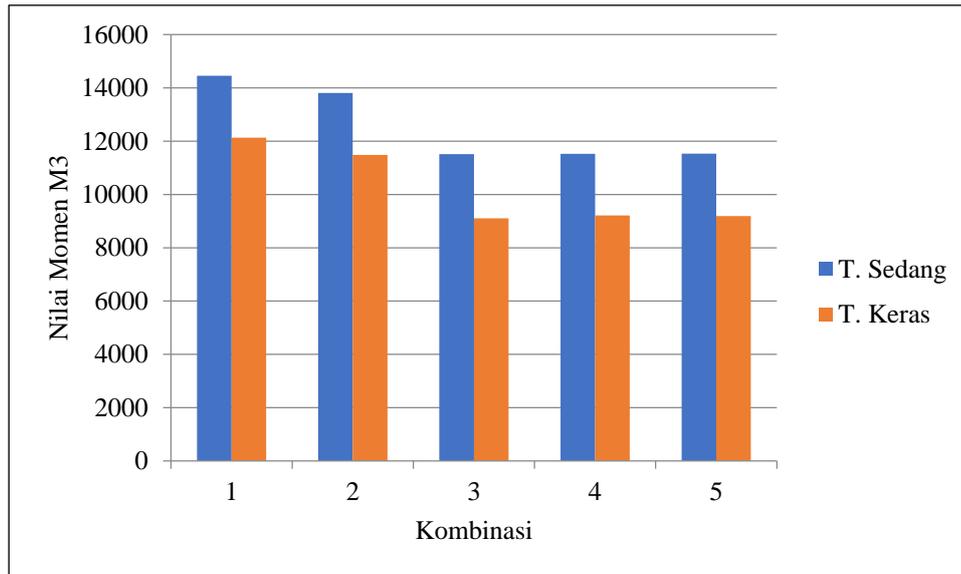
<i>Output Case</i> (Kombinasi)	Momen (.kN.m)
Kombinasi kuat 1	12131,686
Kombinasi kuat 2	11482,912
Kombinasi kuat 3	9108,9452
Kombinasi kuat 4	9212,2588
Kombinasi kuat 5	9187,1924

Hasil analisis diatas maka, didapat nilai momen (M3) maksimum yaitu sebesar:
12131,686 kN.m

Cek syarat :

$$M_u \leq \phi_f M_n$$

$$12131,686 \leq 57898,71 \quad (\text{Ok})$$



Gambar 4.1: Perbandingan nilai momen ultimit (Mu) pada jembatan situs tanah sedang dan situs tanah keras.

Dari grafik diatas dapat dilihat nilai momen ultimit (Mu) pada jembatan situs tanah sedang lebih besar dibandingkan dengan momen ultimit (Mu) pada jembatan situs tanah keras.

2. Perhitungan kekuatan gelagar terhadap gaya geser

Gaya geser yang diterima oleh gelagar akan didukung oleh bagian pelat badan. Keadaan yang menentukan adalah pada saat kondisi leleh dan tekuk dan tekuk lokal. Pelat badan termasuk penampang kompak sehingga mampu mencapai kondisi leleh tanpa mengalami tekuk lokal. Persyaratan kelangsingan badan agar kondisi leleh mencapai tercapai harus memenuhi syarat.

$$\frac{D}{t_w} > 1,12 \sqrt{\frac{E_s k_{sh}}{f_y}}$$

Digunakan $k_{sh} = 5$

$$\frac{1,55}{0,023} > 1,12 \sqrt{\frac{200000 \times 5}{290}}$$

$$67,2245 > 65,7687$$

(memenuhi)

Maka, nilai $C_w = 1$

$$\begin{aligned} V_p &= 0,58 \times F_y \times D \times t_w \\ &= 0,58 \times 290 \times 1,55 \times 0,023 \end{aligned}$$

$$= 5981,492 \text{ kN}$$

$$V_n = C_w \times V_n$$

$$= 1 \times 5981,492 = 5981,492 \text{ kN}$$

Hasil analisis nilai gaya geser ultimit dengan menggunakan *software* pada situs tanah sedang yaitu 3823,13 kN.

Cek terhadap kuat geser:

$$\text{Syarat} = V_{ui} \leq \phi_v V_n$$

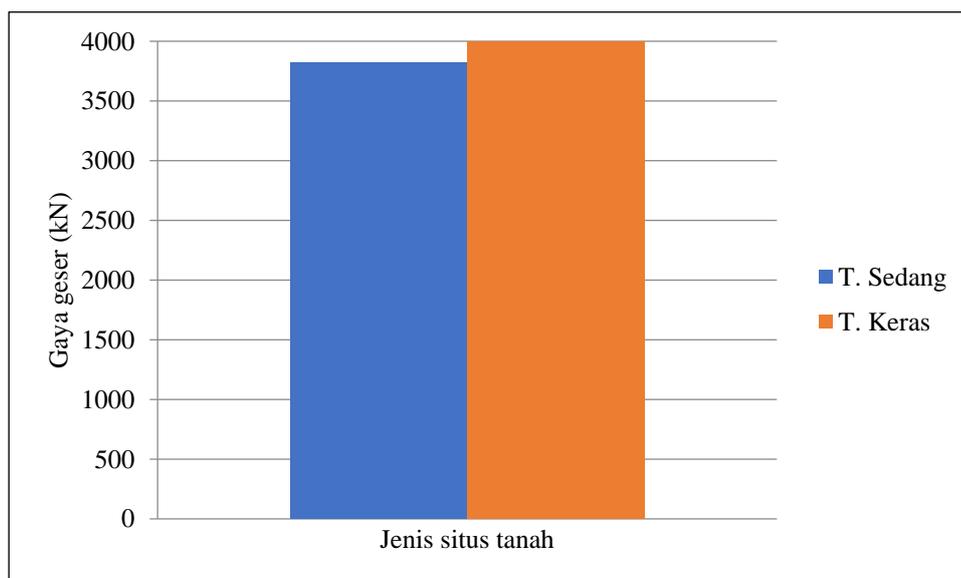
$$= 3823,13 > 5981,492 \quad (\text{Ok})$$

Hasil analisis nilai gaya geser ultimit dengan menggunakan *software* pada situs tanah keras yaitu 3997,64 kN.

Cek syarat terhadap kuat geser:

$$\text{Syarat} = V_{ui} \leq \phi_v V_n$$

$$= 3997,64 < 5981,492 \quad (\text{Ok})$$



Gambar 4.2: Perbandingan nilai gaya geser ultimit (V_u).

Dari grafik diatas dapat dilihat perbandingan nilai gaya geser ultimit (V_n) pada situs tanah keras memiliki gaya geser ultimit yang lebih besar dari situs tanah sedang.

4.2.3 Kontrol Lendutan

Lendutan pada saat beban penuh adalah lendutan jangka panjang akibat kombinasi. Nilai lendutan tersebut tidak boleh melampaui lendutan yang di iijinkan. Berdasarkan Peraturan Menteri No.60 tahun 2012, koefisien lendutan maksimum jembatan komposit adalah $L/1000$ panjang teoritis.

$$L/1000 = 40/1000 = 0,004 \text{ m}$$

Tabel 4.5: Nilai lendutan akibat kombinasi pada jembatan respon spektrum situs tanah sedang.

<i>Output Case</i> (Kombinasi)	Lendutan (m)
Desain	0,001909

Dari hasil analisa dengan software untuk jembatan respon spektrum pada situs tanah sedang didapat lendutan maksimum saat *service* yaitu 0,001909 m seperti terlihat pada Tabel 4.5 diatas.

$$\Delta \text{ terjadi} < \Delta \text{ ijin}$$

$$0,001909 \text{ m} < 0,004 \text{ m} \quad (\text{memenuhi syarat})$$

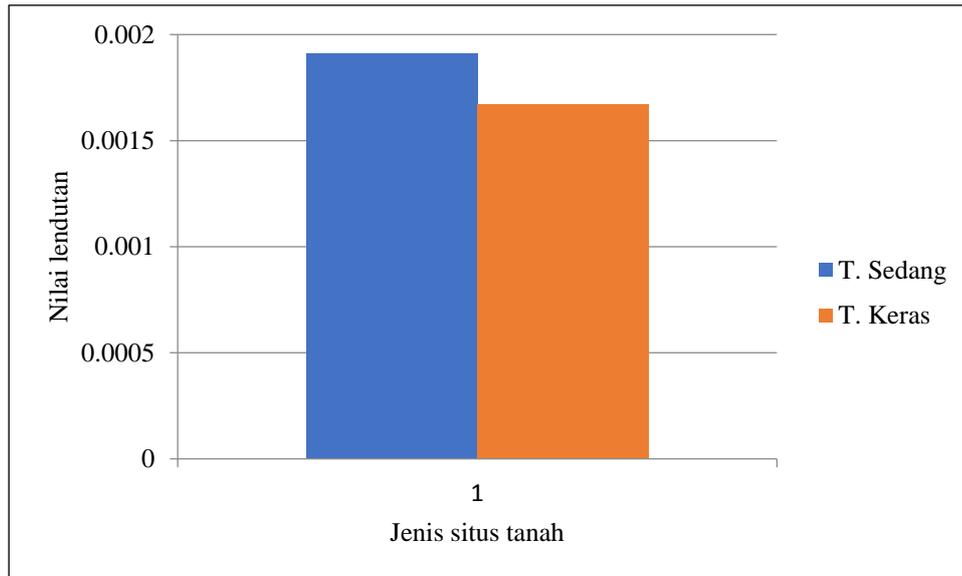
Tabel 4.6: Nilai lendutan akibat kombinasi pada jembatan respon spektrum situs tanah keras.

<i>Output Case</i> (Kombinasi)	Lendutan (m)
Desain	0,001673

Dari hasil analisa dengan *software* untuk jembatan pada situs tanah sedang didapat lendutan maksimum saat *service* yaitu 0,001673 m seperti terlihat pada Tabel 4.6 diatas.

$$\Delta \text{ terjadi} < \Delta \text{ ijin}$$

$$0,001673 \text{ m} < 0,004 \text{ m} \quad (\text{memenuhi syarat})$$



Gambar 4.3: Grafik perbandingan nilai lendutan pada jembatan situs tanah sedang dan situs tanah keras.

Dari grafik diatas diketahui nilai lendutan pada respon spektrum pada situs tanah sedang lebih besar dibandingkan nilai lendutan respon spektrum pada situs tanah keras.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dengan membandingkan pada dua jenis situs tanah di Kota Padang, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil analisa yang dilakukan dengan menggunakan *software* pada jembatan kereta api pada jenis situs tanah sedang dan tanah keras didapat hasil sebagai berikut:
 - a. Nilai gaya geser
 - 1) Tanah sedang = 3823,13 kN
 - 2) Tanah keras = 3997,64 kN
 - b. Nilai momen lentur
 - 1) Tanah sedang = 14457,49 kNm
 - 2) Tanah keras = 12131,69 kNm
 - c. Nilai lendutan
 - 1) Tanah sedang = 0,001909 m
 - 2) Tanah keras = 0,001673 m
2. Hasil perbandingan yang diperoleh dari Tugas Akhir ini adalah jenis situs tanah keras memiliki nilai lendutan yang kecil dibandingkan dengan jenis situs tanah sedang karena semakin kaku suatu struktur maka lendutan yang terjadi akan semakin kecil sehingga distribusi gaya teredam dan tidak menimbulkan efek lendutan yang besar pada jembatan. Sedangkan pada jenis situs tanah sedang, kekakuan struktur lebih kecil maka nilai lendutan yang terjadi lebih besar sehingga struktur bersifat lebih fleksibel.

5.2 Saran

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

1. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik pada daerah Kota Padang, hendaknya juga turut ditinjau pada jenis situs tanah lunak dan tanah batuan.
2. Dalam pendesainan struktur di Indonesia, diharap mengacu pada peraturan yang lebih baru agar terdapat korelasi yang lebih baik dalam mendesaian.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. 2012. *LRFD Bridge Design Specifications*, 6th Edition. Washington DC, USA.
- Bambang, S., Muntohar, A.S. 2007. *Jembatan*, Beta Offset, Yogyakarta.
- BSN. 2016. SNI 1725:2016 *Standar Pembebanan Untuk Jembatan*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta, Indonesia.
- BSN. 2016. SNI 2833:2016 *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Jembatan*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta, Indonesia.
- CCL Bridge Bearings. *Design of Bridge Bearings Mechanical & Composite Bearings*.
- Chen, W., Duan, L. 2000. *Bridge Engineering Handbook*. CRC Press. Boca Raton., FL.
- Conrad, P.H. 1983. *Steel Box Girder Bridges-Design Guides & Methods*. Institute for Physical Science and Technology and Civil Engineering Department. University of Maryland. Maryland, USA.
- Gere, J.M., Timoshenko, S. 1997. *Mekanika Bahan-Terjemahan Jilid 1*. Jakarta: Erlangga
- Helwig, T., Yura, J., Hertman, R., Williamson, E., Dawei, L. 2007. *Design Guidelines for Steel Trapezoidal Box Girder System*. Texas Department of Transportation, Austin, USA.
- Patel, P. 2009. *LRFD Design of Double Composite Box Girder Bridges*. University of South Florida. USA.
- PM. No. 60. 2012. *Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*. Menteri Perhubungan. Jakarta. Indonesia.
- Sennah, K., Kennedy, J. B., Nour, S. 2003. *Design for Shear in Curved Composite Multiple Steel Box Girder Bridge*, Journal of Bridge Engineering. Vol 8. No. 3, pp. 144-152.
- Setiawan, A. 2013. *Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD*. Jakarta: Erlangga.

- Siswanto, M.F., 1999. *Diktat Kuliah Struktur Baja III*. Jurusan Teknik Sipil. FT Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Wolchuk, R. 1981. *Design Rules for Steel Box Girder Bridges*. IVBH Abhandlungen, Swiss.

LAMPIRAN

Analisis perhitungan keamanan *box girder* baja yang digunakan:

1. Rasio modular

Pada kondisi komposit untuk beban jangka pendek nilai rasio modular ditentukan dengan persamaan:

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$
$$n = \frac{200000}{29725,41}$$
$$n = 6,728$$

2. Momen leleh

Menentukan momen leleh dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$M_y = M_{D1} + M_{D2} + M_{AD}$$
$$= 3512,46 + 13618,2 + 39416,37$$
$$= 56547,04 \text{ kN.m}$$

3. Kondisi batas ultimit *box girder* baja

Dalam kondisi batas ultimit perlu dilakukan pemeriksaan struktur gelagar seperti pelat sayap atas, pelat badan dan pelat sayap bawah untuk menghindari kegagalan masing-masing komponen. Pemeriksaan ini dilakukan untuk mencari tegangan total yang terjadi pada struktur gelagar dan dapat menggunakan persamaan berikut:

a. Pelat sayap atas

- $$f = \frac{M_{D1}}{S_{NC}} + \frac{M_{D2}}{S_{LT}} + \frac{M_{D3}}{S_{ST}}$$
$$f = \frac{3512,46}{0,0708} + \frac{13618,2}{0,16535} + \frac{14782,32}{0,26897}$$
$$f = 186,92 \text{ MPa}$$
- $$(f_{bu})_{CLL} = \frac{\gamma M_{CLL}}{S_{ST}}$$
$$(f_{bu})_{CLL} = \frac{1,75 \times 598,5}{0,26897}$$
$$(f_{bu})_{CLL} = 3,894 \text{ MPa}$$

- $f_{bu} = f + f_{bu}$
 $= 186,92 + 3,894$
 $= 190,81 \text{ MPa}$

b. Pelat sayap atas

- $f = \frac{M_{D1}}{S_{NC}} + \frac{M_{D2}}{S_{LT}} + \frac{M_{D3}}{S_{ST}}$
 $f = \frac{3512,46}{0,0935} + \frac{13618,2}{0,11238} + \frac{14782,32}{0,11939}$

$$f = 282,54 \text{ MPa}$$

- $(f_{bu})_{CLL} = \frac{\gamma M_{CLL}}{S_{ST}}$

$$(f_{bu})_{CLL} = \frac{1,75 \times 598,5}{0,11939}$$

$$(f_{bu})_{CLL} = 8,773 \text{ MPa}$$

- $f_{bu} = f + f_{bu}$
 $= 282,54 + 8,773$
 $= 291,32 \text{ MPa}$

4. Lentur lateral pelat sayap atas

Untuk menghitung tegangan lentur lateral pada pelat sayap atas dapat dilakukan dengan cara merubah gaya geser vertikal menjadi gaya lateral pada pelat sayap atas dengan menggunakan persamaan berikut:

- Gaya geser vertikal

$$\Delta V_u = \frac{V_u}{\frac{1}{2}L}$$

$$= \frac{3476,96}{\frac{1}{2} \cdot 40}$$

$$= 173,85 \text{ kN/m}$$

- Gaya geser horizontal setiap pelat badan

$$\Delta V_H = \frac{1}{2} \Delta V_u \tan(\theta_{web})$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 173,85 \tan(14,04)$$

$$= 21,73 \text{ kN/m}$$

- Momen lentur lateral

$$\begin{aligned}
 M_{LAT} &= \frac{\Delta V_H s^2}{12} \\
 &= \frac{21,73 \times 5^2}{12} \\
 &= 45,27 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

- Modulus penampang pelat sayap atas

$$\begin{aligned}
 s_f &= \frac{t_{tf} b_{tf}^2}{6} \\
 s_f &= \frac{0,028 \times 0,55^2}{6} \\
 S_f &= 0,00142 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

- Tegangan lentur lateral

$$\begin{aligned}
 f_{LAT} &= \frac{M_{LAT}}{S_f} \\
 &= \frac{45,2729}{0,00142} \\
 &= 32,071 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

5. Faktor implifikasi lentur lateral pelat sayap atas

Beberapa langkah untuk menentukan faktor amplifikasi lentur lateral pelat sayap atas berikut ini:

Menentukan tinggi elastis pelat badan diperoleh menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 D_c &= (Y_t - Y_f) \sqrt{\frac{s^2 + 1}{s^2}} \\
 &= (0,88 - 0,028) \sqrt{\frac{5^2 + 1}{5^2}} \\
 &= 0,869 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jari-jari girasi tekuk torsi lateral diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 r_t &= \frac{b_{tf}}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{D_c t_w}{b_{tf} t_f} \right)}} \\
 &= \frac{0,55}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{0,869 \times 0,025}{0,55 \times 0,028} \right)}} \\
 &= 0,131
 \end{aligned}$$

Menentukan batas panjang maksimal tanpa pengikat lateral dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 L_p &= 1,0 r_t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\
 &= 1,0 \times 0,131 \sqrt{\frac{200000}{390}} \\
 &= 2,965
 \end{aligned}$$

Tegangan tekuk torsi elastis pelat sayap atas ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 F_{cr} &= \frac{C_b R_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \\
 &= \frac{1 \times 1 \times 3,14^2 \times 200000}{\left(\frac{5}{0,1309}\right)^2} \\
 &= 1353,879
 \end{aligned}$$

Jadi faktor amplifikasi ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 AF &= \frac{0,85}{\left(1 - \frac{f_{bu}}{F_{cr}}\right)} \geq 1,0 \\
 AF &= \frac{0,85}{\left(1 - \frac{285,883}{1353,879}\right)} \geq 1,0
 \end{aligned}$$

$$AF = 1,0775 \geq 1,0$$

Tegangan lentur lateral total pada pelat sayap atas dengan nilai amplifikasi disesuaikan dengan nilai diatas dan ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 f_{lat} &= AF (f_{LAT} + f_t) \\
 f_{lat} &= 1,0775 (35,378 + 65,459) \\
 &= 100,8377 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

6. Pelat sayap atas dalam menerima lentur

Pelat sayap dalam menahan lentur harus memenuhi persyaratan yang ada dibawah ini:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\frac{2 \times 0,869}{0,025} \leq 5,7 \sqrt{\frac{200000}{390}}$$

$$69,503 \leq 129,0796 \quad (\text{memenuhi})$$

7. Ketahanan tekuk lokal sayap atas

Tekuk lokal dapat terjadi jika perbandingan lebar dengan ketebalan dari elemen yang mengalami tekan terlalu besar, sehingga diperlukan adanya pembatasan rasio antara lebar dengan ketebalan dari elemen yang mengalami tekan. Perbandingan antara lebar dengan ketebalan pada sayap atas dinyatakan dengan (λ_f) . Untuk menentukan besarnya nilai (λ_f) digunakan persamaan:

$$\begin{aligned} \lambda_f &= \frac{b_{tf}}{2t_{tf}} \\ &= \frac{0,55}{2 \times 0,028} \\ &= 9,821 \end{aligned}$$

Rasio kelangsingan sayap kompak ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \lambda_{pf} &= 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ &= 0,38 \sqrt{\frac{200000}{390}} \\ &= 8,605 \end{aligned}$$

Rasio kelangsingan sayap tidak kompak ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \lambda_{rf} &= 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ &= 0,56 \sqrt{\frac{200000}{390}} \\ &= 12,6815 \end{aligned}$$

8. Tekuk torsi lateral sayap atas

Persyaratan gelagar dalam menerima lentur harus juga memperhatikan tekuk torsi lateral yang ditentukan dengan persamaan:

$$L_p = 1,0 r_t \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}}$$

$$L_p = 1,0 \times 0,1309 \sqrt{\frac{200000}{390}}$$

$$= 2,965 \text{ m}$$

$$L_r = \pi r_t \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}}$$

$$= 3,14 \times 0,1309 \sqrt{\frac{200000}{390}}$$

$$= 11,135 \text{ m}$$

9. Ketahanan tekuk pada pelat badan

Untuk menentukan besarnya nilai tegangan yang terjadi akibat tekuk pada bagian pelat badan digunakan persamaan:

$$k = \frac{9}{\left(\frac{D_c}{D}\right)^2}$$

$$= \frac{9}{\left(\frac{0,869}{1,55}\right)^2}$$

$$= 28,505$$

$$F_{crw} = \frac{0,9 E k}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2}$$

$$= \frac{0,9 \times 200000 \times 28,505}{\left(\frac{1,55}{0,025}\right)^2}$$

$$= 1341,424 \text{ MPa}$$

10. Konstruksi pelat sayap atas

Konstruksi pelat sayap atas harus memenuhi persyaratan, yaitu:

a. Tegangan tekuk lokal

$$f_{bu} + f_{lat} \leq \phi_f R_h F_{yc}$$

$$190,81 + 32,071 \leq 1 \times 1 \times 390$$

$$222,881 \leq 390 \quad (\text{oke})$$

b. Tahanan tekuk torsi lateral

$$f_{bu} + \frac{1}{3}f_{lat} \leq \phi_f F_{nc}$$

$$190,81 + \frac{1}{3} 100,838 \leq 1 \times 390$$

$$224,423 \leq 390 \quad (\text{oke})$$

c. Tegangan tekuk lentur pada pelat badan

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{crw}$$

$$190,81 \leq 1 \times 1341,424$$

$$190,81 \leq 1341,424 \quad (\text{oke})$$

11. Konstruksi pelat sayap bawah

Pemeriksaan konstruksi pelat sayap bawah harus memenuhi persyaratan tegangan leleh nominal pelat daerah tarik berikut:

$$f_{bu} \leq \phi_f R_h F_y \Delta$$

$$291,316 \leq 1 \times 1 \times 390 \times 1$$

$$291,316 \leq 390 \quad (\text{oke})$$

12. Kapasitas momen gelagar (*girder*)

Pada *box girder* perlu dilakukan pengecekan terhadap momen yang dihasilkan dari lentur. Syarat yang harus dipenuhi agar gelagar *box girder* baja memenuhi lentur yaitu:

a. Menentukan persyaratan kelngsingan pelat badan

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\frac{2 \times 0,0383}{0,025} \leq 3,76 \sqrt{\frac{200000}{390}}$$

$$3,0635 < 85,147 \quad (\text{aman})$$

b. Menentukan momen lentur nominal

$$M_n = M_p \left(1,07 - 0,7 \frac{D_p}{D_t} \right)$$

$$M_n = 59383,28 \left(1,07 - 0,7 \frac{0,238}{1,756} \right)$$

$$= 57899,19 \text{ kN.m}$$

Kemudian membandingkan antara nilai momen ultimilite dan momen nominal yang dihasilkan dengan persamaan:

$$M_u \leq \phi_f M_n$$

$$35473,24 \leq 1 \times 57899,19$$

$$35473,24 \leq 57899,19 \quad (\text{aman})$$

13. Gaya geser

Kekuatan pelat badan dalam menahan gaya geser ditentukan oleh keadaan leleh pelat badan dan tekuk lokal pada pelat badan. Tekuk pada pelat bada (*web*) harus memenuhi persyaratan seperti persamaan berikut:

$$V_u \leq \phi_v V_n$$

Dalam menentukan gaya geser nominal yang terjadi pada pelat badan dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} V_p &= 0,58 F_{yw} D t_w \\ &= 0,58 \times 390 \times 1,55 \times 0,025 \\ &= 8743,561 \text{ kN} \end{aligned}$$

Nilai C diambil dari kondisi ke 3 sesuai uraian pada Bab 2:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1,57}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \left(\frac{E_k}{F_{yw}}\right) \\ &= \frac{1,57}{\left(\frac{1,55}{0,025}\right)^2} \left(\frac{200000}{390}\right) \\ &= 1,0525 \end{aligned}$$

Untuk menghitung gaya geser yang terjadi pada panel interior dan ujung panel digunakan persamaan:

$$\begin{aligned} V_n &= C_w \cdot V_p \\ &= 1,0525 \times 8743,561 \\ &= 9202,206 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tabel L.1: Lendutan layan 1 pada situs tanah sedang.

Layout Line Distance m	Item Type	Sect Vert m	Sect Tran m	Sect Long m	Sect RLong Degrees
0	Max	-0,000402	0,000241	0,001426	-3,97E-06
0	Min	-0,000654	-0,000456	0,000867	-3,97E-06
2	Max	-0,003257	0,000211	0,00142	-1,85E-05
2	Min	-0,004275	-0,000426	0,000867	-1,85E-05
4	Max	-0,005995	0,000189	0,001222	-3,28E-05
4	Min	-0,007803	-0,000402	0,000708	-3,28E-05
6	Max	-0,008102	0,000173	0,000935	-4,36E-05
6	Min	-0,010502	-0,000386	0,000475	-4,36E-05
8	Max	-0,009343	0,000163	0,000598	-5,02E-05
8	Min	-0,012081	-0,000381	0,000201	-5,02E-05
10	Max	-0,009594	0,000157	0,000244	-5,27E-05
10	Min	-0,012387	-0,000383	-0,000088	-5,27E-05
12	Max	-0,008844	0,000156	-0,000094	-5,11E-05
12	Min	-0,011426	-0,000394	-0,000368	-5,11E-05
14	Max	-0,007191	0,000158	-0,000374	-4,56E-05
14	Min	-0,009295	-0,000412	-0,000611	-4,56E-05
16	Max	-0,004851	0,000164	-0,000559	-3,68E-05
16	Min	-0,006267	-0,000435	-0,000782	-3,68E-05
18	Max	-0,002152	0,000172	-0,000573	-2,56E-05
18	Min	-0,00278	-0,000464	-0,000793	-2,56E-05
19,15	Max	-0,000783	0,00018	-0,000474	-1,95E-05
19,15	Min	-0,001094	-0,000484	-0,000698	-1,95E-05
20	Max	0,000115	0,000191	-0,000473	-1,57E-05
20	Min	-0,000339	-0,000507	-0,000699	-1,57E-05
20	Max	0,000117	0,000184	0,000699	-1,57E-05
20	Min	-0,000318	-0,000501	0,000473	-1,57E-05
20,85	Max	-0,000782	0,000178	0,000698	-1,95E-05
20,85	Min	-0,00109	-0,000483	0,000474	-1,95E-05
22	Max	-0,002153	0,000172	0,000793	-2,56E-05
22	Min	-0,00278	-0,000464	0,000573	-2,56E-05
24	Max	-0,004854	0,000163	0,000782	-3,68E-05
24	Min	-0,006267	-0,000435	0,000559	-3,68E-05
26	Max	-0,007195	0,000158	0,000611	-4,56E-05
26	Min	-0,009295	-0,000411	0,000374	-4,56E-05
28	Max	-0,008848	0,000156	0,000368	-5,11E-05
28	Min	-0,011426	-0,000394	0,000094	-5,11E-05
30	Max	-0,009598	0,000157	0,000088	-5,27E-05
30	Min	-0,012387	-0,000383	-0,000244	-5,27E-05

Tabel L.1: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	Item Type	Sect Vert m	Sect Tran m	Sect Long m	Sect RLong Degrees
32	Max	-0,009345	0,000163	-0,000201	-5,02E-05
32	Min	-0,012081	-0,000381	-0,000598	-5,02E-05
34	Max	-0,008104	0,000173	-0,000475	-4,36E-05
34	Min	-0,010502	-0,000386	-0,000935	-4,36E-05
36	Max	-0,005995	0,000189	-0,000708	-3,28E-05
36	Min	-0,007803	-0,000402	-0,001222	-3,28E-05
38	Max	-0,003257	0,000211	-0,000867	-1,85E-05
38	Min	-0,004275	-0,000426	-0,00142	-1,85E-05
40	Max	-0,000402	0,000241	-0,000867	-3,97E-06
40	Min	-0,000654	-0,000456	-0,001426	-3,97E-06

Tabel L.2: Lendutan layan 2 pada situs tanah sedang.

Layout Line Distance m	Item Type	Sect Vert m	Sect Tran m	Sect Long m	Sect RLong Degrees
0	Max	-0,00038	0,00037	0,00154	-3,42E-06
0	Min	-0,00071	-0,00054	0,00081	-3,42E-06
2	Max	-0,0032	0,00033	0,00153	-1,71E-05
2	Min	-0,00452	-0,0005	0,00081	-1,71E-05
4	Max	-0,0059	0,0003	0,00132	-3,05E-05
4	Min	-0,00825	-0,00046	0,00066	-3,05E-05
6	Max	-0,00797	0,00028	0,00102	-4,05E-05
6	Min	-0,01109	-0,00044	0,00042	-4,05E-05
8	Max	-0,0092	0,00027	0,00067	-4,67E-05
8	Min	-0,01276	-0,00043	0,00015	-4,67E-05
10	Max	-0,00944	0,00027	0,0003	-4,88E-05
10	Min	-0,01307	-0,00044	-0,00014	-4,88E-05
12	Max	-0,0087	0,00027	-5,9E-05	-4,70E-05
12	Min	-0,01206	-0,00045	-0,00041	-4,70E-05
14	Max	-0,00708	0,00028	-0,00035	-4,15E-05
14	Min	-0,00981	-0,00047	-0,00066	-4,15E-05
16	Max	-0,00477	0,00029	-0,00054	-3,29E-05
16	Min	-0,00661	-0,00049	-0,00083	-3,29E-05
18	Max	-0,00211	0,0003	-0,00055	-2,20E-05
18	Min	-0,00293	-0,00053	-0,00084	-2,20E-05
19,15	Max	-0,00075	0,00031	-0,00045	-1,62E-05
19,15	Min	-0,00116	-0,00055	-0,00074	-1,62E-05
20	Max	0,00018	0,00033	-0,00045	-1,25E-05
20	Min	-0,00041	-0,00058	-0,00074	-1,25E-05
20	Max	0,00018	0,00032	0,00074	-1,25E-05
20	Min	-0,00038	-0,00057	0,00045	-1,25E-05
20,85	Max	-0,00075	0,00031	0,00074	-1,62E-05
20,85	Min	-0,00115	-0,00055	0,00045	-1,62E-05
22	Max	-0,00211	0,0003	0,00084	-2,20E-05
22	Min	-0,00293	-0,00053	0,00055	-2,20E-05
24	Max	-0,00478	0,00029	0,00083	-3,29E-05
24	Min	-0,00661	-0,00049	0,00054	-3,29E-05
26	Max	-0,00708	0,00027	0,00066	-4,15E-05
26	Min	-0,00981	-0,00047	0,00035	-4,15E-05
28	Max	-0,00871	0,00027	0,00041	-4,70E-05
28	Min	-0,01206	-0,00045	5,9E-05	-4,70E-05

Tabel L.2: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	Item Type	Sect Vert m	Sect Tran m	Sect Long m	Sect RLong Degrees
30	Max	-0,00945	0,00027	0,00014	-4,88E-05
30	Min	-0,01307	-0,00043	-0,0003	-4,88E-05
32	Max	-0,0092	0,00027	-0,00015	-4,67E-05
32	Min	-0,01276	-0,00043	-0,00067	-4,67E-05
34	Max	-0,00797	0,00028	-0,00042	-4,05E-05
34	Min	-0,01109	-0,00044	-0,00102	-4,05E-05
36	Max	-0,0059	0,0003	-0,00066	-3,05E-05
36	Min	-0,00825	-0,00046	-0,00132	-3,05E-05
38	Max	-0,0032	0,00033	-0,00081	-1,71E-05
38	Min	-0,00452	-0,0005	-0,00153	-1,71E-05
40	Max	-0,00038	0,00037	-0,00081	-3,42E-06
40	Min	-0,00071	-0,00054	-0,00154	-3,42E-06

Tabel L.3: Lendutan layan 1 pada situs tanah keras.

Layout Line Distance	Item Type	Sect Vert	Sect Tran	Sect Long	Sect RLong
m		m	m	m	Degrees
0,	Max	-0,000339	0,000379	0,001481	-5,71E-04
0,	Min	-0,000622	-0,000421	0,000817	-5,71E-04
2,	Max	-0,002578	0,000325	0,001474	7,21E-04
2,	Min	-0,003742	-0,000376	0,000818	7,21E-04
4,	Max	-0,004802	0,000287	0,001273	1,67E-03
4,	Min	-0,006864	-0,000344	0,000662	1,67E-03
6,	Max	-0,006511	0,00026	0,000983	2,34E-03
6,	Min	-0,00924	-0,000323	0,000434	2,34E-03
8,	Max	-0,007483	0,000241	0,000648	2,61E-03
8,	Min	-0,010593	-0,00031	0,000168	2,61E-03
10,	Max	-0,007616	0,000231	0,000304	2,38E-03
10,	Min	-0,010782	-0,000303	-0,000108	2,38E-03
12,	Max	-0,006918	0,000229	-0,000014	1,67E-03
12,	Min	-0,009844	-0,000303	-0,000369	1,67E-03
14,	Max	-0,005513	0,000236	-0,000276	5,34E-04
14,	Min	-0,007893	-0,00031	-0,000588	5,34E-04
16,	Max	-0,003647	0,00025	-0,000434	-8,50E-04
16,	Min	-0,005228	-0,000322	-0,000726	-8,50E-04
18,	Max	-0,001682	0,000268	-0,000409	-2,20E-03
18,	Min	-0,002329	-0,000339	-0,000696	-2,20E-03
19,15	Max	-0,000823	0,000282	-0,000317	-2,72E-03
19,15	Min	-0,001116	-0,000352	-0,000607	-2,72E-03
20,	Max	-0,000307	0,000304	-0,000291	-2,94E-03
20,	Min	-0,000785	-0,000373	-0,000584	-2,94E-03
20,	Max	-0,000306	0,000294	0,000584	-2,94E-03
20,	Min	-0,000763	-0,000364	0,000291	-2,94E-03
20,85	Max	-0,000822	0,00028	0,000607	-2,72E-03
20,85	Min	-0,001112	-0,00035	0,000317	-2,72E-03
22,	Max	-0,001682	0,000267	0,000696	-2,20E-03
22,	Min	-0,002329	-0,000338	0,000409	-2,20E-03
24,	Max	-0,003648	0,000249	0,000726	-8,50E-04
24,	Min	-0,005228	-0,000322	0,000434	-8,50E-04
26,	Max	-0,005513	0,000236	0,000588	5,34E-04
26,	Min	-0,007893	-0,00031	0,000276	5,34E-04
28,	Max	-0,006918	0,000229	0,000369	1,67E-03
28,	Min	-0,009844	-0,000302	0,000014	1,67E-03
30,	Max	-0,007616	0,000231	0,000108	2,38E-03
30,	Min	-0,010782	-0,000303	-0,000304	2,38E-03

Tabel L.3: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	Item Type	Sect Vert m	Sect Tran m	Sect Long m	Sect RLong Degrees
32,	Max	-0,007483	0,000241	-0,000168	2,61E-03
32,	Min	-0,010593	-0,000309	-0,000648	2,61E-03
34,	Max	-0,006511	0,00026	-0,000434	2,34E-03
34,	Min	-0,00924	-0,000323	-0,000983	2,34E-03
36,	Max	-0,004802	0,000287	-0,000662	1,67E-03
36,	Min	-0,006864	-0,000344	-0,001273	1,67E-03
38,	Max	-0,002578	0,000325	-0,000818	7,21E-04
38,	Min	-0,003742	-0,000376	-0,001474	7,21E-04
40,	Max	-0,000339	0,000379	-0,000817	-5,71E-04
40,	Min	-0,000622	-0,000421	-0,001481	-5,71E-04

Tabel L.4: Lendutan layan 2 pada situs tanah keras.

Layout Line Distance m	Item Type	Sect Vert m	Sect Tran m	Sect Long m	Sect RLong Degrees
0,	Max	-0,000319	0,000521	0,001616	1,04E-04
0,	Min	-0,000687	-0,000519	0,000753	1,04E-04
2,	Max	-0,002507	0,000457	0,001608	3,28E-04
2,	Min	-0,00402	-0,000454	0,000754	3,28E-04
4,	Max	-0,004679	0,000411	0,001394	5,57E-04
4,	Min	-0,00736	-0,000409	0,0006	5,57E-04
6,	Max	-0,00635	0,00038	0,001087	7,22E-04
6,	Min	-0,009898	-0,000378	0,000372	7,22E-04
8,	Max	-0,007299	0,000359	0,000732	8,18E-04
8,	Min	-0,011341	-0,000357	0,000108	8,18E-04
10,	Max	-0,007425	0,000348	0,000368	8,44E-04
10,	Min	-0,011541	-0,000346	-0,000167	8,44E-04
12,	Max	-0,006739	0,000347	0,000035	8,02E-04
12,	Min	-0,010543	-0,000344	-0,000427	8,02E-04
14,	Max	-0,005364	0,000356	-0,000238	6,96E-04
14,	Min	-0,008458	-0,000353	-0,000644	6,96E-04
16,	Max	-0,003545	0,000373	-0,000401	5,35E-04
16,	Min	-0,005601	-0,00037	-0,000781	5,35E-04
18,	Max	-0,001641	0,000396	-0,000376	3,35E-04
18,	Min	-0,002482	-0,000393	-0,000749	3,35E-04
19,15	Max	-0,000798	0,000414	-0,000282	2,43E-04
19,15	Min	-0,001179	-0,000411	-0,00066	2,43E-04
20,	Max	-0,00025	0,000441	-0,000256	2,02E-04
20,	Min	-0,000871	-0,000438	-0,000637	2,02E-04
20,	Max	-0,000249	0,000429	0,000637	2,02E-04
20,	Min	-0,000843	-0,000426	0,000256	2,02E-04
20,85	Max	-0,000797	0,000412	0,00066	2,43E-04
20,85	Min	-0,001174	-0,000408	0,000282	2,43E-04
22,	Max	-0,001642	0,000395	0,000749	3,35E-04
22,	Min	-0,002482	-0,000392	0,000376	3,35E-04
24,	Max	-0,003547	0,000373	0,000781	5,35E-04
24,	Min	-0,005601	-0,00037	0,000401	5,35E-04
26,	Max	-0,005364	0,000356	0,000644	6,96E-04
26,	Min	-0,008458	-0,000353	0,000238	6,96E-04
28,	Max	-0,006739	0,000347	0,000427	8,02E-04

Tabel L.4: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	Item Type	Sect Vert m	Sect Tran m	Sect Long m	Sect RLong Degrees
28,	Min	-0,010543	-0,000344	-0,000035	8,02E-04
30,	Max	-0,007425	0,000348	0,000167	8,44E-04
30,	Min	-0,011541	-0,000345	-0,000368	8,44E-04
32,	Max	-0,007299	0,000359	-0,000108	8,18E-04
32,	Min	-0,011341	-0,000357	-0,000732	8,18E-04
34,	Max	-0,00635	0,00038	-0,000372	7,22E-04
34,	Min	-0,009898	-0,000378	-0,001087	7,22E-04
36,	Max	-0,004679	0,000411	-0,0006	5,57E-04
36,	Min	-0,00736	-0,000409	-0,001394	5,57E-04
38,	Max	-0,002507	0,000457	-0,000754	3,28E-04
38,	Min	-0,00402	-0,000454	-0,001608	3,28E-04
40,	Max	-0,000319	0,000521	-0,000753	1,04E-04
40,	Min	-0,000687	-0,000519	-0,001616	1,04E-04

Tabel L.5: Kombinasi kuat 1 pada situs tanah sedang.

Layout Line Distance m	Item Type	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0	Max	-8047,679	-6614,043	42,719	1112,1814	771,9029	-9262,4864
0	Min	-9280,884	-8163,24	-88,257	-1862,485	-1759,0391	-10681,8452
2	Max	-8047,679	-5767,428	42,719	1029,0456	723,5006	4724,7582
2	Min	-9280,884	-7171,342	-88,257	-1699,9693	-1619,5607	2466,4264
2	Max	-8047,679	-5107,008	42,719	957,1117	717,4885	4728,3927
2	Min	-9275,128	-6366,754	-88,257	-1548,6554	-1613,5486	2466,4264
4	Max	-8047,679	-4232,226	42,719	904,3187	663,3418	16222,6927
4	Min	-9269,832	-5380,828	-88,257	-1416,4824	-1468,3257	11860,7742
4	Max	-8047,679	-3533,412	42,719	871,209	658,0462	16226,3271
4	Min	-9264,537	-4589,822	-88,257	-1303,9927	-1463,0301	11860,7742
6	Max	-8047,679	-2639,189	42,719	857,4094	609,5924	24060,8077
6	Min	-9259,241	-3621,336	-88,257	-1210,813	-1323,5002	18240,8604
6	Max	-8047,679	-1921,934	42,719	860,9556	607,7596	24064,4421
6	Min	-9253,728	-2848,756	-88,257	-1134,9793	-1321,6674	18240,8604
8	Max	-8047,679	-1007,497	42,719	875,7018	587,9048	28206,8828
8	Min	-9247,786	-1893,336	-88,257	-1070,3455	-1210,7365	21606,2985
8	Max	-8047,679	-269,538	42,719	906,7456	593,454	28210,5172
8	Min	-9242,03	-1130,767	-88,257	-1022,0093	-1216,2857	21606,2985
10	Max	-8047,679	663,903	42,719	956,1262	598,6193	28669,1974
10	Min	-9236,735	-191,646	-88,257	-992,0098	-1130,3749	21946,8383
10	Max	-8047,679	1420,342	42,719	1021,386	603,9149	28672,8318
10	Min	-9236,254	552,249	-88,257	-977,8896	-1135,6705	21946,8383
12	Max	-8047,679	2372,104	42,719	1101,9136	632,5423	25577,0072
12	Min	-9241,549	1473,096	-88,257	-979,0372	-1073,2217	19267,0843
12	Max	-8047,679	3146,226	42,719	1190,8586	635,7011	25580,6416
12	Min	-9246,845	2197,42	-88,257	-988,6023	-1076,3805	19267,0843
14	Max	-8047,679	4106,722	42,719	1287,6104	679,3719	18799,6656
14	Min	-9250,804	3098,597	-88,257	-1005,974	-1028,9752	13573,2616
14	Max	-8047,679	4890,152	42,719	1406,1387	684,7412	18803,3
14	Min	-9250,817	3804,35	-88,257	-1045,1224	-1034,3445	13573,2616
16	Max	-8047,679	5868,159	42,719	1538,6315	744,5476	8345,438
16	Min	-9257,125	4687,624	-88,257	-1098,2352	-1003,0747	4865,3703
16	Max	-8047,679	6668,305	42,719	1687,062	743,9153	8341,8036
16	Min	-9262,732	5376,216	-88,257	-1167,2857	-1002,4425	4865,3703
18	Max	-8047,679	7660,129	42,719	1839,3981	800,726	-5363,3853
18	Min	-9268,027	6242,61	-88,257	-1240,2418	-968,1771	-6858,0545
18	Max	-8047,679	8514,077	42,719	2002,6538	794,7397	-5367,0197
18	Min	-9270,662	6964,218	-88,257	-1318,164	-962,1907	-6858,0545
19,15	Max	-8047,679	8623,29	42,719	2002,6538	834,5543	-13817,3239
19,15	Min	-9270,662	7073,431	-88,257	-1318,164	-949,6366	-15746,3874

Tabel L.5: Lanjutan.

Layout Line Distance m	Item Type	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
19,15	Max	4115,104	-286,141	245,185	234,7199	1004,3987	-366,3037
19,15	Min	3562,94	-608,195	-245,185	-268,4564	-489,2119	-642,6186
20	Max	4115,104	-205,418	245,185	234,7199	952,2214	-137,1801
20	Min	3562,94	-527,472	-245,185	-268,4564	-437,0346	-165,2999
20	Max	4115,104	378,99	245,185	142,2724	951,041	-140,6086
20	Min	3564,34	205,166	-245,185	-108,5359	-435,8542	-162,3356
20,85	Max	4115,104	459,712	245,185	142,2724	1003,4755	-365,7453
20,85	Min	3564,34	285,889	-245,185	-108,5359	-488,2887	-514,0309
20,85	Max	-8040,608	-7072,867	87,951	1318,3898	826,538	-13798,1378
20,85	Min	-9270,662	-8623,29	-42,413	-2002,8796	-941,6202	-15730,4039
22	Max	-8040,608	-6963,654	87,951	1318,3898	787,0807	-5353,2658
22	Min	-9270,662	-8514,077	-42,413	-2002,8796	-954,5317	-6800,2061
22	Max	-8040,608	-6242,056	87,951	1240,4645	793,067	-5349,6314
22	Min	-9268,027	-7660,129	-42,413	-1839,6208	-960,5181	-6800,2061
24	Max	-8040,608	-5375,662	87,951	1167,3429	737,059	8341,8036
24	Min	-9262,732	-6668,305	-42,413	-1687,1192	-995,5862	4909,8107
24	Max	-8040,608	-4687,07	87,951	1098,2291	737,51	8345,438
24	Min	-9257,125	-5868,159	-42,413	-1538,6254	-996,0372	4909,8107
26	Max	-8040,608	-3803,63	87,951	1045,0434	678,3251	18803,3
26	Min	-9250,817	-4890,141	-42,413	-1406,0597	-1027,9284	13605,7588
26	Max	-8040,608	-3097,656	87,951	1005,8707	672,9558	18799,6656
26	Min	-9250,804	-4106,702	-42,413	-1287,507	-1022,5591	13605,7588
28	Max	-8040,608	-2196,7	87,951	988,5233	629,9064	25580,6416
28	Min	-9246,845	-3146,206	-42,413	-1190,7796	-1070,5859	19287,3914
28	Max	-8040,608	-1472,542	87,951	978,9764	626,7476	25577,0072
28	Min	-9241,549	-2372,092	-42,413	-1101,8528	-1067,4271	19287,3914
30	Max	-8040,608	-551,695	87,951	977,8289	598,7417	28672,8318
30	Min	-9236,254	-1420,338	-42,413	-1021,3252	-1130,4973	21954,6927
30	Max	-8040,608	192,2	87,951	991,9491	593,4461	28669,1974
30	Min	-9236,735	-663,901	-42,413	-956,0654	-1125,2017	21954,6927
32	Max	-8040,608	1131,487	87,951	1021,9302	588,9023	28210,5172
32	Min	-9242,03	269,538	-42,413	-906,6666	-1211,734	21606,2985
32	Max	-8040,608	1893,336	87,951	1070,3455	583,3531	28206,8828
32	Min	-9247,786	1007,497	-42,413	-875,7018	-1206,1848	21606,2985
34	Max	-8040,608	2849,476	87,951	1134,9034	603,8629	24064,4421
34	Min	-9253,728	1921,934	-42,413	-860,8798	-1317,7707	18240,8604
34	Max	-8040,608	3621,899	87,951	1210,7582	605,6956	24060,8077
34	Min	-9259,241	2639,189	-42,413	-857,3546	-1319,6035	18240,8604
36	Max	-8040,608	4590,376	87,951	1303,9387	658,0462	16226,3271
36	Min	-9264,537	3533,412	-42,413	-871,1551	-1463,0302	11860,7742

Tabel L.5: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	Item Type	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
36	Max	-8040,608	5381,326	87,951	1416,4384	663,3418	16222,6927
36	Min	-9269,832	4232,226	-42,413	-904,2747	-1468,3258	11860,7742
38	Max	-8040,608	6366,754	87,951	1548,6568	717,4885	4728,3927
38	Min	-9275,128	5108,101	-42,413	-957,1132	-1613,5486	2466,4264
38	Max	-8040,608	7171,342	87,951	1699,9769	723,5006	4724,7582
38	Min	-9280,884	5773,496	-42,413	-1029,0532	-1619,5607	2466,4264
40	Max	-8040,608	8163,24	87,951	1862,473	771,9029	-9254,348
40	Min	-9280,884	6620,111	-42,413	-1112,1694	-1759,0391	-10681,8452

Tabel L.6: Kombinasi kuat 3 pada situs tanah sedang.

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0	-8062,484	-6646,792	31,348	-332,6065	-305,4327	-9279,526
2	-8062,484	-5800,177	27,148	-295,2225	-363,9295	3167,4432
2	-8062,484	-5139,758	22,948	-257,8385	-363,9295	3167,4432
4	-8062,484	-4293,143	18,748	-220,4545	-405,6263	12600,3438
4	-8062,484	-3632,723	14,548	-183,0705	-405,6263	12600,3438
6	-8062,484	-2786,109	10,348	-145,6865	-430,5232	19019,1757
6	-8062,484	-2125,689	6,148	-108,3025	-430,5232	19019,1757
8	-8062,484	-1279,074	1,948	-70,9185	-438,62	22423,939
8	-8062,484	-618,655	-2,252	-33,5345	-438,62	22423,939
10	-8062,484	227,96	-6,452	3,8495	-429,9168	22814,6335
10	-8062,484	888,38	-10,652	41,2335	-429,9168	22814,6335
12	-8062,484	1734,994	-14,852	78,6175	-404,4137	20191,2594
12	-8062,484	2395,414	-19,052	116,0015	-404,4137	20191,2594
14	-8062,484	3242,029	-23,252	153,3855	-362,1105	14553,8166
14	-8062,484	3902,448	-27,452	190,7695	-362,1105	14553,8166
16	-8062,484	4749,063	-31,652	228,1535	-303,0074	5902,3051
16	-8062,484	5409,483	-35,852	265,5375	-303,0074	5902,3051
18	-8062,484	6256,098	-40,052	302,9215	-227,1042	-5763,275
18	-8062,484	6965,768	-44,567	343,1093	-227,1042	-5763,275
19,15	-8062,484	7074,981	-44,567	343,1093	-175,8526	-13836,7056
19,15	3599,988	-360,071	1,785	-15,8882	152,491	-413,7682
20	3599,988	-279,348	1,785	-15,8882	150,9738	-142,0149
20	3599,988	279,348	-1,785	15,8882	150,9738	-142,0149
20,85	3599,988	360,071	-1,785	15,8882	152,491	-413,7682
20,85	-8062,484	-7074,981	44,567	-343,1093	-175,8526	-13836,7056
22	-8062,484	-6965,768	44,567	-343,1093	-227,1042	-5763,275
22	-8062,484	-6256,098	40,052	-302,9215	-227,1042	-5763,275
24	-8062,484	-5409,483	35,852	-265,5375	-303,0074	5902,3051
24	-8062,484	-4749,063	31,652	-228,1535	-303,0074	5902,3051
26	-8062,484	-3902,448	27,452	-190,7695	-362,1105	14553,8166
26	-8062,484	-3242,029	23,252	-153,3855	-362,1105	14553,8166
28	-8062,484	-2395,414	19,052	-116,0015	-404,4137	20191,2594
28	-8062,484	-1734,994	14,852	-78,6175	-404,4137	20191,2594
30	-8062,484	-888,38	10,652	-41,2335	-429,9169	22814,6335
30	-8062,484	-227,96	6,452	-3,8495	-429,9169	22814,6335
32	-8062,484	618,655	2,252	33,5345	-438,62	22423,939
32	-8062,484	1279,074	-1,948	70,9185	-438,62	22423,939
34	-8062,484	2125,689	-6,148	108,3025	-430,5232	19019,1757

Tabel L.6: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
34	-8062,484	2786,109	-10,348	145,6865	-430,5232	19019,1757
36	-8062,484	3632,723	-14,548	183,0705	-405,6263	12600,3438
36	-8062,484	4293,143	-18,748	220,4545	-405,6263	12600,3438
38	-8062,484	5139,758	-22,948	257,8385	-363,9295	3167,4432
38	-8062,484	5800,177	-27,148	295,2225	-363,9295	3167,4432
40	-8062,484	6646,792	-31,348	332,6065	-305,4327	-9279,526

Tabel L.7: Kombinasi kuat 3 pada situs tanah sedang.

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0	-8062,315	-6646,755	-26,635	-378,1908	-507,0063	-9279,3321
2	-8062,315	-5800,14	-26,335	-338,3361	-454,0372	3167,5636
2	-8062,315	-5139,721	-26,035	-298,4814	-454,0372	3167,5636
4	-8062,315	-4293,106	-25,735	-258,6266	-402,2681	12600,3906
4	-8062,315	-3632,687	-25,435	-218,7719	-402,2681	12600,3906
6	-8062,315	-2786,072	-25,135	-178,9172	-351,699	19019,149
6	-8062,315	-2125,652	-24,835	-139,0625	-351,699	19019,149
8	-8062,315	-1279,037	-24,535	-99,2078	-302,3298	22423,8387
8	-8062,315	-618,618	-24,235	-59,3531	-302,3298	22423,8387
10	-8062,315	227,997	-23,935	-19,4984	-254,1607	22814,4596
10	-8062,315	888,416	-23,635	20,3564	-254,1607	22814,4596
12	-8062,315	1735,031	-23,335	60,2111	-207,1916	20191,0119
12	-8062,315	2395,451	-23,035	100,0658	-207,1916	20191,0119
14	-8062,315	3242,066	-22,735	139,9205	-161,4224	14553,4956
14	-8062,315	3902,485	-22,435	179,7752	-161,4224	14553,4956
16	-8062,315	4749,1	-22,135	219,6299	-116,8533	5901,9105
16	-8062,315	5409,519	-21,835	259,4847	-116,8533	5901,9105
18	-8062,315	6256,134	-21,535	299,3394	-73,4842	-5763,7432
18	-8062,315	6965,805	-21,212	342,1832	-73,4842	-5763,7432
19,15	-8062,315	7075,018	-21,212	342,1832	-49,0903	-13837,2161
19,15	3600,58	-360,071	-0,127	-16,9383	265,1007	-413,7916
20	3600,58	-279,348	-0,127	-16,9383	265,2091	-142,0383
20	3600,58	279,348	0,128	16,9383	265,2091	-142,0383
20,85	3600,58	360,071	0,128	16,9383	265,1007	-413,7916
20,85	-8062,315	-7075,018	21,212	-342,1832	-49,0903	-13837,2161
22	-8062,315	-6965,805	21,212	-342,1832	-73,4842	-5763,7432
22	-8062,315	-6256,134	21,535	-299,3394	-73,4842	-5763,7432
24	-8062,315	-5409,519	21,835	-259,4847	-116,8533	5901,9105
24	-8062,315	-4749,1	22,135	-219,6299	-116,8533	5901,9105
26	-8062,315	-3902,485	22,435	-179,7752	-161,4224	14553,4956
26	-8062,315	-3242,066	22,735	-139,9205	-161,4224	14553,4956
28	-8062,315	-2395,451	23,035	-100,0658	-207,1916	20191,0119
28	-8062,315	-1735,031	23,335	-60,2111	-207,1916	20191,0119
30	-8062,315	-888,416	23,635	-20,3564	-254,1607	22814,4596
30	-8062,315	-227,997	23,935	19,4984	-254,1607	22814,4596
32	-8062,315	618,618	24,235	59,3531	-302,3298	22423,8387
32	-8062,315	1279,037	24,535	99,2078	-302,3298	22423,8387
34	-8062,315	2125,652	24,835	139,0625	-351,699	19019,149

Tabel L.7: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
34	-8062,315	2786,072	25,135	178,9172	-351,699	19019,149
36	-8062,315	3632,687	25,435	218,7719	-402,2681	12600,3906
36	-8062,315	4293,106	25,735	258,6266	-402,2681	12600,3906
38	-8062,315	5139,721	26,035	298,4814	-454,0372	3167,5636
38	-8062,315	5800,14	26,335	338,3361	-454,0372	3167,5636
40	-8062,315	6646,755	26,635	378,1908	-507,0064	-9279,3321

Tabel L.8: Kombinasi kuat 5 pada situs tanah sedang.

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0	-8062,315	-6646,755	-26,635	-378,1908	-507,0063	-9279,3321
2	-8062,315	-5800,14	-26,335	-338,3361	-454,0372	3167,5636
2	-8062,315	-5139,721	-26,035	-298,4814	-454,0372	3167,5636
4	-8062,315	-4293,106	-25,735	-258,6266	-402,2681	12600,3906
4	-8062,315	-3632,687	-25,435	-218,7719	-402,2681	12600,3906
6	-8062,315	-2786,072	-25,135	-178,9172	-351,699	19019,149
6	-8062,315	-2125,652	-24,835	-139,0625	-351,699	19019,149
8	-8062,315	-1279,037	-24,535	-99,2078	-302,3298	22423,8387
8	-8062,315	-618,618	-24,235	-59,3531	-302,3298	22423,8387
10	-8062,315	227,997	-23,935	-19,4984	-254,1607	22814,4596
10	-8062,315	888,416	-23,635	20,3564	-254,1607	22814,4596
12	-8062,315	1735,031	-23,335	60,2111	-207,1916	20191,0119
12	-8062,315	2395,451	-23,035	100,0658	-207,1916	20191,0119
14	-8062,315	3242,066	-22,735	139,9205	-161,4224	14553,4956
14	-8062,315	3902,485	-22,435	179,7752	-161,4224	14553,4956
16	-8062,315	4749,1	-22,135	219,6299	-116,8533	5901,9105
16	-8062,315	5409,519	-21,835	259,4847	-116,8533	5901,9105
18	-8062,315	6256,134	-21,535	299,3394	-73,4842	-5763,7432
18	-8062,315	6965,805	-21,212	342,1832	-73,4842	-5763,7432
19,15	-8062,315	7075,018	-21,212	342,1832	-49,0903	-13837,2161
19,15	3600,58	-360,071	-0,127	-16,9383	265,1007	-413,7916
20	3600,58	-279,348	-0,127	-16,9383	265,2091	-142,0383
20	3600,58	279,348	0,128	16,9383	265,2091	-142,0383
20,85	3600,58	360,071	0,128	16,9383	265,1007	-413,7916
20,85	-8062,315	-7075,018	21,212	-342,1832	-49,0903	-13837,2161
22	-8062,315	-6965,805	21,212	-342,1832	-73,4842	-5763,7432
22	-8062,315	-6256,134	21,535	-299,3394	-73,4842	-5763,7432
24	-8062,315	-5409,519	21,835	-259,4847	-116,8533	5901,9105
24	-8062,315	-4749,1	22,135	-219,6299	-116,8533	5901,9105
26	-8062,315	-3902,485	22,435	-179,7752	-161,4224	14553,4956
26	-8062,315	-3242,066	22,735	-139,9205	-161,4224	14553,4956
28	-8062,315	-2395,451	23,035	-100,0658	-207,1916	20191,0119
28	-8062,315	-1735,031	23,335	-60,2111	-207,1916	20191,0119
30	-8062,315	-888,416	23,635	-20,3564	-254,1607	22814,4596
30	-8062,315	-227,997	23,935	19,4984	-254,1607	22814,4596
32	-8062,315	618,618	24,235	59,3531	-302,3298	22423,8387
32	-8062,315	1279,037	24,535	99,2078	-302,3298	22423,8387

Tabel L.8: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
34	-8062,315	2125,652	24,835	139,0625	-351,699	19019,149
34	-8062,315	2786,072	25,135	178,9172	-351,699	19019,149
36	-8062,315	3632,687	25,435	218,7719	-402,2681	12600,3906
36	-8062,315	4293,106	25,735	258,6266	-402,2681	12600,3906
38	-8062,315	5139,721	26,035	298,4814	-454,0372	3167,5636
38	-8062,315	5800,14	26,335	338,3361	-454,0372	3167,5636
40	-8062,315	6646,755	26,635	378,1908	-507,0064	-9279,3321

Tabel L.9: Kombinasi kuat 1 pada situs tanah keras.

Layout Line Distance m	ItemType	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0,	Max	-9.636.535	-6.419.082	87.214	18.264.262	19.412.386	-115.862.178
0,	Min	-10.978.623	-7.967.616	-86.502	-18.138.693	-19.264.575	-132.047.284
2,	Max	-9.636.535	-5.560.835	87.214	16.665.946	18.086.288	18.459.361
2,	Min	-10.978.623	-6.963.169	-86.502	-16.554.253	-17.952.711	-5.294.033
2,	Max	-9.636.535	-4888,77	87.214	15.232.521	18.005.775	18.495.706
2,	Min	-10.972.492	-6.147.229	-86.502	-15.134.703	-17.872.198	-5.294.033
4,	Max	-9.636.535	-4.027.621	87.214	14.034.701	16.610.783	128.584.467
4,	Min	-10.967.197	-5.150.053	-86.502	-13.950.759	-1.649.144	84.145.964
4,	Max	-9.636.535	-3.316.135	87.214	13.110.633	16.543.727	128.620.812
4,	Min	-10.961.901	-4.347.705	-86.502	-13.040.567	-16.424.385	84.145.964
6,	Max	-9.636.535	-2408,94	87.214	12.435.806	15.172.623	202.004.441
6,	Min	-10.956.605	-3.367.985	-86.502	-12.379.616	-15.067.515	142.968.897
6,	Max	-9.636.535	-1.678.376	87.214	12.001.309	15.122.843	202.040.785
6,	Min	-10.951.307	-2.583.609	-86.502	-11.958.994	-15.017.735	142.968.897
8,	Max	-9.636.535	-750,34	87.214	1.173.965	13.977.116	237.966.272
8,	Min	-10.945.526	-1.618.981	-86.502	-11.711.212	-13.886.242	171.170.063
8,	Max	-9.636.535	1.566	87.214	11.696.815	14.044.171	238.002.616
8,	Min	-10.939.395	-846,91	-86.502	-11.682.253	-13.953.297	171.170.063
10,	Max	-9.636.535	949.189	87.214	11.910.337	13.176.046	236.578.435
10,	Min	-10.934.099	101.304	-86.502	-11.909.651	-13.099.406	168.702.173
10,	Max	-9.636.535	1.720.026	87.214	12.339.921	13.243.102	23.661.478
10,	Min	-10.928.804	854.094	-86.502	-1.235.311	-13.166.462	168.702.173
12,	Max	-9.636.535	2.686.281	87.214	12.974.844	12.617.349	19.924.906
12,	Min	-10.930.939	1.783.618	-86.502	-13.001.909	-12.554.944	135.621.514
12,	Max	-9.636.535	3.474.935	87.214	13.732.073	12.665.182	199.285.404
12,	Min	-10.936.235	2.516.843	-86.502	-13.773.014	-12.602.776	135.621.514
14,	Max	-9.636.535	4.449.712	87.214	14.581.302	12.19,76	124.595.026
14,	Min	-10.940.107	3.427.054	-86.502	-14.636.119	-12.149.429	71.931.747
14,	Max	-9.636.535	5.247.319	87.214	15.711.508	12.268.898	12.463.137
14,	Min	-10.940.207	4.141.679	-86.502	-1578,02	-12.220.727	71.931.747
16,	Max	-9.636.535	6.239.128	87.214	17.051.534	12.059.411	12.969.466
16,	Min	-10.946.532	5.034.047	-86.502	-17.134.102	-12.025.474	-22.364.282
16,	Max	-9.636.535	7.052.607	87.214	18.522.881	12.089.028	12.933.122
16,	Min	-10.952.122	5.732.081	-86.502	-18.619.325	-12.055.091	-22.364.282
18,	Max	-9.636.535	8.057.074	87.214	20.042.175	11.868.283	-126.160.104
18,	Min	-10.957.417	6608,44	-86.502	-20.152.495	-11.848.581	-147.268.283
18,	Max	-9.636.535	8.923.636	87.214	2.161.204	11.792.482	-126.196.448
18,	Min	-10.959.965	7.341.763	-86.502	-21.737.276	-11.772.779	-147.268.283

Tabel L.9: Lanjutan.

Layout Line Distance m	ItemType	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
19,15	Max	-9.636.535	9.032.849	87.214	2.161.204	11.764.227	-213.696.545
19,15	Min	-10.959.965	7.450.976	-86.502	-21.737.276	-11.752.709	-240.661.918
19,15	Max	2.359.784	-267.069	338.337	4.709.115	788.763	-7.380.484
19,15	Min	1.936.816	-625.704	-338.337	-4.703.217	-792.394	-83.364.225
20,	Max	2.359.784	-186.347	338.337	4.709.115	6.969.053	-70.976.676
20,	Min	1.936.816	-544.981	-338.337	-4.703.217	-7.005.363	-79.263.381
20,	Max	2.359.784	434,59	338.337	3.641.547	6.949.913	-70.991.037
20,	Min	1.936.998	186.142	-338.337	-3.647.445	-6.986.223	-79.263.381
20,85	Max	2.359.784	515.313	338.337	3.641.547	7.884.569	-73.734.259
20,85	Min	1.936.998	266.864	-338.337	-3.647.445	-7.920.879	-82.502.928
20,85	Max	-9.628.172	-7.450.039	86.209	21.751.286	11.682.153	-213.377.067
20,85	Min	-10.959.965	-9.032.849	-86.921	-2.162.605	-11.670.635	-240.661.918
22,	Max	-9.628.172	-7.340.826	86.209	21.751.286	11.713.775	-125.960.844
22,	Min	-10.959.965	-8.923.636	-86.921	-2.162.605	-11.694.072	-147.268.283
22,	Max	-9.628.172	-6.607.502	86.209	20.166.504	11.789.577	-12592,45
22,	Min	-10.957.417	-8.057.074	-86.921	-20.056.184	-11.769.874	-147.268.283
24,	Max	-9.628.172	-5.731.143	86.209	1.862.633	12.016.177	12.999.327
24,	Min	-10.952.122	-7.052.607	-86.921	-18.529.886	-1.198.224	-22.364.282
24,	Max	-9.628.172	-5.033.109	86.209	17.135.274	1.198.656	13.035.671
24,	Min	-10.946.532	-6.239.128	-86.921	-17.052.706	-11.952.623	-22.364.282
26,	Max	-9.628.172	-4140,46	86.209	15.795.431	12.201.903	12.463.137
26,	Min	-10.940.207	-5.247.319	-86.921	-15.726.738	-12.153.731	71.931.747
26,	Max	-9.628.172	-3425,46	86.209	14.656.036	12.130.605	124.595.026
26,	Min	-10.940.107	-4.449.712	-86.921	-14.601.219	-12.082.433	71.931.747
28,	Max	-9.628.172	-2.515.624	86.209	13.788.273	12.604.042	199.285.404
28,	Min	-10.936.235	-3474,95	-86.921	-13.747.332	-12.541.636	135.621.514
28,	Max	-9.628.172	-1782,68	86.209	13.013.656	1.255.621	19.924.906
28,	Min	-10.930.939	-2.686.295	-86.921	-12.986.591	-12.493.804	135.621.514
30,	Max	-9.628.172	-853.156	86.209	12.364.859	13.187.818	23.661.478
30,	Min	-10.928.804	-1.720.026	-86.921	-1.235.167	-13.111.178	168.702.173
30,	Max	-9.628.172	-100.366	86.209	11.921.402	13.120.762	236.578.435
30,	Min	-10.934.099	-949.189	-86.921	-11.922.089	-13.044.122	168.702.173
32,	Max	-9.628.172	848.129	86.209	11.697.483	13.994.743	238.002.616
32,	Min	-10.939.395	-1.566	-86.921	-11.712.046	-13.903.869	171.170.063
32,	Max	-9.628.172	1.618.981	86.209	11.711.238	13.927.688	237.966.272
32,	Min	-10.945.526	750,34	-86.921	-11.739.676	-13.836.813	171.170.063
34,	Max	-9.628.172	2.584.828	86.209	11.974.253	15.108.358	202.040.785
34,	Min	-10.951.307	1.678.376	-86.921	-12.016.568	-1.500.325	142.968.897

Tabel L.9: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	ItemType	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
34,	Max	-9.628.172	3.368.922	86.209	12.391.362	15.158.138	202.004.441
34,	Min	-10.956.605	2408,94	-86.921	-12.447.552	-1.505.303	142.968.897
36,	Max	-9.628.172	4.348.643	86.209	13.052.309	16.543.727	128.620.812
36,	Min	-10.961.901	3.316.135	-86.921	-13.122.375	-16.424.385	84.145.964
36,	Max	-9.628.172	5.150.897	86.209	13.961.303	16.610.783	128.584.467
36,	Min	-10.967.197	4.027.621	-86.921	-14.045.245	-1.649.144	84.145.964
38,	Max	-9.628.172	6.147.229	86.209	15.134.703	18.005.775	18.495.706
38,	Min	-10.972.492	4.892.222	-86.921	-15.232.521	-17.872.198	-5.294.033
38,	Max	-9.628.172	6.963.169	86.209	16.554.253	18.086.288	18.459.361
38,	Min	-10.978.623	5.564.287	-86.921	-16.665.946	-17.952.711	-5.294.033
40,	Max	-9.628.172	7.967.616	86.209	18.138.693	19.412.386	-115.762.657
40,	Min	-10.978.623	6.422.534	-86.921	-18.264.262	-19.264.575	-132.047.284

Tabel L.10: Kombinasi kuat 3 pada situs tanah keras.

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0,	-9.595.988	-6.443.078	12.319	1.969.315	3.303.117	-11.537.446
2,	-9.595.988	-5.589.032	12.319	1.752.377	305.673	4.946.641
2,	-9.595.988	-4.921.166	12.319	1.535.439	305.673	4.946.641
4,	-9.595.988	-4.067.119	12.319	1.318.501	2.810.342	94.829.489
4,	-9.595.988	-3.399.253	12.319	1.101.563	2.810.342	94.829.489
6,	-9.595.988	-2.545.206	12.319	884.625	2.563.954	154.274.085
6,	-9.595.988	-1.877.341	12.319	667.687	2.563.954	154.274.085
8,	-9.595.988	-1.023.294	12.319	450.749	2.317.567	18.328.043
8,	-9.595.988	-355.428	12.319	233.811	2.317.567	18.328.043
10,	-9.595.988	498.619	12.319	16.873	2.071.179	181.848.522
10,	-9.595.988	1.166.485	12.319	-200.065	2.071.179	181.848.522
12,	-9.595.988	2.020.531	12.319	-417.002	1.824.792	149.978.362
12,	-9.595.988	2.688.397	12.319	-63.394	1.824.792	149.978.362
14,	-9.595.988	3.542.444	12.319	-850.878	1.578.404	8.766.995
14,	-9.595.988	4210,31	12.319	-1.067.816	1.578.404	8.766.995
16,	-9.595.988	5.064.357	12.319	-1.284.754	1.332.017	-5.076.715
16,	-9.595.988	5.732.222	12.319	-1.501.692	1.332.017	-5.076.715
18,	-9.595.988	6.586.269	12.319	-171.863	1.085.629	-128.261.631
18,	-9.595.988	7.303.943	12.319	-1.951.838	1.085.629	-128.261.631
19,15	-9.595.988	7.413.156	12.319	-1.951.838	943.956	-212.884.954
19,15	1.973.989	-363,23	4,35E-07	92.199	-1.031.972	-73.773.697
20,	1.973.989	-282.507	4,40E-07	92.199	-1.031.972	-71.029.316
20,	1.973.989	282.507	4,26E-07	-92.199	-1.031.972	-71.029.316
20,85	1.973.989	363,23	4,51E-07	-92.199	-1.031.972	-73.773.697
20,85	-9.595.988	-7.413.156	-12.319	1.951.838	943.956	-212.884.954
22,	-9.595.988	-7.303.943	-12.319	1.951.838	1.085.629	-128.261.631
22,	-9.595.988	-6.586.269	-12.319	171.863	1.085.629	-128.261.631
24,	-9.595.988	-5.732.222	-12.319	1.501.692	1.332.017	-5.076.715
24,	-9.595.988	-5.064.357	-12.319	1.284.754	1.332.017	-5.076.715
26,	-9.595.988	-4210,31	-12.319	1.067.816	1.578.404	8.766.995
26,	-9.595.988	-3.542.444	-12.319	850.878	1.578.404	8.766.995
28,	-9.595.988	-2.688.397	-12.319	63.394	1.824.792	149.978.362
28,	-9.595.988	-2.020.531	-12.319	417.002	1.824.792	149.978.362
30,	-9.595.988	-1.166.485	-12.319	200.065	2.071.179	181.848.522
30,	-9.595.988	-498.619	-12.319	-16.873	2.071.179	181.848.522
32,	-9.595.988	355.428	-12.319	-233.811	2.317.567	18.328.043
32,	-9.595.988	1.023.294	-12.319	-450.749	2.317.567	18.328.043
34,	-9.595.988	1.877.341	-12.319	-667.687	2.563.954	154.274.085
34,	-9.595.988	2.545.206	-12.319	-884.625	2.563.954	154.274.085

Tabel L.10: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
36,	-9.595.988	3.399.253	-12.319	-1.101.563	2.810.342	94.829.489
36,	-9.595.988	4.067.119	-12.319	-1.318.501	2.810.342	94.829.489
38,	-9.595.988	4.921.166	-12.319	-1.535.439	305.673	4.946.641
38,	-9.595.988	5.589.032	-12.319	-1.752.377	305.673	4.946.641
40,	-9.595.988	6.443.078	-12.319	-1.969.315	3.303.117	-11.537.446

Tabel L.11: Kombinasi kuat 5 pada situs tanah keras.

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0,	-9.634.893	-6.468.381	-15.598	480.085	191.077	-115.841.912
2,	-9.634.893	-5.611.334	-14.098	421.383	488.044	4.955.243
2,	-9.634.893	-4.940.469	-12.598	362.681	488.044	4.955.243
4,	-9.634.893	-4.083.422	-11.098	303.979	725.011	95.194.146
4,	-9.634.893	-3.412.556	-9.598	245.277	725.011	95.194.146
6,	-9.634.893	-2.555.509	-8.098	186.574	901.978	154.874.796
6,	-9.634.893	-1.884.643	-6.598	127.872	901.978	154.874.796
8,	-9.634.893	-1.027.596	-5.098	6.917	1.018.945	183.997.194
8,	-9.634.893	-356.731	-3.598	10.468	1.018.945	183.997.194
10,	-9.634.893	500.316	-2.098	-48.234	1.075.912	182.561.341
10,	-9.634.893	1.171.182	-0,598	-106.937	1.075.912	182.561.341
12,	-9.634.893	2.028.229	0,902	-165.639	1.072.879	150.567.235
12,	-9.634.893	2.699.094	2.402	-224.341	1.072.879	150.567.235
14,	-9.634.893	3.556.141	3.902	-283.043	1.009.847	88.014.877
14,	-9.634.893	4.227.007	5.402	-341.745	1.009.847	88.014.877
16,	-9.634.893	5.084.054	6.902	-400.447	886.814	-5.095.733
16,	-9.634.893	5754,92	8.402	-45.915	886.814	-5.095.733
18,	-9.634.893	6.611.967	9.902	-517.852	703.781	-128.764.596
18,	-9.634.893	7.332.866	11.514	-580.957	703.781	-128.764.596
19,15	-9.634.893	7.442.079	11.514	-580.957	571.368	-213.720.525
19,15	1.980.771	-364.505	-0,637	24.948	-34.886	-74.059.716
20,	1.980.771	-283.782	-0,637	24.948	-29.468	-71.304.498
20,	1.980.771	283.782	0,638	-24.948	-29.468	-71.304.498
20,85	1.980.771	364.505	0,638	-24.948	-34.886	-74.059.716
20,85	-9.634.893	-7.442.079	-11.514	580.957	571.368	-213.720.525
22,	-9.634.893	-7.332.866	-11.514	580.957	703.781	-128.764.596
22,	-9.634.893	-6.611.967	-9.902	517.852	703.781	-128.764.596
24,	-9.634.893	-5754,92	-8.402	45.915	886.814	-5.095.733
24,	-9.634.893	-5.084.054	-6.902	400.447	886.814	-5.095.733
26,	-9.634.893	-4.227.007	-5.402	341.745	1.009.847	88.014.877
26,	-9.634.893	-3.556.141	-3.902	283.043	1.009.847	88.014.877
28,	-9.634.893	-2.699.094	-2.402	224.341	1.072.879	150.567.235
28,	-9.634.893	-2.028.229	-0,902	165.639	1.072.879	150.567.235
30,	-9.634.893	-1.171.182	0,598	106.937	1.075.912	182.561.341
30,	-9.634.893	-500.316	2.098	48.234	1.075.912	182.561.341
32,	-9.634.893	356.731	3.598	-10.468	1.018.945	183.997.194
32,	-9.634.893	1.027.596	5.098	-6.917	1.018.945	183.997.194
34,	-9.634.893	1.884.643	6.598	-127.872	901.978	154.874.796
34,	-9.634.893	2.555.509	8.098	-186.574	901.978	154.874.796

Tabel L.11: *Lanjutan.*

Layout Line Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
36,	-9.634.893	3.412.556	9.598	-245.277	725.011	95.194.146
36,	-9.634.893	4.083.422	11.098	-303.979	725.011	95.194.146
38,	-9.634.893	4.940.469	12.598	-362.681	488.044	4.955.243
38,	-9.634.893	5.611.334	14.098	-421.383	488.044	4.955.243
40,	-9.634.893	6.468.381	15.598	-480.085	191.077	-115.841.912

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



1. Daftar Diri Peserta

Nama Lengkap : Azura
Panggilan : Azura
Tempat/Tanggal Lahir : Kolam/08 Agustus 1997
Jenis Kelamin : Perempuan
Alamat : Jalan Utama II, Desa Kolam, Kecamatan Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang
Agama : Islam
Nama Orang Tua
Ayah : Yusman
Ibu : Sufriati
No. HP : 085835970627
E-mail : azuraa8897@gmail.com

2. Riwayat Pendidikan

Nomor Pokok Mahasiswa : 1507210148
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Alamat Perguruan Tinggi : Jl. Kapten Muchtar Basri BA No. 3 Medan 20238

No.	Tingkat Pendidikan	Nama dan Tempat	Tahun Kelulusan
1.	SD	SD Negeri 104201, Kolam	2009
2.	SMP	SMP Negeri 17, Medan	2012
3.	SMA	SMK Negeri 1 Percut Sei Tuan	2015
4.	Melanjutkan Kuliah di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Tahun 2015 sampai selesai.		