



UNIVERSITAS INDONESIA

**TIPE BANTALAN REL
PADA JENIS MODA ANGKUTAN TREM**

SKRIPSI

**PRIMA SETIAWAN YAN PRADONO
0405010507**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**TIPE BANTALAN REL
PADA JENIS MODA ANGKUTAN TREM**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**PRIMA SETIAWAN YAN PRADONO
0405010507**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN TRANSPORTASI
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Prima Setiawan Yan Pradono

NPM : 0405010507

Tanda Tangan :



Tanggal : 16 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Prima Setiawan Yan Pradono
NPM : 0405010507
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Tipe Bantalan Rel Pada Jenis Moda Angkutan
Trem.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Ir. Sigit Pranowo Hadiwardoyo, DEA. (.....)

Penguji I : Ir. Alan Marino, M.Sc. (.....)

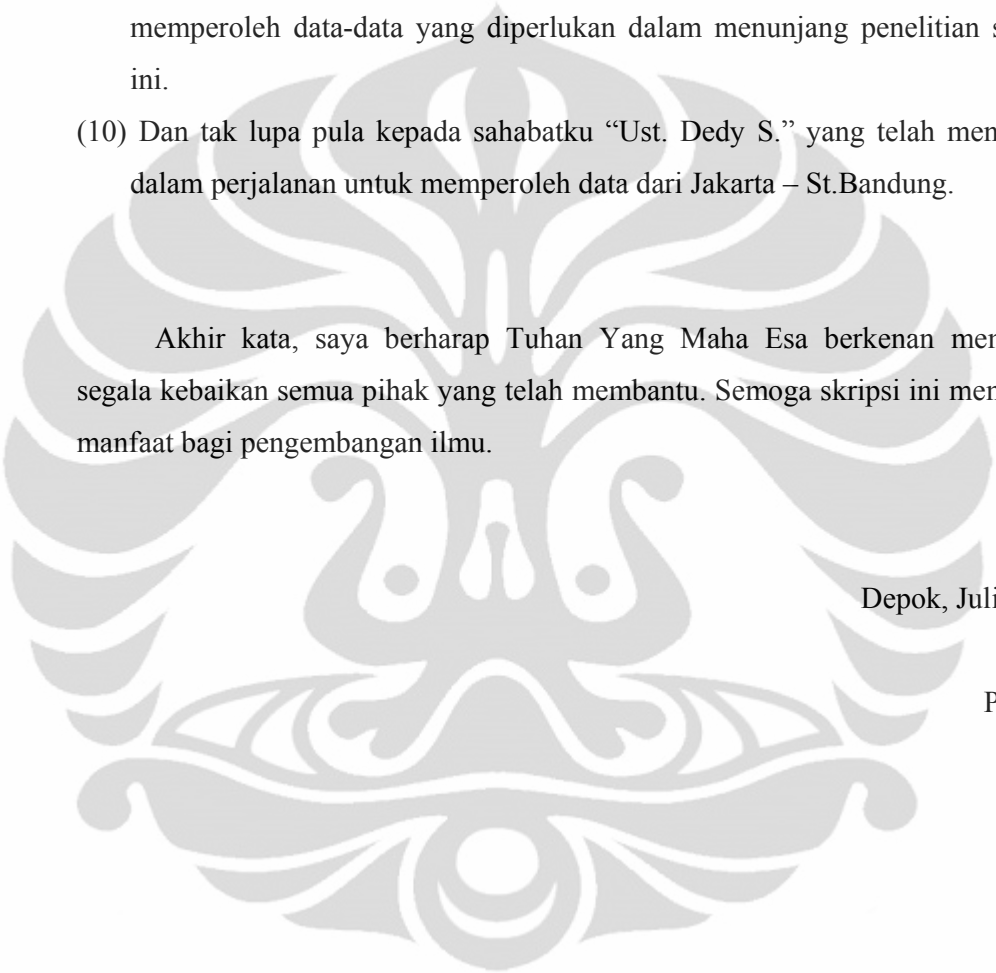
Penguji II : Ir. Heddy R. Agah, M.Eng. (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 16 Juli 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, skripsi dapat diselesaikan. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu diucapkan terima kasih yang sebesar - besarnya kepada :

- (1) Dr.Ir. Sigit Pranowo Hadiwardoyo, DEA. selaku dosen pembimbing, atas waktu, tenaga, dan pikiran yang telah diluangkan untuk mengarahkan dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Para penguji Bapak Ir. Alan Marino, M.Sc dan Ir. Heddy R. Agah, M.Eng., terima kasih atas masukan dan saran-saran yang bapak berikan.
- (3) Bapak Ir. Jachrizal Sumabrata, Ph.D, yang telah bersedia memberikan masukan dan saran-saran.
- (4) Mba dian yang telah membantu dalam urusan administratif yang terkait dalam persiapan surat-surat.
- (5) Ibu dan bapak penjaga perpustakaan yang senantiasa memberikan senyum terbaiknya untuk melayani dalam peminjaman skripsi maupun buku-buku referensi.
- (6) Bapak dan ibu , serta adik-adikku yang telah memberikan doa, perhatian, dan kasih sayangnya serta segala bentuk bantuan dalam penyusunan skripsi ini.
- (7) Sahabat-sahabat seperjuangan-ku “Sahrial, Seno, Yudha, Tyo, Prima.H, Eko, Bagas, Adi, Zae, Theo, Rian, Vian, Eka, Mubin, Emon” dan teman-teman Sipil 2005 lainnya yang tidak bisa disebutkan satu per-satu yang telah memberikan bantuan/dukungan/doa untuk kelancaran penyusunan skripsi ini. Terima kasih juga penulis ucapkan untuk “Engkong Ipin” yang telah memberikan saran dan nasihatnya dalam memberikan semangat kepada penulis untuk segera menyelesaikan skripsi ini.

- 
- (8) Sahabat terbaikku “Tri Susanti” beserta keluarga yang senantiasa memberikan dukungan semangat dan do’anya serta menjadi inspirasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
- (9) PT. Kereta Api (Persero) DAOP 1 Jakarta, Seksi Jalan Rel dan Jembatan, Resort 15 Manggarai, kepada “Mas Joko” yang telah membantu dalam memperoleh data-data yang diperlukan dalam menunjang penelitian skripsi ini.
- (10) Dan tak lupa pula kepada sahabatku “Ust. Dedy S.” yang telah menemani dalam perjalanan untuk memperoleh data dari Jakarta – St.Bandung.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juli 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Prima Setiawan Yan Pradono
NPM : 0405010507
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**TIPE BANTALAN REL
PADA JENIS MODA ANGKUTAN TREM**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 16 Juli 2010
Yang menyatakan



(Prima Setiawan Yan Pradono)

ABSTRAK

Nama : Prima Setiawan Yan Pradono
Program Studi: Teknik Sipil
Judul : Tipe Bantalan Rel Pada Jenis Moda Angkutan Trem

Bantalan merupakan salah satu bagian dari susunan konstruksi dari jalan rel yang berfungsi sebagai landasan tempat rel bertumpu, sehingga harus cukup kuat untuk menumpu beban dari moda jalan rel yang berjalan di atasnya maupun seluruh komponen struktur penyusun suatu jalan relnya itu sendiri. Bahan material yang biasanya digunakan pada bantalan adalah kayu, baja dan beton. Pemilihan bahan material tersebut merupakan salah satu hal yang dapat mempengaruhi *efisiensi* dari pendayagunaan sumber daya alam sehubungan dengan konsep pembangunan yang berwawasan lingkungan, selain itu juga dilihat dari sisi ekonomi dalam hal biaya yang dikeluarkan untuk pembangunannya. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan untuk menentukan alternatif bentuk dari bantalan rel yang dapat membandingkan dari ketiga jenis material tersebut yang paling efisien dan ekonomis dalam menunjang masa layanan (*life time*) dari kekuatan struktur yang dapat dipikul oleh bantalan dalam jangka waktu tertentu.

Penelitian ini adalah penelitian analisis komparasi dari beberapa alternatif tipe bantalan rel yang paling sesuai dilihat dari segi teknis dan ekonomi jika diaplikasikan pada konstruksi jalan rel untuk moda angkutan trem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari beberapa alternatif tipe bantalan yang paling sesuai adalah tipe bantalan beton melintang.

Kata Kunci: Efisiensi, ekonomis, *life time*, bantalan, baja, beton, kayu.

ABSTRACT

Name : Prima Setiawan Yan Pradono
Program Study : Civil Engineering
Title : Type of Sleepers in Tramway Track

Sleeper is one part of the order of construction of the rail road that serves as a platform where the rail rests, so it must be strong enough to support the load of the mode of track that runs above it and all components of the compiler structure of a rail road itself. His materials are commonly used in the sleepers is wood, steel and concrete. Election materials is one thing that can affect the *efficiency* of utilization of natural resources in relation to the concept of environmentally development, it is also viewed from the side of the economy in terms of cost incurred for its construction. Therefore, in this study was conducted to determine alternative forms of sleepers who can compare the three types of material is the most efficient and economical in supporting the service (*life time*) of the power structures that can be carried by sleepers within a certain timeframe.

This research is a comparative analysis of several alternative types of sleepers are most suitable in terms of technical and economical if applied to the construction of railways for tram transport modes. The results showed that out of several alternatives the most suitable type of sleepers is a type of cross-sleeper concrete.

Keywords: Efficiency, economy, *life time*, sleeper, steel, concrete, wood

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii

BAB 1 PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Deskripsi Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... 5

2.1 Angkutan Umum Perkotaan.....	5
2.1.1 Angkutan Umum Berbasis Jalan Raya.....	7
2.1.2 Angkutan Umum Berbasis Jalan Rel	7
2.1.2.1 LRT (<i>Light Rail Transit</i>).....	7
2.1.2.2 <i>Heavy Rail</i> / MRT (<i>Mass Rapid Transit</i>).....	12
2.2 Konstruksi Jalan Rel Pada Moda Angkutan Trem.....	13
2.2.1 Bagian Atas dan Bagian Bawah dari Jalan Rel.....	13
2.2.2 Gaya Yang Diderita Jalan Rel.....	15
2.2.3 Bagian Bawah dari Jalan Rel	17
2.2.3.1 Tubuh Jalan.....	17
2.2.3.2 Alas Balas	17
2.2.4 Bagian Atas dari Jalan Rel Moda Trem.....	20
2.2.4.1 Rel.....	21
2.2.4.2 Bantalan	24

2.2.5	Struktur Jalan Trem.....	31
2.2.6	Struktur Jalan Raya	32
2.2.7	Geometri Jalan	34
2.2.7.1	Jalan Raya	34
2.2.7.2	Jalan Rel.....	36
2.3	Pedoman Perencanaan Bantalan	40
2.3.1	Bantalan Kayu.....	40
2.3.2	Bantalan Baja	42
2.3.3	Bantalan Beton.....	44
2.3.3.1	Bantalan beton pratekan blok tunggal dengan proses ‘ <i>pretension</i> ’ ...	45
2.3.3.2	Bantalan beton pratekan blok tunggal dengan proses ‘ <i>posttension</i> ’ .	47
2.3.3.3	Bantalan beton blok ganda.....	48
2.4	Bantalan Slab	48
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		50
3.1	Pendahuluan.....	50
3.2	Alur Penelitian	51
3.3	Tahapan Penelitian.....	52
3.3.1	Pengumpulan Informasi dan Data.....	52
3.3.2	Evaluasi Tegangan yang Terjadi pada Bantalan	53
3.3.2.1	Penentuan parameter sebagai input dalam program SAP 2000	53
3.3.2.2	Penentuan parameter hasil output dari simulasi program SAP 2000 untuk analisis tegangan pada bantalan.....	54
3.3.3	Identifikasi Karakteristik Pembebanan Pada Bantalan	54
3.3.4	Perhitungan Kekuatan Bantalan dengan Pembebanan (<i>Loading</i>) dan Distribusi Reaksi (<i>Distribution of Reaction</i>) Yang Terjadi Pada Bantalan	55
3.3.5	Perencanaan Biaya Konstruksi Berdasarkan Perbandingan Biaya Persatuan Panjang	56
3.3.5.1	<i>Net Present Value</i> (NPV).....	57

BAB 4 PERHITUNGAN KEKUATAN BEBERAPA ALTERNATIF TIPE BANTALAN DAN EEFISIENSI BIAYA KONSTRUKSI BERDASARKAN METODE <i>NPV</i>	61
4.1 Karakteristik Pembebanan Jalan Rel Pada Moda Trem	61
4.2 Pembebanan Pada Bantalan Rel Jenis Moda Trem	64
4.3 Pemodelan Bentuk Tipe Bantalan	66
4.4 Analisis Perhitungan Kekuatan Bantalan	69
4.4.1 Perhitungan Rail Pressure (P) dan Lateral Rail Pressure (Q) yang Terjadi Pada Bantalan Beton Akibat Dari Beban Jalan Rel	70
4.4.2 Perhitungan Beban Merata Pada Tepi Bawah Rel Serta Superposisi Dari Beberapa Beban Gandar Yang Membebani Bantalan	71
4.4.2.1 Perhitungan beban yang harus dipikul oleh tipe bantalan melintang berdasarkan variasi jarak antar bantalan	72
4.4.3 Analisis Daya Dukung Tanah Dasar	73
4.4.4 Analisis Kekuatan Pada Tipe Bantalan Kayu Didasarkan Pada Balok Finit (<i>Finite Beam</i>) Di Atas Perletakan Elastis	74
4.4.5 Analisis Kekuatan Pada Tipe Bantalan Baja Didasarkan Pada Balok Finit (<i>Finite Beam</i>) Di Atas Perletakan Elastis	77
4.4.6 Analisis Tegangan Pada Tipe Bantalan Beton Melintang Didasarkan Pada Balok Finit (<i>Finite Beam</i>) Di Atas Perletakan Elastis	79
4.4.7 Analisis Kekuatan Pada Bantalan Beton Menerus	86
4.4.8 Analisis Tegangan Yang Terjadi Pada Bantalan <i>Slab Track</i>	88
4.5 Perbandingan Estimasi Biaya Investasi dan Pelaksanaan Konstruksi Bantalan Per-Satuan Panjang	91
4.6 Perencanaan Biaya Konstruksi Bantalan Dengan Metode <i>NPV</i>	101

BAB 5 ANALISIS PERBANDINGAN ALTERNATIF	
TIPE BANTALAN SERTA BIAYA INVESTASI DAN	
PEMELIHARAANNYA	118
5.1 Analisis Tegangan Yang Terjadi Pada Beberapa Alternatif Bentuk	
Bantalan.....	118
5.1.1 Tipe Bantalan Kayu Melintang	118
5.1.2 Tipe Bantalan Baja Melintang	120
5.1.3 Tipe Bantalan Beton Melintang	121
5.1.4 Tipe Bantalan Beton Menerus.....	126
5.1.5 Tipe Bantalan <i>Slab Track</i>	128
5.2 Analisis Jarak Antar Bantalan.....	129
5.3 Analisis Umur Rencana atau Ketahanan dan Pemeliharaan Bantalan	131
5.4 Analisis Biaya Konstruksi Bantalan Dengan Metode	
<i>Net Present Value</i>	133
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN	139
6.1 Kesimpulan	139
6.2 Saran.....	141
DAFTAR REFERENSI	142

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.2.1.a	<i>Light Rail Singgle</i>	8
Gambar 2.1.2.1.b	<i>Light Rail Multi Car</i>	8
Gambar 2.1.2.1.c	<i>Light Rail Off-Road</i>	8
Gambar 2.1.2.1.d	<i>Steam Power Trem</i>	9
Gambar 2.1.2.1.e	<i>Electrical Trem</i>	9
Gambar 2.1.2.1.f	<i>Double Floors Trem</i>	10
Gambar 2.1.2.1.g	Kereta Trem Sebagai Angkutan <i>Light Rail</i> Dalam Kota	11
Gambar 2.1.2.2.a	Angkutan <i>Heavy Rail</i> Kereta Komuter Tenaga Listrik.....	12
Gambar 2.1.2.2.b	Angkutan <i>Heavy Rail</i> Kereta <i>Metro/Subway</i>	12
Gambar 2.2	Potongan Melintang Struktur Jalan Rel Di Atas Tanah	14
Gambar 2.3	Jalan Rel Pada Moda Trem sejajar dengan permukaan jalan ...	14
Gambar 2.4	Diagram tekanan balas pada bagian bawah satu bantalan.....	19
Gambar 2.5	Diagram tekanan balas di bawah dua bantalan.....	19
Gambar 2.6.a	Bantalan arah memanjang	25
Gambar 2.6.b	Bantalan arah melintang.....	25
Gambar 2.7	Bantalan kayu.....	27
Gambar 2.8	Bantalan baja	29
Gambar 2.9	Bantalan beton blok ganda.....	30
Gambar 2.10	Bantalan beton blok tunggal.....	30
Gambar 2.11	Potongan memanjang struktur jalan rel dengan tipe bantalan arah melintang dengan perkerasan aspal	31
Gambar 2.12	Penampang melintang jalan rel konvensional.....	39
Gambar 2.13	Potongan melintang jalan rel dengan perkerasan aspal.....	40
Gambar 2.14	Balok bantalan kayu	41
Gambar 2.15	Penampang melintang bantalan baja	43
Gambar 2.16	Penampang memanjang bantalan baja	43
Gambar 2.17	Sistem penjangkaran	44
Gambar 2.18	Bantalan beton.....	45
Gambar 2.19	Tekanan pada bagian bawah bantalan.....	46
Gambar 2.20	Penulangan pada bantalan beton blok ganda.....	48
Gambar 2.21	Beberapa tipe bantalan <i>slab</i>	49
Gambar 3.1	Alur Penelitian.....	51
Gambar 3.2	Tekanan yang terjadi di bawah bantalan.....	56
Gambar 4.1	Jalan rel moda trem	61
Gambar 4.2	Struktur jalan rel moda trem.....	62
Gambar 4.3	Pembebanan statis pada potongan melintang dari bantalan	65
Gambar 4.4	Pembebanan pada jalan rel di atas pondasi elastis dengan memanjang dari rel.....	65
Gambar 4.5	Bantalan melintang.....	66
Gambar 4.6.a	Bantalan beton menerus	67
Gambar 4.6.b	Tampak atas penampang bantalan beton menerus	67
Gambar 4.6.c	Tampak depan penampang bantalan beton menerus.....	68
Gambar 4.6.b	Tampak samping penampang bantalan beton menerus.....	68
Gambar 4.7.a	Bantalan <i>slab track</i>	68
Gambar 4.7.b	Penampang melintang bantalan <i>slab track</i>	69

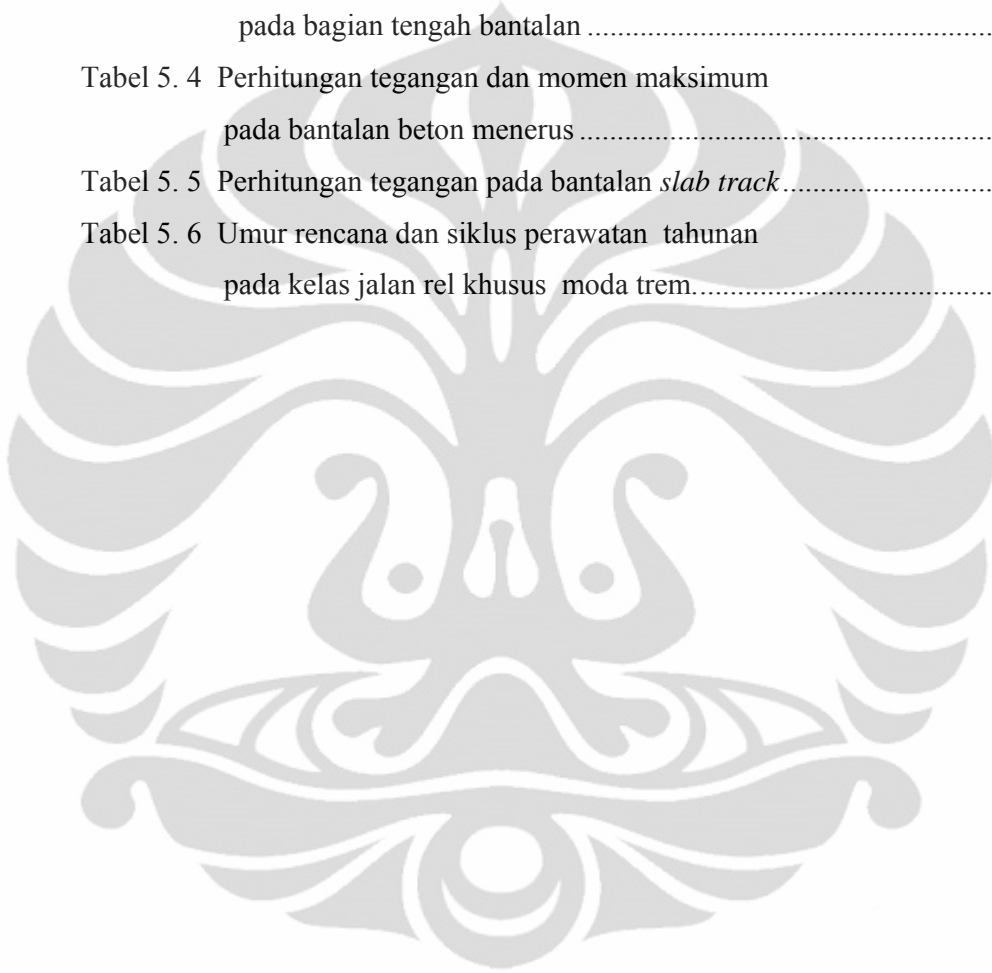
Gambar 4.8. Reaksi balas yang terjadi di bawah bantalan.....	70
Gambar 4.9. Tekanan pada permukaan badan jalan	73
Gambar 4.10. Tekanan pada bagian bawah bantalan.....	74
Gambar 4.11. Pembebanan pada bantalan akibat superposisi dari beberapa beban gandar.....	75
Gambar 4.12. Potongan penampang bantalan beton.....	79
Gambar 4.13. Diagram tegangan pada bagian bawah rel tahap pratekan awal.....	83
Gambar 4.14. Diagram tegangan pada bagian tengah bantalan tahap pratekan awal.....	83
Gambar 4.15. Diagram tegangan pada bagian bawah rel tahap pratekan efektif.....	84
Gambar 4.16. Diagram tegangan pada bagian tengah bantalan tahap pratekan efektif.....	85
Gambar 4.17. Pembebanan balok rel sepanjang bantalan	86
Gambar 4.18. Pembebanan roda gandar trem pada bantalan menerus	87
Gambar 4.19. Bentuk 3-dimensi tipe bantalan <i>slab</i>	88
Gambar 4.20. Pembebanan akibat beban rel pada bantalan <i>slab</i>	88
Gambar 4.21. Pembebanan akibat beban roda trem statis pada bantalan <i>slab</i>	89
Gambar 4.22. Diagram tegangan akibat momen maksimum pada bantalan <i>slab</i>	89
Gambar 4.23. Diagram tegangan akibat gaya lintang maksimum pada bantalan <i>slab</i>	90
Gambar 5.1. Perbandingan tegangan yang terjadi pada bagian bawah rel	124
Gambar 5.2. Perbandingan tegangan yang terjadi pada bagian tengah bantalan.....	125
Gambar 5.3. Perbandingan beban terhadap variasi jarak antar bantalan	129
Gambar 5.4. Perbandingan momen pada bagian bawah rel.....	130
Gambar 5.5. Perbandingan momen pada bagian tengah bantalan	130
Gambar 5.6. Pekerjaan galian tanah pada konstruksi jalan rel moda trem	133
Gambar 5.7. Grafik perbandingan estimasi alternatif total biaya konstruksi bantalan dengan metode <i>NPV</i>	134
Gambar 5.8. Grafik perbandingan estimasi biaya investasi awal konstruksi dari beberapa alternatif bentuk bantalan.....	136

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan antara jalan raya dan jalan rel.	6
Tabel 2. 2 Tipikal <i>rolling stock</i>	10
Tabel 2. 3 Modifikasi LRT di beberapa kota di Amerika Utara	11
Tabel 2. 4 Spesifikasi angkutan <i>heavy rail</i>	13
Tabel 2. 5 Tegangan yang terjadi pada rel berdasarkan atas standar jalan rel di Indonesia.....	22
Tabel 2. 6 Karakteristik penampang rel	22
Tabel 2. 7 Komposisi kimia dari rel.....	23
Tabel 2. 8 Panjang minimum rel panjang	24
Tabel 2. 9 Dimensi bantalan kayu dan toleransi yang masih dijijinkan di Indonesia.....	27
Tabel 2. 10 Kecepatan rencana (V_R) sesuai klasifikasi jalan di kawasan perkotaan	35
Tabel 2. 11 Persyaratan perencanaan lengkungan	36
Tabel 2. 12 Pelebaran sepur	37
Tabel 2. 13 Pengelompokan lintas berdasar pada kelandaian.....	38
Tabel 2. 14 Landai penentu maksimum	38
Tabel 2. 15 Jari-jari minimum lengkung vertikal.....	39
Tabel 2. 16 Penampang melintang jalan rel.....	39
Tabel 2. 17 Momen maksimum yang dapat diterima berdasarkan kelas kayu	41
Tabel 2. 18 Kekuatan bantalan dari kayu berdasarkan kelas	41
Tabel 2. 19 Kekuatan bantalan dari baja berdasarkan tebal.....	43
Tabel 2. 20 Momen maksimum yang dapat diterima.....	45
Tabel 2. 21 Momen maksimum yang dapat diterima.....	47
Tabel 3. 1 Klasifikasi standar jalan rel.....	52
Tabel 4. 1 Karakteristik Bantalan.....	63
Tabel 4. 2 Momen maksimum dan Kekuatan yang di izinkan dari beberapa tipe bantalan.....	63
Tabel 4.3 Perbandingan beban aksial yang harus ditahan oleh bantalan berdasarkan variasi jarak antar bantalan.	72

Tabel 4. 4 Momen tahanan bantalan baja berdasarkan variasi jarak antar bantalan.....	78
Tabel 4. 5 Momen tahanan bantalan beton pada daerah di bawah rel berdasarkan variasi jarak antar bantalan	81
Tabel 4. 6 Momen tahanan bantalan beton pada daerah tengah bantalan berdasarkan variasi jarak antar bantalan	82
Tabel 4. 7 Estimasi biaya pengadaan bantalan kayu melintang.....	91
Tabel 4. 8 Estimasi biaya konstruksi bantalan kayu melintang	92
Tabel 4. 9 Estimasi biaya pengadaan bantalan baja melintang.....	93
Tabel 4. 10 Estimasi biaya konstruksi bantalan baja melintang	94
Tabel 4. 11 Estimasi biaya pengadaan bantalan beton melintang.....	95
Tabel 4. 12 Estimasi biaya konstruksi bantalan beton melintang	96
Tabel 4. 13 Estimasi biaya pengadaan bantalan beton menerus	97
Tabel 4. 14 Estimasi biaya konstruksi bantalan beton menerus.....	98
Tabel 4. 15 Estimasi biaya pengadaan bantalan <i>Slab Track</i>	99
Tabel 4. 16 Estimasi biaya konstruksi bantalan <i>Slab Track</i>	100
Tabel 4. 17 Perhitungan excel <i>Net Present Value</i> dari konstruksi bantalan kayu melintang	104
Tabel 4. 18 Perhitungan excel <i>Net Present Value</i> dari konstruksi bantalan baja melintang	107
Tabel 4. 19 Perhitungan excel <i>Net Present Value</i> dari konstruksi bantalan beton melintang	110
Tabel 4. 20 Perhitungan excel <i>Net Present Value</i> dari konstruksi bantalan beton menerus.....	113
Tabel 4. 21 Perhitungan excel <i>Net Present Value</i> dari konstruksi bantalan <i>Slab Track</i>	116
Tabel 5. 1.a Perhitungan tegangan dan momen maksimum bantalan kayu pada bagian bawah rel.....	118
Tabel 5. 1.b Perhitungan tegangan dan momen maksimum bantalan kayu pada bagian tengah bantalan.....	118
Tabel 5. 2.a Perhitungan tegangan dan momen maksimum bantalan baja pada bagian bawah rel.....	120

Tabel 5. 2.b Perhitungan tegangan dan momen bantalan baja melintang pada bagian tengah bantalan	121
Tabel 5. 3.a Perhitungan tegangan dan momen bantalan beton melintang pada bagian bawah rel	121
Tabel 5. 3.b Perhitungan tegangan dan momen bantalan beton melintang pada bagian tengah bantalan	121
Tabel 5. 4 Perhitungan tegangan dan momen maksimum pada bantalan beton menerus	126
Tabel 5. 5 Perhitungan tegangan pada bantalan <i>slab track</i>	128
Tabel 5. 6 Umur rencana dan siklus perawatan tahunan pada kelas jalan rel khusus moda trem	132



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 4.01 A. Simulasi pemodelan pada bantalan kayu melintang
- Lampiran 4.02 A. Simulasi pemodelan pada bantalan baja melintang
- Lampiran 4.03 A. Simulasi pemodelan pada bantalan beton melintang
- Lampiran 4.04 A. Simulasi pemodelan pada bantalan beton menerus
- Lampiran 4.05 A. Simulasi pemodelan pada bantalan *slab track*
- Lampiran 4.01.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan kayu
- Lampiran 4.02.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan baja
- Lampiran 4.03.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan beton melintang
- Lampiran 4.04.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan beton menerus
- Lampiran 4.05.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan *slab*
- Lampiran 4.06.B. Estimasi volume pekerjaan galian tanah
- Lampiran 4.07.B. RAB Konstruksi tipe bantalan kayu melintang
- Lampiran 4.08.B. RAB Konstruksi tipe bantalan baja melintang
- Lampiran 4.09.B. RAB Konstruksi tipe bantalan beton melintang
- Lampiran 4.10.B. RAB Konstruksi tipe bantalan beton menerus
- Lampiran 4.11.B. RAB Konstruksi tipe bantalan *slab track*
- Lampiran 4.12.B. Perhitungan Bahan Bantalan Beton Menerus
- Lampiran 4.13.B. Perhitungan Bahan Bantalan *slab track*
- Lampiran 4.14.B. Gambar variasi tipe bantalan beton

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan angkutan umum perkotaan yang ditujukan sebagai upaya untuk meningkatkan kemampuan daya angkut serta meningkatkan mutu pelayanan penumpang sebagai angkutan umum yang tertib, cepat, nyaman dan aman, maka diperlukan pemilihan alternatif moda yang sesuai dengan kondisi dari suatu lingkup wilayah. Pemilihan moda yang dimaksud yaitu harus dapat menunjang pengangkutan penumpang secara massal, sehingga proses mobilisasi orang dapat dilakukan secara efektif per-setiap kali perjalanan.

Moda transportasi darat massal yang memadai sebagai standar mobilitas kehidupan masyarakat yang dinamis, dibagi menjadi dua jenis alternatif yang terdiri dari angkutan umum berbasis jalan raya salah satu contoh seperti *busway*, dan angkutan umum berbasis jalan rel seperti kereta api dan trem. Namun dalam penulisan ini pembahasannya di khususkan hanya pada moda trem.

Pemilihan pembangunan moda trem ditujukan sebagai sarana transportasi massal yang ramah lingkungan dan efisien. Dikarenakan konstruksi jalan rel yang digunakan pada moda trem ini terintegrasi dengan jalan raya sehingga diperlukan perencanaan sarana dan prasarana jalan rel yang baik untuk pendukung pembangunannya dengan melihat dari sisi perkerasan jalan yang telah terbangun.

Perencanaan konstruksi jalan rel harus direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat dipertanggung jawabkan secara teknis dan ekonomis. Secara teknis diartikan konstruksi jalan rel tersebut harus dapat dilalui oleh kendaraan rel dengan aman dengan tingkat kenyamanan tertentu selama umur konstruksinya. Secara ekonomis diharapkan agar pembangunan dan pemeliharaan konstruksi tersebut dapat diselenggarakan dengan biaya yang seoptimal mungkin di mana masih dimungkinkan terjaminnya keamanan dan tingkat kenyamanan.

1.2 Deskripsi Masalah

Hampir semua kegiatan pembangunan pada umumnya menyangkut pendayagunaan sumberdaya alam. Begitu juga dengan pembangunan jalan rel yang memerlukan sumber daya alam cukup besar, terutama dalam penggunaan sumber daya kayu dan baja sebagai salah satu penunjang dalam pembangunan konstruksi jalan rel. Telah kita ketahui bersama pendayagunaan sumberdaya alam seperti kayu sering dieksploitasi guna memenuhi kebutuhan akan pembangunan jalan rel di masa lalu. Oleh karena itu, semakin lama kuantitas kayu di Indonesia semakin berkurang, untuk itu diperlukan peralihan pendayagunaan kayu yang berfungsi sebagai bantalan dalam konstruksi jalan rel dengan material lain seperti beton yang lebih ramah lingkungan sehingga tidak perlu mengeksploitasi sumber daya alam yang jumlahnya semakin terbatas.

Selain dilihat dari segi sumber daya alam yang telah dijelaskan diatas, untuk merencanakan suatu konstruksi jalan rel bagi moda trem ini perlu diperhatikan pula faktor dari struktur perkerasan jalan raya yang telah terbangun (*eksisting*) sebelumnya, apakah setiap lapisan pondasi dari struktur perkerasan tersebut sudah memadai untuk mendukung komponen penyusun dari konstruksi jalan rel untuk moda trem yang akan dipasang pada perkerasan jalan raya yang ada. Oleh karena itu, dalam hal pembangunan konstruksi jalan rel pada moda angkutan trem ini membutuhkan biaya yang terbilang cukup besar, baik dari segi pemasangan jalurnya maupun infrastruktur pendukungnya, misalnya saja dapat dilihat dari jumlah penggunaan bantalan yang dibutuhkan tidaklah sedikit.

Sehubungan dengan hal diatas maka perencanaan konstruksi jalan rel khususnya untuk bantalan rel pada moda angkutan jenis trem ini diperlukan beberapa desain bentuk alternatif struktur dari setiap tipe bantalan yang digunakan terkait dengan perhitungan efisiensi biaya pembangunan serta pemeliharannya. Sehingga dapat dipilih alternatif bentuk bantalan yang sesuai dengan peruntukan konstruksi jalan rel bagi moda trem, serta efisiensi biaya pembangunannya yang seefisien mungkin.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini dimaksudkan untuk :

- Perbandingan kekuatan dan ketahanan (umur rencana) dari beberapa alternatif tipe bentuk bantalan rel yang digunakan pada konstruksi jalan rel jenis moda angkutan trem
- Dapat diketahui perbandingan perhitungan biaya konstruksi dari setiap alternatif tipe bantalan terkait efisiensi biaya pembangunannya dengan mengacu pada beberapa parameter seperti umur layanan, serta volume bantalan yang dibutuhkan untuk satu ruas tertentu.

1.4 Batasan Penelitian

Dengan waktu penelitian yang sangat terbatas dan agar penelitian dapat terarah pada tujuan yang telah ditetapkan, maka penelitian ini dibatasi hanya kepada hal-hal berikut :

1. Perencanaan perhitungan kekuatan alternatif dari tipe bentuk bantalan yang digunakan pada jenis moda trem ini terbatas hanya pada tipe bantalan dengan material kayu, baja dan beton.
2. Perencanaan perhitungan biaya pembangunan konstruksi bantalan didasarkan pada perhitungan investasi dan pemeliharaan yaitu dengan pendekatan metode *Net Present Value*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang ingin dicapai dari penelitian ini diantaranya yaitu :

1. *Efisiensi* biaya pembangunan konstruksi jalan rel untuk moda angkutan trem berdasarkan perencanaan alternatif bentuk bantalan.
2. Pemilihan bentuk tipe bantalan yang sesuai untuk digunakan pada jalan rel bagi moda angkutan trem berdasarkan segi kekuatan strukturnya serta keekonomisan biaya pembangunan serta pemeliharannya.
3. Sebagai bahan rujukan bagi penelitian-penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika dalam penulisan skripsi ini, dibagi dalam lima (5) bab yang sebagian besar terdiri dari :

Pada bab pertama berisi tentang uraian latar belakang, deskripsi permasalahan, tujuan penelitian, batasan penelitian, serta sistematika penulisan.

Pada bab kedua berisi tentang uraian dasar teori pengetahuan dari angkutan umum perkotaan khususnya jenis moda angkutan trem, serta penjelasan susunan konstruksi jalan rel, dan beberapa teori mengenai tipe-tipe bantalan rel yang didasarkan pada peraturan perencanaan konstruksi jalan rel.

Pada bab ketiga dijelaskan metode pengumpulan informasi dan data yang digunakan sebagai penunjang dalam penulisan, serta kerangka pemikiran sebagai dasar dalam membuat alur penelitian pada penulisan skripsi ini.

Pada bab keempat berisi tentang perhitungan dan pengolahan data yang didapat dari penelitian seperti data – data bentuk dimensi dan kekuatan bantalan, serta perhitungan kelayakan ekonomi dari beberapa alternatif tipe bantalan berkaitan dengan efisiensi biaya pembangunan. Kemudian data – data tersebut diolah berdasarkan teori-teori yang ada pada tinjauan pustaka.

Pada bab Kelima berisi tentang analisis perbandingan dari beberapa alternatif tipe bantalan berdasarkan tegangan yang terjadi, jarak antar bantalan yang digunakan, umur rencana ketahanan dari bantalan serta pemeliharannya, dan analisis efisiensi biaya konstruksi pada beberapa alternatif tipe bantalan.

Pada bab Keenam berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui bentuk bantalan yang sesuai dan paling efisien yang dapat digunakan pada konstruksi jalan rel pada jenis moda angkutan trem, dengan memperhatikan faktor kekuatan serta umur ekonomi dari bantalan tersebut, sehingga tercapainya efisiensi dalam hal biaya pembangunannya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Angkutan Umum Perkotaan

Pengangkutan secara tepat, teratur dan dalam jumlah yang besar (*mass transportation*) sangat diperlukan untuk menunjang mobilitas kehidupan masyarakat perkotaan yang dinamis. Pengangkutan tidak terbatas hanya untuk beberapa puluh manusia atau beberapa ton barang sekaligus, tetapi untuk beribu-ribu orang dan beribu-ribu ton barang sekaligus, selain itu pula diperlukan untuk jarak yang jauh. Transportasi telah merambah dan mempengaruhi kehidupan masyarakat modern saat ini sehingga pengaruh sosial dan budaya membentuk suatu gaya hidup. Teknologi yang dipakai dalam transportasi pun selalu berkembang, dan transportasi masal terus berperan dalam memenuhi kebutuhan hidup masyarakat.

Angkutan umum perkotaan berdasarkan penggunaan jalur lintasnya dapat dibedakan menjadi dua yaitu angkutan umum berbasis jalan raya dan angkutan umum berbasis jalan rel. Angkutan umum berbasis jalan raya pada umumnya menggunakan perkerasan jalan sebagai jalur lintasnya, sehingga peruntukkan jalurnya dibatasi dengan berbagi dengan kendaraan bermotor lainnya yang menggunakan jalan secara bersamaan, namun adapula jenis moda yang memiliki prioritas jalur khusus sebagai jalur lintasannya, misalnya *bus priority* atau dikenal sebagai *busway*. Sedangkan, angkutan umum berbasis jalan rel berbeda dengan angkutan umum jalan raya, yang membedakannya yaitu hak prioritas penggunaan jalan rel pada umumnya lebih eksklusif, sehingga tidak dapat berbagi dengan moda angkutan umum jalan raya lainnya, akan tetapi ada pula jenis moda angkutan jalan rel yang hak prioritas penggunaan jalur lintasnya bersifat semi prioritas, artinya jenis moda tersebut penggunaan hak jalurnya terintegrasi dengan kendaraan jalan raya lainnya, sehingga pada jenis moda angkutan jalan rel seperti halnya dengan moda *trem*, memiliki syarat ketentuan batas maksimum kecepatannya yang setara atau lebih rendah dengan kecepatan kendaraan bermotor

di jalan raya. Adapun perbandingan karakteristik yang nyata antara transportasi jalan raya dan transportasi jalan rel dapat ditunjukkan dengan tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan antara jalan raya dan jalan rel.

Item	Jalan Raya	Jalan Rel
Bahan jalur	Perkerasan fleksibel, perkerasan kaku, atau perkerasan komposit.	Berupa balok di atas pondasi elastis.
Lalu lintas	Penggunaannya berbagai jenis lalu lintas, dari pejalan kaki sampai kendaraan berat.	Jalur jalan rel disediakan untuk pergerakan kereta api yang terjadwal
Tegangan	Tegangan diteruskan ke tanah dasar melalui formasi lapis perkerasan.	Beban berat dari lokomotif dan gerbong diterima oleh sepur. Sehingga struktur sepur harus sangat kuat.
Kecepatan	Karena digunakan oleh berbagai jenis kendaraan, maka kecepatan kendaraan harus dibatasi	Karena tidak ada hambatan pada jalurnya, maka kecepatan yang relatif lebih tinggi lebih dapat dicapai
Gesekan	Kendaraan berjalan karena adanya gesekan antara roda (karet) dengan permukaan jalan. Gesekannya tinggi	Kereta api berjalan karena adanya gesekan antara kepala rel (baja) dengan roda baja. Gesekannya relatif rendah, yaitu kira-kira 20% gesekan antara roda (karet) kendaraan dan permukaan jalan
Perpindahan jalur	Perpindahan jalur jalan raya melalui pertemuan atau persilangan jalan	Perpindahan jalur melalui peralatan khusus, dikenal sebagai wesel.

Sumber : Jalan Rel (Tri Utomo, S.H, 2006)

2.1.1 Angkutan Umum Berbasis Jalan Raya

Sebagai gambaran umum untuk jenis angkutan umum massal yang mempergunakan jalan raya sebagai jalur pengangkutannya, termasuk dalam jenis ini yaitu bus priority (*Busway*).

Adapun karakteristik dari jenis moda busway antara lain :

- berjalan pada jalur khusus bus
- proses naik dan turun penumpang yang cepat pada tempat yang telah ditentukan
- sistem pembayaran biaya transport sebelum berangkat yang efektif dan efisien
- halte yang nyaman
- bis yang nyaman
- adanya integritas dengan moda transportasi lainnya

2.1.2 Angkutan Umum Berbasis Jalan Rel

Kereta Api sebagai angkutan umum massal berbasis jalan rel sebagai jalur pengangkutannya. Kereta api sebagai angkutan dalam kota secara umum dapat dibagi menjadi *Light Rail* dan *heavy rail*.

2.1.2.1 LRT (*Light Rail Transit*)

A. Definisi *Light Rail*

Bentuk *Light Rail* direncanakan pada tahun 1972 oleh U.S. Urban Mass Transit Association (UMTA) untuk mendeskripsikan bentuk transformasi baru dari angkutan mobil/kendaraan jalan yang berada di Eropa dan Amerika Serikat (Frederick, J.H,1985). Arti dari *Light Rail* dapat diterjemahkan sebagai angkutan rel dengan beban/kapasitas ringan serta mampu melaju dengan manufer dan kecepatan yang memadai. Dalam pengoperasiannya, angkutan *Light Rail* diregulasikan beroperasi dengan perlengkapan dan infrastruktur lebih ringan, serta kecepatan lebih rendah dibanding dengan angkutan rel lainnya karena medan operasinya sebidang dengan angkutan jalan lainnya demi menjaga keselamatan bersama.

American Public Transportation Authority (APTA) dalam “*Glossary of Transit Terminology*” mendefinisikan *Light Rail* sebagai angkutan rel yang

menggunakan listrik dengan volume kapasitas trafik lebih ringan dari angkutan *heavy rail*. Namun perlu diketahui tidak semua angkutan *Light Rail* menggunakan energi listrik adapula yang berbahan bakar. Angkutan *Light Rail* biasanya menggunakan jalur secara eksklusif, bidang naik-turun penumpang dibuat tinggi atau rendah, serta terdiri dari *single* atau *multi* car. Kategori angkutan *Light Rail* secara umum dapat dibedakan menjadi (Shardin, N. CS, 1992) :

- ❖ Bentuk konvensional: jalur dan kereta berjalan sebidang dengan jalan sehingga berbagi *space* dengan lalu-lintas kendaraan jalan lainnya. Dengan demikian jalur dibuat rendah sehingga kepala rel sejajar dengan bidang jalan. Untuk angkutan *Light Rail* sebidang dengan jalan tersebut, terdapat dua kombinasi desain jalur yakni: *on – road* dan *off – road*.
- ❖ Variasi bentuk modern : kereta berjalan pada jalur secara eksklusif dipisahkan dengan jalan pada umumnya. Kereta berjalan pada bidang yang terpisah dengan jalan yakni dapat berupa diatas atau dibawah level permukaan jalan. Contoh: *monorail*.



Gambar 2.1.2.1.a. *light rail single car*



Gambar 2.1.2.1.b. *light rail multi car*



Gambar 2.1.2.1.c. *light rail off-road*

Sumber : *Light Rail*, Wikipedia_the free encyclopedia, Edisi 4 April 2007

B. Sejarah *Light Rail*

Trem (*tramway*) adalah model angkutan *Light Rail* yang aslinya berasal dari Inggris Utara berasal dari kata untuk sejenis truk pengangkut tambang batu bara. Angkutan trem dalam keseharian masyarakat Amerika Utara disebut dengan *trolley car* atau *streetcar*. Untuk kali pertama, *trem* atau *streetcar* dioperasikan di Amerika utara yakni di kota New York melintasi jalan raya menggunakan jalur dan ditarik dengan tenaga kuda. Angkutan tersebut mulai dioperasikan tahun 1832 dan diikuti kota-kota lain yakni New Orleans dan Louisiana pada tahun 1835. Pada saat pertama, jalan rel diletakkan menonjol diatas permukaan jalan dan menimbulkan banyak kecelakaan bagi pengguna jalan lainnya, kemudian pada tahun 1852 diganti dengan rel yang rendah dengan kepala rel sejajar dengan permukaan jalan yang ditemukan oleh Alphonse Loubat (Frederick, J.H, 1985).

Perkembangan penggunaan angkutan trem disejumlah kota-kota di Eropa meningkat pesat. Pada saat itu, pengoperasian trem yang ditarik dengan kuda membutuhkan biaya yang besar dan kadang-kadang tenaga kuda tidak kuat menarik trem pada kondisi padat penumpang. Dengan pesatnya kemajuan teknologi *mechanical*, secara perlahan trem tenaga kuda diganti dengan mesin (*steam power*) pada tahun 1873. Kemudian setelah tahun 1881, penggunaan tenaga listrik untuk trem (*electrical trem*) mulai diterapkan ketika Siemens AG mengenalkan sistem elektrik untuk pengoperasian trem pada acara *International Electricity Exhibition* di Paris (Frederick, J.H, 1985).



Gambar 2.1.2.1.d. *Steam powered trem*



Gambar 2.1.2.1.e. *Electrical trem*

Sumber : *Light Rail*, Wikipedia_the free encyclopedia, Edisi 4 April 2007

Penggantian trem tenaga kuda dengan tenaga listrik terjadi secara besar-besaran pada akhir abad ke-19 atau awal abad ke-20. Di kota New York secara

resmi menutup pelayanan angkutan trem tenaga kuda pada tahun 1917. Selain menggunakan steam power dan listrik, bentuk penggunaan tenaga lain untuk trem antara lain: bahan bakar petroleum (Stockholm, Swedia), gas (Lytham St Annes), tekanan udara (Paris), dan storage batteries (New York) (Frederick, J.H, 1985).

C. Spesifikasi *Light Rail*

Model Armada *Light Rail*

Model unit armada *Light Rail* dalam hal ini adalah *streetcar* antara lain:

- Berdasarkan jumlah lantai : satu lantai (*one floor*) dan tingkat (*double floors*).
- Berdasarkan ukuran lantai (dari rel) : *low floor* (300 – 360 mm), *high floor* (>360 mm)
- Berdasarkan jumlah rangkaian : *single car* dan *multi car*
- Berdasarkan fungsinya: angkutan penumpang dan angkutan barang (Dresden, Vienna, Zürich, Amsterdam)



Gambar 2.1.2.1.f. *Double floors trem*

Sumber : *Light Rail*, Wikipedia_the free encyclopedia, Edisi 4 April 2007

Tabel 2.2 Tipikal *rolling stock*

Type	Rapid Transit	Light Rail	Streetcar
Manufacturer	Rohr	Siemens	St. Louis Car
Model	BART A-Car	S70	PCC
Width	3.2 m (10.5 ft)	2.7 m (8.7 ft)	2.5 m (8.3 ft)
Length	22.9 m (75 ft)	27.7 m (91 ft)	14.2 m (47 ft)
Capacity	150 max	220 max	65 max
Top Speed	125 km/h (80 mph)	106 km/h (66 mph)	70 km/h (45 mph)

Sumber : *Light Rail*, Wikipedia_the free encyclopedia, Edisi 4 April 2007

Karakteristik dari angkutan *Light Rail* pada saat ini biasanya dioperasikan dengan tenaga listrik, sehingga pembangunan infrastruktur jalan rel dilengkapi dengan saluran kabel listrik di atasnya untuk suplai energi sepanjang rute yang dilalui. Untuk ketertiban penumpang, disediakan halte khusus tempat pemberhentian untuk naik atau turun penumpang. Angkutan *Light Rail* dalam kota

yang dioperasikan tersebut biasanya maksimal terdiri dari empat rangkaian, mengingat jalur yang dilalui sebidang dengan jalan kendaraan lain untuk



Gambar 2.1.2.1.g. Kereta Trem sebagai angkutan light rail dalam kota

Sumber : Light Rail, Wikipedia encyclopedia, Edisi 4 April 2007

‘menghindari terjadinya kemacetan.

Angkutan umum jenis *Light Rail* atau sering disebut dengan *Light Rail Transit* (LRT) dapat di ambil contoh yakni kereta Trem. Untuk kali pertama, pada tahun 1970-an U.S. *Urban Mass Transit Association* (UMTA) melakukan pengembangan standarisasi armada angkutan *Light Rail*. Armada LRT baru tersebut diterapkan di Boston dan San Francisco sebanyak 275 unit yang dipesan dari perusahaan Boeing-Vertol pada tahun 1973. Modifikasi LRT selanjutnya dilakukan hingga kota-kota lain di Amerika utara menerapkan sistem LRT antara lain sebagai berikut (UMTA):

Tabel 2.3 Modifikasi LRT di beberapa kota di Amerika Utara

Kota	Tahun pembukaan	Panjang rute (mil)	Biaya operasional (juta \$)	Rata-rata penumpang per hari
Edmonton	1978	6,5	185	25.000
Calgary	1981	17,1	500	111.000
San Diego	1981	33,2	292	50.000
Buffalo	1985	6,4	536	29.900
Vancouver	1986	15,2	1033	110.000
Portland	1986	15,1	240	22.500
Sacramento	1987	18,3	176	23.400
San Jose	1987	20,3	500	19.700
Los Angeles	1990	21,5	877	34.200
Baltimore	1992	22,7	364	18.600
St. Louis	1993	18	351	23.000

Sumber: *Journal of American Planning Association*, U.S. Urban Mass Transit Association (UMTA).

2.1.2.2 Heavy Rail / MRT (Mass Rapid Transit)

Secara umum pengertian dari *heavy rail* yakni angkutan rel dengan jumlah kapasitas penumpang besar serta beroperasi dengan layanan kecepatan yang tinggi. Mengingat kapasitas penumpang besar dan kecepatan layanan yang tinggi, konstruksi rel (jalur) angkutan *heavy rail* harus didesain lebih kuat dan kokoh, serta lebih lebar dari sistem *Light Rail* untuk keselamatan perjalanan, sehingga untuk konstruksi dan pengoperasian angkutan *heavy rail* lebih besar dari angkutan *Light Rail*. Penggerak yang digunakan untuk pengoperasian *heavy rail* angkutan dalam kota dapat berupa lokomotif disel dan listrik. Namun, seiring dengan meningkatnya tingkat pencemaran udara sebagai akibat polusi asap dari kendaraan bermotor diperkotaan, sebagian besar pemerintah- pemerintah kota di dunia menerapkan kebijakan untuk angkutan *heavy rail* dalam kota, pada umumnya menggunakan tenaga listrik.

Secara umum, karakteristik dari kereta kommuter / regional tenaga listrik dan kereta metro / subway hampir sama. Keduanya memintasi jalur dengan spesifikasi hampir sama dan jalur yang dilalui terpisah dari jalan kendaraan lainnya (mobil, bus, dan angkutan jalan). Yang membedakan kedua angkutan ini yakni letak jalur yang dilalui, untuk jalur kereta kommuter / regional tenaga listrik yang dilewati terletak dipermukaan tanah, sedangkan kereta metro / jalur *subway* yang dilewati terletak di bawah permukaan tanah (*underground*).



Gambar 2.1.2.2.a. Angkutan *heavy rail*
kereta komuter tenaga listrik



Gambar 2.1.2.2.b. Angkutan *heavy rail*
kereta metro / subway

Sumber : *Light Rail*, Wikipedia_the free encyclopedia, Edisi 4 April 2007

A. Spesifikasi Angkutan *Heavy rail* Dalam Kota

Spesifikasi angkutan *heavy rail* dalam kota antara lain sebagai berikut:

Tabel 2.4 Spesifikasi angkutan *heavy rail*

Spesifikasi	Detail
Lebar sepur	± 1.435 mm (Indonesia : 1.067 mm)
Jumlah rangkaian	1 – 12 gerbong
Kecepatan rata-rata	± 90 km /jam
Kapasitas penumpang	100 penumpang per gerbong

Sumber : Jalan Kereta Api (Iman Subarkah, 1981)

Sedangkan, menurut Reglemen R.10 PJKA, pembagian kelas jalan rel di Indonesia berdasarkan tingkatan kecepatan yang diizinkan adalah sebagai berikut (Rekayasa Jalan Rel, Alamsyah A.A, 2003) :

- Kelas I tingkat 1 (I /1) kecepatan tertinggi = 120 km/ jam.
- Kelas I tingkat 2 (I /2) kecepatan tertinggi = 100 km/ jam.
- Kelas II tingkat 1 (II/1), kecepatan tertinggi = 59 km/ jam.
- Kelas II tingkat 2 (II/2), kecepatan tertinggi = 45 km/ jam.
- Kelas II tingkat 3 (II/3), kecepatan tertinggi = 40 km/ jam.
- Kelas III, kecepatan tertinggi = 20 km/ jam.

Sedangkan menurut Reglemen R.19, pembagiannya sebagai berikut :

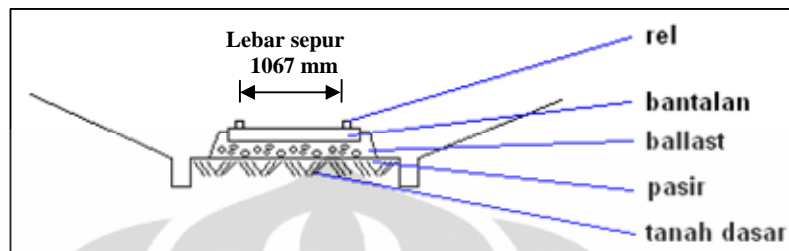
- Kelas II / 1 sampai dengan I / 1, termasuk lintas raya.
- Kelas II / 2 dan II / 3, termasuk lintas cabang.
- Kelas III, termasuk jalan trem.

2.2 Konstruksi Jalan Rel Pada Moda Angkutan Trem

2.2.1 Bagian Atas dan Bagian Bawah dari Jalan Rel

Susunan Konstruksi pada jalan rel bagian atas pada umumnya terdiri dari rel-rel yang disangga oleh bantalan-bantalan kayu, besi atau beton bertulang. Rel-rel tersebut ditambatkan pada bantalan dengan menggunakan paku rel (*rail spikes*), tirpon (*screw spikes*) atau baut (*bolt*), secara langsung atau dengan perantaraan pelat-pelat jepit. Kedua rel dengan bantalan-bantalannya merupakan suatu rangka, disebut bagian atas dari jalan rel. Rangka-rangka rel sambung-

menyambung dengan pelat-pelat penyambung pada rel-relnya, dan diperkuat dengan baut-baut sambungan dan disebut *sepur*.

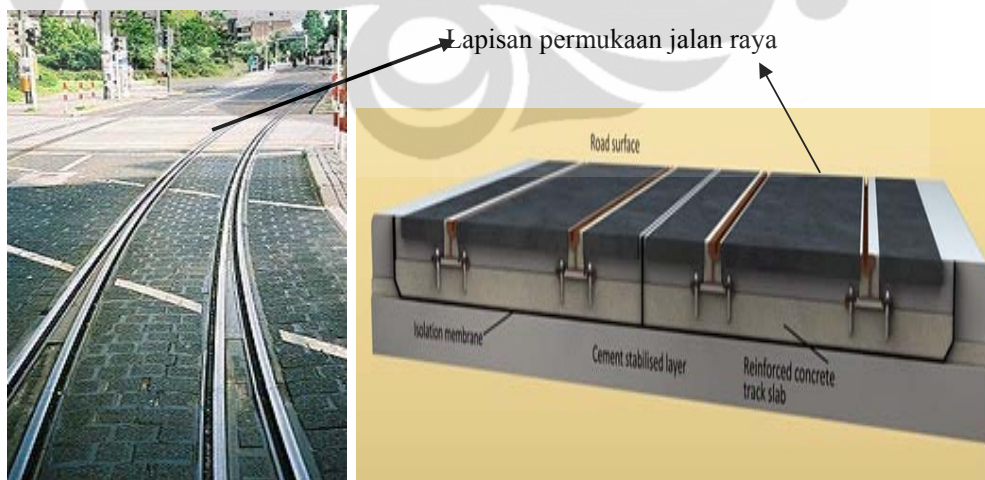


Gambar 2.2 Potongan melintang struktur jalan rel di atas tanah

Sumber : Jalan Kereta Api (Iman Subarkah, 1981)

Sepur ini diletakkan di dalam suatu alas dari pasir, krikil atau kricak, yang dinamai alas *balas*. Tepi atas dari alas balas rata dengan dengan tepi atas dari bantalan. Dengan demikian sepur itu tidak dapat menggeser ke samping atau ke arah memanjang, tetapi kokoh duduknya di dalam balas. Di bawah alas terdapat pasir dan bagian dari badan tanah yang bentuknya seperti suatu tanggul, disebut tubuh jalan. Alas balas dan tubuh jalan termasuk bagian bawah dari jalan rel.

Namun, perbedaan antara konstruksi jalan rel untuk jenis moda angkutan trem yaitu pada perletakan jalan rel-nya yang dibangun pada perkerasan jalan raya yang telah terbangun sebelumnya, sehingga susunan konstruksi bagian atasnya tertutup oleh lapisan perkerasan jalan.



Gambar 2.3 Jalan rel pada moda trem sejajar dengan permukaan jalan.

Sumber: Rail Future Conference 15th Nov. 2008

2.2.2 Gaya Yang Diderita Jalan Rel

Kereta api yang berjalan di atas jalan rel akan menimbulkan gaya-gaya yang harus ditahan oleh struktur jalannya. Gaya-gaya tersebut diantaranya berupa:

1. Gaya-gaya vertikal yang disebabkan oleh berat kereta api.
2. Gaya-gaya mendatar siku-siku pada sumbu sepur, disebabkan oleh gerakan dinamis dari kereta api dan oleh tekanan angin pada kereta api.
3. Gaya-gaya mendatar yang bekerja secara memanjang searah sumbu sepur, disebabkan oleh pengereman, sentuhan, gaya berat jika jalannya menanjak dan akibat memuainya rel.

Seluruh gaya vertikal diterima oleh kedua rel dan dengan perantaraan bantalan-bantalan diteruskan kepada alas balas. Alas balas meneruskan kembali gaya-gaya tersebut secara memencar dan merata dengan luas permukaan yang lebih besar kepada badan jalan, sehingga tekanan spesifik pada tubuh jalan ini menjadi kecil, tidak melebihi tekanan maksimum yang masih dapat ditahan oleh tubuh jalan. Untuk ini, alas balas harus cukup tebal.

Gaya mendatar terutama ditahan oleh alas balas. Untuk itu, bantalan-bantalan seluruh tebalnya harus terpendam di dalam alas balas. Selain itu, untuk menahan gaya horizontal yang bekerja siku-siku pada sumbu sepur, di kedua ujung bantalan pun harus ada cukup balas. Bagian ini disebut dengan bahu alas balas (*ballast shoulder*).

Suatu jalan rel menahan gaya-gaya dinamis yang ditimbulkan oleh beban yang melaluinya dengan kecepatan tertentu. Beban tersebut berupa tekanan terpusat dari roda-roda kereta api yang bergerak secara berurutan. Berjalannya roda-roda itu disertai dengan sentuhan-sentuhan pada jalan rel karena adanya sambungan-sambungan rel. Sentuhan tersebut akan menimbulkan getaran yang juga harus ditahan oleh jalan rel. Tiap kali roda melewati sambungan rel, berpindah dari ujung rel yang satu ke ujung rel lainnya. Pada waktu roda meninggalkan ujung rel yang satu, roda itu sedikit turun karena di tempat lubang antara dua rel (yang disebut siar sambungan) tidak ada yang mendukungnya ke arah vertikal. Karena itu roda membentur pada ujung rel lainnya. Benturan inilah yang menyebabkan sentuhan dan relnya bergetar. Getaran-getaran yang timbul tidak hanya terjadi pada rel-rel, tetapi juga pada bagian bantalan, balas, dan tubuh

jalan.

Selanjutnya, beban kereta api juga menimbulkan gaya desak ke arah horizontal siku-siku pada sumbu sepur, yang dilimpahkan melalui roda-roda kepada rel. Gaya ini berupa sentuhan-sentuhan horizontal dan juga akibat goyangan kereta api dalam perjalanannya karena adanya renggang antara flens roda dan rel dan karena tidak ratanya sepur. Gaya desak horizontal ini oleh rel-rel dilimpahkan melalui besi-besi penambat relnya (paku rel, tirpon atau baut jepit) kepada bantalan, yang akhirnya melimpahkannya kepada lapisan balas.

Selanjutnya juga, lapisan balasnya harus kuat menahan gaya desak horizontal tadi. Pertahanan balasnya terdiri atas pertahanan geser pada bidang tepi bawah dan bidang samping bantalannya dan pertahanan balas yang ditimbulkan oleh lapisan balas pada ujung bantalan. Besarnya pertahanan geser pada bidang tepi bawah dan samping bantalan tergantung pada besarnya tekanan oleh beban pada bantalannya sendiri dan angka gesekannya. Pada umumnya, angka gesekan antara dua bahan yang sama kerasnya, oleh getaran akan lebih cepat menurun daripada gesekan antara bahan keras dan bahan lembek. Dalam hal ini juga, angka gesekan antara bantalan dan lapisan balas sangat dipengaruhi oleh intensitas getaran yang ditimbulkan oleh kereta api. Semakin tinggi kecepatan kereta api, semakin keras getaran yang ditimbulkannya dan semakin banyak berkurangnya angka gesekan itu, dan dengan demikian juga pertahanan gesernya. Sebaliknya, semakin besar kecepatan kereta api, semakin besar pula sentuhan-sentuhan yang terjadi, dengan demikian pula gaya desak ke arah horizontal pada rel.

Sehubungan dengan itu, maka untuk kecepatan kereta apinya ditentukan suatu batas maksimum, sehingga gaya desak horizontal masih dapat ditahan oleh pertahanan geser dan pertahanan balasnya, dengan cukup aman.

Beban bergerak disertai sentuhan dan getaran yang keras sekali dan terjadi dari hari ke hari secara berulang terus-menerus itu, dapat menyebabkan perubahan-perubahan pada susunan dan kedudukan konstruksi yang menahannya, yaitu jalan rel. Setiap kali beban bergerak melaluinya, terjadilah perubahan, yang semakin lama semakin membesar. Jika sampai terjadi kelambatan sedikit saja dalam perbaikannya, perubahan tersebut dapat melampaui suatu batas tertentu, yang mengakibatkan bencana berupa kecelakaan kereta api dengan segala

korbannya. Itulah sebabnya jalan rel mengharuskan pengawasan dan perawatan yang intensif secara terus-menerus.

2.2.3 Bagian Bawah dari Jalan Rel

2.2.3.1 Tubuh Jalan

Tubuh jalan berupa tanah dasar, yaitu umumnya tanah liat atau pasir atau campuran tanah liat dan pasir. Dengan berjalannya waktu, tanah akan memadat. Pemadatan ini disebabkan oleh berat butir-butir tanahnya sendiri dan oleh meresapnya air yang ada di dalamnya menuju ke permukaan bawah.

Karena beratnya kereta api, tanah juga dapat memadat. Besarnya pemadatan ini tergantung pada kompresibilitas tanah itu sendiri. Besarnya kompresibilitas tergantung pada tingkat konsolidasi dari tanah. Kompresibilitas tanah yang berbutir halus adalah lebih kecil daripada yang berbutir kasar. Campuran butir-butir berbentuk pipih akan memperbesar kompresibilitasnya.

2.2.3.2 Alas Balas

Pada bagian atas dari tubuh jalan terdapat selapisan pasir, krikil atau kricak, yang berfungsi sebagai (Iman Subarkah,1981) :

- a) melimpahkan tekanan kendaraan di atas rel dan bantalan kepada tubuh jalan secara merata dan dengan luas bidang tekanan yang lebih besar, sehingga tekanan spesifik pada tubuh jalan menjadi kecil, tidak melampaui daya penahan dari tanah tubuh jalannya.
- b) memberi kedudukan yang tetap dan kokoh pada sepur (yaitu bantalan-bantalan dengan rel-relnya), baik ke arah memanjang maupun ke arah siku-siku pada sumbu sepur.
- c) mengalirkan air secepat-cepatnya, supaya bantalan-bantalan tetap kering dan tidak cepat lapuk atau rusak.
- d) untuk kelentingan jalan rel.

Untuk alas balas dapat dipakai pasir, split, krikil, kricak. Bahan yang dipakai haruslah bersih, supaya rumput dan tumbuh-tumbuhan tidak dapat tumbuh, yang dapat menyebabkan balas menjadi kotor dan mengurangi

kelentingan dan daya pengeringnya.

Pasir untuk balas harus bersih dan berbutir kasar, boleh tercampur krikil halus. Jika digunakan bantalan baja, sebaiknya jangan digunakan pasir, karena baja mudah terkorosi. Pasir laut yang sudah mati boleh juga digunakan untuk balas, jika digunakan bantalan kayu. Krikil harus juga bersih dan keras. Besarnya antara 0,5 – 6 sentimeter. Tidak boleh mengandung pasir lebih dari 10 %. Kricak harus dibuat dari batu alam yang keras, tidak boleh tercampur dengan debu, remukan batu dan lain-lain.

Sebagai gambaran umum untuk mengetahui lapisan balas yang digunakan pada konstruksi jalan rel dapat diketahui beberapa macam karakteristik dari balas berikut ini (Balai Pelatihan Teknik Perkeretaapian Bekasi, 2002) :

a) Lapisan balas atas :

Batu pecah yang keras, padat, bersudut tajam dengan ukuran 20 – 60 mm

b) Lapisan balas bawah :

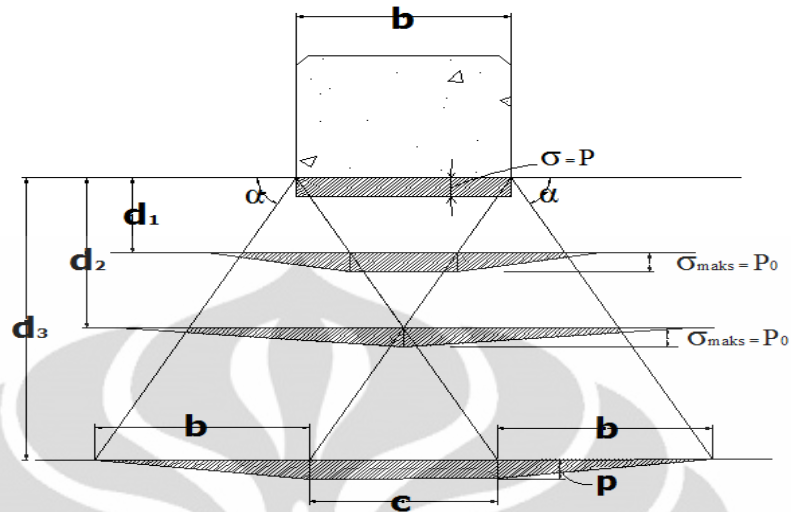
Krikil halus, sedang atau kasar dan dapat berfungsi sebagai saringan antara balas bagian atas dengan tanah dasar.

c) Definisi balas batu pecah :

Suatu bagian dari jalan rel yang terdiri dari susunan batu pecah dengan ukuran tertentu. Harus mempunyai kapasitas pendukung yang baik, tahan gesekan yang tinggi terhadap bantalan.

d) Tebal balas :

Tebal alas balas tergantung pada tanah dasarnya (dalam hal ini tubuh jalan), tekanan gandar, kecepatan kereta api maksimum yang diizinkan dan jenis bahan yang dipakai. Pelimpahan tekanan dari bantalan kepada tubuh jalan melalui balas berlangsung di bawah bantalan dengan tekanan yang merata sebesar p_0 kg tiap cm^2 . Sedalam d_1 diagram tegangannya seperti pada gambar 2.4 di bawah, tegangan maksimumnya tetap sebesar p_0 dan nilai maksimum ini tidak berubah sampai kedalaman tertentu, yaitu d_2 .



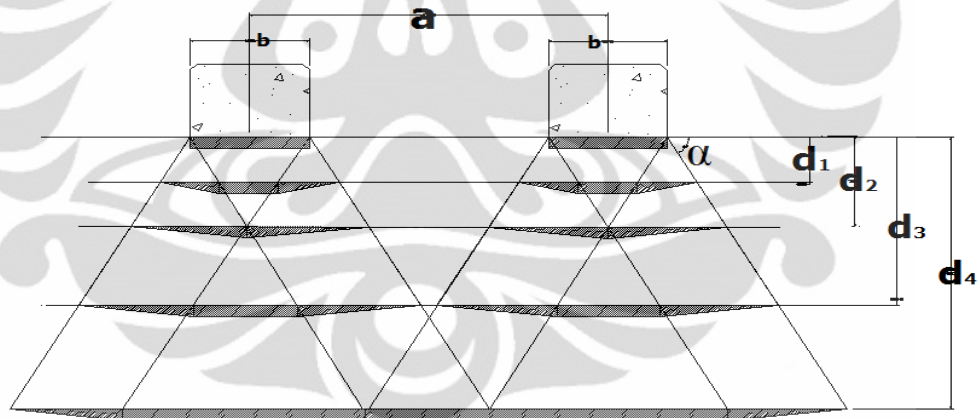
Gambar 2. 4 Diagram tekanan balas pada bagian bawah satu bantalan

Sumber : Jalan Kereta Api (Iman Subarkah, 1981)

Dimana :

$$d_2 = \frac{1}{2} b \operatorname{tg} \alpha$$

$$(b + c) p = b \cdot p_0 \text{ atau } p = \frac{b}{b+c} p_0 ; p = \frac{d_2}{d_3} p_0 \quad (2.1)$$



Gambar 2.5 Diagram tekanan balas di bawah dua bantalan

Sumber : Jalan Kereta Api (Iman Subarkah, 1981)

Tekanan balas yang terjadi di bawah dua bantalan dapat dilihat pada gambar diagram diatas, dimana tekanan yang terdistribusi secara merata didapatkan pada kedalaman sebesar d_4 .

Dimana :

$$d_4 = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \text{ dan } a = \text{jarak bantalan}$$

$$p = \frac{d_3}{d_4} p_0 \quad (2.2)$$

Nilai daya dukung tanah dasar (CBR) yang diperoleh akibat tekanan-tekanan yang dihasilkan oleh pembebanan pada struktur jalan trem dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Talbot sebagai berikut (PD.10, Penjelasan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel, 1986):

$$\sigma_1 = \frac{3.P_d}{b.l} \quad (2.3)$$

Dimana :

P_d = beban dinamis (kg)

b = lebar bantalan (cm)

l = panjang bantalan (cm)

$$\sigma_2 = \frac{53,87.\sigma_1}{d^{1.25}} \quad (2.4)$$

Dimana :

d = tebal balas (cm)

σ_2 = tekanan pada permukaan badan jalan (kg/cm^2)

σ_1 = tekanan di bawah bantalan (kg/cm^2)

Sebagai contoh di dalam prakteknya, tebal alas balas di bawah bantalan untuk jalan kelas I tingkat I diambil paling sedikit 40 cm terdiri atas suatu lapisan atas dari kricak setebal 25 cm dan lapisan bawah dari pasir setebal 15 cm (Iman Subarkah, 1981).

Sedangkan ukuran bahu balas yang umumnya digunakan yaitu (Balai Pelatihan Teknik Perkeretaapian, 2002):

- 50 cm untuk jalan rel kelas I dan II
- 40 cm untuk jalan rel kelas III dan IV
- 35 cm untuk jalan rel kelas V

2.2.4 Bagian Atas dari Jalan Rel Moda Trem

Bagian atas dari jalan rel terdiri atas :

- a. rel-rel yang bekerja sebagai penghantar roda dan melimpahkan tekanan kendaraan kepada bantalan-bantalan.
- b. alat-alat besi kecil, yaitu alat-alat yang menambat rel pada bantalan-

bantalan, alat-alat penyambung rel, pelat-pelat alas.

- c. bantalan-bantalan yang memegang kedua rel, meneruskan tekanan kepada alas balas dan menjamin kokohnya kedudukan sepur di dalam balas.
- d. perkerasan jalan (*flexible pavement / rigid pavement*) yang menutupi beberapa bagian dari konstruksi jalan rel pada moda angkutan trem. Sehingga kepala rel terlihat sejajar dengan permukaan perkerasan jalan raya.

2.2.4.1 Rel

Rel merupakan batang yang dipikul oleh penyangga-penyangga, sehingga rel menderita momen-momen pelenturan. Oleh karena itu momen pertahanannya harus cukup besar untuk menahan tegangan-tegangan lentur akibat dari tekanan roda. Jadi, untuk lalu-lintas berat diperlukan rel dengan profil yang lebih berat daripada untuk lalu-lintas ringan. Selain itu rel, rel harus tahan terhadap aus dan tidak mudah retak.

Profil dari rel harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut :

- a) momen pertahanannya harus cukup besar untuk menahan tegangan-tegangan lentur akibat tekanan roda. oleh karena itu, potongan melintangnya dibuat berbetuk i, jadi bahan dikumpulkan ke dalam bagian dari kepala dan kaki rel.
- b) permukaan rel harus sesuai dengan bentuk rodanya sedemikian, sehingga proses ausan yang terjadi lambat sekali dan tekanan spesifik oleh roda pada rel menjadi kecil.
- c) rel harus mudah diletakkan dan ditambah pada bantalan. Kaki rel dibuat lebar dan sisi bawahnya datar.

Rel-rel umumnya dapat tahan 15 – 20 tahun atau lebih, tergantung pada lalu lintasnya, keadaan setempat dan bahan penyusun dari relnya sendiri. Namun dalam kenyataannya, tidak jarang dijumpai rel-rel yang umumnya sudah berusia lebih dari 40 tahun. Sedangkan jika dilihat dari segi panjangnya rel dapat bermacam-macam.

A. Tipe dan Karakteristik Penampang

Penggunaan rel yang sering digunakan di Indonesia ialah rel R14, rel R3, dan rel R2, dengan berat masing-masing 41,52 kg/m; 33,4 kg/m; 25,75 kg/m dan momen inersia (I_x) masing-masing 1360, 1037, dan 538 cm^4 (Ir. Iman Subarkah,1981).

Sedangkan berdasarkan perencanaan konstruksi jalan rel (Peraturan Dinas No.10,1986) tipe rel untuk masing-masing kelas jalan serta karakteristik dari penampang rel tercantum pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.5 Tegangan yang terjadi pada rel berdasarkan atas standar jalan rel di Indonesia

Kelas Jalan	Tipe rel	Tegangan (kg/cm^2)
I	R. 60	1042
	R. 54	1195
II	R. 54	1146
	R. 50	1236
III	R.54	1097
	R.50	1183
	R.42	1474
IV	R. 54	1048
	R. 50	1130
	R. 42	1409
V	R. 42	1343

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

Tabel 2.6 Karakteristik penampang rel

Besaran geometri rel	Tipe rel				
	R.33	R. 42	R. 50	R. 54	R. 60
Berat (kg/m)	33.34	42,59	50,40	54,43	60,34
I_x (cm^4)	1036,6	1.369	1.960	2.346	3.055

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

B. Jenis, Komposisi kimia, Kekuatan dan Kekerasan

1. Jenis

Jenis rel yang dipakai adalah rel tahan aus yang sejenis dengan rel UIC-WRA.

2. Komposisi kimia

Komposisi kimia rel tercantum pada tabel 2.7.

Tabel 2.7 Komposisi kimia dari rel

Unsur kimia	Kadar komposisi (%)
C	0,60 – 0,80
Si	0,15 – 0,35
Mn	0,90 – 1,10
P	Max. 0,035 %
S	Max. 0,025 %

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

3. Kekuatan rel

Kuat tarik minimum rel adalah 90 kg/mm^2 dengan perpanjangan minimum 10 %.

4. Kekerasan rel

Kekerasan kepala rel tidak boleh kurang dari pada 240 *Brinell*.

C. Jenis Rel Menurut Panjangnya

Di Indonesia panjang rel yang biasa digunakan adalah sebagai berikut (Iman Subarkah, 1981) :

Rel R2 panjang 6,80 m dan 20,30 meter.

Rel R3 panjang 11,90 m dan 13,60 meter.

Rel R14 panjang 13,60 m dan 17 meter.

Saat ini rel-rel yang digunakan jauh lebih panjang lagi, yaitu mencapai 25 meter sebagai panjang normal yang dipakai.

Sedangkan menurut pedoman perencanaan konstruksi jalan rel, panjang rel dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu :

1. Rel standar adalah rel yang panjangnya 25 meter.
2. Rel pendek adalah rel yang panjangnya maksimal 100 meter.
3. Rel panjang adalah rel yang panjang tercantum minimumnya pada tabel.

Tabel 2.8 Panjang minimum rel panjang

Jenis bantalan	Tipe rel			
	R. 42	R. 50	R. 54	R. 60
Bantalan kayu	325 m	375 m	400 m	450 m
Bantalan beton	200 m	225 m	250 m	275 m

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

2.2.4.2 Bantalan

Bantalan merupakan landasan tempat rel bertumpu dan diikat dengan penambat rel oleh karena itu harus cukup kuat untuk menahan beban dari kereta api yang berjalan diatas rel. Bahan yang banyak digunakan pada bantalan adalah kayu, baja dan beton bertulang. Pemilihan bahan material tersebut didasarkan pada kelas yang sesuai pada klasifikasi jalan rel di Indonesia. Adapun fungsi dari bantalan yaitu diantaranya :

- a. meneruskan beban dari rel ke balas, menahan beban lebar sepur dan stabilitas ke arah luar jalan rel.
- b. menjamin kokohnya kedudukan sepur di dalam *balas*.
- c. menjamin kedudukan yang tetap bagi rel-rel, sehingga lebar sepur tetap.
- d. menahan beberapa gaya lateral
- e. memberikan kemudahan pada saat penggantian *rail fastening* (tirpon).

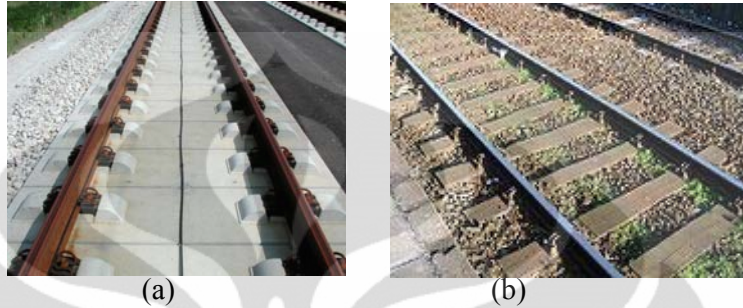
persyaratan-persyaratan bantalan yang baik adalah :

- a. harus dapat memelihara lebar sepur (*gauge*) dengan sebaik-baiknya,
- b. harus menyediakan area perletakan yang cukup untuk rel-rel,
- c. mempunyai berat yang cukup untuk kestabilan,
- d. kontak area antara balas dan bantalan–bantalan harus cukup memadai,
- e. tidak mudah tercabut dari posisinya,
- f. bantalan harus mempunyai kekuatan yang cukup memadai untuk menahan beban atau tekanan-tekanan yang berat,
- g. bantalan-bantalan yang dipakai harus ekonomis.

A. Bentuk Bantalan

Berdasarkan arah perletakkannya terdapat dua bentuk bantalan, yaitu :

- a). bantalan arah memanjang
- b). bantalan arah melintang



Gambar 2.6 (a) Bantalan arah memanjang. (b) Bantalan arah melintang

Sumber : *Rail road tie*, Wikipedia_the free encyclopedia, Edisi 16 November 2008

Apabila digunakan bantalan arah memanjang, air hujan dapat terbendung, sehingga balas yang digunakan harus mampu menyalurkan dengan baik air hujan yang terbendung tersebut. Untuk itu, maka frekuensi pemeliharaan dan pembersihan balas menjadi tinggi, akibatnya biaya yang diperlukan menjadi besar. Selain itu, untuk menjaga agar jarak antar bantalan memanjang dapat terjaga, diperlukan konstruksi penambat arah melintang. Geometri membujur bantalan arah memanjang harus mengikuti geometri memanjang jalan rel dan harus menerus, oleh karena itu maka bahan yang paling cocok untuk bantalan arah memanjang ialah beton.

Sedangkan untuk bantalan arah melintang yang biasanya digunakan pada jalan rel untuk kereta api konvensional, tidak terlalu membutuhkan frekuensi yang tinggi dalam pemeliharaan dan pembersihan balasnya, sehingga biayanya relatif lebih minimal dibandingkan dengan bantalan arah membujur. Selain itu untuk penggunaan bahan material pada bantalan arah melintang ini dapat digunakan alternatif seperti baja, beton ataupun kayu.

B. Jenis bantalan

Berikut ini akan dijelaskan pengetahuan secara umum jenis bantalan berdasarkan bahan material yang digunakan seperti kayu, baja dan beton.

1. Bantalan Kayu

Bantalan kayu digunakan pada jalan rel di Indonesia karena selain mudah dibentuk juga bahannya mudah didapat. Supaya dapat memenuhi fungsinya, bantalan kayu harus cukup keras, sehingga mampu menahan tekanan, penambat rel yang dipasang pada bantalan tidak mudah lepas, dan harus tahan lama. Untuk itu maka bahan kayu yang digunakan selain harus kuat menahan beban yang bekerja padanya, juga harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- utuh dan padat
- tidak terdapat mata kayu
- tidak mengandung unsur kimia yang tidak baik bagi komponen jalan rel yang terbuat dari logam
- tidak ada lubang bekas ulat atau binatang lainnya
- tidak ada tanda-tanda permulaan terjadi pelapukan, dan
- apabila kayu diawetkan, pengawetan harus merata dan sempurna

Keunggulan penggunaan dari bantalan kayu adalah sebagai berikut :

- mudah didapat dan harga per meter kubik relatif murah,
- dapat meredam *vibration* dan *shock*,
- bantalan kayu sangat sesuai dengan untuk semua tipe balas,
- mudah mempergunakannya, mengangkat, mengambil, dan memelihara.

Sedangkan, kelemahan bantalan kayu yaitu :

- sukar untuk menjaga sepur yang baik,
- biaya pemeliharaan tinggi (mahal),
- hanya berumur 12-15 tahun untuk bantalan yang tidak diawetkan.

- Bentuk dan dimensi bantalan kayu

Bentuk dan dimensi bantalan kayu yang akan diuraikan berikut ialah untuk lebar sepur 1067 mm.



Gambar 2.7 Bantalan kayu

Sumber : *Rail road tie*, Wikipedia_the free encyclopedia, Edisi 16 November 2008

Dimensi bantalan kayu berikut toleransi dimensi yang masih diijinkan ialah sebagai berikut.

Tabel 2. 9 Dimensi bantalan kayu dan toleransi yang masih diijinkan di Indonesia.

No.	Letak bantalan	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tebal (cm)	Berat Minimum (Kg)
1	Pada jalan lurus	200 (+4,-2)	22 (+2,-1)	13 (+1,-0)	± 50
2	Pada jembatan	180 (+4,-2)	22 (+2,-1)	18 (+1,-0)	± 50

Sumber: Jalan rel (Tri Utomo S.H,2006)

Kayu terbaik di Indonesia adalah jati. Kayu besi juga biasa dipakai, karena keras, tetapi mudah belah, dan lagi mengandung asam yang tidak baik bagi alat-alat besi penambat rel. Untuk jalan rel kelas II dipakai juga kayu tahun . Ukuran bantalan kayu di Negara Indonesia adalah 0,12 x 0,22 x 2,00 meter, dengan toleransi kurang 2 atau lebih 10 sentimeter bagi panjangnya, kurang satu atau lebih 2 cm, untuk lebarnya dan lebih 2 cm bagi tebalnya. Bidang sisi atas dan sisi bawah harus rata dan sejajar (Iman Subarkah,1981).

Bantalan kayu jati dapat tahan 16 sampai 20 tahun atau lebih, kayu tahun tahan 10 sampai 15 tahun, sama sekali tergantung pada kualitas kayu dan keadaannya setempat. Kayu-kayu yang diawetkan dengan minyak atau lainnya, akan tahan lebih lama lagi.

2. Bantalan Baja

Pemakaian bantalan baja membawa lebih banyak keuntungan karena di dalam balas yang baik, bantalan besi tahan jauh lebih lama daripada bantalan kayu. Untuk menjaga jangan sampai bantalan besi dapat bergeser atau berputar di dalam balas, sisi-sisinya dibuat menyengkeram supaya dapat mencakup balas cukup banyak. Begitu juga ujung-ujungnya dibuat menyengkeram supaya tidak dapat menggeser ke arah siku-siku pada sumbu putar.

Keunggulan dari bantalan baja di antaranya ialah :

- ringan dan mudah diangkut,
- tidak mudah lapuk, tidak diserang oleh binatang-binatang kecil (rayap dan sejenisnya),
- elastisitas yang lebih besar sehingga retak-retak seperti yang terjadi pada bantalan kayu dan bantalan beton dapat dihindari,
- pada balas yang baik, bantalan baja lebih tahan lama dibandingkan dengan bantalan kayu. Umur layanan bantalan baja dapat mencapai 30, 40 tahun (Mundrey J.S,2000),
- mudah dan relatif murah dalam pembuatannya.

Kelemahan dari bantalan baja ialah :

- memerlukan devisa untuk pembeliannya, kalau negara belum dapat memproduksinya sendiri.
- jika ada kereta atau gerbong ke luar rel, maka bantalan besi yang tertimpa roda melekok dan tidak bisa diluruskan kembali dengan baik, sehingga lebar sepur berubah jika digunakan lagi.
- pada kecepatan kereta api tinggi, berjalannya kereta api kurang tenang.
- bantalan baja harus tetap kering, oleh karenanya balasnya harus dan tidak menahan air (kerikil atau kricak). batu-batunya harus keras supaya tidak mudah hancur oleh besi.

- Bentuk dan dimensi bantalan baja

Bantalan baja untuk R. 25 dan R. 33 mempunyai dimensi yang sama, perbedaannya hanya pada posisi lubang alat penambatnya. Dimensi bantalan baja secara umum sebagai berikut :

- Panjang : 200 cm
- Lebar bawah : 23,2 cm
- atas : 14,4 cm
- Tinggi : 75 cm
- Tebal bawah rel : 0,9 cm
- Berat : 47,2 kg



Gambar 2.8 Bantalan baja

Sumber : *Resort manggarai*, seksi bangunan jalan rel dan jembatan.

3. Bantalan beton

Kebutuhan akan bantalan dalam jumlah yang besar yang harus dipenuhi dalam waktu yang relatif singkat, tidak dapat dilayani dengan hanya menggunakan bantalan kayu atau baja saja. Untuk itu kebutuhan bantalan dalam jumlah yang besar juga menjadi salah satu faktor yang menunjang (*feasibility*) pembuatan bantalan beton untuk di aplikasikan pada konstruksi jalan rel di masa sekarang.

Keunggulan yang ada pada bantalan beton diantaranya ialah :

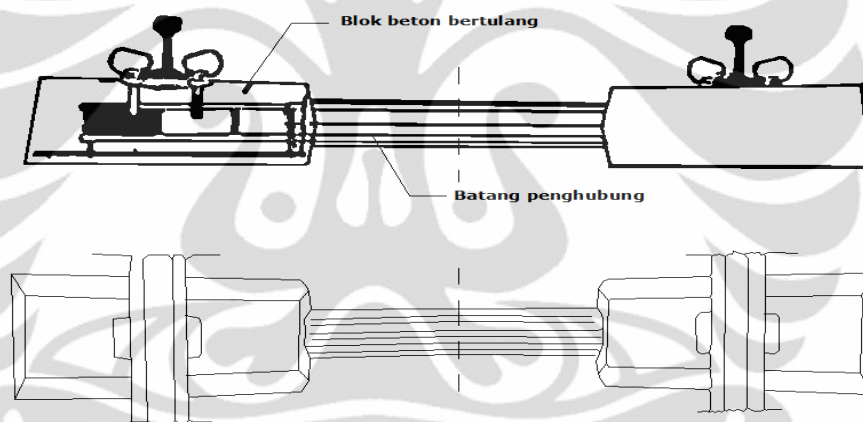
- stabilitasnya baik, dapat menjaga lebar sepur dengan baik,
- umur konstruksi panjang,
- tidak dapat terbakar,
- pengendalian mutu bahan mudah dilaksanakan, cocok untuk produksi massal (*mass production*), dan
- beton bukan konduktor listrik, sehingga dapat digunakan untuk sepur dengan elektrifikasi.

Sedangkan, kelemahan dari bantalan beton ialah :

- kurang elastik dibandingkan dengan bantalan kayu,
- pemasangan secara manual sulit karena berat bantalan beton sangat tinggi, yaitu sekitar $2 \frac{1}{2}$ sampai 3 kali lebih besar dari berat bantalan kayu,
- kemungkinan kerusakan pada proses pengangkutan dan pengangkatan,
- tidak meredam getaran dan kebisingan (perlu konstruksi tambahan untuk meredam).

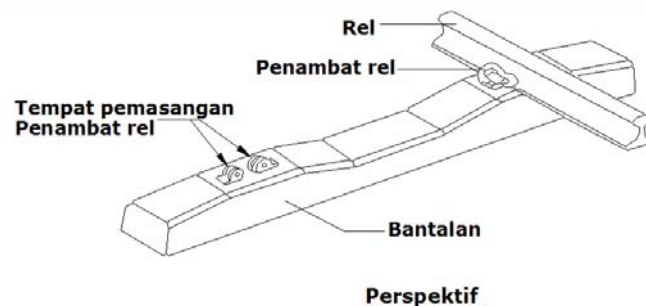
Terdapat dua jenis bantalan beton, yaitu :

- a) Bantalan beton blok ganda (*bi-block*), dan
- b) Bantalan beton blok tunggal (*monolithic*).



Gambar 2.9 Bantalan beton blok ganda

Sumber: Jalan rel. (Tri Utomo S.H,2006)



Gambar 2.10 Bantalan beton blok tunggal

Sumber: Jalan rel. (Tri Utomo S.H,2006)

C. Jarak Bantalan

Secara ideal jarak bantalan atau jumlah bantalan dalam satu satuan panjang rel tergantung pada hal-hal berikut :

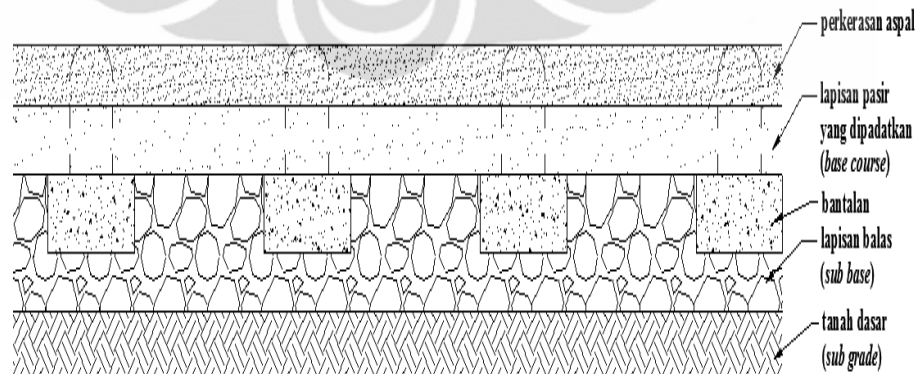
- a) tipe, potongan melintang dan kekuatan rel,
- b) jenis dan kekuatan bantalan,
- c) balas tempat bantalan diletakkan, dan
- d) beban gandar, volume dan kecepatan kereta api.

Secara praktis di Indonesia untuk jarak bantalan adalah sebagai berikut :

- a) jarak bantalan pada lintas lurus ialah 60 cm, sehingga jumlah bantalan yang dipergunakan adalah 1.667 buah untuk km panjang.
- b) sedangkan pada tikungan/lengkung, jarak bantalan diambil sebesar 60 cm diukur pada rel luar.

2.2.5 Struktur Jalan Trem

Dikarenakan konstruksi jalan rel pada jenis moda angkutan trem ini dalam hal penggunaan jalurnya (*track*) yang berbagi dengan penggunaan jalur perkerasan jalan raya, oleh karena itu dalam merencanakan selain konstruksi dari jalan relnya sendiri (rel, bantalan, dan balas) perlu juga diperhatikan dari sisi geometri dan struktur perkerasan jalan yang sudah terbangun sebelumnya. Sebagai gambaran visual perspektif dari susunan konstruksi jalan rel untuk moda trem yang diaplikasikan pada struktur perkerasan jalan raya, dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.11 Potongan memanjang struktur jalan rel dengan tipe bantalan beton arah melintang dengan perkerasan aspal

Sumber : Jalan rel (Tri Utomo S.H,2006)

Perkerasan jalan yang ditinjau dalam merencanakan pembangunan jalan trem ini adalah lapisan material yang dipilih dan dikerjakan menurut persyaratan tertentu dan berfungsi menyebarkan beban roda kendaraan baik bagi moda tremnya maupun kendaraan lainnya yang menggunakan perkerasan jalan, sehingga dapat ditahan oleh tanah dasar. Secara umum, bagian perkerasan jalan secara berturut-turut dari lapisan atas ke lapisan bawah yaitu lapisan permukaan (*surface*), lapisan pondasi atas berupa pasir yang dipadatkan (*base course*), lapisan pondasi bawah (*sub base*) dalam hal ini diasumsikan sebagai lapisan balas yang digunakan pada konstruksi jalan rel, dan lapisan tanah dasar (*sub grade*).

Tujuan struktur perkerasan (*pavement*) jalan yang akan diaplikasikan menyatu dengan konstruksi jalan rel untuk moda trem ini adalah :

- Agar di atas struktur perkerasan itu dapat di lalui setiap saat. Oleh karena itu, lapis permukaan perkerasan harus kedap air untuk melindungi lapisan dibawahnya hingga ke tanah dasar sehingga kadar air lapis tanah dasar tidak mudah berubah. Selain itu pula agar material penyusun dari konstruksi jalan relnya tidak cepat mudah mengalami kerusakan.
- Mendistribusikan beban terpusat, agar tekanan yang terjadi pada lapis tanah dasar menjadi lebih kecil. Oleh karena itu, lapis struktur perkerasan harus dibuat dengan sifat modulus kekakuan (modulus elastisitas) lapisan atas lebih besar daripada lapis di bawahnya.

2.2.6 Struktur Jalan Raya

Sebagai gambaran umum untuk mengetahui jenis perkerasan yang ada pada jalan raya, dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu perkerasan lentur (*Flexible Pavement*), perkerasan kaku (*Rigid Pavement*), dan perkerasan komposit.

A. Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)

Perkerasan lentur adalah perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar yang telah dipadatkan. Lapisan-lapisan tersebut, berturut-turut dari atas ke bawah, yaitu lapisan permukaan (*surface*), lapisan pondasi (*base course*), lapisan pondasi bawah (*sub base*), dan lapisan tanah dasar (*sub grade*).

B. Perkerasan Kaku (Rigid Pavement)

Perkerasan jalan beton semen atau secara umum disebut perkerasan kaku, terdiri atas plat (*slab*) beton semen sebagai lapis pondasi dan lapis pondasi bawah (bisa juga tidak ada) di atas tanah dasar. Dalam konstruksi perkerasan kaku, plat beton sering disebut sebagai lapis pondasi karena dimungkinkan masih adanya lapisan aspal beton di atasnya yang berfungsi sebagai lapis permukaan.

Perkerasan beton yang kaku dan memiliki modulus elastisitas yang tinggi, akan mendistribusikan beban ke bidang tanah dasar yang cukup luas sehingga bagian terbesar dari kapasitas struktur perkerasan diperoleh dari plat beton sendiri. Hal ini berbeda dengan perkerasan lentur dimana kekuatan perkerasan diperoleh dari tebal lapis pondasi bawah, lapis pondasi dan lapis permukaan.

Lapis pondasi bawah digunakan di bawah plat beton karena beberapa pertimbangan, yaitu antara lain untuk menghindari terjadinya pumping, kendali terhadap sistem drainasi, kendali terhadap kembang-susut yang terjadi pada tanah dasar dan untuk menyediakan lantai kerja (*working platform*) untuk pekerjaan konstruksi. Secara lebih spesifik, fungsi dari lapis pondasi bawah adalah:

- menyediakan lapisan yang seragam, stabil dan permanen.
- menaikkan harga modulus reaksi tanah dasar (*modulus of sub-grade reaction = k*), menjadi modulus reaksi gabungan (*modulus of composite reaction*).
- mengurangi kemungkinan terjadinya retak-retak pada plat beton.
- menyediakan lantai kerja bagi alat-alat berat selama masa konstruksi.

a) Jenis-jenis Perkerasan Jalan Beton Semen

Berdasarkan adanya sambungan dan tulangan plat beton perkerasan kaku, perkerasan beton semen dapat diklasifikasikan menjadi 3 jenis sebagai berikut:

- perkerasan beton semen biasa dengan sambungan tanpa tulangan untuk kendali retak.
- perkerasan beton semen biasa dengan sambungan dengan tulangan plat untuk kendali retak. untuk kendali retak digunakan *wire mesh* diantara siar dan penggunaannya independen terhadap adanya tulangan *dowel*.
- perkerasan beton bertulang menerus (tanpa sambungan). tulangan beton

terdiri dari baja tulangan dengan prosentasi besi yang relatif cukup banyak (0,02 % dari luas penampang beton).

- perkerasan semen beton pra-tekan.

Pada saat ini, jenis perkerasan beton semen yang populer dan banyak digunakan di negara-negara maju adalah jenis perkerasan beton bertulang menerus.

C. Perkerasan Komposit

Perkerasan komposit merupakan gabungan konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*) dan lapisan perkerasan lentur (*flexible pavement*) di atasnya, dimana kedua jenis perkerasan ini bekerja sama dalam memikul beban lalu lintas. Untuk ini maka perlu ada persyaratan ketebalan perkerasan aspal agar mempunyai kekakuan yang cukup serta dapat mencegah retak refleksi dari perkerasan beton di bawahnya. Perkerasan komposit ini biasa digunakan sebagai *runway* pesawat terbang.

2.2.7 Geometri Jalan

Pada bagian ini akan dijelaskan secara umum mengenai aspek geometri jalan yang dapat dipertimbangkan sebagai gambaran dalam memperoleh informasi yang diperlukan dalam perencanaan konstruksi jalan rel untuk moda trem, yang pada dasarnya struktur konstruksinya merupakan kombinasi dengan struktur perkerasan jalan raya yang telah terbangun sebelumnya.

2.2.7.1 Jalan Raya

Persyaratan geometri jalan raya yang harus diperhatikan :

- a) memenuhi aspek keselamatan, kelancaran, efisiensi, ekonomi, ramah lingkungan dan kenyamanan;
- b) mempertimbangkan dimensi kendaraan;
- c) mempertimbangkan efisiensi perencanaan;
- d) mendukung hierarki fungsi dan kelas jalan dalam suatu tatanan sistem jaringan jalan secara konsisten;
- e) mempertimbangkan pandangan bebas pemakai jalan;
- f) mempertimbangkan drainase jalan;
- g) mempertimbangkan kepentingan para penyandang cacat.

Alinyemen horisontal dan vertikal harus mempertimbangkan aspek kebutuhan teknik dan aspek kebutuhan pemakai jalan yang memadai dan efisien.

Pemilihan alternatif alinyemen perlu mempertimbangkan:

- a) keselamatan dan kenyamanan bagi pengemudi, penumpang dan pejalan kaki;
 - b) kesesuaian dengan keadaan topografi, geografi dan geologi di sekitar jalan;
 - c) koordinasi antara alinyemen horisontal dan vertikal;
 - d) ekonomi dan lingkungan
- Kecepatan rencana (V_R)

Kecepatan yang dipilih untuk mengikat komponen perencanaan geometri jalan dinyatakan dalam kilometer per jam (km/h).

V_R untuk suatu ruas jalan dengan kelas dan fungsi yang sama, dianggap sama sepanjang ruas jalan tersebut. V_R untuk masing-masing fungsi jalan ditetapkan sesuai Tabel .

Untuk kondisi lingkungan dan atau medan yang sulit, V_R suatu bagian jalan dalam suatu ruas jalan dapat diturunkan, dengan syarat bahwa penurunan tersebut tidak boleh lebih dari 20 kilometer per jam (km/h).

Tabel 2.10 Kecepatan rencana (V_R) sesuai klasifikasi jalan di kawasan perkotaan

Fungsi jalan	Kecepatan rencana V_R , (km/h)
Arteri Primer	50 - 100
Kolektor Primer	40-80
Arteri Sekunder	50-80
Kolektor Sekunder	30-50
Lokal Sekunder	30-50

Sumber : Perencanaan Geometri Jalan Perkotaan (RSNI,2004)

- Potongan melintang

Potongan melintang jalan terdiri atas bagian-bagian sebagai berikut:

- a) jalur lalu lintas;
- b) bahu jalan;
- c) saluran samping;
- d) median, termasuk jalur tepian;
- e) trotoar / jalur pejalan kaki;
- f) jalur sepeda;
- g) Separator / jalur hijau;
- h) lereng / talud

2.2.7.2 Jalan Rel

Geometri jalan rel direncanakan berdasar pada kecepatan rencana seperti ukuran-ukuran kereta yang melewatinya dengan memperhatikan faktor keamanan, kenyamanan, ekonomi dan keserasian dengan lingkungan sekitarnya. Berikut ini akan diuraikan geometri pada jalan rel hanya secara garis besarnya saja.

- Lebar Sepur

Untuk seluruh kelas jalan rel lebar sepur yang digunakan di Indonesia adalah 1067 mm yang merupakan jarak terkecil antara kedua sisi kepala rel, diukur pada daerah 0 – 14 mm di bawah permukaan teratas kepala rel.

- Lengkung Horisontal

Alinemen horisontal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang horisontal, alinemen horisontal terdiri dari garis lurus dan lengkungan.

1. Lengkung Lingkaran

Dua bagian lurus, yang perpanjangannya saling membentuk sudut harus dihubungkan dengan lengkung yang berbentuk lingkaran, dengan lengkung atau tanpa lengkung-lengkung peralihan. Untuk berbagai kecepatan rencana, besar jari-jari minimum yang diijinkan adalah seperti yang tercantum dalam tabel.

Tabel 2.11 Persyaratan perencanaan lengkungan

Kecepatan rencana (km/jam)	Jari-jari minimum lengkung lingkaran tanpa lengkung peralihan (m)	Jari-jari minimum lengkung lingkaran yang diijinkan dengan lengkung peralihan (m)
120	2370	780
110	1990	660
100	1650	550
90	1330	440
80	1050	350
70	810	270
60	600	200

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

2. Lengkung Peralihan

Lengkung peralihan adalah suatu lengkung dengan jari-jari yang berubah beraturan. Lengkung peralihan dipakai sebagai peralihan antara bagian yang lurus dan bagian lingkaran dan sebagai peralihan antara dua jari-jari lingkaran yang berbeda. Lengkung peralihan dipergunakan pada jari-jari lengkung yang relatif kecil.

3. Lengkung S

Lengkung S terjadi bila dua lengkung dari suatu lintas yang berbeda arah lengkungnya terletak bersambungan. Antara kedua lengkung yang berbeda arah ini harus ada bagian lurus sepanjang paling sedikit 20 meter di luar lengkung peralihan.

4. Pelebaran Sepur

Pelebaran sepur dilakukan agar roda kendaraan rel dapat melewati lengkung tanpa mengalami hambatan. Pelebaran sepur dicapai dengan menggeser rel dalam ke arah dalam. Besar pelebaran sepur untuk berbagai jari-jari tikungan adalah seperti yang tercantum dalam tabel 2.11.

Tabel 2.12 Pelebaran sepur

Pelebaran sepur (mm)	Jari-jari tikungan (meter)
0	$R > 600$
5	$550 < R < 600$
10	$400 < R < 550$
15	$350 < R < 400$
20	$100 < R < 350$

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

Pelebaran sepur maksimum yang diijinkan adalah 20 mm.

5. Peninggian Rel

Pada lengkungan, elevasi rel luar dibuat lebih tinggi dari pada rel dalam untuk mengimbangi gaya sentrifugal yang dialami oleh rangkaian kereta. Peninggian rel dicapai dengan menempatkan rel dalam pada tinggi semestinya dan rel luar lebih tinggi.

- Landai

1. Pengelompokan lintas

Berdasar pada kelandaian dari sumbu jalan rel dapat dibedakan atas 4 (empat) kelompok seperti yang tercantum dalam tabel 2.12.

Tabel 2.13 Pengelompokan lintas berdasar pada kelandaian

Kelompok	Kelandaian
Lintas datar	0 sampai 10 o/oo
Lintas pegunungan	10 o/oo sampai 40 o/oo
Lintas dengan rel gigi	40 o/oo sampai 80 o/oo

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

2. Landai penentu

Landai penentu adalah suatu kelandaian (pendakian) yang terbesar yang ada pada suatu lintas lurus. Besar landai penentu terutama berpengaruh pada kombinasi daya tarik lokomotif dan rangkaian yang dioperasikan. Untuk masing-masing kelas jalan rel, besar landai penentu adalah seperti yang tercantum pada tabel 2.13.

Tabel 2.14 Landai penentu maksimum

Kelas jalan rel	Landai penentu maksimum
1	10 o/oo
2	10 o/oo
3	20 o/oo
4	25 o/oo
5	25 o/oo

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

- Lengkung Vertikal

Alinemen vertikal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang vertikal yang melalui sumbu jalan rel tersebut, alinemen vertikal terdiri dari garis lurus, dengan atau tanpa kelandaian, dan lengkung vertikal yang berupa busur lingkaran. Besar jari-jari minimum dari lengkung vertikal bergantung kepada besar kecepatan rencana dan adalah seperti yang tercantum dalam tabel 2.15.

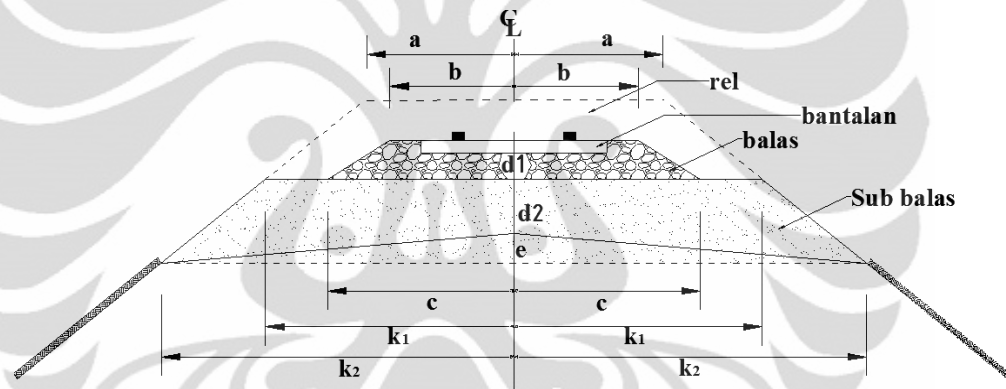
Tabel 2.15 Jari-jari minimum lengkung vertikal

Kecepatan rencana (km/jam)	Jari-jari minimum lengkung vertikal (meter)
lebih besar dari 100	8000
sampai 100	6000

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

- Penampang Melintang

Penampang melintang jalan rel adalah potongan pada jalan rel, dengan arah tegak lurus sumbu jalan rel, dimana terlihat bagian-bagian dan ukuran-ukuran jalan rel dalam arah melintang. Ukuran-ukuran penampang melintang jalan rel berjalur tunggal dan berjalur ganda tercantum pada tabel 2.15.



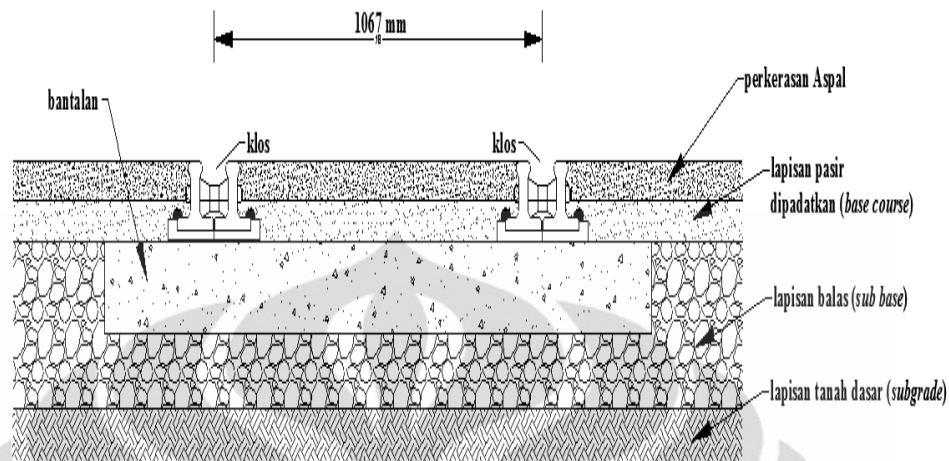
Gambar 2.12 Penampang melintang jalan rel konvensional

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

Tabel 2.16 Penampang melintang jalan rel

Kelas Jalan	V maks (km/jam)	d ₁ (cm)	b (cm)	c (cm)	k ₁ (cm)	d ₂ (cm)	e (cm)	k ₂ (cm)	a (cm)
I	120	30	150	235	265-315	15-50	25	375	185-237
II	110	30	150	235	265-315	15-50	25	375	185-237
III	100	30	140	225	240-270	15-50	22	325	170-200
IV	90	25	140	215	240-250	15-35	20	300	170-190
V	80	25	135	210	240-250	15-35	20	300	170-190

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)



Gambar 2.13 Potongan melintang jalan rel dengan perkerasan aspal

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

2.3 Pedoman Perencanaan Bantalan

Berikut ini dijelaskan beberapa spesifikasi dari jenis bantalan kayu, baja dan beton yang dibagi menjadi tiga jenis yaitu bantalan beton pratekan blok tunggal dengan proses 'pretension' dan 'post tension' serta bantalan beton blok ganda, berdasarkan Pedoman Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Bab 3, pasal 4), serta Penjelasan Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Bab 3, pasal 4).

2.3.1 Bantalan Kayu

Bantalan kayu digunakan dalam jalan rel dikarenakan bahan tersebut mudah diperoleh di Indonesia dan mudah untuk dibentuk. Masalah dalam bantalan kayu, hanyalah pengawetan yang harus merata dan sempurna. Selain itu harus memenuhi syarat kayu harus utuh dan berbentuk padat, tidak bermata, tidak ada lubang bekas ulat, tidak ada tanda-tanda permulaan lapuk. Untuk memperpanjang umur bantalan harus dipasang pelat andas. Adapun spesifikasi bantalan yang terbuat dari kayu ini yaitu diantaranya sebagai berikut :

a. Geometri bantalan kayu yang digunakan pada saat ini, yaitu :

• Pada jalan yang lurus bantalan kayu mempunyai ukuran :

Panjang = $L = 2.000 \text{ mm}$

Tinggi = $t = 130 \text{ mm}$

Lebar = $b = 220 \text{ mm}$

- Pada jembatan bantalan kayu mempunyai ukuran :

Panjang = L = 1.800 mm

Tinggi = t = 200 mm atau 240 mm

Lebar = b = 220 mm

- Mutu kayu yang dipergunakan untuk bantalan kayu, memenuhi ketentuan Peraturan Bahan Jalan Rel Indonesia. Jenis kayu yang dapat digunakan adalah kayu besi, kayu jati, dan kayu yang digolongkan dalam PKKI, termasuk kelas I atau II dan yang biasa dipakai oleh PT. KAI
- Bantalan kayu pada bagian tengah maupun bagian bawah harus mampu menahan momen maksimum sebesar :

Tabel 2.17 Momen maksimum yang dapat diterima berdasarkan kelas kayu

Kelas Kayu	Momen maksimum (kg-m)
I	800
II	530

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986,198)

Tabel 2.18 Kekuatan bantalan dari kayu berdasarkan kelas

Bantalan	P (kg)
Kayu Jati	4.113
Kayu kelas I	4.747

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

- Bentuk penampang melintang bantalan kayu harus empat persegi panjang pada seluruh tubuh bantalan.



Gambar 2.14 Balok bantalan kayu

Sumber : *Resort manggarai*, seksi bangunan jalan rel dan jembatan.

- Perencanaan dimensi bantalan, sepenuhnya memakai teori tegangan lentur:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_x} \quad (2.5)$$

Jika penampang berbentuk persegi :

$$\sigma = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \quad (2.6)$$

Momen dihitung dengan teori balok berhingga di atas perletakan elastis (*finite beam in elastic foundation*). Momen maksimum yang dapat dipikul, dihitung berdasarkan tegangan ijin lentur dari kayu, untuk mutu kayu kelas I :

$$\bar{\sigma}_{lt} = 125 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{dan} \quad \text{Kelas II} \quad \bar{\sigma}_{lt} = 83 \text{ kg/cm}^2$$

2.3.2 Bantalan Baja

Bantalan baja dipergunakan dalam jalan rel karena lebih ringan, sehingga pengangkutannya lebih mudah. Selain itu jika dilihat dari penampang melintangnya kurang baik karena stabilitas lateral dan aksialnya didapat dari konstruksi cengkeramannya, karena berat sendiri yang kecil (47,1 kg) dan gesekan antara dasar bantalan dan balas juga kecil.

Bantalan terbuat dari pelat baja, gunanya adalah untuk menghindari retak-retak yang timbul (pasti terdapat) pada bantalan beton dan kayu. Pada bantalan baja hal ini tidak terlihat karena elastisitasnya lebih besar, biasanya dipasang pada lengkungan, tidak pada keseluruhan lintasan kereta api karena harganya lebih mahal dari bantalan beton.

Berikut ini adalah spesifikasi yang digunakan pada bantalan baja, yaitu diantaranya :

- a. Pada jalur lurus bantalan baja mempunyai ukuran :
 - Panjang : 2.000 mm
 - Lebar atas : 144 mm
 - Lebar bawah : 232 mm
 - Tebal baja : minimal 7 mm
- b. Mutu baja yang dipakai untuk bantalan baja, harus memenuhi ketentuan Peraturan Bahan Jalan Rel Indonesia (PBJRI).
- c. Bantalan baja pada bagian tengah bantalan maupun pada bagian bawah rel, harus mampu menahan momen sebesar = 650 kg-m.

Tabel 2.19 Kekuatan bantalan dari baja berdasarkan tebal

Bantalan	P (kg)
Baja 7 mm	11.984
Baja 9 mm	14.981
Baja 13mm	20.937

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

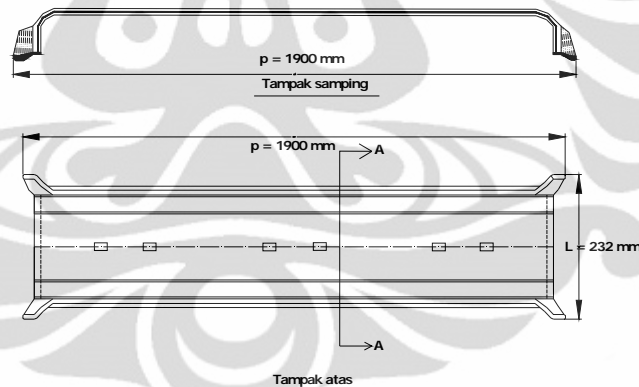
- d. Bentuk penampang melintang bantalan baja, harus mempunyai bentuk kait keluar pada ujung bawahnya.



Gambar 2.15 Penampang melintang bantalan baja

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

- e. Bentuk penampang memanjang bantalan baja, harus mempunyai bentuk kait ke dalam pada ujung-ujung bawah.



Gambar 2.16 Penampang memanjang bantalan baja

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

- f. Perencanaan dimensi bantalan, sepenuhnya memakai teori tegangan lentur pada persamaan (2.5).

Momen dihitung dengan teori balok berhingga di atas perletakan elastis (*Finite Beam on Elastic Foundation*). Momen maksimum yang dapat dipikul, dihitung berdasarkan tegangan ijin baja = 1600 kg/cm^2 dan momen tahanan bantalan baja yang digunakan oleh PT. KA = $40,6 \text{ cm}^3$. Untuk mengurangi timbulnya karat, bantalan baja harus selalu kering sehingga struktur di bawahnya

harus mudah meloloskan air. Pada perlintasan, jalan rel yang sering terendam air tidak boleh digunakan bantalan baja. Hal ini dikarenakan khawatir mempercepat terjadinya karat pada tempat-tempat tersebut.

2.3.3 Bantalan Beton

Ide pembuatan bantalan beton pratekan bermula dari usaha untuk mengurangi retak-retak yang biasanya timbul pada bagian-bagian yang mengalami tegangan tarik. Pada bantalan beton pratekan, setelah beban melewatinya, retakan-retakan yang terjadi relatif akan merapat kembali karena adanya gaya tekan dari kabel-kabel pratekannya.

Ada dua cara penarikan kabel, yaitu diantaranya :

- a. Kabel ditarik sebelum beton dicor (*pretension*)
- b. Kabel ditarik sesudah beton dicor (*post tension*)

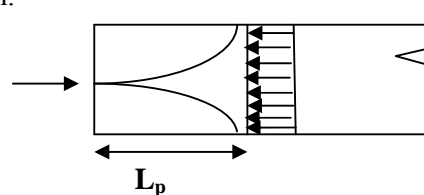
Beberapa tipe bantalan beton yang menggunakan proses '*pretension*' antara lain adalah :

- Inggris : Dow-Mac ; Stent
- Jerman : Bv-53
- Perancis : SNCF-VW
- Indonesia : WIKA ; Kodja ; Bina Sarana Dirgantara

Sedangkan tipe bantalan beton yang menggunakan proses '*post tension*' adalah :

- Jerman : B-55
- Belgia : Franki Bagon

Pada proses '*pretension*', penyaluran gaya dari kabel ke beton melalui tegangan geser antara kabel dan beton, sedangkan pada proses '*post tension*' melalui suatu system penjangkaran di ujung kabel. Sistem penjangkaran ini biasanya dipatenkan.



Gambar 2.17 sistem penjangkaran

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

Tegangan rata-rata akibat gaya terpusat, baru terjadi pada seluruh penampang pada jarak L_p dari titik tangkap N. panjang L_p disebut panjang penyaluran antara lain tergantung pada besarnya diameter kabel dan mutu dari beton.



Gambar 2.18 Bantalan beton

Sumber : Resort manggarai, seksi bangunan jalan rel dan jembatan.

2.3.3.1 Bantalan beton pratekan blok tunggal dengan proses '*pretension*'

Adapun spesifikasi bantalan beton pratekan blok tunggal dengan proses *pretension* harus memenuhi beberapa syarat yaitu diantaranya :

- a. Pada jalur lurus, bantalan beton pratekan dengan proses '*pretension*' mempunyai ukuran panjang :

$$L = l + 2 \alpha \phi \quad (2.7)$$

dimana : l = jarak antara kedua sumbu vertikal rel (mm)

α = 80 sampai 160°

ϕ = diameter kabel baja prategang (mm)

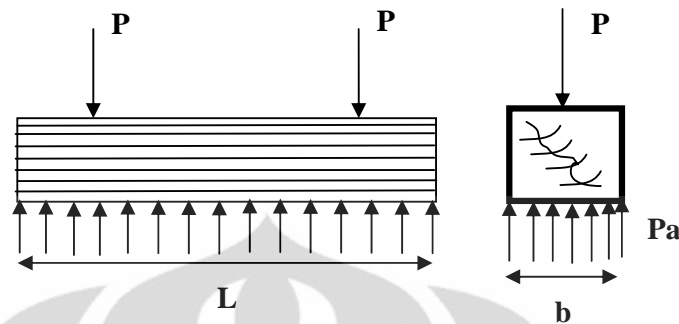
- b. Mutu campuran beton harus mempunyai kuat tekan karakteristik tidak kurang dari 500 kg/cm^2 , mutu baja untuk tulangan geser tidak kurang dari U-24 dan mutu baja prategang ditetapkan dengan tegangan putus sebesar 17.000 kg/cm^2 .
- c. Bantalan beton pratekan dengan proses '*pretension*', harus mampu memikul momen minimum sebesar :

Tabel 2.20 Momen maksimum yang dapat diterima bantalan beton dengan proses '*pretension*'

Bagian	Momen (kg-m)
Bawah rel	+ 1.500
Tengah Bantalan	- 765

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

Tekanan yang terjadi dibawah bantalan (William.W.H, 1982) :



Gambar 2.19 Tekanan pada bagian bawah bantalan

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

$$Ab' = 2/3 L \times b \quad (2.8)$$

$$Pa = 2 P / Ab' = 3P / b.L \quad (2.9)$$

Dimana :

Pa = Tekanan pada permukaan balas (psi)

(untuk bantalan kayu tidak boleh melebihi = 65 psi = 4,569 kg/cm² ;

bantalan beton = 85 psi = 5,976 kg/cm²)

Ab' = Total luas permukaan bantalan (in²)

L = Panjang bantalan (in)

b = Lebar bantalan (in)

- d. Bentuk penampang bantalan beton harus menyerupai trapesium, dengan luas penampang bagian tengah bantalan tidak kurang dari 85 % luas penampang bagian bawah rel.
- e. Pusat Berat Baja Prategang diusahakan sedekat mungkin dengan Pusat Berat Beton.
- f. Perhitungan kehilangan tegangan pada gaya prategang cukup diambil sebesar 25 % gaya prategang awal. Kecuali jika diadakan hitungan teoritis, maka dapat diambil lain dari 25 %.

2.3.3.2 Bantalan beton pratekan blok tunggal dengan proses 'posttension'

Adapun spesifikasi bantalan beton pratekan blok tunggal dengan proses *posttension* harus memenuhi beberapa syarat yaitu diantaranya :

- a. Pada jalur lurus, bantalan beton pratekan dengan proses 'posttension' mempunyai ukuran panjang :

$$L = l + 2 \gamma \quad (2.10)$$

Dimana : l = jarak antara kedua sumbu vertikal rel (mm)

γ = panjang daerah regularisasi tegangan, yang tergantung jenis *angker* yang dipakai.

- b. Mutu campuran beton harus mempunyai kuat tekan karakteristik tidak kurang dari 500 kg/cm², mutu baja untuk tulangan geser tidak kurang dari mutu U-24 dan mutu baja prategang ditetapkan dengan tegangan putus minimum sebesar 17.000 kg/cm².
- c. Bantalan beton pratekan dengan proses 'posttension' harus mampu memikul momen minimum sebesar.

Tabel 2.21 Momen maksimum yang dapat diterima bantalan beton dengan proses 'posttension'

Bagian	Momen (kg-m)
Bawah rel	+ 1.500
Tengah Bantalan	- 765

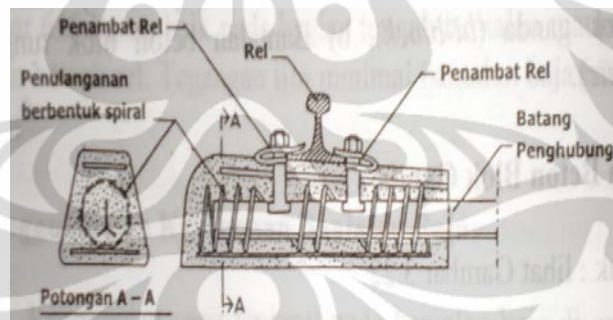
Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

- d. Bentuk penampang melintang bantalan beton harus trapesium, dengan luas penampang bagian tengah bantalan, tidak kurang dari 85 % luas penampang bagian bawah rel.
- e. Pusat Berat Baja Prategang harus selalu terletak pada daerah galih sepanjang tubuh bantalan.
- f. Perhitungan kehilangan tegangan pada gaya prategang cukup diambil 20 % gaya prategang awal. Kecuali jika diadakan hitungan teoritis, maka diambil lain dari 20 %.

2.3.3.3 Bantalan beton blok ganda

Untuk spesifikasi bantalan beton blok ganda harus memenuhi beberapa syarat sebagai berikut :

- a. Pada jalur lurus, satu buah bantalan beton blok ganda mempunyai ukuran, sebagai berikut :
 - Panjang = 700 mm
 - Lebar = 300 mm
 - Tinggi rata-rata = 200 mm
- b. Pada bagian jalur yang lain, hanya panjang penghubungnya yang disesuaikan.
- c. Mutu campuran beton harus mempunyai kuat tekan karakteristik tidak kurang dari 385 kg/cm^2 , mutu untuk tulang lentur tidak kurang dari U-32 dan mutu untuk batang penghubung, tidak kurang dari U-32.
- d. Panjang batang penghubung, harus dibuat sedemikian rupa sehingga cukup untuk meletakkan angker penambat.



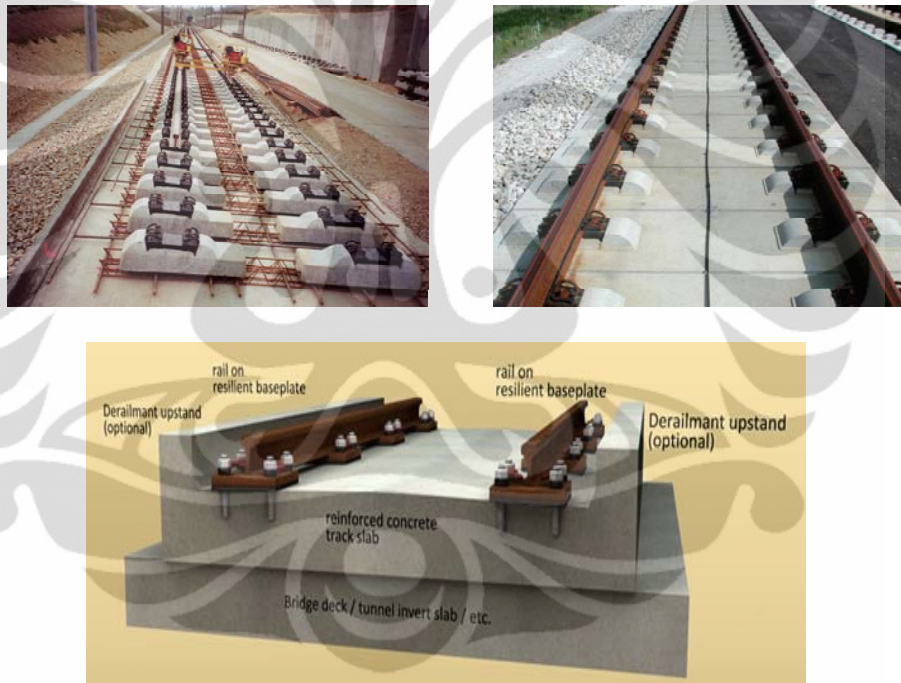
Gambar 2.20 Penulangan pada bantalan blok ganda

Sumber: Tri Utomo S.H. Jalan rel. hal.78.

2.4 Bantalan Slab

Bantalan Slab adalah bantalan yang langsung menjadi satu dengan badan jalan yang dicor dalam bentuk slab. Pengerjaannya harus sangat teliti untuk mendapatkan kualitas penggunaan yang nyaman. Investasi untuk pembangunan lintasan dengan bantalan slab lebih besar dari bantalan beton atau baja tetapi biaya perawatannya jauh lebih rendah. Di beberapa Negara seperti Eropa, Amerika dan Jepang bantalan slab ini dipergunakan untuk membangun lintasan kereta api cepat, maupun untuk kelas kereta *light rail*.

Berbagai jenis jalur slab beton telah melayani jalan rel di beberapa Negara seperti Jepang, Eropa dan Amerika Utara. Di Jepang, di mana jalur slab telah digunakan sekitar tiga puluh tahun, dimaba biaya untuk membangun konstruksi jalur slab diperkirakan $\pm 1,3$ lebih tinggi dibandingkan standar biaya dengan menggunakan jalur balas. Jalur slab ini terdiri dari beton pracetak dengan panjang 5-m dan lapisan aspal semen mortar di bawah beton (200mm sampai 400mm tebalnya), disediakan pada interval setiap 5 m. Bagian jalur yang dibuat yaitu dari beton bertulang pracetak atau beton pratekan. Jalur slab yang digunakan untuk kereta Shinkansen yaitu 2.340 mm (92 in) lebar, 4930 mm (16,2 ft) panjang dan 160 (6,3 in) - 200 mm (7,87 in) tebal dan berat 5 ton (David and Gene, 2001).



Gambar 2.21 Beberapa tipe bantalan *slab*

Sumber : Railroad Tie, Wikipedia_the free encyclopedia, Edisi 16 November 2008

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

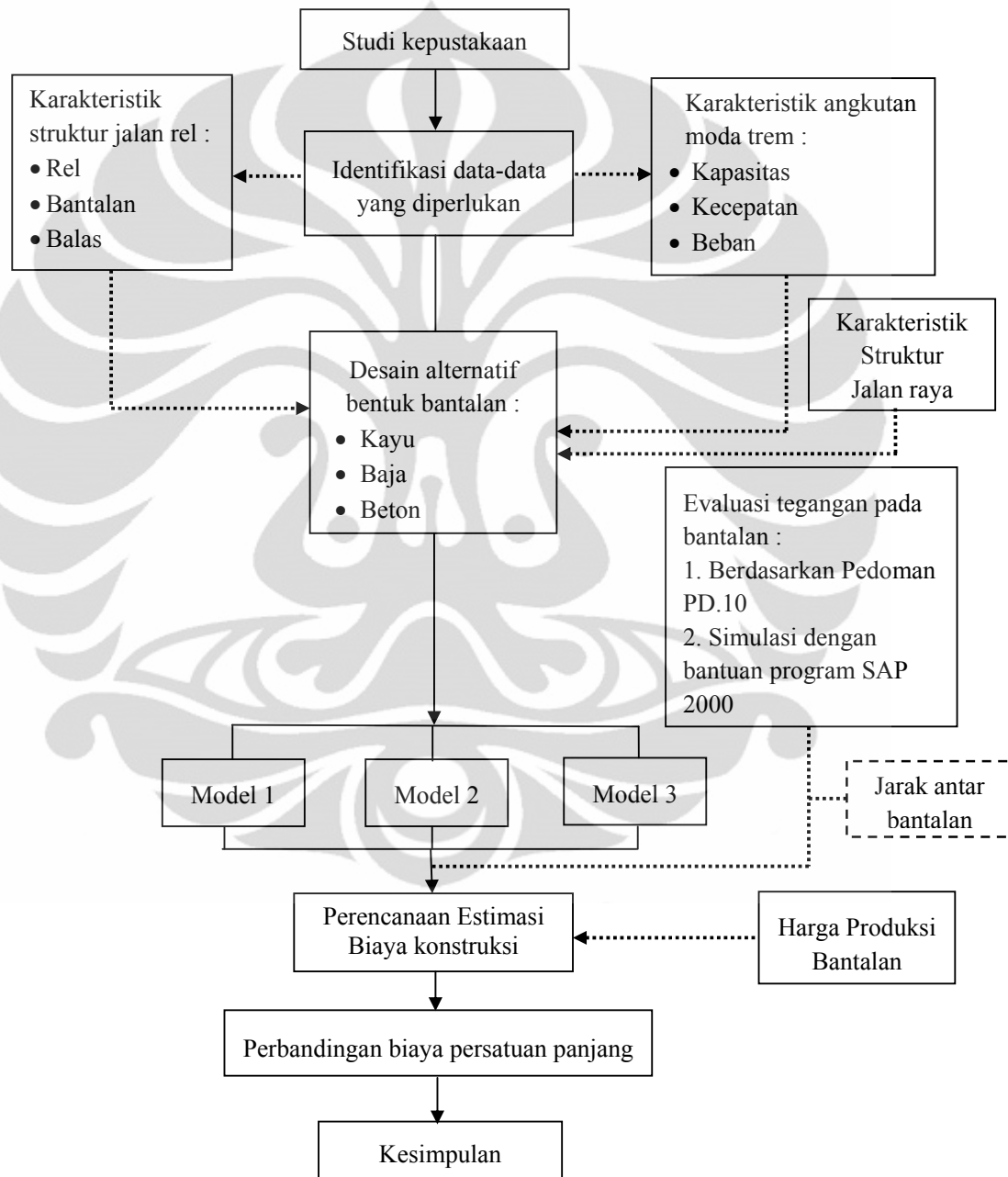
3.1 Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan kerangka pemikiran yang digunakan sebagai dasar dalam penentuan alur dari penelitian. Dalam penelitian ini juga dilakukan dengan metode serta perhitungan yang sesuai berdasarkan teori dasar yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, sehingga diperoleh tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian. Selain itu penelitian ini lebih di fokuskan kepada penelitian komparatif yaitu dengan perbandingan beberapa alternatif model bentuk bantalan dengan variasi bahan material antara baja, beton dan kayu yang digunakan pada konstruksi jalan rel, dilihat dari segi spesifikasi (kekuatan struktur) tiap masing-masing material tersebut serta perbandingan biaya ekonomi pembangunannya. Untuk selanjutnya akan dipilih salah satu dari ketiga alternatif bentuk dari bantalan tersebut, yang paling efisien dalam segala hal, baik dalam kekuatan strukturnya dalam menahan tegangan yang ditumpu oleh jalan rel, maupun keekonomisan biaya konstruksinya yaitu dengan memperhatikan parameter umur layanan dari setiap tipe bantalan serta volume yang dibutuhkan untuk struktur jalan trem pada suatu ruas tertentu.

Perencanaan perhitungan dari bentuk dimensi bantalan yang dibuat dalam penelitian ini berpedoman pada Penjelasan Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (PD No.10) Pasal 4 mengenai Standar Jalan Rel serta beberapa literatur yang berkaitan mengenai perencanaan konstruksi jalan rel. Sedangkan, untuk perhitungan komponen biaya, didasarkan pada pendekatan dengan metode evaluasi secara ekonomi teknik yaitu dengan menggunakan metode *Net Present Value*.

3.2 Alur Penelitian

Untuk mempermudah pembahasan dalam penelitian ini, dicoba untuk dipaparkannya kerangka pemikiran melalui bagan alur penelitian yang tertera di bawah ini secara umum :



Gambar 3.1 Bagan alur penelitian perencanaan alternatif bentuk tipe bantalan dan perhitungan efisiensi biaya pembangunannya.

Pada bagan alur penelitian tersebut, bermaksud untuk melakukan perbandingan secara komparatif terhadap beberapa alternatif bentuk bantalan yang diusulkan berdasarkan biaya persatuan panjang yang diperlukan untuk membangun konstruksi bantalan tersebut. Adapun dari beberapa alternatif bentuk bantalan itu diantaranya ialah model 1 yaitu bentuk tipe bantalan melintang, model 2 yaitu tipe bantalan menerus, dan model 3 yaitu tipe bantalan *slab track*.

3.3 Tahapan Penelitian

Berikut ini adalah penjelasan mengenai masing-masing tahapan yang dilakukan dalam penelitian untuk menentukan alternatif bentuk bantalan rel yang akan direncanakan :

3.3.1 Pengumpulan Informasi dan Data

Informasi dan data-data yang dikumpulkan menjadi awal dalam kegiatan penelitian ini, yaitu dengan menggali sumber informasi melalui studi kepustakaan. Data-data yang diperlukan sebelum memulai dalam merencanakan perhitungan bentuk dimensi dari bantalan yang akan digunakan seperti data karakteristik dari struktur jalan rel serta karakteristik moda angkutan trem yang meliputi beban angkut (kapasitas), kecepatan dan dimensi dari prototype.

Tabel 3.1 Klasifikasi standar jalan rel

Kelas Jalan Rel	Daya Angkut Lintas ($\times 10^6$ ton/tahun)	V_{maks} (km/jam)	Tipe rel	Jenis bantalan Jarak (mm)	P_{maks} gandar (ton)	Tebal balas atas (cm)
I	> 20	120	R.60/R.54	<u>Beton</u> 600	18	30
II	10 – 20	110	R.54/R.50	<u>Beton/kayu</u> 600	18	30
III	5 – 10	100	R.54/R.50/R.42	<u>Beton/kayu/baja</u> 600	18	30
IV	2.5 - 5	90	R.54/R.50/R.42	<u>Beton/kayu/baja</u> 600	18	25
V	< 2.5	80	R.42/R.33	<u>kayu/baja</u> 600	18	25

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

Data lain yang perlu diperhatikan seperti :

1. Jarak (spasi) antar bantalan
2. Modulus elastisitas (E) dari material bahan bantalan dan jalan rel
3. Momen inersia dari setiap bentuk tipe bantalan.

Selain mengetahui data-data yang diperlukan untuk merencanakan bentuk dimensi dari bantalan, diperlukan pula data dan informasi yang digunakan sebagai parameter dalam segi perencanaan perhitungan biaya pembangunannya yang lebih efisien. Adapun parameter yang dimaksud diantaranya :

1. Umur layanan

Dari setiap tipe bantalan yang digunakan memiliki tingkat ketahanan tertentu dalam masa layannya untuk mendukung konstruksi jalan rel dalam menahan tegangan yang terjadi.

2. Harga produksi bantalan

Dengan mengetahui harga produksi per-setiap tipe bantalan, maka akan didapatkan biaya volume bantalan per-satuan panjang (Km) dengan memperhatikan parameter jarak antara setiap bantalan (khusus untuk tipe bantalan melintang)

3.3.2 Evaluasi Tegangan yang Terjadi pada Bantalan

Dalam hal ini penulis mencoba menganalisis kekuatan struktur dari setiap bantalan yang dimodelkan berdasarkan pada peraturan perencanaan konstruksi jalan rel dan mengacu pada beberapa parameter tertentu yang nantinya akan dijadikan sebagai input data dalam program analisis struktur (SAP 2000).

3.3.2.1 Penentuan parameter sebagai input dalam program SAP 2000

Dalam permodelan bentuk dari bantalan diperlukan parameter input data yang perlu ditentukan di dalam program SAP 2000, adapun parameter yang ditentukan yaitu :

- Permodelan bentuk struktur dari setiap tipe bantalan (dimensi)
- Properti bahan material (baja, beton, dan kayu)
- Daya dukung balas yang diasumsikan sebagai perletakan dari bantalan (kekakuan/ modulus elastisitas jalan rel)
- Pembebanan dari moda trem (statik/dinamik).

3.3.2.2 Penentuan parameter hasil output dari simulasi program SAP 2000 untuk analisis tegangan pada bantalan

Adapun yang menjadi acuan dalam menganalisis tegangan yang terjadi pada bantalan melalui hasil *output* dari program SAP 2000 yang telah dijalankan sebelumnya, yaitu diambil nilai untuk momen maksimum yang terjadi pada bagian dari tengah bantalan dan bagian di bawah rel, yang kemudian akan menjadi salah satu variabel untuk mengetahui besarnya tegangan dalam perhitungan berdasarkan teori yang ada pada tinjauan pustaka.

3.3.3 Identifikasi Karakteristik Pembebanan Pada Bantalan

Berikut ini akan dijelaskan mengenai perhitungan yang digunakan pada perencanaan pembebanan pada bantalan berdasarkan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel, PD.No.10, 198).

- Perhitungan beban merata pada tepi bawah rel yang membebani bantalan:

$$p = k \cdot y_o \quad ; \quad (y_o = \text{lenturan maksimum}) \quad (3.1)$$

$$y_o = P_d / 2k = P \Pi / 8 k x_1 = 0,393 P_d / kx \quad (3.2)$$

Super posisi dari beberapa beban gandar ke bantalan menjadi :

$$Q = 2p = 0,786 P_d S / x_1 \quad (3.3)$$

$$x_1 = \Pi / 4\lambda$$

$$P_d = P + 0,01 P (V - 5) \quad ; \quad V \text{ dalam mil/jam} \quad (3.4)$$



$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (3.5)$$

; λ = *damping factor*

k = modulus elastisitas jalan rel = 180 kg/cm²

E = modulus elastisitas rel = 2,1 x 10⁶ kg/cm²

3.3.4 Perhitungan Kekuatan Bantalan dengan Pembebanan (*Loading*) dan Distribusi Reaksi (*Distribution of Reaction*) Yang Terjadi Pada Bantalan

- *Loading dan Reaction*

Berdasarkan oleh *The Japanese National Railways* yang mengembangkan teori pembebanan dan reaksi yang terjadi pada bantalan, khususnya bantalan dari beton dalam beberapa kondisi (Rekayasa Jalan Rel, Alamsyah, A.A, 2003).

- ❖ *Loading*

Rail Pressure (P) dan *lateral rail pressure* (Q) yang terjadi pada bantalan beton dari rel dapat dihitung dengan menggunakan formula sebagai berikut (Alamsyah, A.A, 2003) :

$$P = W \times y_v \times (1 + a) \quad (3.6)$$

$$Q_F = H_F \times y_h \times (1 + b) \quad (3.7)$$

$$Q_S = H_S \times y_h \times (1 + b) \quad (3.8)$$

P = *Vertical rail pressure* pada bantalan

W = *Maximum static wheel load* (beban roda)

Q_F = *Lateral rail pressure* (normal) pada bantalan

Q_S = *Lateral rail pressure* (abnormal)

y_v = *Distribution factor of wheel load* = 0,5

y_h = *Distribution factor of lateral pressure* = 0,5

a = *Impact factor* karena *wheel flat, corrugation, velocity*, dll = 1,0

b = *Impact factor in velocity* untuk *lateral rail pressure* = 0,5

H_F = *Lateral rail load* (normal) = 3,0 tons

H_S = *Lateral rail load* (abnormal) = 6,0 tons

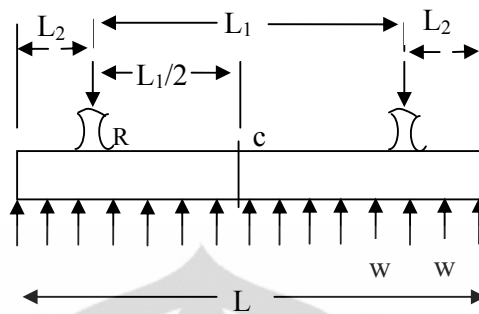
- ❖ *Distribusi Reaksi*

Distribusi reaksi akibat beban gandar diasumsikan terdistribusi merata (*uniformly distributed reaction*) yang keseluruhannya terjadi sepanjang bantalan. Dimana reaksi beban persatuan panjang terhadap kondisi tersebut yaitu (Mundrey, J.S, 2000) :

$$w = \frac{2P}{L} \quad (3.9)$$

dimana : P = beban roda (pounds)

L = panjang bantalan (inch)



Gambar 3.2 Tekanan yang terjadi di bawah bantalan

Sumber : *Railway Track Engineering* (Mundrey, J.S, 2000)

$$\text{Momen lentur pada pusat bantalan : } M_c = \left(\frac{P}{4} \right) (L_1 - 2 \cdot L_2) \quad (3.10)$$

$$\text{dan Momen Lentur di bawah rel : } M_r = \frac{PxL_2^2}{L} \quad (3.11)$$

3.3.5 Perencanaan Biaya Konstruksi Berdasarkan Perbandingan Biaya Persatuan Panjang

Dalam sebuah proyek konstruksi terdapat berbagai tahapan yang berkaitan dengan manajemen konstruksi. Dalam tahapan manajemen konstruksi tersebut, terdapat berbagai permasalahan mengenai pengelolaan anggaran biaya pelaksanaan pekerjaan, sehingga perlu direncanakan suatu rancangan atau estimasi anggaran biaya pelaksanaan pekerjaan.

Perkiraan biaya memegang peranan penting dalam penyelenggaraan proyek. Pada taraf pertama dipergunakan untuk mengetahui berapa besar biaya yang diperlukan untuk membangun proyek atau investasi, selanjutnya memiliki fungsi yang amat luas yaitu merencanakan dan mengendalikan sumber daya seperti material, tenaga kerja, pelayanan maupun waktu.

Untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas kegiatan pembangunan di bidang konstruksi, diperlukan suatu sarana dasar perhitungan harga satuan yaitu Analisa Biaya Konstruksi disingkat ABK. Analisa biaya konstruksi adalah suatu cara perhitungan harga satuan pekerjaan konstruksi, yang dijabarkan dalam perkalian indeks bahan bangunan dan upah kerja dengan harga bahan bangunan dan standar pengupahan pekerja, untuk menyelesaikan per-satuan pekerjaan konstruksi.

Prosedur dalam menentukan perbandingan ekonomi biaya diantara perbedaan desain bentuk dan jenis material yang digunakan pada bantalan ini, memiliki parameter dalam segi syarat dari bantalan yang baik, dan masa layanannya yang dapat menunjang dalam jangka waktu selama beberapa tahun. Suatu metode matematis dari perhitungan biaya yang dilakukan ini relatif dapat membantu dalam menentukan kebijakan pengambilan keputusan, jika suatu bantalan dapat dipilih dengan membandingkan, berdasarkan pada perbedaan bahan material yang digunakan, serta desain bentuk dari setiap jenis bantalan yang akan dipasang pada jalan rel per-satuan panjang. Sehingga diperoleh tujuan dalam hal efisiensi biaya pembangunan sebagai investasi dan pemeliharaan konstruksi jalan rel pada moda angkutan trem.

Setelah mengetahui desain dimensi dari setiap tipe bantalan, maka tahapan selanjutnya dalam penelitian ini adalah membuat perencanaan estimasi biaya dari setiap tipe bantalan yang telah ditentukan spesifikasinya dengan berpedoman pada faktor harga produksi volume bantalan per-satuan panjang (km). Di dalam perencanaan biaya konstruksi dari bantalan ini menggunakan pendekatan dengan metode *Net Present Value*. Untuk mengidentifikasi hal apa saja yang diperlukan dalam tahapan perhitungan biaya dengan metode *NPV* ini, maka terlebih dahulu perlu diketahui pada penjelasan sub-sub-bab berikut ini.

3.3.5.1 *Net Present Value* (NPV)

NPV didefinisikan sebagai nilai dari proyek yang bersangkutan yang diperoleh berdasarkan selisih antara *cash flow* yang dihasilkan terhadap investasi yang dikeluarkan. NPV yang dianggap layak adalah NPV yang bernilai positif. NPV bernilai positif mengindikasikan *cash flow* yang dihasilkan melebihi jumlah yang diinvestasikan. Perhitungan NPV dapat dilihat pada persamaan berikut ini:

$$\text{NPV} = C_0 + \sum \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (3.12)$$

Di mana, C_0 = investasi awal tahun ke-0

C_t = Cost pada tahun ke-t

i = interest rate yang ditentukan

t = tahun

Analisis yang harus dilakukan dalam hal perhitungan dengan metode *NPV* ini adalah analisis keseluruhan secara finansial. Dalam analisis ini dilakukan pengukuran kelayakan suatu proyek secara finansial dimulai dari estimasi biaya yang diperlukan dari proyek tersebut. Estimasi biaya yang dimaksud mencakup (Petty. J.W,1996) :

- Estimasi biaya investasi awal

Estimasi ini dilakukan untuk mendapatkan gambaran yang pasti mengenai keseluruhan biaya yang dibutuhkan. Keseluruhan biaya ini meliputi biaya perolehan ijin usaha, biaya peralatan, biaya instalasi, biaya *engineering*, biaya pelatihan, biaya pembelian tanah dan biaya lain yang dikeluarkan pada awal investasi dilakukan.

- Estimasi biaya operasional

Terdapat tiga macam biaya operasi. **Pertama**, biaya langsung, yaitu segala biaya yang mempunyai keterkaitan langsung dengan proses produksi mencakup biaya bahan langsung dan biaya tenaga kerja langsung. **Kedua**, biaya tidak langsung, yaitu biaya yang tidak terkait langsung dengan proses produksi. Biaya ini mencakup biaya bahan tidak langsung, biaya tenaga kerja tak langsung dan berbagai biaya tak langsung lainnya.

Selain dari hal yang telah dijelaskan diatas, guna menunjang estimasi biaya yang akan direncanakan diperlukan pula suatu analisis mengenai harga satuan pekerjaan dari proyek konstruksi yang akan dijalankan. Untuk itu terlebih dahulu kita perlu mengetahui apa yang dimaksud dengan harga satuan pekerjaan.

- Harga Satuan Pekerjaan

Harga satuan pekerjaan ialah jumlah harga bahan dan upah tenaga kerja berdasarkan perhitungan analisis. Harga bahan didapat di pasaran, dikumpulkan dalam satu daftar yang dinamakan *Daftar Harga Satuan Bahan*. Setiap bahan atau material mempunyai jenis dan kualitas tersendiri. Hal ini menjadi harga material tersebut beragam. Untuk itu sebagai patokan harga biasanya didasarkan pada lokasi daerah bahan tersebut berasal. Misalnya untuk harga semen harus berdasarkan kepada harga patokan semen yang ditetapkan.

Upah tenaga kerja didapatkan dilokasi, dikumpulkan dan dicatat dalam satu daftar yang dinamakan *Daftar Harga Satuan Upah*. Untuk menentukan upah

pekerja dapat diambil standar harga yang berlaku di pasaran atau daerah tempat proyek dikerjakan yang sesuai dengan spesifikasi dari dinas PU. Dari ketiga metoda yang digunakan sudah termasuk peralatan kerja atau setiap pekerja harus mempunyai peralatan kerja sendiri yang mendukung keahlian masing-masing.

Untuk menentukan harga bangunan dapat diambil standar harga yang berlaku di pasar atau daerah tempat proyek dikerjakan sesuai dengan spesifikasi dari dinas PU setempat *Daftar Harga Satuan Bahan*. Pada analisa ini sudah termasuk peralatan kerja atau setiap pekerja harus mempunyai peralatan kerja sendiri yang mendukung keahlian masing-masing.

Untuk menentukan harga satuan alat dapat diambil standar harga yang berlaku di pasar atau daerah tempat proyek dikerjakan sesuai dengan spesifikasi dari dinas PU setempat yang dinamakan *Daftar Harga Satuan Alat*.

Secara umum dapat disimpulkan sebagai berikut :

$$\boxed{\text{Harga Satuan Pekerjaan} = \text{H.S. Bahan} + \text{H.S. Upah} + \text{H.S. Alat}} \quad (3.13)$$

- Analisa Harga Satuan

Analisa harga satuan pekerjaan merupakan analisa material, upah tenaga kerja, dan peralatan untuk membuat satu-satuan pekerjaan tertentu yang diatur dalam pasal-pasal analisa pada SNI, dari hasilnya ditetapkan koefisien pengali untuk material, upah tenaga kerja dan peralatan segala jenis pekerjaan.

Analisa Harga Satuan Bahan

Analisa bahan suatu pekerjaan, ialah menghitung banyaknya/volume masing-masing bahan, serta besarnya biaya yang dibutuhkan. Kebutuhan bahan/material ialah besarnya jumlah bahan yang dibutuhkan untuk menyelesaikan bagian pekerjaan dalam satu kesatuan pekerjaan (Bachtiar Ibrahim, 1994 dalam Dani Kurniawan, 2004).

Kebutuhan bahan dapat dicari dengan rumus umum sebagai berikut :

$$\boxed{\Sigma \text{Bahan} = \text{Volume pekerjaan} \times \text{Koefisien analisa bahan}} \quad (3.14)$$

Indeks bahan merupakan indeks kuantum yang menunjukkan kebutuhan bahan bangunan untuk setiap satuan jenis pekerjaan. Analisa bahan dari suatu pekerjaan merupakan kegiatan menghitung banyaknya / volume masing-masing

bahan, serta besarnya biaya yang dibutuhkan sedangkan indeks satuan bahan menunjukkan banyaknya bahan yang diperlukan untuk menghasilkan 1 m³, 1 m², volume pekerjaan yang akan dikerjakan. (Bachtiar Ibrahim, 1993).

Analisa Harga Satuan Upah

Analisa upah suatu pekerjaan ialah, menghitung banyaknya tenaga yang diperlukan, serta besarnya biaya yang dibutuhkan untuk pekerjaan tersebut. (Bachtiar Ibrahim, 1993). Kebutuhan tenaga kerja ialah besarnya jumlah tenaga yang dibutuhkan untuk menyelesaikan bagian pekerjaan dalam satu kesatuan pekerjaan, kecepatan dan penyelesaian suatu pekerjaan tergantung dari kualitas dan kuantitas pekerjaannya (Dani Kurniawan, 2004).

Secara umum jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan untuk suatu volume pekerjaan tertentu dapat dicari dengan rumus :

$$\Sigma \text{ Tenaga Kerja} = \text{Volume Pekerjaan} \times \text{Koefisien analisa tenaga} \quad (3.15)$$

Indeks satuan tenaga kerja adalah besarnya jumlah tenaga yang dibutuhkan untuk menyelesaikan bagian pekerjaan dalam satuan pekerjaan. (Bachtiar Ibrahim, 1993).

Tingkatan dan tugas tenaga kerja pada masing-masing metoda adalah sebagai berikut :

- a. Pekerja, jenis tenaga kerja ini adalah tingkatan tenaga kerja yang paling rendah. Upah yang diterima jenis tenaga ini pun paling rendah. Tugasnya hanya membantu dalam persiapan bahan atau pekerjaan yang tidak membutuhkan keterampilan khusus.
- b. Mandor, jenis tenaga ini adalah tingkatan tenaga kerja yang paling tinggi dan tugasnya hanya mengawasi pekerjaan.

Analisa Harga Satuan Alat

Harga satuan dasar alat terdiri dari :

- Biaya pasti (*initial cost atau capital cost*)
- Biaya operasional dan pemeliharaan (*direct operational and maintenance cost*).

BAB 4
PERHITUNGAN KEKUATAN BEBERAPA ALTERNATIF TIPE
BANTALAN DAN EFISIENSI BIAYA KONSTRUKSI BERDASARKAN
METODE NPV

4.1 Karakteristik Pembebanan Jalan Rel Pada Moda Trem

Pada bagian ini diklasifikasikan beberapa pembebanan yang terjadi pada jalan rel berdasarkan karakteristik struktur dari moda tremnya sendiri maupun pemilihan dari jenis rel, dan bantalan yang digunakan.

I. Spesifikasi umum moda trem :

Infrastruktur

- Sistem rel : menggunakan tipe rel R 33, dengan isolasi bantalan karet
- Persinyalan : *mix traffic*
- Radius minimum lengkung : 25 m

Moda Trem

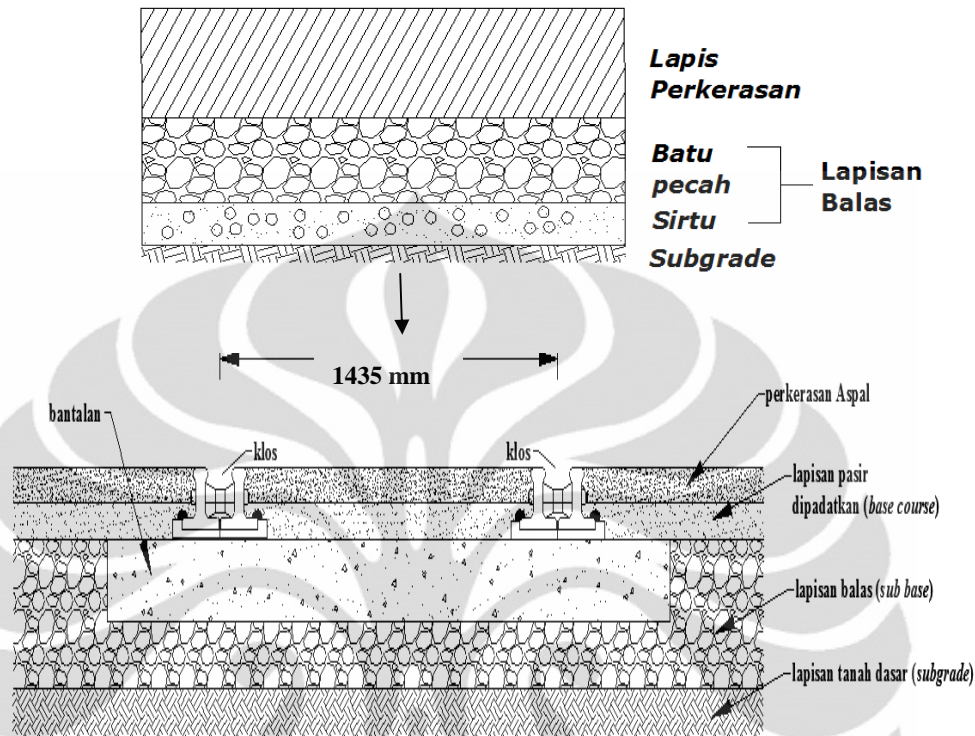
- Konfigurasi : 3 gerbong per set
- Dimensi (Estimasi LxWxH) : 30m x 2,5m x 3,5m
- Kecepatan maksimum : 70 km/jam
- Kecepatan operasi rata-rata : 15 – 30 km/jam
- Sistem bogie : *2 axle bogie*, dengan *damping steel wheel* (standar untuk Trem)
- Beban gandar : 10 ton
- Berat trem jika dimuati : 40 ton

II. Pemasangan jalan rel

- Lebar sepur : 1435 mm
- Tipe rel : R.33



Gambar 4.1 Jalan rel moda trem




Gambar 4.2 Struktur jalan rel moda trem

Pada dasarnya pemasangan jalan rel pada moda trem, merupakan suatu kombinasi antara perkerasan jalan raya dengan jalan rel bagi moda tremnya sendiri, dimana pergerakan operasional dari moda trem ditempatkan sejajar dengan permukaan jalan raya yang jalur lalu lintasnya berbagi dengan pengguna moda kendaraan darat lainnya. Sehingga, pada perencanaan konstruksi jalan rel bagi moda trem ini diperlukan sebuah perencanaan struktur yang dapat mendukung dengan baik dalam hal memberikan tingkat pelayanan dari pengguna jalan lainnya. Dengan demikian pula biaya operasional pemeliharaan khususnya untuk jalan rel maupun lapis perkerasan jalan raya pada umumnya yang menjadi kesatuan ini, dapat diminimalisasi dalam jangka waktu tertentu.

III. Tipe dan Karakteristik Bantalan :

Tabel 4.1 Karakteristik Bantalan

Tipe	Dimensi				Berat Minimum (Kg)	
	Panjang (cm)	Lebar (cm)		Tinggi (cm)		
Kayu	200	22		13	± 50	
Baja 	200	Bawah: 23,2	Atas: 14,4	7,5	47,1	
Beton	200	Bawah: 25,3	Atas: 20,5	Ujung 20	Tengah 17,5	± 175

Sumber : Telah diolah kembali berdasarkan Album *Track Material* (Balai Pelatihan Teknik Perkeretaapian Bekasi, 2002)

IV. Karakteristik Momen maksimum dan Kekuatan bantalan berdasarkan tipe bahan

Tabel 4. 2 Momen maksimum dan Kekuatan yang di izinkan dari beberapa tipe bantalan

Tipe bahan	Momen maksimum (Kg-m)		Kekuatan (P) (Kg)
Kayu *	800		4113
Baja **	650		11.984
Beton	Bawah rel + 1500	Tengah Bantalan - 765	-

Sumber : Telah diolah kembali berdasarkan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986)

Keterangan : * berdasarkan tipe kelas kayu jati

** berdasarkan tebal baja 7 mm

Karakteristik struktur jalan rel yang akan diaplikasikan pada moda trem ini mengadopsi dari struktur jalan rel yang digunakan pada kelas jalan rel ke-5 berdasarkan peraturan Reglemen R.10 (PJ.KA,1986), hal yang mendasari pemilihan komponen profil dari penyusun struktur jalan rel pada moda trem ini

digunakan tipe rel yang lebih ringan dibandingkan tipe rel yang digunakan pada kelas jalan rel untuk kereta api berat (*heavy rail*), sedangkan untuk pemilihan bantalan akan dibandingkan dengan beberapa jenis bahan materialnya seperti kayu, baja dan beton, yang untuk selanjutnya akan dipilih jenis bantalan mana yang paling sesuai untuk diaplikasikan pada jalan rel moda trem ini baik dari segi kemampuan kekuatan strukturnya dalam menahan beban struktur jalan relnya sendiri maupun dari beban lalu lintas moda trem yang berjalan di atas jalan rel serta keefisienan dalam segi biaya pembangunan konstruksinya sebagai investasi dan pemeliharaan dalam jangka waktu yang cukup lama.

4.2 Pembebanan Pada Bantalan Rel Jenis Moda Trem

Sebelum merencanakan desain bentuk dari beberapa tipe bantalan yang akan dipergunakan pada jalan rel moda trem, tahapan pertama dari perencanaan ini yaitu membuat perhitungan pembebanan yang ditimbulkan oleh struktur jalan rel berdasarkan kelengkapan utilitasnya maupun beban dari moda trem yang ditahan oleh struktur jalan rel sehingga mempengaruhi seberapa besar kekuatan yang mampu dipikul oleh bantalan.

Adapun untuk perhitungan pembebanan yang terjadi pada bantalan adalah sebagai berikut :

- Beban Luar

$$\text{Gaya kepada bogie (Pbogie = Pb)} = W_{\text{trem}}/2 = 40/2 = 20 \text{ ton}$$

$$\text{Beban gandar moda trem (Pg)} = P_{\text{bogie}}/2 = 20/2 \text{ ton} = 10 \text{ ton}$$

$$\text{Beban roda statis (Ps)} = P_{\text{gandar}}/2 = 5 \text{ ton}$$

Beban rel :

$$\text{Rel yang digunakan tipe R.33} = 33,34 \text{ kg/m}$$

$$\text{Panjang} = 11,3/13,3/13,6 \text{ m}$$

Beban kelengkapan alat penambat Jalan rel :

$$\text{Tirepon} = 0,44 \text{ kg}$$

$$\text{Plat landas} = 5 \text{ kg}$$

$$\text{Pelapis karet} = 0,15 \text{ kg}$$

$$\text{Paku rel} = 0,23 \text{ kg} +$$

$$\text{Jumlah beban penambat rel per-m} = 5,82 \text{ kg}$$

- Berat sendiri dari bantalan

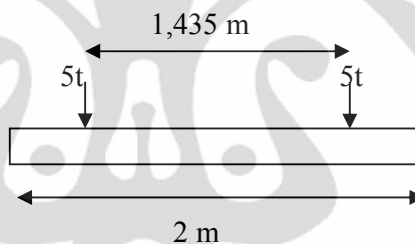
Bantalan Kayu	= 50 kg
Bantalan Baja	= 47,1 kg
Bantalan Beton	= 175 kg

- Pemodelan pembebanan pada trem

Beban trem ditumpu oleh 2 bogie yang masing-masing bogie terdiri dari 2 gandar dengan beban masing-masing 10 ton, akan didistribusikan ke jalan rel dengan asumsi rel sebagai balok memanjang diatas perletakan elastis dimana lapisan balas di asumsikan sebagai pegas.

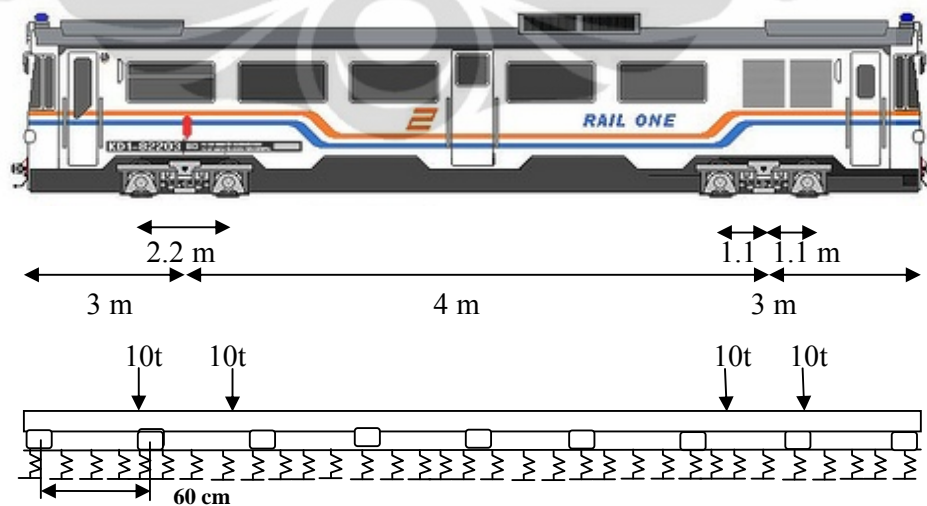
Pada pemodelan pembebanan ini, dibagi menjadi dua yaitu dengan beban statis dan beban dinamis.

- Beban statis (Ps)



Gambar 4.3 Pembebanan statis pada potongan melintang dari bantalan

- Beban Dinamis



Gambar 4.4 Contoh aplikasi pembebanan pada jalan rel di atas pondasi elastis dengan potongan memanjang dari rel .

Dari pembebanan tersebut akan ditinjau melalui pemodelan pembebanan statis dan dinamis dengan menggunakan program SAP 2000, agar dapat diketahui kekuatan struktur yang mampu ditahan oleh setiap tipe bantalan dengan mengacu pada beberapa parameter tertentu, diantaranya :

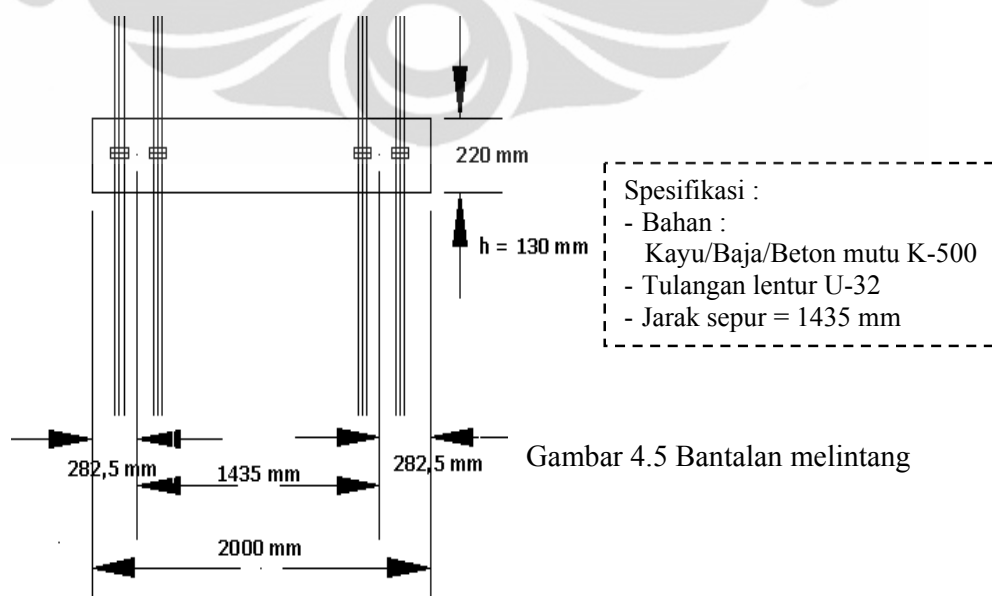
- Momen positif/Negatif pada daerah di bawah rel
- Momen positif/Negatif pada daerah di tengah bantalan.
- Tegangan yang terjadi pada bantalan
- Jarak bantalan, khusus untuk tipe bantalan melintang

4.3 Pemodelan Bentuk Tipe Bantalan

Berikut ini beberapa contoh model bentuk tipe bantalan yang digunakan untuk moda trem berdasarkan kriteria bahan material yang digunakan, yang selanjutnya akan dianalisis berdasarkan kekuatan strukturnya masing-masing maupun keefisienan dalam biaya konstruksinya.

I. Model bantalan melintang

Bantalan melintang merupakan bantalan konvensional yang dipergunakan pada konstruksi jalan rel kereta api, biasanya bantalan melintang ini mempergunakan bahan material dari kayu, baja atau beton. Pada konstruksi jalan rel bagi moda trem ini ,dianalisis kekuatan struktur bantalannya dengan kriteria bahan material yang digunakan antara baja beton dan kayu.



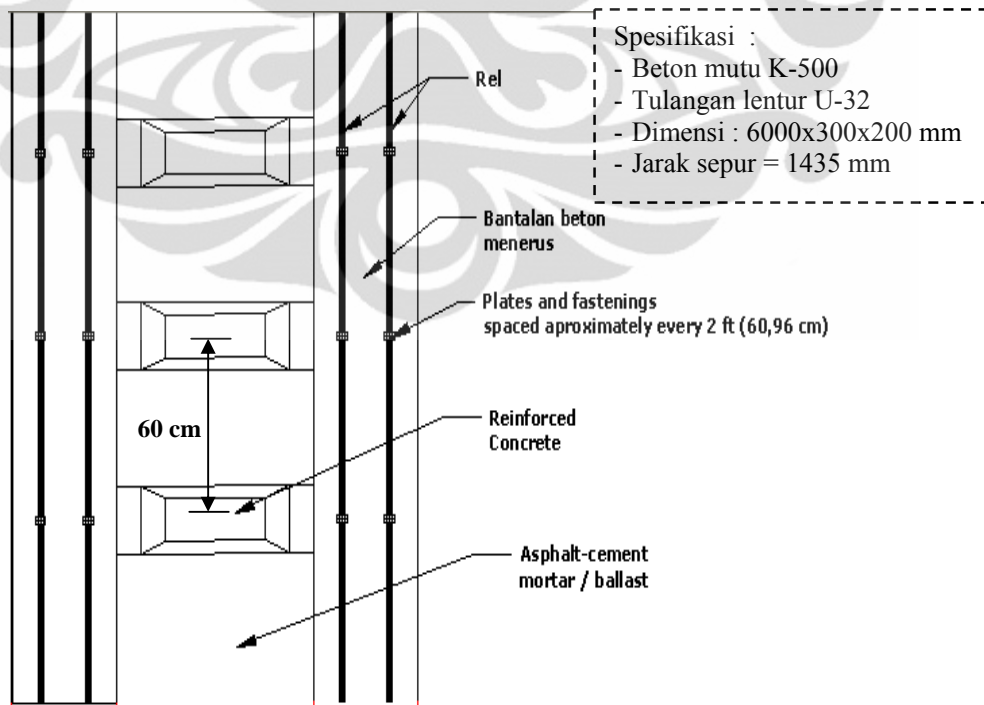
Gambar 4.5 Bantalan melintang

II. Model bantalan menerus

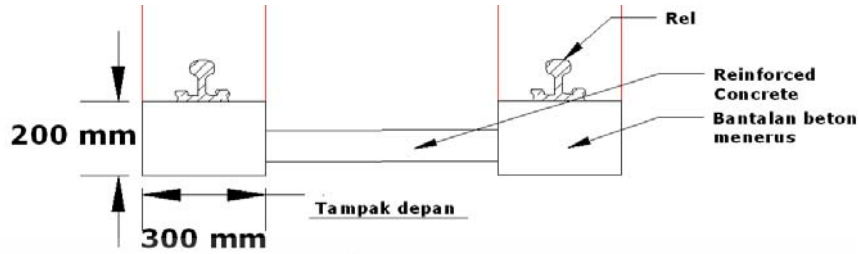
Pada tipe bantalan menerus ini pada umumnya mempergunakan bahan material dari beton dengan mutu standar yang telah ditetapkan, selain itu bantalan menerus ini desain dimensi dari panjang bantalannya mengikuti sepanjang rel yang digunakan, dengan dibagi menjadi beberapa blok-blok, dan ditempatkan diatas perletakan beton bertulang agar menjadi satu sistem yang terikat, sehingga menjaga agar jarak sepurnya tetap *fix*.



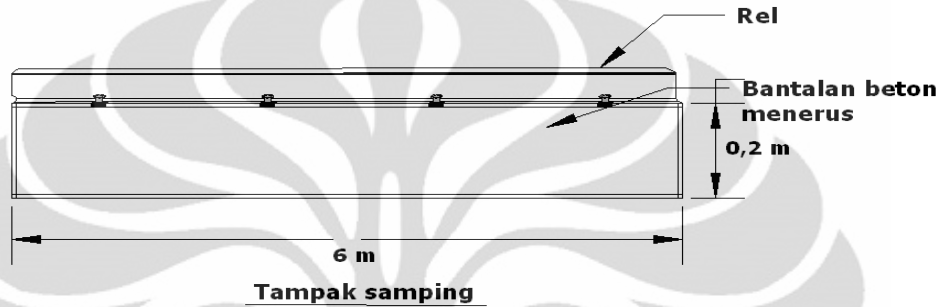
Gambar 4.6 a Bantalan beton menerus



Gambar 4.6.b Tampak atas penampang bantalan beton menerus



Gambar 4.6.c Tampak depan penampang bantalan beton menerus



Gambar 4.6.d Tampak samping penampang bantalan beton menerus

III. Model bantalan *slab track*

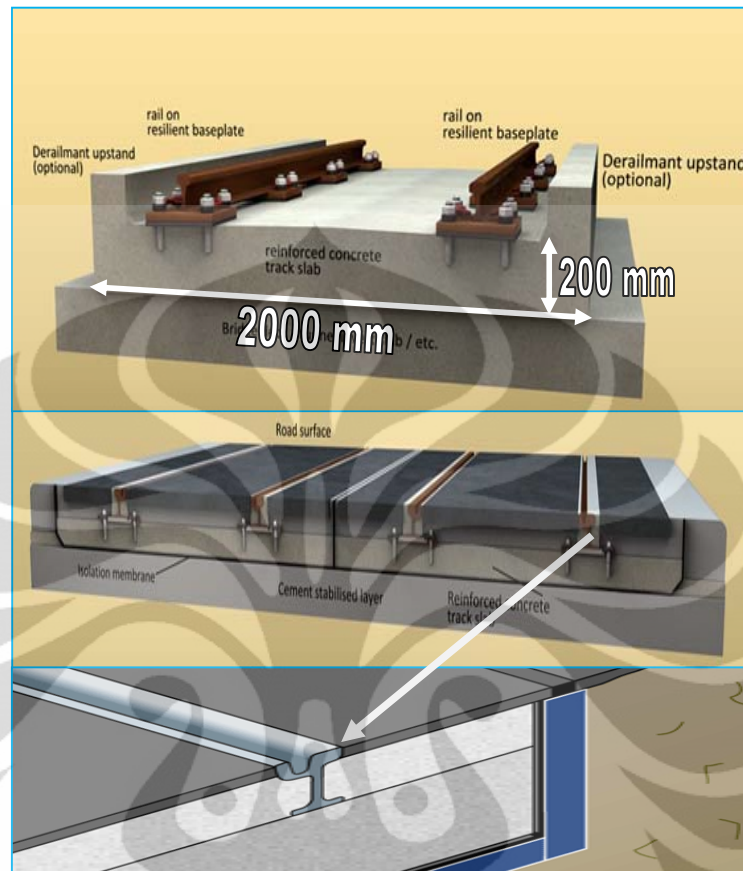
Bantalan slab merupakan bentuk model bantalan modern di dunia yang dipergunakan untuk kelas kereta api cepat dan kereta api ringan saat ini. Pada bantalan ini tidak memerlukan balas yang digunakan sebagai pondasi untuk menyalurkan beban dari jalan rel pada umumnya, sebagai ganti dari balas, sistem pondasi pada bantalan slab ini menggunakan perkuatan dari beton bertulang.



Spesifikasi :

- Beton mutu K-500
- Tulangan lentur U-32
- Dimensi : 5000x2000 x 200 mm
- Jarak sepur = 1435 mm

Gambar 4.7.a Bantalan *slab track*



Gambar 4.7.b Penampang melintang bantalan *slab track*

4.4 Analisis Perhitungan Kekuatan Bantalan

Untuk memperoleh dimensi bantalan yang sesuai diperuntukkan bagi jalan rel pada moda angkutan trem, sebelumnya diperlukan analisis komponen kekuatan struktur perkerasan jalan yang telah terbangun sebelumnya, guna mengetahui nilai daya dukung tanah dasar pada perkerasan jalan tersebut.

Nilai – nilai kekuatan dari setiap lapisan perkerasan jalan menentukan seberapa besar beban yang dapat diterima oleh setiap bahan material penyusunnya untuk menahan beban baik struktur jalan relnya maupun lalu-lintas dari moda angkutan trem yang akan ditempatkan pada struktur perkerasan jalan tersebut. Jika, nilai kekuatan bahan material pada jalan eksisting sebelum dibangun jalan rel moda trem di atasnya memiliki nilai kekuatan yang kurang mendukung untuk menahan beban dari struktur jalan rel moda trem, maka diperlukan penambahan kekuatan dari setiap lapisan perkerasan tersebut.

Dalam penambahan kekuatan setiap lapis bahan material perkerasan jalan raya tersebut, harus memenuhi persyaratan dari kekuatan balas yang ada pada struktur jalan rel, sehingga beban dari struktur jalan rel maupun lalu-lintas dari moda tremnya dapat didistribusikan secara merata ke setiap lapisan yang ada pada struktur perkerasan jalan selain itu juga mampu untuk menahan beban yang terjadi di atas jalur trem tersebut secara keseluruhan dalam jangka waktu yang panjang.

4.4.1 Perhitungan *Rail Pressure* (P) dan *Lateral Rail Pressure* (Q) yang Terjadi

Pada Bantalan Beton Akibat Dari Beban Jalan Rel

Berdasarkan pada persamaan (3.1), (3.2) dan (3.3) :

Vertical rail pressure pada bantalan

$$\begin{aligned} - P &= W \times y_v \times (1+a) \\ &= 5 \text{ ton} \times 0,5 \times (1+1) = 5 \text{ ton} \end{aligned}$$

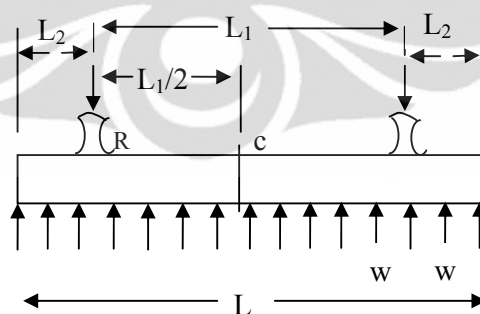
Lateral rail pressure (normal) pada bantalan

$$\begin{aligned} - Q_F &= H_F \times y_h \times (1 + b) \\ &= 3 \text{ tons} \times 0,5 \times (1+0,5) = 2,25 \end{aligned}$$

Lateral rail pressure (abnormal)

$$\begin{aligned} - Q_S &= H_S \times y_h \times (1 + b) \\ &= 6 \text{ tons} \times 0,5 \times (1+0,5) = 4,5 \end{aligned}$$

Reaksi balas



Gambar 4.8 Tekanan yang terjadi di bawah bantalan

$$w = \frac{2P}{L} = \frac{2 \times 5000 \text{ kg}}{200} = 50 \text{ kg/cm} = 279.985 \text{ lbs/in}$$

momen lentur maksimum pada pusat bantalan, (M_c), yang terjadi sebesar :

$$M_c = \left(\frac{5000 \text{ kg}}{4} \right) (143,5 - 2 \cdot 28,25) \text{ cm} = 108750 \text{ kg-cm} = 94.390,72 \text{ lb-in}$$

dan di bawah rel sebesar :

$$M_r = \frac{5000 \text{ kg} \cdot (28,25 \text{ cm})^2}{200 \text{ cm}} = 19951,5626 \text{ kg-cm} = 17317,17 \text{ lb-in}$$

4.4.2 Perhitungan Beban Merata Pada Tepi Bawah Rel Serta Superposisi Dari Beberapa Beban Gandar Yang Membebani Bantalan

Berdasarkan persamaan (3.1) ; (3.2) ; (3.3) ; (3.4) dan (3.5) :

- Beban roda (P) = 5000 kg ; V_{maks} Trem = 70 km/jam
- Tipe rel yang digunakan R.33 $\longrightarrow I_x = 1036,6 \text{ cm}^4$
- Modulus elastisitas rel (E) = $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
- Keadaan balas sedang (k) = 180 kg/cm^2
- Variasi jarak bantalan yang digunakan = 50-160 cm

Beban merata pada tepi bawah rel yang membebani bantalan :

$$y_o = 6925,5 / (2 \times 180) = 19,2375 \text{ cm}^2$$

$$p = 180 \text{ kg/cm}^2 \times 19,2375 \text{ cm}^2 = 3462,75 \text{ kg}$$

Transformasi beban roda yang dinamis ke statis ekuivalen dengan menggunakan persamaan TALBOT :

$$P_d = 5000 \text{ kg} + 0,01 \times 5000 \text{ kg} \times \left[\left(\frac{70}{1,609} - 5 \right) \text{ mil/jam} \right] = 6925,5 \text{ kg}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{180 \text{ kg/cm}^2}{4 \times 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 \times 1036,6 \text{ cm}^4}} = 0,011 \text{ cm}^{-1}$$

$$x = \pi / 4 \cdot \lambda = \pi / (4 \times 0,011 \text{ cm}^{-1}) = 71,36 \text{ cm}$$

4.4.2.1 Perhitungan beban yang harus dipikul oleh tipe bantalan melintang berdasarkan variasi jarak antar bantalan

Pengaruh jarak antar bantalan yang digunakan terhadap beban yang bekerja pada struktur dari bantalan memiliki peranan penting terhadap besarnya reaksi momen-momen maupun gaya yang harus ditahan oleh bantalan dalam menyalurkan beban tersebut. Adapun perhitungan beban akibat dari struktur jalan rel moda trem yang harus ditahan oleh bantalan, didasarkan pada persamaan (3.3) berikut ini :

$$Q = \frac{0,786 \times P_d \times S}{x}$$

Tabel 4.3 Perbandingan beban aksial yang harus ditahan oleh bantalan berdasarkan variasi jarak antar bantalan.

No.	S (cm)	Q (Kg)
1	50	3814,072
2	60	4576,886
3	70	5339,7
4	80	6102,15
5	90	6865,329
6	100	7628,143
7	110	8390,958
8	120	9153,772
9	130	9916,586
10	140	10679,4
11	150	11442,21
12	160	12205,03

4.4.3 Analisis Daya Dukung Tanah Dasar

Nilai daya dukung tanah dasar (CBR) yang diperoleh akibat tekanan-tekanan yang dihasilkan oleh pembebanan pada struktur jalan trem dengan asumsi tebal balas (d) = 25 cm dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Talbot (2.3 dan 2.4) sebagai berikut :

$$\sigma_1 = \frac{3 \times 6925,5}{22 \times 200} = 4,722 \text{ kg/cm}^2$$

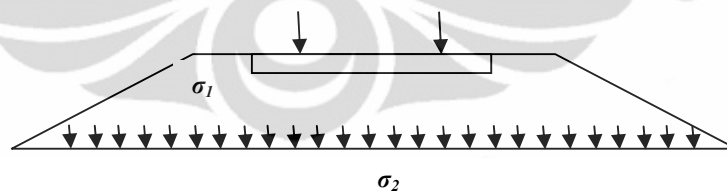
$$\sigma_2 = \frac{53,87 \times 4,722}{25^{1,25}} = 4,55 \text{ kg/cm}^2$$

Korelasi tegangan yang terjadi pada permukaan badan jalan (σ_2) terhadap nilai CBR dapat dihitung dengan menggunakan rumus (PD.10, Penjelasan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel) :

$$CBR = \frac{\sigma_2 \times 3}{3000} \times 100\%$$

dalam korelasi σ_2 dalam psi (lb/inch²). Jadi $\sigma_2 = 64,72$ psi

$$CBR = \frac{64,72 \times 3}{3000} \times 100\% = 6,5\%$$

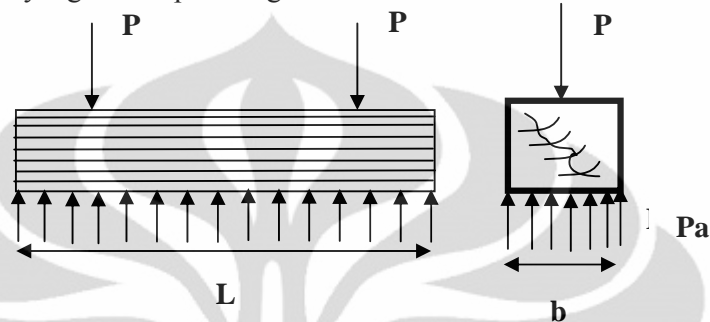


Gambar 4.9 Tekanan pada permukaan badan jalan

Jadi, berdasarkan perhitungan diatas diperoleh nilai *CBR* sebesar 6,5% dengan ketebalan balas yang digunakan cukup setebal 25 cm.

- Dengan asumsi menggunakan bantalan kayu :
 Diambil dimensi 200 x 22 x 13 cm
 Beban roda statis (Ps) = 5 ton = 5000 kg

Tekanan yang terjadi pada bagian bawah bantalan



Gambar 4.10 Tekanan pada bagian bawah bantalan

Berdasarkan pada persamaan (2.4) dan (2.5) :

$$Ab' = \frac{2}{3} \times 200 \times 22 = 2.933,33 \text{ cm}^2 = 454.667 \text{ in}^2$$

$$P_a = \frac{3 \times 5000}{22 \times 200} = 3,409 \text{ kg/cm}^2 = 48,49 \text{ psi}$$

$$\checkmark 48,49 \text{ psi} < 85 \text{ psi}$$

Dari perhitungan diperoleh nilai tekanan yang terjadi pada permukaan balas sebesar 48,49 psi tidak melebihi tekanan yang diizinkan untuk bantalan beton.

4.4.4 Analisis Kekuatan Pada Tipe Bantalan Kayu Didasarkan Pada Balok Finit (*Finite Beam*) Di Atas Perletakan Elastis (Berdasarkan Pedoman Perencanaan Konstruksi Jalan Rel PD.10)

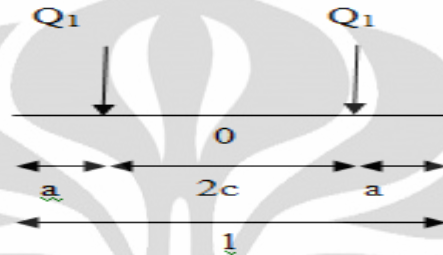
Pada bagian ini akan di analisis tegangan pada bantalan dengan pemilihan karakteristik bantalan sebagai berikut :

- Bantalan kayu kelas I ; $E = 1,25 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
- Dimensi = 200 x 22 x 13 cm

Momen inersia :

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot 22 \cdot 13^3 = 4.027,83 \text{ cm}^4$$

- Lebar sepur (*gauge*) ; $2c = 1435 \text{ mm}$
- Keadaan balas sedang ; $k = 180 \text{ kg/cm}^2$



Gambar 4.11 Pembebanan pada bantalan akibat superposisi dari beberapa beban gandar

Dumping factor

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{180 \text{ kg/cm}^2}{4 \times 1,25 \cdot \frac{10^5 \text{ kg}}{\text{cm}^2} \times 4.027,83 \text{ cm}^4}}$$

$$= 0,01729 \text{ cm}^{-1}$$

Momen pada sisi bawah rel

$$M_0 = \frac{Q_1}{4\lambda} \cdot \frac{1}{\sin \lambda l + \sinh \lambda l} \cdot [\{ 2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2 \lambda c + \cosh \lambda l) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2 \lambda c + \cos \lambda l) - \sinh 2 \lambda a (\sin 2 \lambda c + \sinh \lambda l) - \sin 2 \lambda a (\sinh \lambda c + \sin \lambda l) \}]$$

$$= \frac{Q_1}{4 \times 0,017129} \cdot \frac{1}{(15,861 - 0,311)} \cdot [2,52 (0,324 + 15,892) - 1,56 (1,873 - 0,950) - 1,14 (0,946 + 15,861) - 0,83 (0,661 - 0,311)]$$

$$\checkmark = 18,523 Q_1$$

Momen di tengah bantalan

$$- M_a = - \frac{Q_1}{2\lambda} \cdot \frac{1}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \cdot [\sinh \lambda c \{ \sin \lambda c + \sin \lambda (1-c) \} \\ + \sin \lambda c \{ \sinh \lambda c + \sinh \lambda (1-c) \} \\ + \cosh \lambda c \cdot \cos \lambda (1-c) \\ - \cos \lambda c \cdot \cosh \lambda (1-c)]$$

$$= - \frac{Q_1}{2 \times 0,017129} \cdot \frac{1}{(15,861 - 0,311)} \cdot [0,661 (0,581 + 0,299) \\ + 0,581 (0,661 + 8,509) \\ + 1,199 \cdot (-0,954) \\ - 0,814 \cdot 8,568]$$

$$\times = -4,098 Q_1$$

Momen tahanan bantalan

$$- M = \sigma_{lt} \times w \\ = 5/6 \times 150 \times 1/6 \times 22 \times 13^2 \\ = 77458,33 \text{ kg-cm}$$

$$\text{Jadi } M = M_0 \longrightarrow 77458,33 = 18,523 Q_1$$

$$Q_1 = 4181,74 \text{ kg}$$

$Q_1 < Q$ ► material kayu kelas I masih dapat digunakan untuk jalan rel kelas moda trem, jika jarak antar bantalan yang digunakan adalah 50 cm, sedangkan jika jarak antar bantalan lebih dari 50 cm maka bantalan tidak mampu menerima beban akibat dari superposisi dari beberapa beban gandar yang jatuh ke bantalan karena beban yang dapat dipikul (Q_1) lebih kecil dari beban yang terjadi (Q) pada bantalan akibat pembebanan dari jalan rel moda trem.

4.4.5 Analisis Kekuatan Pada Tipe Bantalan Baja Didasarkan Pada Balok Finit
(*Finite Beam*) Di Atas Perletakan Elastis (Berdasarkan Pedoman
Perencanaan Konstruksi Jalan Rel PD.10)

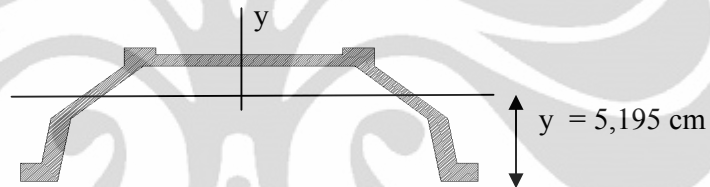
Diambil dimensi :

Panjang = 200 cm

Lebar = 23,2 cm

Berat = 47,1 kg

E = 683209,9 kg/cm² = 6,83 · 10⁵ kg/cm²



I_x = momen inersia sisi x = 162,5 cm⁴

I_y = momen inersia sisi y = 1284,5 cm⁴

w_x = momen tahanan sisi x = 40,6 cm³

w_y = momen tahanan sisi y = 110,5 cm³

Dumping factor

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{180 \text{ kg/cm}^2}{4 \times 6,83 \cdot \frac{10^5 \text{ kg}}{\text{cm}^2} \times 162,5 \text{ cm}^4}}$$

$$= 0,02523 \text{ cm}^{-1}$$

Momen pada sisi bawah rel

$$M_0 = \frac{Q_1}{4\lambda} \cdot \frac{1}{\sin \lambda l + \sinh \lambda l} \cdot [\{ 2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda l) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda l) - \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda l) - \sin 2\lambda a (\sinh \lambda c + \sin \lambda l) \}]$$

$$= \frac{Q_1}{4 \cdot 0,02523} \cdot \frac{1}{(77,727-0,945)} \cdot [3,2003 (- 0,237 + 77,734) \\ - 1,145 (3,138 + 0,328) \\ - 1,960 (0,971 + 77,727) \\ - 0,989 (1,034 - 0,945)]$$

$$\checkmark = 11,576 Q_1$$

Momen di tengah bantalan

$$- M_a = - \frac{Q_1}{2\lambda} \cdot \frac{1}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \cdot [\sinh \lambda c \{ \sin \lambda c + \sin \lambda(1-c) \} \\ + \sin \lambda c \{ \sinh \lambda c + \sinh \lambda(1-c) \} \\ + \cosh \lambda c \cdot \cos \lambda(1-c) \\ - \cos \lambda c \cdot \cosh \lambda(1-c)] \\ = - \frac{Q_1}{2 \cdot 0,02523} \cdot \frac{1}{(77,727-0,945)} \cdot [1,034 (0,786 - 0,841) \\ + 0,786 (1,034 + 31,431) \\ + 1,438 \cdot (- 0,541) \\ - 0,617 \cdot 31,447]$$

$$\times = - 1,363 Q_1$$

Tabel 4.4 Momen tahanan bantalan baja berdasarkan variasi jarak antar bantalan

No.	S (cm)	Q ₁ (Kg)	M (Kg-cm)	M (Kg-m)
1	50	3.814,07	44.153,19	441,53
2	60	4.576,89	52.983,83	529,84
3	70	5.339,70	61.814,47	618,14
4	80	6.102,51	70.645,11	706,45
5	90	6.865,33	79.475,75	794,76
6	100	7.628,14	88.306,38	883,06
7	110	8.390,96	97.137,02	971,37
8	120	9.153,77	105.967,66	1.059,68
9	130	9.916,59	114.798,30	1.147,98
10	140	10.679,40	123.628,94	1.236,29
11	150	11.442,21	132.459,58	1.324,60
12	160	12.205,03	141.290,21	1.412,90

4.4.6 Analisis Kekuatan Pada Tipe Bantalan Beton Melintang Didasarkan Pada Balok Finit (*Finite Beam*) Di Atas Perletakan Elastis (Berdasarkan Pedoman Perencanaan Konstruksi Jalan Rel PD.10)

Diambil data-data bantalan beton dari salah satu bantalan beton produksi dalam negeri :

Dipakai baja prategang sebanyak 18 buah dengan diameter 5,08 mm, tegangan putus 16000 kg/cm^2 .

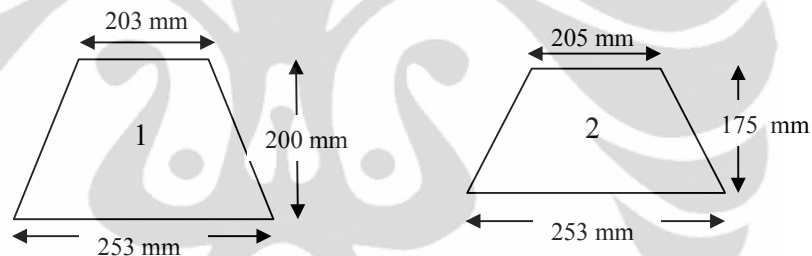
Pada saat kondisi transfer = 70 % kapasitas maksimum

.....► $P_{\text{initial}} = 18 \times 2270,24 \text{ kg}$

Dan pada saat kondisi efektif = 55 % kapasitas maksimum

.....► $P_{\text{efektif}} = 18 \times 1783,76 \text{ kg}$.

- Data geometri dan besaran karakteristik penampang :



Gambar 4.12 Potongan penampang bantalan beton ;
(1) bawah rel (2) tengah bantalan

Sumber : Telah diolah kembali dari Album Bangunan Atas
(Balai Pelatihan Teknik Perkeretaapian Bekasi)

$$A_1 = 456 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 400,75 \text{ cm}^2$$

$$I_1 = 15139,09 \text{ cm}^4$$

$$I_2 = 10190,02 \text{ cm}^4$$

$$Y_1 \text{ (a)} = \text{letak garis netral dari sisi atas} = 10,368 \text{ cm}$$

$$Y_1 \text{ (b)} = \text{letak garis netral dari sisi bawah} = 9,64 \text{ cm}$$

(besaran $Y_1 \text{ (a)}$ dan $Y_1 \text{ (b)}$ untuk penampang bawah rel)

$$Y_2 \text{ (a)} = 9,055 \text{ cm}$$

$$Y_2 \text{ (b)} = 8,445 \text{ cm}$$

(besaran $Y_2 \text{ (a)}$ dan $Y_2 \text{ (b)}$ untuk penampang tengah bantalan)

$$W_1 (a) = \text{momen tahanan sisi atas} = 1460,46 \text{ cm}^3$$

$$W_1 (b) = \text{momen tahanan sisi bawah} = 1571,26 \text{ cm}^3$$

(besaran $W_1 (a)$ dan $W_1 (b)$ untuk penampang bawah rel)

$$W_2 (a) = 1125,35 \text{ cm}^3$$

$$W_2 (b) = 1206,36 \text{ cm}^3$$

(besaran $W_2 (a)$ dan $W_2 (b)$ untuk penampang di tengah bantalan)

$$\text{❖ } E = 6400 \sqrt{500} = 143108,35 \text{ kg/cm}^2$$

Harga : - Untuk daerah di bawah rel

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 143108,35 \times 15139,09}} = 0,012 \text{ cm}^{-1}$$

- Untuk daerah di tengah bantalan

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 143108,35 \times 10190,02}} = 0,013 \text{ cm}^{-1}$$

❖ Momen pada daerah di bawah rel :

$$M = \frac{Q_1}{4\lambda} \cdot \frac{1}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \cdot [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda l) \\ - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda l) \\ - \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda l) \\ - \sin 2\lambda a (\sinh \lambda c + \sin \lambda l)]$$

$$= \frac{Q_1}{4 \times 0,012} \times \frac{1}{5,466 + 0,675} \cdot [2,238 (0,652 + 5,56) \\ - 1,779 (1,394 - 0,737) - 0,731 (0,758 + 5,466) - 0,627 (0,444 + \\ 0,675)]$$

$$\checkmark = 25,367 Q_1$$

Tabel 4.5 Momen tahanan bantalan beton pada daerah di bawah rel berdasarkan variasi jarak antar bantalan

No.	S (cm)	Q ₁ (Kg)	M (Kg-cm)	M (Kg-m)
1	50	3,814.07	96,751.33	967.51
2	60	4,576.89	116,101.60	1,161.02
3	70	5,339.70	135,451.86	1,354.52
4	80	6,102.51	154,802.13	1,548.02
5	90	6,865.33	174,152.40	1,741.52
6	100	7,628.14	193,502.66	1,935.03
7	110	8,390.96	212,852.93	2,128.53
8	120	9,153.77	232,203.19	2,322.03
9	130	9,916.59	251,553.46	2,515.53
10	140	10,679.40	270,903.73	2,709.04
11	150	11,442.21	290,253.99	2,902.54
12	160	12,205.03	309,604.26	3,096.04

❖ Momen pada daerah tengah bantalan :

$$\begin{aligned}
 M &= -\frac{Q_1}{2\lambda} \cdot \frac{1}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \cdot [\sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda(1-c)) \\
 &\quad + \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda(1-c)) \\
 &\quad + \cosh \lambda c \cdot \cos \lambda(1-c) \\
 &\quad - \cos \lambda c \cdot \cosh \lambda(1-c)] \\
 &= -\frac{Q_1}{2 \times 0,013} \times \frac{1}{6,695+0,516} \cdot [0,483 (0,449 + 0,846) \\
 &\quad + 0,449 (0,483 + 4,163) \\
 &\quad + (1,111 \times -0,533) \\
 &\quad - (0,893 \times 4,282)]
 \end{aligned}$$

$$\times = -10,168 Q_1$$

Tabel 4.6 Momen tahanan bantalan beton pada daerah tengah bantalan berdasarkan variasi jarak antar bantalan

No.	S (cm)	Q1 (Kg)	M (Kg-cm)	M (Kg-m)
1	50	3.814,07	- 34.617,54	- 346,18
2	60	4.576,89	- 41.541,05	- 415,41
3	70	5.339,70	- 48.464,56	- 484,65
4	80	6.102,51	- 55.388,07	- 553,88
5	90	6.865,33	- 62.311,57	- 623,12
6	100	7.628,14	- 69.235,08	- 692,35
7	110	8.390,96	- 76.158,59	- 761,59
8	120	9.153,77	- 83.082,10	- 830,82
9	130	9.916,59	- 90.005,61	- 900,06
10	140	10.679,40	- 96.929,12	- 969,29
11	150	11.442,21	-103.852,62	- 1.038,53
12	160	12.205,03	-110.776,13	- 1.107,76

❖ Analisis tegangan :

➤ Tahap pratekan awal

▪ Pada bagian bawah rel

- Sisi atas :

$$\sigma = \frac{P_{\text{initial}}}{A} - \frac{P_i \cdot e}{w} = \frac{18 \times 2270,24}{456} - \frac{18 \times 2270,24 \times (0,135)}{1460,46}$$

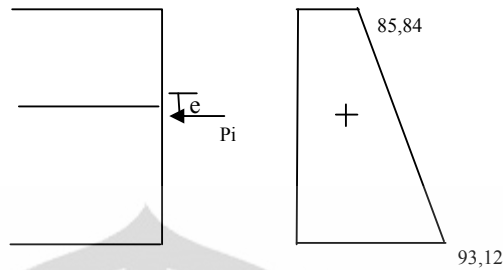
$$\checkmark = 85,84 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma < \sigma_{\text{maks}} = 200 \text{ kg/cm}^2)$$

- Sisi bawah :

$$\sigma = \frac{18 \times 2270,24}{456} + \frac{18 \times 2270,24 \times (0,135)}{1571,26}$$

$$\checkmark = 93,12 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma < \sigma_{\text{maks}} = 200 \text{ kg/cm}^2)$$

kondisi tegangan :



Gambar 4.13 Diagram tegangan pada bagian bawah rel tahap pratekan awal

Dari diagram tegangan tersebut memperlihatkan pada tahapan patekan awal, tegangan yang terjadi pada bagian bawah rel mampu ditahan oleh kekuatan dari bantalan dengan menyalurkan tegangan pada sisi bagian atas sebesar 85,84 kg/cm² dan sisi bagian bawah sebesar 93,12 kg/cm².

▪ Pada bagian tengah bantalan

- Sisi atas :

$$\sigma = \frac{P_{\text{initial}}}{A} - \frac{P_i \cdot e}{w} = \frac{18 \times 2270,24}{400,75} - \frac{18 \times 2270,24 \times (1,055)}{1125,35}$$

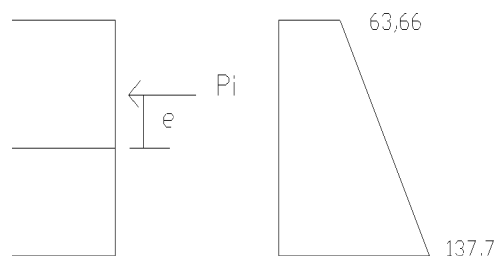
$$\checkmark = 63,66 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma < \sigma_{\text{maks}} = 200 \text{ kg/cm}^2)$$

- Sisi bawah :

$$\sigma = \frac{18 \times 2270,24}{400,75} + \frac{18 \times 2270,24 \times (1,055)}{1206,63}$$

$$\checkmark = 137,7 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma < \sigma_{\text{maks}} = 200 \text{ kg/cm}^2)$$

kondisi tegangan :



Gambar 4.14 Diagram tegangan pada bagian tengah bantalan tahap pratekan awal

Kondisi tegangan yang diperlihatkan pada diagram di atas terjadi pada bagian tengah bantalan, dengan pendistribusian tegangan pada bagian sisi atas sebesar $63,66 \text{ kg/cm}^2$ dan pada bagian sisi bawah sebesar $137,7 \text{ kg/cm}^2$.

➤ Tahap Pratekan efektif

Dengan berasumsi bahwa momen yang masih dapat ditahan oleh bantalan beton berdasarkan momen maksimum ijin, dari perhitungan sebelumnya diperoleh $M_{\text{bawah rel}} = 135,451.86 \text{ kg-cm}$ dan $M_{\text{tengah bantalan}} = 48464,56 \text{ kg-cm}$, maka tegangan yang terjadi pada tahap pratekan efektif yaitu dapat dilihat pada perhitungan di bawah ini.

▪ **Bawah rel**

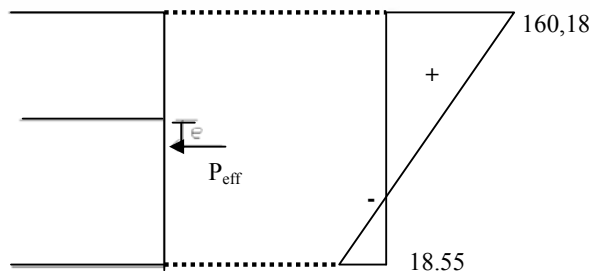
- Sisi atas :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{eff}}}{A} - \frac{P_{\text{eff}} \cdot e}{w} + \frac{M}{W} \\ &= \frac{18 \times 1783,76}{456} - \frac{18 \times 1783,76 \times (0,135)}{1460,46} + \frac{135.451,86}{1460,46} \\ &= 160,18 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma < \sigma_{\text{maks}} = 200 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

- Sisi bawah :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{18 \times 1783,76}{456} - \frac{18 \times 1783,76 \times (0,135)}{1571,26} - \frac{135.451,86}{1571,26} \\ &= -18,55 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma > \sigma_{\text{maks}} = -35 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

kondisi tegangan :



Gambar 4.15 Diagram tegangan pada bagian bawah rel tahap pratekan efektif

- Tengah bantalan

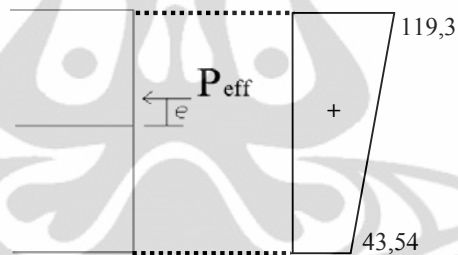
- Sisi atas :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{eff}}}{A} + \frac{P_{\text{eff}} \cdot e}{w} - \frac{M}{W} \\ &= \frac{18 \times 1783,76}{400,75} - \frac{18 \times 1783,76 \times (0,135)}{1125,35} + \frac{48464,56}{1125,35} \\ &= 119,33 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma < \sigma_{\text{maks}} = 200 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

- Sisi bawah :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{eff}}}{A} - \frac{P_{\text{eff}} \cdot e}{w} + \frac{M}{W} \\ &= \frac{18 \times 1783,76}{400,75} + \frac{18 \times 1783,76 \times (0,135)}{1206,63} - \frac{48464,56}{1206,63} \\ &= 43,54 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma < \sigma_{\text{maks}} = 200 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

kondisi tegangan :

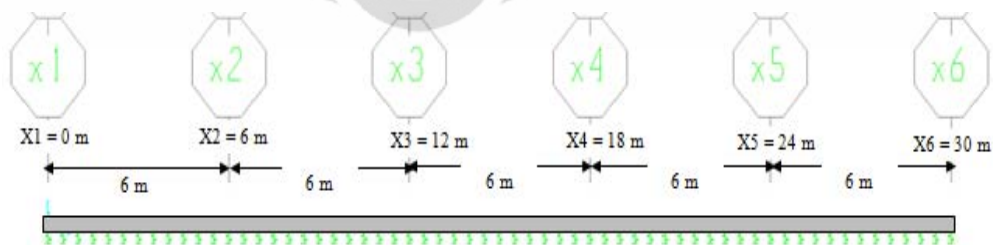


Gambar 4.16 Diagram tegangan pada bagian tengah bantalan tahap pratekan efektif

4.4.7 Analisis Kekuatan Pada Bantalan Beton Menerus

Analisis kekuatan pada bantalan beton menerus ini berbeda dengan bantalan melintang yang telah dianalisis pada sub-sub bab sebelumnya, yang membedakan pada bantalan beton menerus ini yaitu dari pembebanannya dimana rel yang dianggap sebagai balok menerus yang duduk di atas bantalan yang dimensi panjangnya mengikuti sepanjang rel, dengan dibagi menjadi beberapa bagian blok/segmen yang ditentukan, selain itu bantalan duduk diatas tumpuan balas dalam hal ini diasumsikan sebagai perletakan elastis (*spring*), dengan pengambilan asumsi jarak yang digunakan antar *springs* yaitu sebesar 10 cm. Analisis gaya-gaya yang terjadi pada bantalan beton menerus ditinjau berdasarkan simulasi dari garis pengaruh momen sepanjang bantalan dalam satu sisi bagian rel saja, dengan asumsi beban-beban yang bekerja pada kedua bagian rel dianggap sama. Setelah itu, maka dapat diketahui nilai momen maksimum yang terjadi pada bantalan menerus ini, berdasarkan dari pengaruh momen yang terjadi pada setiap interval jarak dari beban gandar trem. Selain itu, dari nilai momen maksimum yang diperoleh tersebut akan menentukan besarnya nilai tegangan yang terjadi pada bantalan menerus yang akan menentukan besarnya beban desain yang mampu ditahan oleh struktur bantalan. Untuk memperjelas simulasi yang dilakukan dengan menggunakan bantuan program analisis struktur (SAP 2000) ini, dapat dilihat pada uraian berikut ini.

- Pembebanan balok rel sepanjang bantalan terbagi merata sebagai beban mati ($q_{rel} = 33,34 \text{ kg/m}$)



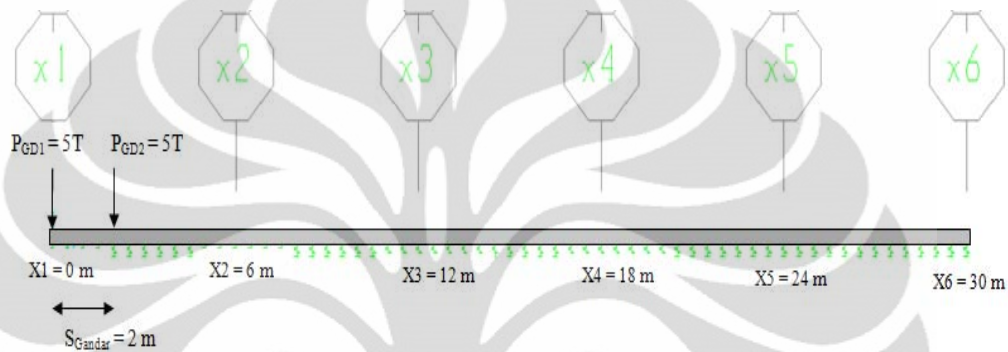
Gambar 4.17 Pembebanan balok rel sepanjang bantalan

Pada pembebanan akibat balok rel ini diasumsikan sebagai beban terbagi merata sepanjang rel yang digunakan yaitu R.33 dengan panjang 11,3 m. Dimana pengambilan panjang bantalan yang digunakan sepanjang rel yaitu 30 m, hal ini

di asumsikan dari panjang moda trem keseluruhan yang akan melewati bantalan menerus tersebut, dengan asumsi panjang bantalan yang digunakan masing-masing sebesar 6 m .

- Pembebanan roda gandar trem terpusat pada bantalan menerus sebagai beban hidup (LL)

($P_{\text{gandar}} = 5000 \text{ kg}$) :

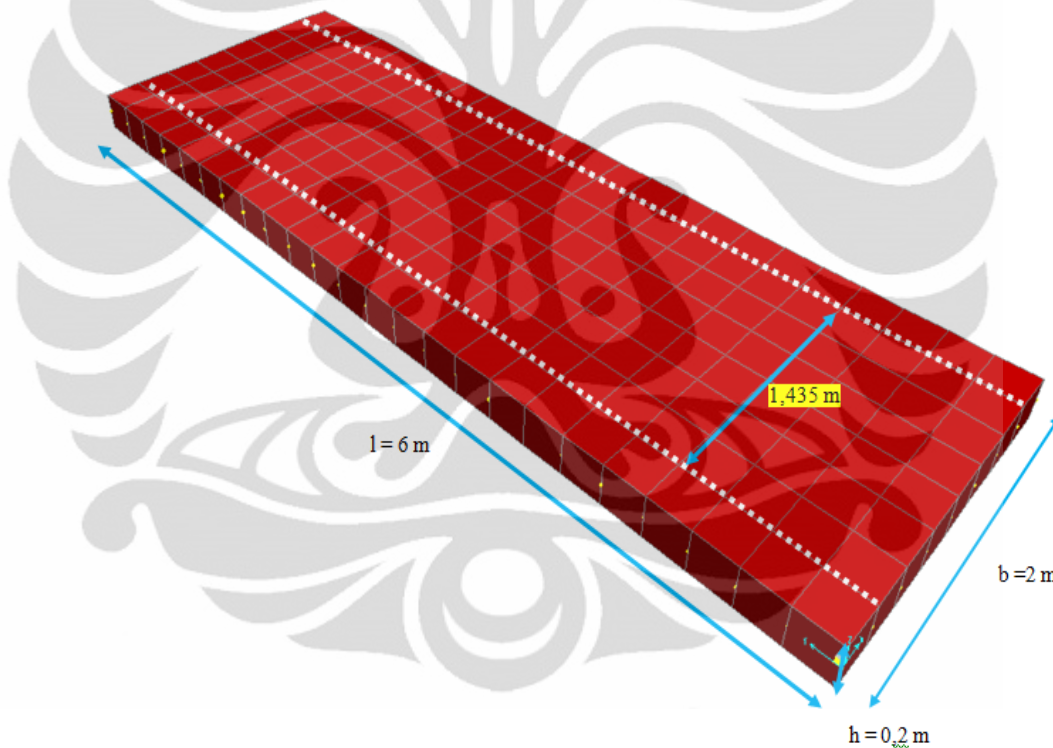


Gambar 4.18 Pembebanan roda gandar trem pada bantalan menerus

Untuk pembebanan akibat gandar roda trem, diasumsikan bahwa beban yang ditransfer dari masing-masing roda gandar sebesar 5 ton, dengan jarak antar gandar yaitu sebesar 2 m. Untuk mengetahui besarnya nilai garis pengaruh momen yang terjadi sepanjang bantalan maka asumsi untuk perpindahan beban antar roda gandar trem yang akan melewati bantalan menerus tersebut, dari titik awal (x1) hingga seluruh beban gandar dari moda trem tersebut membebani bantalan sepanjang 30 m. Sehingga dari simulasi tersebut akan diperoleh nilai momen maksimum yang akan menjadi acuan sebagai beban desain yang mampu ditahan oleh bantalan menerus ini. Hasil dari simulasi garis pengaruh momen maksimum yang terjadi sepanjang bantalan tersebut dapat dilihat pada lampiran.

4.4.8 Analisis Tegangan Yang Terjadi Pada Bantalan *Slab Track*

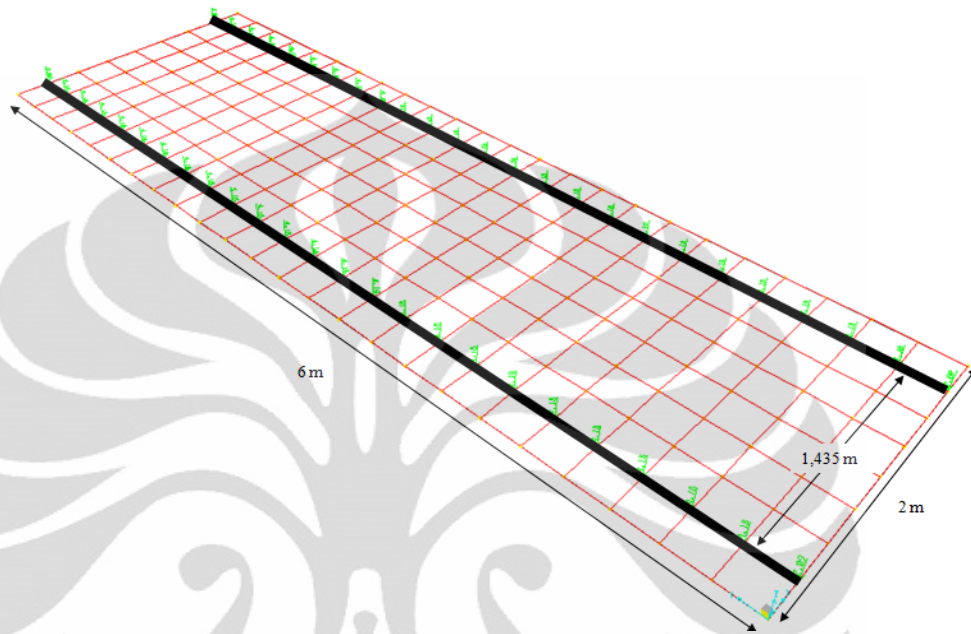
Tipe bantalan *slab track* ini didasarkan pada perhitungan dengan menggunakan simulasi pemodelan pelat beton, dengan asumsi properti material yang telah ditentukan untuk input data dalam program analisis struktur SAP 2000, dan untuk perletakan pada bantalan slab ini karena pada bagian *subbase* sebagai landasan untuk dudukannya, digunakan stabilisasi dengan lapisan semen beton, atau lapisan aspal, maka di asumsikan perletakannya menggunakan perletakan *area spring* seperti yang digunakan pada tipe bantalan yang menggunakan jalur balas. Sebagai gambaran model slab beton yang didesain dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.19 Bentuk 3-dimensi tipe bantalan slab

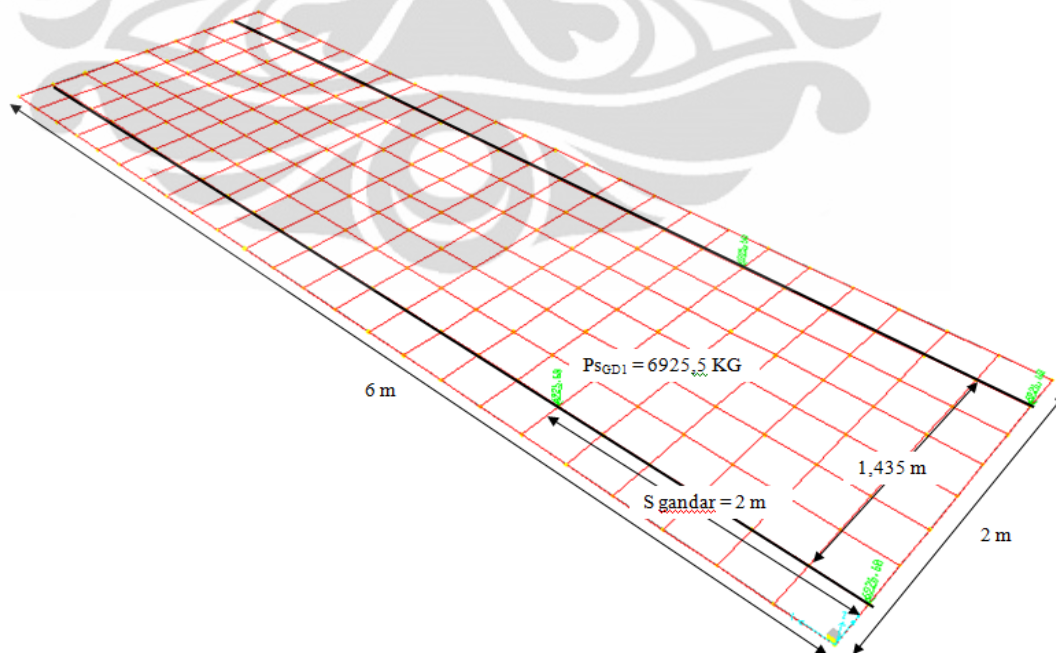
Adapun simulasi dari beban yang bekerja pada bantalan slab ini dibagi menjadi dua yaitu :

- a. Beban rel sebagai beban mati yang terbagi merata ($q = 33,34 \text{ kg/m}$)



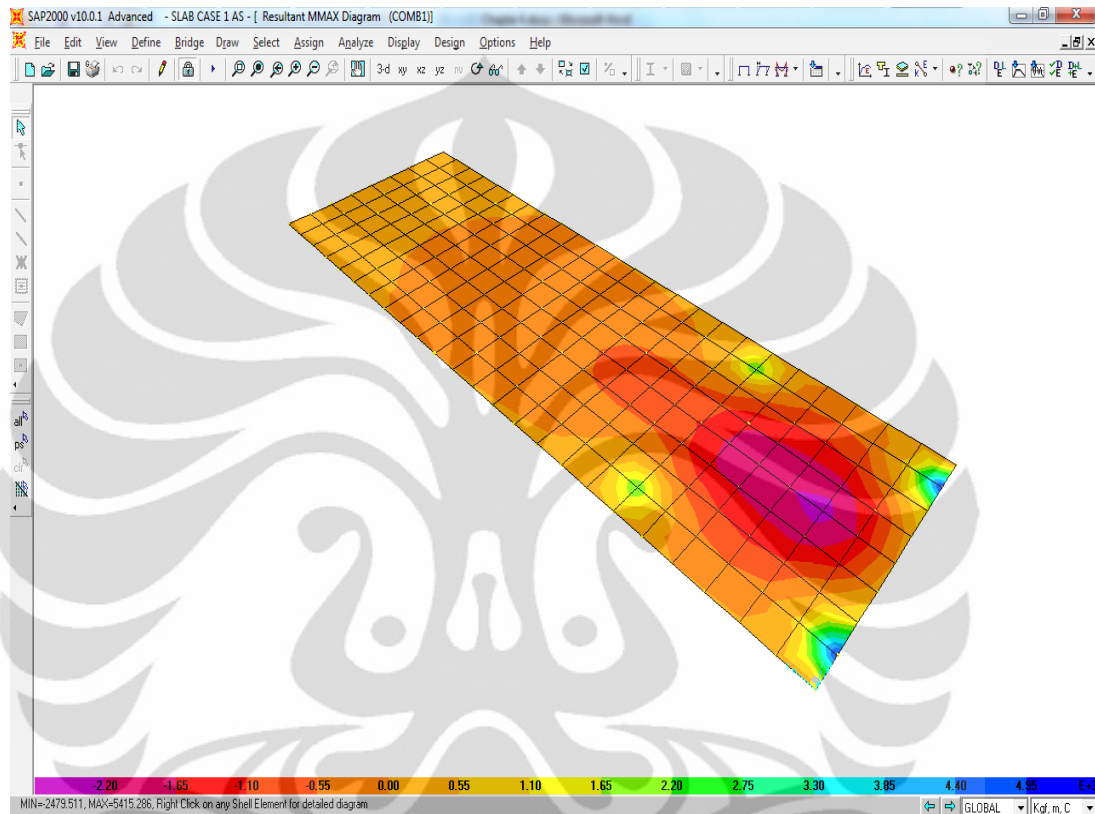
Pada pembebanan akibat rel ini diasumsikan sebagai beban terbagi merata yang diletakkan pada jarak antar sepur 1,435 m pada bagian lebar dari slab.

- b. Beban roda gandar statis ($P_s = 6925,5 \text{ kg}$)



Gambar 4.21 Pembebanan akibat beban roda gandar trem pada bantalan slab

Pada pembebanan akibat beban gandar dari roda trem di definisikan sebagai beban hidup. Setelah dilakukan analisis perhitungan dengan program SAP 2000 dengan mengkombinasikan pembebanan = 1.2 DL + 1.6 LL, maka diperoleh nilai momen yang terjadi pada bantalan slab pada gambar berikut :



Gambar 4.22 Diagram momen maksimum pada bantalan slab akibat beban rel dan roda gandar trem

Pada gambar diagram momen maksimum di atas akibat pengaruh dari resultan gaya beban rel dan gandar dari trem tersebut dapat diketahui pada daerah di tengah *slab* diperoleh nilai $M_{\min} = -2479,511$ kg-m, sedangkan pada daerah di sekitar bawah rel yaitu diperoleh nilai $M_{\max} = 5415,286$ kg-m. Untuk hasil *output* dari beberapa simulasi akibat beban roda gandar trem yang berpindah-pindah dapat dilihat pada lampiran 4.05 A.

4.5 Perbandingan Estimasi Biaya Investasi dan Pelaksanaan Konstruksi Bantalan Per-Satuan Panjang

Berikut ini merupakan simulasi untuk mengestimasi perhitungan biaya dari beberapa tipe alternatif bentuk bantalan, berdasarkan nilai harga bahan dan pekerjaan dari setiap masing-masing pelaksanaan konstruksi dalam pemasangan bantalan untuk suatu ruas tertentu, dengan parameter banyaknya jumlah bantalan yang dipergunakan berdasarkan jarak yang telah ditentukan pada perhitungan sebelumnya serta parameter biaya investasi dalam pemeliharaan untuk setiap tipe bantalan. Untuk data penentuan nilai biaya harga bahan serta biaya volume untuk setiap pekerjaan diambil berdasarkan data yang diperoleh dari instansi terkait dengan penelitian ini “PT.Kereta Api, Indonesia, Resort Manggarai, Seksi bangunan dan jalan rel”. dan untuk mengetahui analisa harga satuan setiap pekerjaan dapat dilihat pada lampiran.

1. Biaya investasi bantalan kayu melintang
 - a. Biaya pengadaan

Tabel 4.7 Estimasi biaya pengadaan bantalan kayu melintang

Dengan jarak antar bantalan (S = 50 cm)

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
I. Pengadaan							
1	2,000	btg	Pengadaan bantalan kayu melintang 200x22x13 cm	-	692,200	-	1,258,400,000
2	675	m ³	Pengadaan balas kricak uk. 2/6 cm sepanjang 1 km	-	140,000	-	94,500,000
Jumlah						-	1,352,900,000
Total biaya investasi awal konstruksi (Rp.)				1,352,900,000			

b. Biaya pelaksanaan pekerjaan konstruksi

Tabel 4.8 Estimasi biaya konstruksi bantalan kayu melintang

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
II. Pelaksanaan							
1	2	OH	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	1,388	m ³	Pekerjaan galian tanah	71,625	-	99,415,500	-
3	2,700	m ²	Pemadatan tanah dasar	29,500	-	79,650,000	-
4	2,000	btg	Memasang bantalan kayu melintang di lokasi (menyetel dan mengebor bantalan pada bagian alat penambat)	10,700	6,103.5	21,400,000	12,207,000
5	675	m ³	Menghampar/ memasukkan balas kricak uk.2/6 cm	16,335	-	11,026,125	-
Jumlah						211,581,625	12,207,000
Total biaya pelaksanaan konstruksi (Rp.)				223,788,625			

- Keterangan : untuk penjelasan lebih rinci mengenai harga satuan setiap pekerjaan dapat dilihat pada lampiran 4.07 B.

2. Biaya investasi bantalan baja melintang
 - a. Biaya pengadaan

Tabel 4.9 Estimasi biaya pengadaan bantalan baja melintang

Dengan jarak antar bantalan (S = 70 cm)

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
<u>I. Pengadaan</u>							
1	1,667	btg	Pengadaan bantalan baja melintang 200x23.2x7.5 cm	-	607,500	-	1,012,702,500
2	675	m ³	Pengadaan balas kricak uk. 2/6 cm sepanjang 1 km	-	140,000	-	94,500,000
Jumlah						-	1,107,202,500
Total biaya investasi awal konstruksi (Rp.)						1,107,202,500	

b. Biaya pelaksanaan pekerjaan konstruksi

Tabel 4.10 Estimasi biaya konstruksi bantalan baja melintang

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
II. Pelaksanaan							
1	2	OH	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	1,239	m ³	Pekerjaan galian tanah	71,625	-	88,764,863	-
3	2,700	m ²	Pemadatan tanah dasar	29,500	-	79,650,000	-
4	1,667	btg	Memasang bantalan baja melintang di lokasi (menyetel dan mengelas baseplat pada bantalan baja)	33,825	71,800	56,386,275	119,690,600
5	675	m ³	Menghampar/ memasukkan balas kricak uk.2/6 cm	16,335	-	11,026,125	-
Jumlah						235,917,263	119,690,600
Total biaya pelaksanaan konstruksi (Rp.)				355,607,863			

- Keterangan : untuk penjelasan lebih rinci mengenai harga satuan setiap pekerjaan dapat dilihat pada lampiran 4.08 B.

3. Biaya investasi bantalan beton melintang
 - a. Biaya pengadaan

Tabel 4.11 Estimasi biaya pengadaan bantalan beton melintang

Dengan jarak antar bantalan (S = 70 cm)

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
<u>I. Pengadaan</u>							
1	1,429	btg	Pengadaan bantalan beton melintang	-	505,000	-	721,645,000
2	675	m ³	Pengadaan balas kricak uk. 2/6 cm sepanjang 1 km	-	140,000	-	94,500,000
Jumlah						-	816,145,000
Total biaya investasi awal konstruksi (Rp.)				816,145,000			

b. Biaya pelaksanaan pekerjaan konstruksi

Tabel 4.12 Estimasi biaya konstruksi bantalan beton melintang

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
II. Pelaksanaan							
1	2	OH	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	1,577	m ³	Pekerjaan galian tanah	71,625	-	112,938,300	-
3	2,700	m ²	Pemadatan tanah dasar	29,500	-	79,650,000	-
4	1,429	btg	Memasang bantalan beton melintang di lokasi (menyetel dan mengebor pada bagian alat penambat)	11,165	8,876	15,954,785	12,683,804
5	675	m ³	Menghampar/ memasukkan balas kricak uk.2/6 cm	16,335	-	11,026,125	-
Jumlah						219,659,210	12,683,804
Total biaya pelaksanaan konstruksi (Rp.)				232,343,014			

- Keterangan : untuk penjelasan lebih rinci mengenai harga satuan setiap pekerjaan dapat dilihat pada lampiran 4.09 B.

4. Biaya investasi tipe bantalan beton menerus
 - a. Biaya pengadaan

Tabel 4.13 Estimasi biaya pengadaan bantalan beton menerus

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
<u>I. Pengadaan</u>							
1	334	blok	Pengadaan bantalan beton menerus (Vol. =600x30x20 cm)	-	2,390,000	-	798,260,000
2	1,667	Btg	Batang penghubung (Vol = 133,5x20x13,5 cm)	-	18,848.33	-	31,420,161
3	675	m ³	Pengadaan balas kricak uk. 2/6 cm sepanjang 1 km	-	140,000	-	94,500,000
Jumlah						-	924,180,161
Total biaya investasi awal konstruksi (Rp.)				924,180,161			

b. Biaya pelaksanaan pekerjaan konstruksi

Tabel 4.14 Estimasi biaya konstruksi bantalan beton menerus

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
II. Pelaksanaan							
1	2	OH	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	1,577	m ³	Pekerjaan galian tanah	71,625	-	112,938,300	-
3	2,700	m ²	Pemadatan tanah dasar	29,500	-	79,650,000	-
4	334	blok	Memasang bantalan beton menerus di lokasi (menyetel dan mengebor pada bagian alat penambat)	59,900	44,076	20,006,600	14,721,384
5	675	m ³	Menghampar/ memasukkan balas kricak uk.2/6 cm	16,335	-	11,026,125	-
Jumlah						223,711,025	14,721,384
Total biaya pelaksanaan konstruksi (Rp.)				238,432,409			

- Keterangan : untuk penjelasan lebih rinci mengenai harga satuan setiap pekerjaan dapat dilihat pada lampiran 4.10 B.

5. Biaya investasi tipe bantalan *Slab Track*
 a. Biaya pengadaan

Tabel 4.15 Estimasi biaya pengadaan bantalan *Slab Track*

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
I. Pengadaan							
1	200	blok	Pengadaan bantalan <i>slab track</i> volume = 500x200x20 cm	-	5,390,000	-	1,078,000,000
2	200	blok	Pembuatan lantai kerja sepanjang 1 km (stabilisasi dengan beton mutu rendah) *vol.lantai kerja = 5x2x0.15 m	-	2,139,000	-	427,800,000
Jumlah						-	1,505,800,000
Total biaya investasi awal konstruksi (Rp.)				1,505,800,000			

b. Biaya pelaksanaan pekerjaan konstruksi

Tabel 4.16 Estimasi biaya konstruksi bantalan *Slab Track*

No	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
II. Pelaksanaan							
1	2	OH	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	968	m ³	Pekerjaan galian tanah	71,625		69,333,000	-
3	2,000	m ²	Pemadatan tanah dasar	29,500	-	59,000,000	-
4	200	blok	Memasang lantai kerja	67,500	-	13,500,000	-
5	200	blok	Memasang bantalan <i>slab track</i> di lokasi (menyetel dan mengebor pada bagian alat penambat)	85,900	105,676	17,180,000	21,135,200
Jumlah						159,103,000	21,135,200
Total biaya pelaksanaan konstruksi (Rp.)				180,238,200			

- Keterangan : untuk penjelasan lebih rinci mengenai harga satuan setiap pekerjaan dapat dilihat pada lampiran 4.11 B.

4.6 Perencanaan Biaya Konstruksi Bantalan Dengan Metode *NPV*

- Perhitungan Nilai Sekarang Untuk Total Biaya Konstruksi dari Bantalan.

Total biaya yang dikeluarkan merupakan hasil penjumlahan modal awal (C_0) dan biaya operasional (c). Jumlah biaya tersebut kemudian dihitung berdasarkan nilai waktu sekarang. Rumus yang digunakan adalah:

$$Total\ Cost\ NPV = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

a. Estimasi biaya investasi bantalan

Konstruksi dari beberapa alternatif bantalan rel moda trem ini diperkirakan memakan waktu kurang lebih satu tahun dengan biaya yang telah dihitung sebelumnya berdasarkan dari variasi bahan material yang digunakan. Dimana pada estimasi biaya investasi ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu : pertama, biaya awal untuk pengadaan bahan dari setiap masing-masing tipe bantalan yang perlu dikeluarkan pada awal tahun ke-0 ; kedua, merupakan biaya untuk pelaksanaan pekerjaan dari pemasangan konstruksi bantalan di lapangan yang dimulai pada tahun pertama ; dan ketiga, merupakan biaya untuk menginvestasi kembali dari bantalan yang telah habis masa layanannya pada akhir tahun dari umur rencana untuk setiap tipe bantalan.

b. Estimasi biaya operasional pemeliharaan bantalan

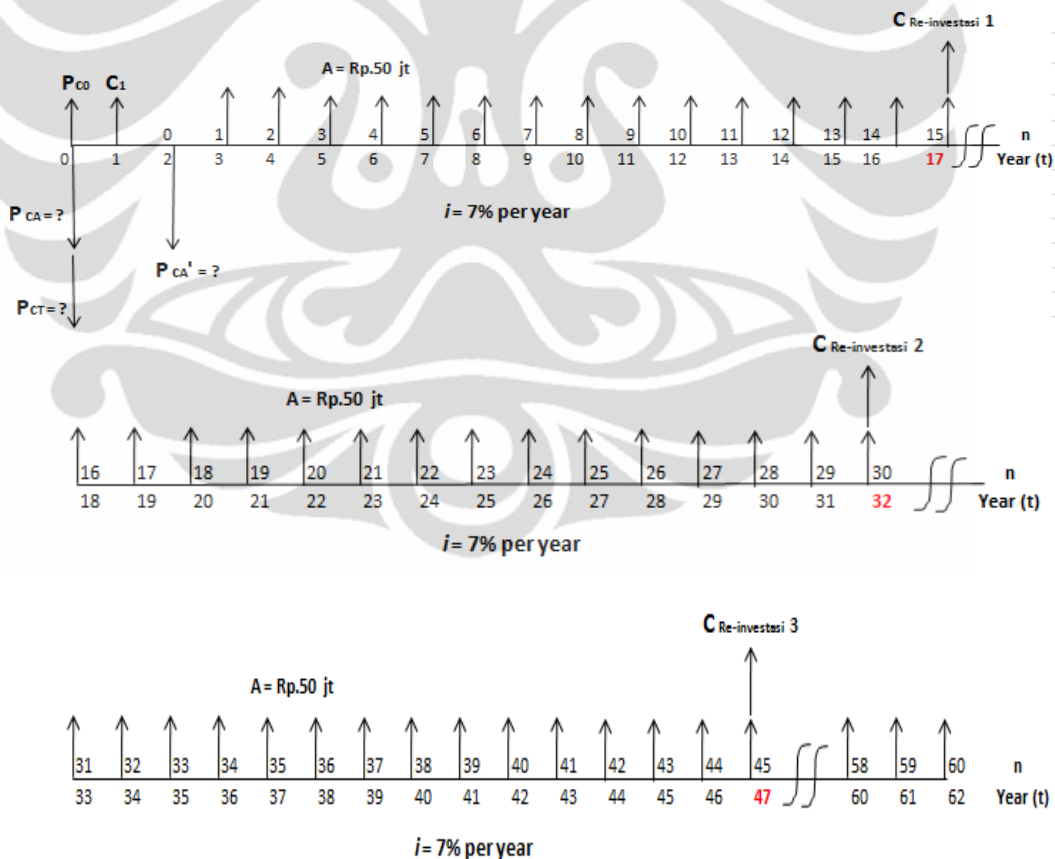
Sedangkan besarnya anggaran biaya operasional dari pemeliharaan per-tahun diasumsikan sebesar Rp 50-juta, dimulai pada awal tahun ketiga setelah konstruksi dari jalan rel pada moda trem beroperasi. Sementara itu estimasi biaya pemeliharaan dari bantalan ini didasarkan pada umur rencana dari setiap tipe bantalan. Dimana asumsi umur rencana dari masing-masing bantalan diperkirakan akan dapat berfungsi dengan baik selama masa umur layanan dari setiap bahan material yang dipergunakan dalam keadaan normal dapat ditaksir sebagai berikut : yaitu diantaranya bantalan kayu, untuk kayu kelas 1 yang dipergunakan dapat bertahan selama ± 15 tahun, sedangkan bantalan baja dapat bertahan selama ± 30 tahun dan bantalan beton dapat bertahan sekitar ± 20 tahun. Agar umur rencana dari setiap bantalan tersebut dapat tercapai maka diperlukan siklus perawatan yang menyeluruh selama periode waktu yang direncanakan.

Perhitungan estimasi biaya untuk menginvestasi kembali dari masing-masing tipe bantalan ini yang telah mencapai batas umur layanannya dapat dilihat pada lampiran B.

Melihat dari umur setiap bantalan yang berbeda-beda, maka untuk dapat mempermudah dalam membandingkan umur dari setiap tipe bantalan tersebut secara merata, maka diambil patokan atau acuan untuk umur layanan dari setiap tipe bantalan yaitu diperkirakan sekitar ± 60 tahun.

Dengan asumsi untuk inflasi tingkat bunga nasional yang digunakan yaitu sebesar 7 persen per-tahun. Maka dapat diketahui total nilai sekarang bersih (*Net Present Value*) dari setiap tipe bantalan yang direncanakan adalah sebagai berikut :

a. Diagram *cash flow* konstruksi bantalan kayu melintang



Dimana :

n = umur layanan bantalan

P_{C0} (Biaya investasi awal pengadaan bantalan) = Rp. 1352.90 jt

C_1 (Biaya pelaksanaan konstruksi pada awal tahun I) = Rp. 223.79 jt

C_A (Biaya Siklus perawatan - per-tahun) = Rp. 50 jt

$C_{re-investasi -1}$ pada n tahun ke-15 = Rp. 1542.08 jt

$C_{re-investasi -2}$ pada n tahun ke-30 = Rp. 1542.08 jt

$C_{re-investasi -3}$ pada n tahun ke-45 = Rp. 1542.08 jt

$P_{CA}' = \text{Rp. } 50 \text{ jt } (P/A, 10\%, 60)$

$P_{CT} = P_{C0} + P_{CA} + C_1 + C_{re-investasi - 1} + C_{re-investasi - 2} + C_{re-investasi - 3}$

= Rp. 1352.90 jt + $P_{CA}' (P/F, 10\%, 2)$ + Rp. 223.79 jt $(P/F, 10\%, 1)$ +
Rp. 1542.08 jt $(P/F, 10\%, 17)$ + Rp. 1542.08 jt $(P/F, 10\%, 32)$ +
Rp. 1542.08 jt $(P/F, 10\%, 47)$

= Rp. 1352.90 jt + Rp. 50 jt $(P/A, 10\%, 60) (P/F, 10\%, 2)$ +
Rp. 223.79 jt $(P/F, 10\%, 1)$ + Rp. 1542.08 jt $(P/F, 10\%, 17)$ +
Rp. 1542.08 jt $(P/F, 10\%, 32)$ + Rp. 1542.08 jt $(P/F, 10\%, 47)$

= Rp. 1352.90 jt + Rp. 50 jt (14,0392) (0,8734) +
Rp. 223.79 jt (0,9346) + Rp. 1542.08 jt (0,3166) +
Rp. 1542.08 jt (0,1147) + Rp. 1542.08 jt (0,0416)

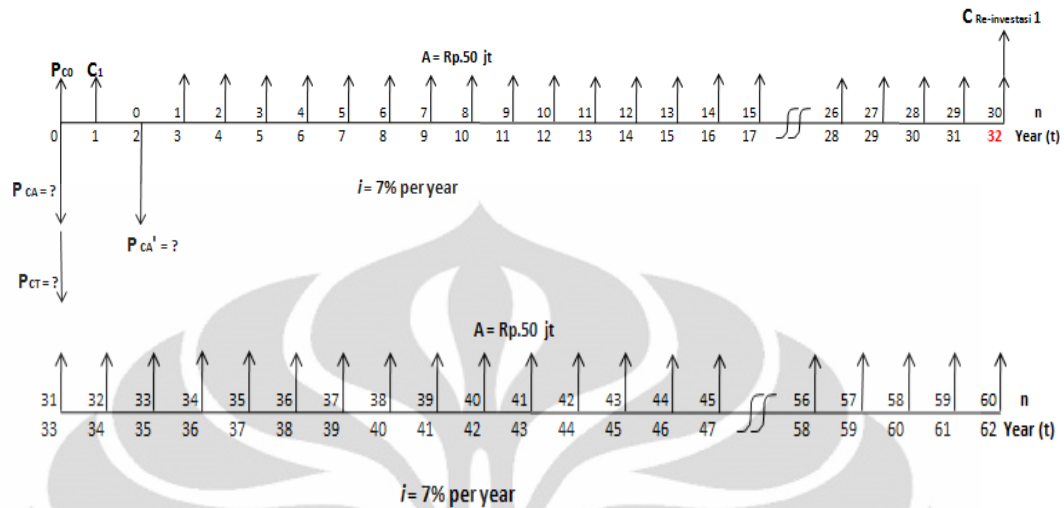
= **Rp. 2904.42 jt**

Tabel 4.17 Perhitungan excel *Net Present Value* dari konstruksi bantalan kayu melintang (dalam : Jutaan rupiah)

Tahun (t)	Biaya Investasi (C)	Biaya Pemeliharaan Tahunan (CA)	Tingkat Bunga (i=7%) (1+i) ^t	Total Cost C + CA (2+3)	NPV (C Total) (5 : 4)
1	2	3	4	5	6
0	1,352.90	0.00	1.0000	1,352.90	1352.90
1	223.79	0.00	1.0700	223.79	209.15
2	0.00	0.00	1.1449	0.00	0.00
3	0.00	50.00	1.2250	50.00	40.81
4	0.00	50.00	1.3108	50.00	38.14
5	0.00	50.00	1.4026	50.00	35.65
6	0.00	50.00	1.5007	50.00	33.32
7	0.00	50.00	1.6058	50.00	31.14
8	0.00	50.00	1.7182	50.00	29.10
9	0.00	50.00	1.8385	50.00	27.20
10	0.00	50.00	1.9672	50.00	25.42
11	0.00	50.00	2.1049	50.00	23.75
12	0.00	50.00	2.2522	50.00	22.20
13	0.00	50.00	2.4098	50.00	20.75
14	0.00	50.00	2.5785	50.00	19.39
15	0.00	50.00	2.7590	50.00	18.12
16	0.00	50.00	2.9522	50.00	16.94
17	1,542.08	50.00	3.1588	1,592.08	504.01
18	0.00	50.00	3.3799	50.00	14.79
19	0.00	50.00	3.6165	50.00	13.83
20	0.00	50.00	3.8697	50.00	12.92
21	0.00	50.00	4.1406	50.00	12.08
22	0.00	50.00	4.4304	50.00	11.29
23	0.00	50.00	4.7405	50.00	10.55
24	0.00	50.00	5.0724	50.00	9.86
25	0.00	50.00	5.4274	50.00	9.21
26	0.00	50.00	5.8074	50.00	8.61
27	0.00	50.00	6.2139	50.00	8.05
28	0.00	50.00	6.6488	50.00	7.52
29	0.00	50.00	7.1143	50.00	7.03

Lanjutan 4.17

30	0.00	50.00	7.6123	50.00	6.57
31	0.00	50.00	8.1451	50.00	6.14
32	1,542.08	50.00	8.7153	1,592.08	182.68
33	0.00	50.00	9.3253	50.00	5.36
34	0.00	50.00	9.9781	50.00	5.01
35	0.00	50.00	10.6766	50.00	4.68
36	0.00	50.00	11.4239	50.00	4.38
37	0.00	50.00	12.2236	50.00	4.09
38	0.00	50.00	13.0793	50.00	3.82
39	0.00	50.00	13.9948	50.00	3.57
40	0.00	50.00	14.9745	50.00	3.34
41	0.00	50.00	16.0227	50.00	3.12
42	0.00	50.00	17.1443	50.00	2.92
43	0.00	50.00	18.3444	50.00	2.73
44	0.00	50.00	19.6285	50.00	2.55
45	0.00	50.00	21.0025	50.00	2.38
46	0.00	50.00	22.4726	50.00	2.22
47	1,542.08	50.00	24.0457	1,592.08	66.21
48	0.00	50.00	25.7289	50.00	1.94
49	0.00	50.00	27.5299	50.00	1.82
50	0.00	50.00	29.4570	50.00	1.70
51	0.00	50.00	31.5190	50.00	1.59
52	0.00	50.00	33.7253	50.00	1.48
53	0.00	50.00	36.0861	50.00	1.39
54	0.00	50.00	38.6122	50.00	1.29
55	0.00	50.00	41.3150	50.00	1.21
56	0.00	50.00	44.2071	50.00	1.13
57	0.00	50.00	47.3015	50.00	1.06
58	0.00	50.00	50.6127	50.00	0.99
59	0.00	50.00	54.1555	50.00	0.92
60	0.00	50.00	57.9464	50.00	0.86
61	0.00	50.00	62.0027	50.00	0.81
62	0.00	50.00	66.3429	50.00	0.75
62-th PW	[=NPV(10%,C1:C62)+C0] = 2291.30	[=NPV(10%,CA1:CA62)+CA0] = 613.12	Total		2904.42

b. Diagram *cash flow* konstruksi bantalan baja melintang

Dimana :

n = umur layanan bantalan

P_{C0} (Biaya investasi awal pengadaan bantalan) = Rp. 1107.20 jt

C_1 (Biaya pelaksanaan konstruksi pada awal tahun I) = Rp. 355.61 jt

C_A (Biaya Siklus perawatan - per-tahun) = Rp. 50 jt

$C_{\text{re-investasi -1}}$ pada n tahun ke-30 = Rp. 1424.28 jt

$$P_{CA} = \text{Rp. 50 jt } (P/A, 10\%, 60)$$

$$P_{CT} = P_{C0} + P_{CA} + C_1 + C_{\text{re-investasi - 1}}$$

$$= \text{Rp. 1107.20 jt} + P_{CA} (P/F, 10\%, 2) + \text{Rp. 355.61 jt } (P/F, 10\%, 1) + \text{Rp. 1424.28 jt } (P/F, 10\%, 32)$$

$$= \text{Rp. 1107.20 jt} + \text{Rp. 50 jt } (P/A, 10\%, 60) (P/F, 10\%, 2) +$$

$$\text{Rp. 355.61 jt } (P/F, 10\%, 1) + \text{Rp. 1424.28 jt } (P/F, 10\%, 32)$$

$$= \text{Rp. 1107.20 jt} + \text{Rp. 50 jt } (14,0392) (0,8734) + \text{Rp. 355.61 jt } (0,9346) +$$

$$\text{Rp. 1424.28 jt } (0,1147)$$

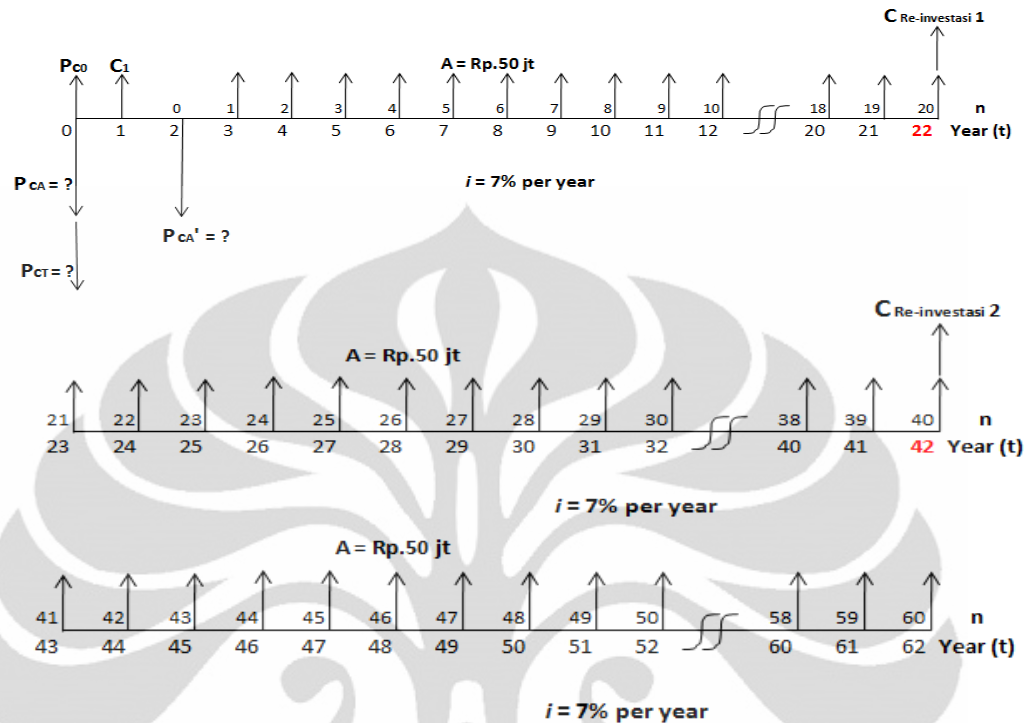
$$= \text{Rp. 2216.09 jt}$$

Tabel 4.18 Perhitungan excel *Net Present Value* dari konstruksi bantalan baja melintang (dalam : Jutaan rupiah)

Tahun (t)	Biaya Investasi (C)	Biaya Pemeliharaan Pertahun (CA)	Tingkat Bunga (i=7%) (1+i) ^t	Total Cost C + CA (2+3)	NPV (C Total) (5 : 4)
1	2	3	4	5	6
0	1,107.20	0.00	1.0000	1,107.20	1107.20
1	355.61	0.00	1.0700	355.61	332.34
2	0.00	0.00	1.1449	0.00	0.00
3	0.00	50.00	1.2250	50.00	40.81
4	0.00	50.00	1.3108	50.00	38.14
5	0.00	50.00	1.4026	50.00	35.65
6	0.00	50.00	1.5007	50.00	33.32
7	0.00	50.00	1.6058	50.00	31.14
8	0.00	50.00	1.7182	50.00	29.10
9	0.00	50.00	1.8385	50.00	27.20
10	0.00	50.00	1.9672	50.00	25.42
11	0.00	50.00	2.1049	50.00	23.75
12	0.00	50.00	2.2522	50.00	22.20
13	0.00	50.00	2.4098	50.00	20.75
14	0.00	50.00	2.5785	50.00	19.39
15	0.00	50.00	2.7590	50.00	18.12
16	0.00	50.00	2.9522	50.00	16.94
17	0.00	50.00	3.1588	50.00	15.83
18	0.00	50.00	3.3799	50.00	14.79
19	0.00	50.00	3.6165	50.00	13.83
20	0.00	50.00	3.8697	50.00	12.92
21	0.00	50.00	4.1406	50.00	12.08
22	0.00	50.00	4.4304	50.00	11.29
23	0.00	50.00	4.7405	50.00	10.55
24	0.00	50.00	5.0724	50.00	9.86
25	0.00	50.00	5.4274	50.00	9.21
26	0.00	50.00	5.8074	50.00	8.61
27	0.00	50.00	6.2139	50.00	8.05
28	0.00	50.00	6.6488	50.00	7.52
29	0.00	50.00	7.1143	50.00	7.03

Lanjutan 4.18

30	0.00	50.00	7.6123	50.00	6.57
31	0.00	50.00	8.1451	50.00	6.14
32	1,424.28	50.00	8.7153	1,474.28	169.16
33	0.00	50.00	9.3253	50.00	5.36
34	0.00	50.00	9.9781	50.00	5.01
35	0.00	50.00	10.6766	50.00	4.68
36	0.00	50.00	11.4239	50.00	4.38
37	0.00	50.00	12.2236	50.00	4.09
38	0.00	50.00	13.0793	50.00	3.82
39	0.00	50.00	13.9948	50.00	3.57
40	0.00	50.00	14.9745	50.00	3.34
41	0.00	50.00	16.0227	50.00	3.12
42	0.00	50.00	17.1443	50.00	2.92
43	0.00	50.00	18.3444	50.00	2.73
44	0.00	50.00	19.6285	50.00	2.55
45	0.00	50.00	21.0025	50.00	2.38
46	0.00	50.00	22.4726	50.00	2.22
47	0.00	50.00	24.0457	50.00	2.08
48	0.00	50.00	25.7289	50.00	1.94
49	0.00	50.00	27.5299	50.00	1.82
50	0.00	50.00	29.4570	50.00	1.70
51	0.00	50.00	31.5190	50.00	1.59
52	0.00	50.00	33.7253	50.00	1.48
53	0.00	50.00	36.0861	50.00	1.39
54	0.00	50.00	38.6122	50.00	1.29
55	0.00	50.00	41.3150	50.00	1.21
56	0.00	50.00	44.2071	50.00	1.13
57	0.00	50.00	47.3015	50.00	1.06
58	0.00	50.00	50.6127	50.00	0.99
59	0.00	50.00	54.1555	50.00	0.92
60	0.00	50.00	57.9464	50.00	0.86
61	0.00	50.00	62.0027	50.00	0.81
62	0.00	50.00	66.3429	50.00	0.75
62-th PW	[=NPV(10%,C1:C62)+C0] = 1602.97	[=NPV(10%,CA1:CA62)+CA0] = 613.12	Total		2216.09

c. Diagram *cash flow* konstruksi bantalan beton melintang

Dimana :

n = umur layanan bantalan

P_{C0} (Biaya investasi awal pengadaan bantalan) = Rp. 816.15 jt

C_1 (Biaya pelaksanaan konstruksi pada awal tahun I) = Rp. 232.34 jt

C_A (Biaya Siklus perawatan - per-tahun) = Rp. 50 jt

$C_{\text{re-investasi -1}}$ pada n tahun ke-20 = Rp. 988.25 jt

$C_{\text{re-investasi -2}}$ pada n tahun ke-40 = Rp. 988.25 jt

$$P_{CA}' = \text{Rp. } 50 \text{ jt } (P/A, 10\%, 60)$$

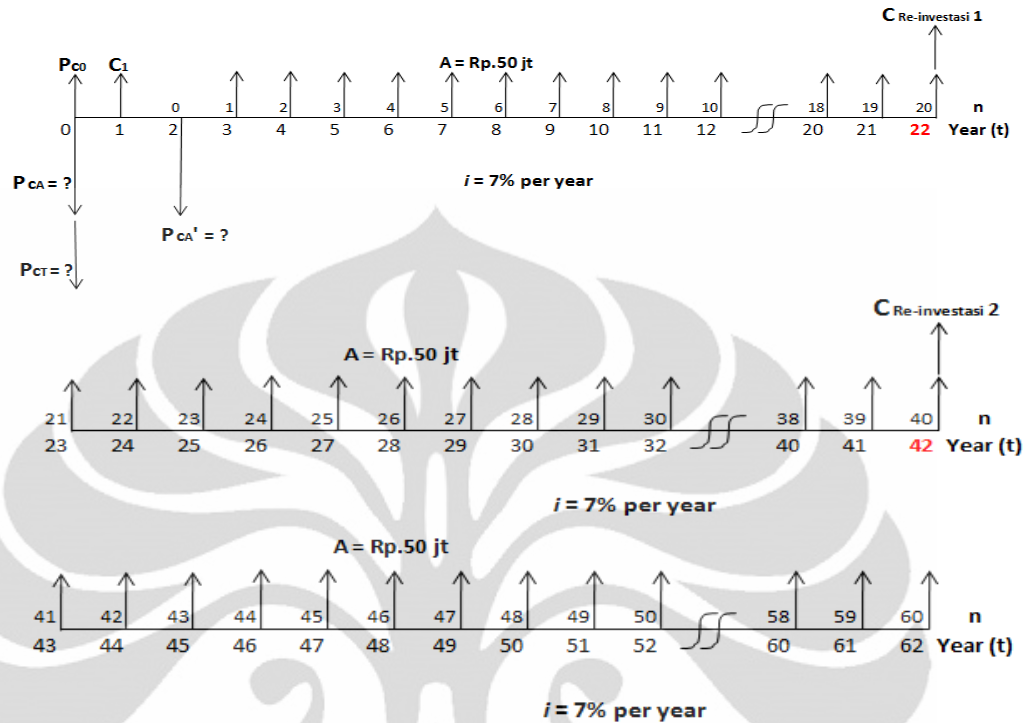
$$\begin{aligned} P_{CT} &= P_{C0} + P_{CA}' + C_1 + C_{\text{re-investasi -1}} + C_{\text{re-investasi -2}} \\ &= \text{Rp. } 816.15 \text{ jt} + P_{CA}'(P/F, 10\%, 2) + \text{Rp. } 232.34 \text{ jt } (P/F, 10\%, 1) + \\ &\quad \text{Rp. } 988.25 \text{ jt } (P/F, 10\%, 22) + \text{Rp. } 988.25 \text{ jt } (P/F, 10\%, 42) \\ &= \text{Rp. } 816.15 \text{ jt} + \text{Rp. } 50 \text{ jt } (P/A, 10\%, 60) (P/F, 10\%, 2) + \text{Rp. } 232.34 \text{ jt} \\ &\quad (P/F, 10\%, 1) + \text{Rp. } 988.25 \text{ jt } (P/F, 10\%, 22) + \text{Rp. } 988.25 \text{ jt } (P/F, 10\%, 42) \\ &= \text{Rp. } 816.15 \text{ jt} + \text{Rp. } 50 \text{ jt } (14,0392) (0,8734) + \text{Rp. } 232.34 \text{ jt } (0,9346) + \\ &\quad \text{Rp. } 988.25 \text{ jt } (0,2257) + \text{Rp. } 988.25 \text{ jt } (0,0583) \\ &= \text{Rp. } 1927.11 \text{ jt} \end{aligned}$$

Tabel 4.19 Perhitungan excel *Net Present Value* dari konstruksi bantalan beton melintang (dalam : Jutaan rupiah)

Tahun (t)	Biaya Investasi (C)	Biaya Pemeliharaan Tahunan (CA)	Tingkat Bunga (i=7%) (1+i) ^t	Total Cost C + CA (2+3)	NPV (C Total) (5 : 4)
1	2	3	4	5	6
0	816.15	0.00	1.0000	816.15	816.15
1	232.34	0.00	1.0700	232.34	217.14
2	0.00	0.00	1.1449	0.00	0.00
3	0.00	50.00	1.2250	50.00	40.81
4	0.00	50.00	1.3108	50.00	38.14
5	0.00	50.00	1.4026	50.00	35.65
6	0.00	50.00	1.5007	50.00	33.32
7	0.00	50.00	1.6058	50.00	31.14
8	0.00	50.00	1.7182	50.00	29.10
9	0.00	50.00	1.8385	50.00	27.20
10	0.00	50.00	1.9672	50.00	25.42
11	0.00	50.00	2.1049	50.00	23.75
12	0.00	50.00	2.2522	139.36	22.20
13	0.00	50.00	2.4098	50.00	20.75
14	0.00	50.00	2.5785	50.00	19.39
15	0.00	50.00	2.7590	50.00	18.12
16	0.00	50.00	2.9522	50.00	16.94
17	0.00	50.00	3.1588	50.00	15.83
18	0.00	50.00	3.3799	50.00	14.79
19	0.00	50.00	3.6165	50.00	13.83
20	0.00	50.00	3.8697	50.00	12.92
21	0.00	50.00	4.1406	50.00	12.08
22	988.25	50.00	4.4304	1,038.25	234.35
23	0.00	50.00	4.7405	50.00	10.55
24	0.00	50.00	5.0724	50.00	9.86
25	0.00	50.00	5.4274	50.00	9.21
26	0.00	50.00	5.8074	50.00	8.61
27	0.00	50.00	6.2139	50.00	8.05
28	0.00	50.00	6.6488	50.00	7.52
29	0.00	50.00	7.1143	50.00	7.03

Lanjutan 4.19

30	0.00	50.00	7.6123	50.00	6.57
31	0.00	50.00	8.1451	50.00	6.14
32	0.00	50.00	8.7153	139.36	5.74
33	0.00	50.00	9.3253	50.00	5.36
34	0.00	50.00	9.9781	50.00	5.01
35	0.00	50.00	10.6766	50.00	4.68
36	0.00	50.00	11.4239	50.00	4.38
37	0.00	50.00	12.2236	50.00	4.09
38	0.00	50.00	13.0793	50.00	3.82
39	0.00	50.00	13.9948	50.00	3.57
40	0.00	50.00	14.9745	50.00	3.34
41	0.00	50.00	16.0227	50.00	3.12
42	988.25	50.00	17.1443	1,038.25	60.56
43	0.00	50.00	18.3444	50.00	2.73
44	0.00	50.00	19.6285	50.00	2.55
45	0.00	50.00	21.0025	50.00	2.38
46	0.00	50.00	22.4726	50.00	2.22
47	0.00	50.00	24.0457	50.00	2.08
48	0.00	50.00	25.7289	50.00	1.94
49	0.00	50.00	27.5299	50.00	1.82
50	0.00	50.00	29.4570	50.00	1.70
51	0.00	50.00	31.5190	50.00	1.59
52	0.00	50.00	33.7253	50.00	1.48
53	0.00	50.00	36.0861	50.00	1.39
54	0.00	50.00	38.6122	50.00	1.29
55	0.00	50.00	41.3150	50.00	1.21
56	0.00	50.00	44.2071	50.00	1.13
57	0.00	50.00	47.3015	50.00	1.06
58	0.00	50.00	50.6127	50.00	0.99
59	0.00	50.00	54.1555	50.00	0.92
60	0.00	50.00	57.9464	50.00	0.86
61	0.00	50.00	62.0027	50.00	0.81
62	0.00	50.00	66.3429	50.00	0.75
62-th PW	[=NPV(10%,C1:C62)+C0] = 1313.99	[=NPV(10%,CA1:CA62)+CA0] = 613.12	Total		1927.11

d. Diagram *cash flow* konstruksi bantalan beton menerus

Dimana :

P_{C0} (Biaya investasi awal pengadaan bantalan) = Rp 924.18 jt

C_1 (Biaya pelaksanaan konstruksi pada awal tahun I) = Rp. 238.43 jt

C_A (Biaya Siklus perawatan - per-tahun) = Rp. 50 jt

$C_{re-investasi - 1}$ pada n tahun ke-20 = Rp. 1053.07 jt

$C_{re-investasi - 2}$ pada n tahun ke-40 = Rp. 1053.07 jt

$P_{CA}' = Rp. 50 \text{ jt } (P/A, 10\%, 60)$

$$P_{CT} = P_{C0} + P_{CA}' + C_1 + C_{\text{Siklus perawatan -1}} + C_{re-investasi -1} + C_{\text{Siklus perawatan -2}} + C_{re-investasi -2} + C_{\text{Siklus perawatan -3}}$$

$$= Rp. 924.18 \text{ jt} + P_{CA}' (P/F, 10\%, 2) + Rp. 238.43 \text{ jt} (P/F, 10\%, 1) +$$

$$Rp. 1053.07 \text{ jt} (P/F, 10\%, 22) + Rp. 1053.07 \text{ jt} (P/F, 10\%, 42) +$$

$$= Rp. 924.18 \text{ jt} + Rp. 50 \text{ jt} (P/A, 10\%, 60) (P/F, 10\%, 2) +$$

$$Rp. 238.43 \text{ jt} (P/F, 10\%, 1) + Rp. 1053.07 \text{ jt} (P/F, 10\%, 22) +$$

$$Rp. 1053.07 \text{ jt} (P/F, 10\%, 42)$$

$$= Rp. 924.18 \text{ jt} + Rp. 50 \text{ jt} (14,0392) (0,8734) + Rp. 238.43 \text{ jt} (0,9346) +$$

$$Rp. 1053.07 \text{ jt} (0,2257) + Rp. 1053.07 \text{ jt} (0,0583)$$

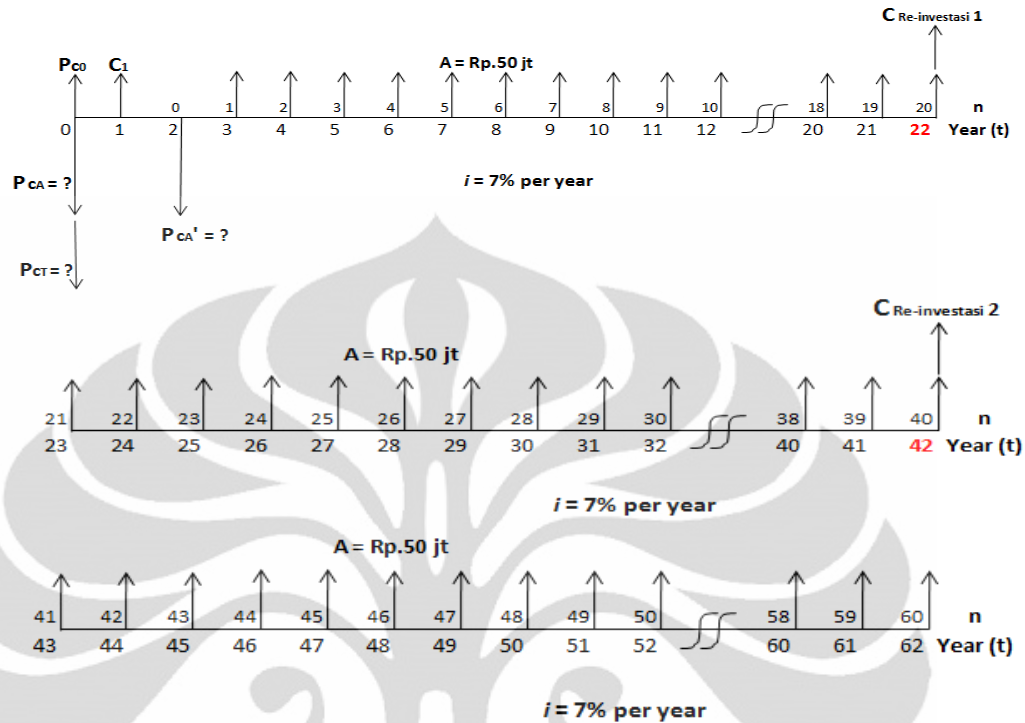
$$= \mathbf{Rp. 2059.25 \text{ jt}}$$

Tabel 4.20 Perhitungan excel *Net Present Value* dari konstruksi bantalan beton menerus (dalam : Jutaan rupiah)

Tahun (t)	Biaya Investasi (C)	Biaya Pemeliharaan Tahunan (CA)	Tingkat Bunga (i=7%) (1+i)^t	Total Cost C + CA (2+3)	NPV (C Total) (5 : 4)
1	2	3	4	5	6
0	924.18	0.00	1.0000	924.18	924.18
1	238.43	0.00	1.0700	238.43	222.83
2	0.00	0.00	1.1449	0.00	0.00
3	0.00	50.00	1.2250	50.00	40.81
4	0.00	50.00	1.3108	50.00	38.14
5	0.00	50.00	1.4026	50.00	35.65
6	0.00	50.00	1.5007	50.00	33.32
7	0.00	50.00	1.6058	50.00	31.14
8	0.00	50.00	1.7182	50.00	29.10
9	0.00	50.00	1.8385	50.00	27.20
10	0.00	50.00	1.9672	50.00	25.42
11	0.00	50.00	2.1049	50.00	23.75
12	0.00	50.00	2.2522	50.00	22.20
13	0.00	50.00	2.4098	50.00	20.75
14	0.00	50.00	2.5785	50.00	19.39
15	0.00	50.00	2.7590	50.00	18.12
16	0.00	50.00	2.9522	50.00	16.94
17	0.00	50.00	3.1588	50.00	15.83
18	0.00	50.00	3.3799	50.00	14.79
19	0.00	50.00	3.6165	50.00	13.83
20	0.00	50.00	3.8697	50.00	12.92
21	0.00	50.00	4.1406	50.00	12.08
22	1053.07	50.00	4.4304	1,103.07	248.98
23	0.00	50.00	4.7405	50.00	10.55
24	0.00	50.00	5.0724	50.00	9.86
25	0.00	50.00	5.4274	50.00	9.21
26	0.00	50.00	5.8074	50.00	8.61
27	0.00	50.00	6.2139	50.00	8.05
28	0.00	50.00	6.6488	50.00	7.52
29	0.00	50.00	7.1143	50.00	7.03

Lanjutan 4.20

30	0.00	50.00	7.6123	50.00	6.57
31	0.00	50.00	8.1451	50.00	6.14
32	0.00	50.00	8.7153	50.00	5.74
33	0.00	50.00	9.3253	50.00	5.36
34	0.00	50.00	9.9781	50.00	5.01
35	0.00	50.00	10.6766	50.00	4.68
36	0.00	50.00	11.4239	50.00	4.38
37	0.00	50.00	12.2236	50.00	4.09
38	0.00	50.00	13.0793	50.00	3.82
39	0.00	50.00	13.9948	50.00	3.57
40	0.00	50.00	14.9745	50.00	3.34
41	0.00	50.00	16.0227	50.00	3.12
42	1053.07	50.00	17.1443	1,103.07	64.34
43	0.00	50.00	18.3444	50.00	2.73
44	0.00	50.00	19.6285	50.00	2.55
45	0.00	50.00	21.0025	50.00	2.38
46	0.00	50.00	22.4726	50.00	2.22
47	0.00	50.00	24.0457	50.00	2.08
48	0.00	50.00	25.7289	50.00	1.94
49	0.00	50.00	27.5299	50.00	1.82
50	0.00	50.00	29.4570	50.00	1.70
51	0.00	50.00	31.5190	50.00	1.59
52	0.00	50.00	33.7253	50.00	1.48
53	0.00	50.00	36.0861	50.00	1.39
54	0.00	50.00	38.6122	50.00	1.29
55	0.00	50.00	41.3150	50.00	1.21
56	0.00	50.00	44.2071	50.00	1.13
57	0.00	50.00	47.3015	50.00	1.06
58	0.00	50.00	50.6127	50.00	0.99
59	0.00	50.00	54.1555	50.00	0.92
60	0.00	50.00	57.9464	50.00	0.86
61	0.00	50.00	62.0027	50.00	0.81
62	0.00	50.00	66.3429	50.00	0.75
62-th PW	[=NPV(10%,C1:C62)+C0] = 1446.13	[=NPV(10%,CA1:CA62)+CA0] = 613.12	Total		2059.25

e. Diagram *cash flow* konstruksi bantalan *slab*

Dimana :

P_{C0} (Biaya investasi awal pengadaan bantalan)	= Rp 1505.80 jt
C_1 (Biaya pelaksanaan konstruksi pada awal tahun I)	= Rp. 180.24 jt
C_A (Biaya Siklus perawatan - per-tahun)	= Rp. 50 jt
$C_{\text{re-investasi -1}}$ pada n tahun ke-20	= Rp. 1568.81 jt
$C_{\text{re-investasi -2}}$ pada n tahun ke-40	= Rp. 1568.81 jt

$$P_{CA}' = \text{Rp. } 50 \text{ jt } (P/A, 10\%, 60)$$

$$\begin{aligned}
 P_{CT} &= P_{C0} + P_{CA}' + C_1 + C_{\text{re-investasi -1}} + C_{\text{re-investasi -2}} \\
 &= \text{Rp. } 1505.80 \text{ jt} + P_{CA}'(P/F, 10\%, 2) + \text{Rp. } 180.24 \text{ jt } (P/F, 10\%, 1) + \\
 &\quad \text{Rp. } 1568.81 \text{ jt } (P/F, 10\%, 22) + \text{Rp. } 1568.81 \text{ jt } (P/F, 10\%, 42) + \\
 &= \text{Rp. } 1505.80 \text{ jt} + \text{Rp. } 50 \text{ jt } (P/A, 10\%, 60) (P/F, 10\%, 2) + \\
 &\quad \text{Rp. } 180.24 \text{ jt } (P/F, 10\%, 1) + \text{Rp. } 1568.81 \text{ jt } (P/F, 10\%, 22) + \\
 &\quad \text{Rp. } 1568.81 \text{ jt } (P/F, 10\%, 42) \\
 &= \text{Rp. } 1505.80 \text{ jt} + \text{Rp. } 50 \text{ jt } (14,0392) (0,8734) + \text{Rp. } 180.24 \text{ jt } (0,9346) + \\
 &\quad \text{Rp. } 1568.81 \text{ jt } (0,2257) + \text{Rp. } 1568.81 \text{ jt } (0,0583) \\
 &= \mathbf{\text{Rp. } 2732.97 \text{ jt}}
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 21 Perhitungan excel *Net Present Value* dari konstruksi bantalan *Slab Track* (dalam : Jutaan rupiah)

Tahun (t)	Biaya Investasi (C)	Biaya Pemeliharaan Tahunan (CA)	Tingkat Bunga (i=7%) (1+i) ^t	Total Cost C + CA (2+3)	NPV (C Total) (5 : 4)
1	2	3	4	5	6
0	1,505.80	0.00	1.0000	1,505.80	1505.80
1	180.24	0.00	1.0700	180.24	168.45
2	0.00	0.00	1.1449	0.00	0.00
3	0.00	50.00	1.2250	50.00	40.81
4	0.00	50.00	1.3108	50.00	38.14
5	0.00	50.00	1.4026	50.00	35.65
6	0.00	50.00	1.5007	50.00	33.32
7	0.00	50.00	1.6058	50.00	31.14
8	0.00	50.00	1.7182	50.00	29.10
9	0.00	50.00	1.8385	50.00	27.20
10	0.00	50.00	1.9672	50.00	25.42
11	0.00	50.00	2.1049	50.00	23.75
12	0.00	50.00	2.2522	50.00	22.20
13	0.00	50.00	2.4098	50.00	20.75
14	0.00	50.00	2.5785	50.00	19.39
15	0.00	50.00	2.7590	50.00	18.12
16	0.00	50.00	2.9522	50.00	16.94
17	0.00	50.00	3.1588	50.00	15.83
18	0.00	50.00	3.3799	50.00	14.79
19	0.00	50.00	3.6165	50.00	13.83
20	0.00	50.00	3.8697	50.00	12.92
21	0.00	50.00	4.1406	50.00	12.08
22	1,568.81	50.00	4.4304	1,618.81	365.39
23	0.00	50.00	4.7405	50.00	10.55
24	0.00	50.00	5.0724	50.00	9.86
25	0.00	50.00	5.4274	50.00	9.21
26	0.00	50.00	5.8074	50.00	8.61
27	0.00	50.00	6.2139	50.00	8.05
28	0.00	50.00	6.6488	50.00	7.52
29	0.00	50.00	7.1143	50.00	7.03

30	0.00	50.00	7.6123	50.00	6.57
31	0.00	50.00	8.1451	50.00	6.14
32	0.00	50.00	8.7153	50.00	5.74
33	0.00	50.00	9.3253	50.00	5.36
34	0.00	50.00	9.9781	50.00	5.01
35	0.00	50.00	10.6766	50.00	4.68
36	0.00	50.00	11.4239	50.00	4.38
37	0.00	50.00	12.2236	50.00	4.09
38	0.00	50.00	13.0793	50.00	3.82
39	0.00	50.00	13.9948	50.00	3.57
40	0.00	50.00	14.9745	50.00	3.34
41	0.00	50.00	16.0227	50.00	3.12
42	1,568.81	50.00	17.1443	1,618.81	94.42
43	0.00	50.00	18.3444	50.00	2.73
44	0.00	50.00	19.6285	50.00	2.55
45	0.00	50.00	21.0025	50.00	2.38
46	0.00	50.00	22.4726	50.00	2.22
47	0.00	50.00	24.0457	50.00	2.08
48	0.00	50.00	25.7289	50.00	1.94
49	0.00	50.00	27.5299	50.00	1.82
50	0.00	50.00	29.4570	50.00	1.70
51	0.00	50.00	31.5190	50.00	1.59
52	0.00	50.00	33.7253	50.00	1.48
53	0.00	50.00	36.0861	50.00	1.39
54	0.00	50.00	38.6122	50.00	1.29
55	0.00	50.00	41.3150	50.00	1.21
56	0.00	50.00	44.2071	50.00	1.13
57	0.00	50.00	47.3015	50.00	1.06
58	0.00	50.00	50.6127	50.00	0.99
59	0.00	50.00	54.1555	50.00	0.92
60	0.00	50.00	57.9464	50.00	0.86
61	0.00	50.00	62.0027	50.00	0.81
62	0.00	50.00	66.3429	50.00	0.75
62-th PW	2119.85	613.12	Total		2732.97

BAB 5
ANALISIS PERBANDINGAN ALTERNATIF TIPE
BANTALAN SERTA BIAYA INVESTASI DAN PEMELIHARAANNYA

5.1 Analisis Tegangan Yang Terjadi Pada Beberapa Alternatif Bentuk Bantalan

Analisis yang dilakukan berikut ini didasarkan pada teori dasar tegangan yang telah dijelaskan pada bab dua sebelumnya, dengan mengikuti standar perhitungan pada peraturan yang berlaku untuk pedoman perencanaan konstruksi jalan rel khususnya pada bagian perencanaan bantalan.

5.1.1 Tipe Bantalan Kayu Melintang

Setelah dilakukan perhitungan berdasarkan Peraturan Dinas Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (PD.10) pada bab empat sebelumnya, diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 5.1.a Perhitungan tegangan dan momen maksimum pada bagian bawah rel

No.	S (cm)	Momen (kg-cm)	Tegangan (σ) (kg/cm ²)
1	50	70647,52	114,01
2	60	84777,03	136,81
3	70	98906,53	159,61
4	80	113036,04	182,41
5	90	127165,54	205,22
6	100	141295,04	228,02
7	110	155424,55	250,82
8	120	169554,05	273,62
9	130	183683,56	296,42
10	140	197813,06	319,22
11	150	211942,57	342,03
12	160	226072,07	364,83

Tabel 5. 1.b Perhitungan tegangan dan momen maksimum pada bagian tengah bantalan

No	S (cm)	Momen (kg-cm)	Tegangan (σ) (kg/cm ²)
1	50	-15628,93	-25,22
2	60	-18754,71	-30,27
3	70	-21880,50	-35,31
4	80	-25006,29	-40,35
5	90	-28132,07	-45,40
6	100	-31257,86	-50,44
7	110	-34383,64	-55,49
8	120	-37509,43	-60,53
9	130	-40635,21	-65,58
10	140	-43761,00	-70,62
11	150	-46886,79	-75,66
12	160	-50012,57	-80,71

Pada tabel diatas dapat diketahui bahwa tegangan yang terjadi pada tipe bantalan kayu melintang pada bagian tengah bantalan dan bawah rel yaitu sebesar = $-25,22 \text{ kg/cm}^2$; $114,01 \text{ kg/cm}^2$. Untuk nilai momen maksimum pada bagian tengah bantalan dan bawah rel yang dihasilkan sebesar = $-15.628,93 \text{ kg-cm}$; $70.647,52 \text{ kg-cm}$. Dari hasil tersebut diketahui bahwa bantalan kayu dapat digunakan pada konstruksi jalan rel pada moda trem, dikarenakan momen maksimum yang terjadi akibat pembebanan baik dari struktur jalan rel maupun dari beban gandar moda tremnya sendiri, masih dalam batas syarat momen maksimum serta tegangan ijin lentur kayu yang di ijinan dalam peraturan perencanaan konstruksi jalan rel yaitu sebesar 80.000 kg-cm dan 125 kg/cm^2 untuk klasifikasi kayu yang digunakan adalah kayu kelas 1 (seperti kayu jati, merbau dan keranji). Namun apabila digunakan klasifikasi kayu kelas 2, dengan momen maksimum yang di ijinan yaitu sebesar 53.000 kg-cm , kayu tersebut tidak mampu menahan momen maksimum yang terjadi pada bagian bawah rel dari bantalan yang sebesar $70.647,52 \text{ kg-cm}$. Jadi dapat disimpulkan bahwa dari tegangan yang terjadi pada tipe bantalan kayu melintang ini, dapat dijadikan sebagai salah satu acuan untuk memilih bantalan kayu yang baik digunakan pada konstruksi jalan rel bagi moda trem.

5.1.2 Tipe Bantalan Baja Melintang

Selanjutnya dilakukan analisis tegangan pada tipe bantalan baja melintang, dengan hasil yang diperoleh dari perhitungan, dapat ditunjukkan pada tabel berikut ini :

Tabel 5. 2.a Perhitungan tegangan dan momen maksimum pada bagian bawah rel

No.	S (cm)	M (Kg-cm)	Tegangan (σ) (kg/cm ²)
1	50	44153,19	1411,54
2	60	52983,83	1593,85
3	70	61814,47	1976,16
4	80	70645,11	2258,47
5	90	79475,75	2540,78
6	100	88306,38	2823,09
7	110	97137,02	3105,40
8	120	105967,66	3387,70
9	130	114798,30	3670,01
10	140	123628,94	3952,32
11	150	132459,58	4234,63
12	160	141290,21	4516,94

Tabel 5. 2.b. Perhitungan tegangan dan momen maksimum pada bagian tengah bantalan

No.	S (cm)	M (Kg-cm)	Tegangan (σ) (kg/cm ²)
1	50	-5198,87	-166,20
2	60	-6238,64	-199,44
3	70	-7278,42	-232,69
4	80	-8318,19	-265,93
5	90	-9357,96	-299,17
6	100	-10397,74	-332,41
7	110	-11437,51	-365,65
8	120	-12477,29	-398,89
9	130	-13517,06	-432,13
10	140	-14556,83	-465,37
11	150	-15596,61	-498,61
12	160	-16636,38	-531,85

Dari tabel 5.2 dapat diketahui tegangan serta momen maksimum yang terjadi baik pada bagian tengah maupun dari sisi bawah rel pada bantalan baja, diperoleh nilai yang masih dalam batas syarat momen maksimum yang di ijin yaitu sebesar 65.000 kg-cm dan batas tegangan ijin baja = 1600 kg/cm². Ketika jarak antar bantalan yang digunakan yaitu antara 50-60 cm, momen dan tegangan yang dihasilkan masih dalam batas ijin, namun jika jarak antar bantalannya diperbesar lagi, maka bantalan baja tidak akan mampu menahan momen maupun tegangan yang terjadi. Jika dilihat dari hasil analisis yang didasarkan pada peraturan, diperoleh nilai momen dan tegangan yang terjadi : pada bagian tengah bantalan = -6238,64 kg-cm ; -232,69 kg/cm², sedangkan pada bagian bawah rel sebesar = 52983,83 kg-cm ; 1593,85 kg/cm². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa bantalan baja masih mampu menahan momen maksimum sesuai dengan batas yang di ijin.

5.1.3 Tipe Bantalan Beton Melintang

Setelah diketahui tegangan serta momen yang terjadi pada tipe bantalan kayu dan baja, berikutnya dilakukan analisis pada tipe bantalan beton, dengan hasil dari perhitungan yang diperoleh dapat ditunjukkan pada tabel berikut ini :

Tabel 5. 3.a. Perhitungan tegangan dan momen pada bagian bawah rel

No.	S (cm)	M (kg-cm)	Tegangan (σ) (kg/cm ²)
1	50	96751,33	66,26
2	60	116101,60	79,51
3	70	135451,86	92,76
4	80	154802,13	106,02
5	90	174152,40	119,27
6	100	193502,66	132,52
7	110	212852,93	145,77
8	120	232203,19	159,02
9	130	251553,46	172,28
10	140	270903,73	185,53
11	150	290253,99	198,78
12	160	309604,26	212,03

Tabel 5. 3.b. Perhitungan tegangan dan momen maksimum pada bagian tengah bantalan

No.	S (cm)	M (Kg-cm)	Tegangan (σ) (kg/cm ²)
1	50	-34617,54	-30,76
2	60	-41541,05	-36,91
3	70	-48464,56	-43,07
4	80	-55388,07	-49,22
5	90	-62311,57	-55,37
6	100	-69235,08	-61,52
7	110	-76158,59	-67,68
8	120	-83082,10	-73,83
9	130	-90005,61	-79,98
10	140	-96929,12	-86,13
11	150	-103852,62	-92,28
12	160	-110776,13	-98,44

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa nilai tegangan serta momen maksimum yang terjadi pada bantalan beton, sesuai yang disyaratkan dalam batasan momen maksimum yang di ijinakan, yaitu dengan nilai : pada bagian tengah bantalan sebesar – 76.500 kg-cm dan pada bagian bawah rel sebesar 150.000 kg-cm. Dimana jarak antar bantalan yang efektif dan masih dapat digunakan untuk bantalan beton yaitu sebesar 70 cm, dengan nilai momen dan tegangan yang terjadi pada bagian tengah bantalan sebesar = -48464,56 kg-cm ; -43,07 kg/cm² sedangkan momen dan tegangan yang terjadi pada bagian bawah rel sebesar = 135451,86 kg-cm ; 92,76 kg/cm².

Setelah mengetahui besarnya nilai tegangan yang ada pada tabel 5.3, khusus untuk bantalan dengan bahan material dari beton ini dilakukan dua analisis tegangan yaitu pada tahap pratekan awal dan tahap pratekan efektif.

Nilai masing-masing tegangan pada tahap pratekan awal diperoleh hasil sebagai berikut :

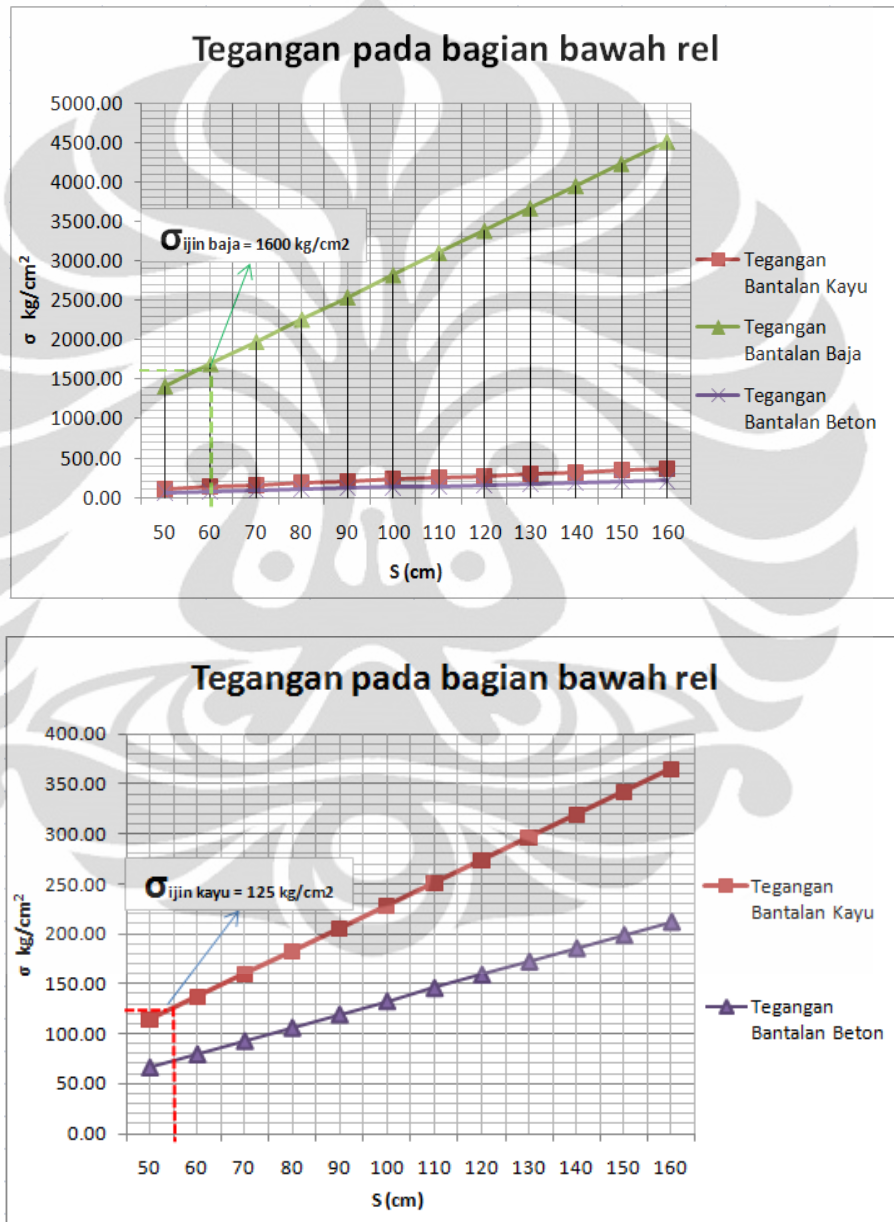
1. Tegangan yang terjadi pada bagian bawah rel : pada sisi atas sebesar $85,84 \text{ kg/cm}^2$, pada sisi bawah sebesar $93,12 \text{ kg/cm}^2$
2. Sedangkan nilai tegangan pada bagian tengah bantalan : pada sisi atas sebesar $63,66 \text{ kg/cm}^2$, pada sisi bawah sebesar $137,7 \text{ kg/cm}^2$.

Sedangkan untuk nilai masing-masing tegangan pada tahap pratekan efektif diperoleh hasil sebagai berikut :

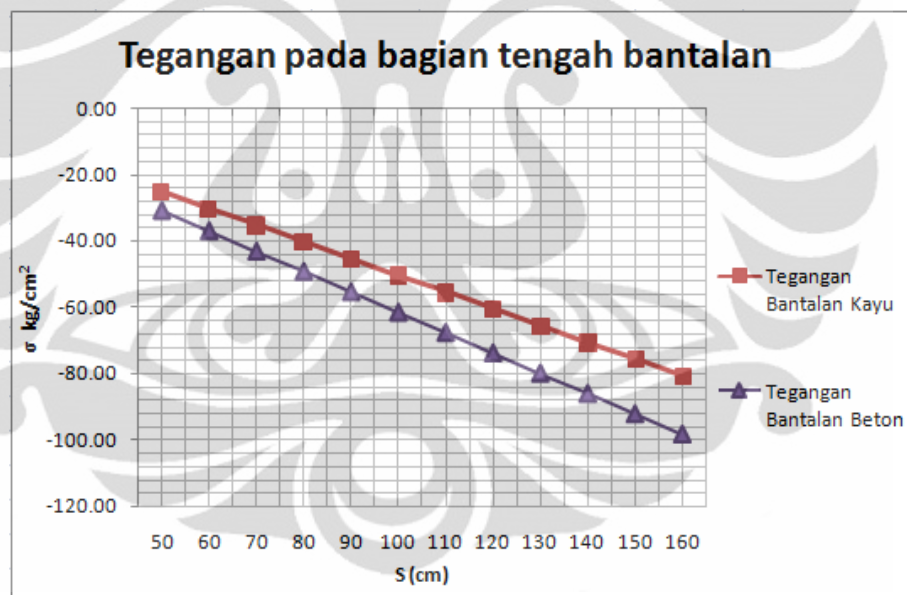
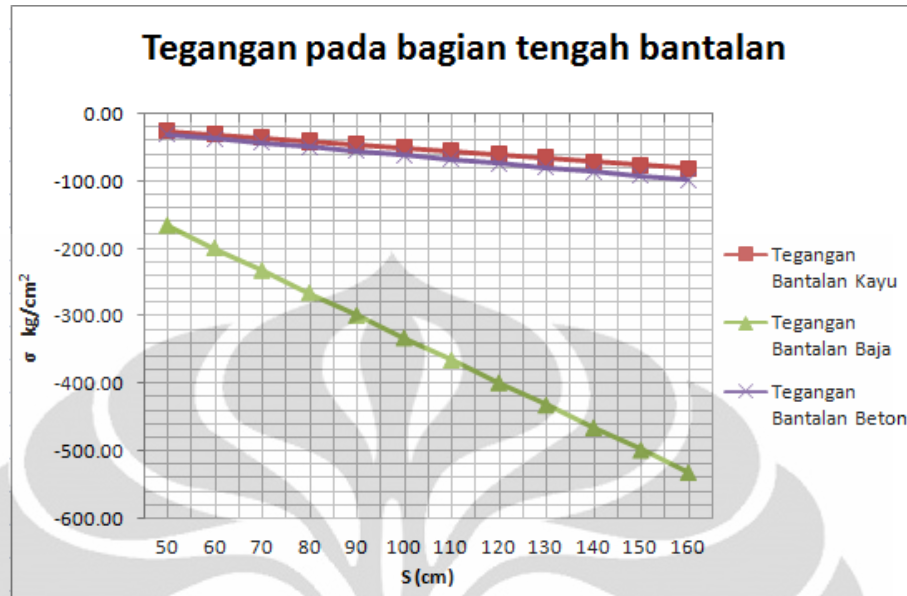
1. Tegangan yang terjadi pada bagian bawah rel : pada sisi atas sebesar $110,92,8 \text{ kg/cm}^2$, pada sisi bawah sebesar $27,24 \text{ kg/cm}^2$
2. Sedangkan nilai tegangan pada bagian tengah bantalan : pada sisi atas sebesar $94,80 \text{ kg/cm}^2$, pada sisi bawah sebesar $66,43 \text{ kg/cm}^2$.

Berdasarkan nilai-nilai dari tegangan tersebut, dapat disimpulkan bahwa tipe bantalan beton melintang ini mampu menahan tegangan dengan tidak melebihi dari batasan syarat tegangan yang di ijinakan pada bagian tengah bantalan maupun bawah rel yaitu sebesar 200 kg/cm^2 .

Setelah diketahui analisis tegangan serta momen maksimum yang terjadi pada beberapa alternatif bentuk tipe bantalan melintang (kayu, baja dan beton), maka dapat dilihat secara keseluruhan, perbandingan tegangan yang ditinjau yaitu yang terjadi pada bagian bawah rel dan pada bagian tengah bantalan, dengan melihat pada grafik berikut ini.



Gambar 5.1 Perbandingan tegangan yang terjadi pada bagian bawah rel



Gambar 5.2 Perbandingan tegangan yang terjadi pada bagian tengah bantalan

Berdasarkan dari grafik-grafik tegangan tersebut dapat diketahui bahwa yang menjadi batasan dalam menentukan tegangan maksimum yang terjadi pada setiap tipe bantalan yaitu diambil pada sisi bagian di bawah rel, sedangkan tegangan yang terjadi untuk bagian di tengah bantalan nilainya lebih kecil dibandingkan dengan sisi bagian bawah rel tersebut.

5.1.4 Tipe Bantalan Beton Menerus

Untuk tipe bantalan beton menerus ini, analisis yang dilakukan untuk mengetahui tegangan-tegangan yang terjadi, yaitu didasarkan pada teori persamaan (2.6) sedangkan untuk memperoleh nilai momen maksimum yang terjadi pada bantalan diperoleh berdasarkan pemodelan dengan bantuan program SAP 2000, adapun hasil analisis dari perhitungannya ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 5.4 Perhitungan tegangan dan momen maksimum pada bantalan beton menerus

	Peninjauan	Satuan	Berdasarkan analisis simulasi dengan SAP 2000
A.	Momen Maksimum		
1	Positif	Kg-cm	627.713
2	Negatif		-598.667
B.	Tegangan	Kg/cm ²	
1	Positif		313,856
2	Negatif	-299,333	

Dari tabel di atas diketahui bahwa nilai tegangan yang terjadi pada bantalan beton menerus adalah sebesar 313,856 kg/cm² dan -299,333 kg/cm², dengan nilai momen maksimum sebesar 627.713 kg-cm dan -598.667 kg-cm. Dari hasil nilai-nilai tersebut jika dibandingkan dengan nilai tegangan dan momen maksimum pada tipe bantalan beton melintang, memang cukup besar perbedaannya, hal ini dikarenakan momen maksimum yang terjadi pada bantalan beton menerus ini ditinjau berdasarkan sepanjang bantalan tersebut dibebani oleh gaya-gaya yang bekerja baik itu beban terbagi rata dari relnya maupun beban gandar dari roda trem. Sedangkan pada bantalan beton melintang, bebannya hanya tertumpu pada kedua sisi bagian relnya saja. Dilihat dari besarnya tegangan dan gaya momen tersebut, pada bantalan beton menerus ini diperkirakan memiliki beberapa kelemahan dalam menunjang dari kokohnya struktur jalan rel yang ditopangnya. Pada bantalan beton menerus ini, gaya-gaya yang terjadi akibat pembebanan dari

jalan relnya sendiri maupun dari beban moda yang berjalan di atasnya, akan cenderung mempengaruhi stabilitas dari kekuatan bantalan tersebut dalam menahan dan mendistribusikan gaya-gaya vertikal rel maupun gaya horizontal pada permukaan tanah, karena bantalan beton menerus ini dibagi menjadi dua sisi bagian yang terpisah yaitu yang terletak di sisi kanan dan kiri dari rel, dimana kestabilan dari satu sisi bantalan ini, tidak berpengaruh terhadap kestabilan dari sisi bantalan di sebelahnya, hal ini dikarenakan struktur dari bantalan tersebut berdiri sendiri-sendiri di atas perletakkannya masing-masing, atau dengan kata lain kedua sisi bagian dari struktur bantalan beton menerus tidak diikat oleh sistem yang dapat menjadikan kedua sisi bagian bantalan tersebut menjadi satu-kesatuan yang kaku. Sehingga bila terjadi *defleksi* akibat pembebanan maka bantalan tersebut tidak dapat merespon reaksi yang terjadi secara bersama-sama. Dari hal tersebut akan menimbulkan beberapa akibat yang dapat membuat kestabilan dari struktur jalan rel menjadi terganggu. Dimana, dapat dimungkinkan jarak sepurnya akan terjadi pergeseran, dan hal tersebut akan berdampak terjadinya kecelakaan bagi moda kereta api, dimana ketika roda kereta yang berjalan di atas jalan rel tersebut akan keluar dari jalur rel atau yang biasa dikenal dengan istilah terjadinya kereta "anjlok". Untuk menghindari terjadinya perubahan jarak antar sepur pada jalan rel yang menggunakan bantalan beton menerus ini, maka diperlukan suatu perkuatan dengan menambahkan batang penghubung yang dapat menjadikan kedua bagian dari bantalan beton menerus ini menjadi satu bagian yang tidak terpisahkan sehingga dapat dikatakan sebagai suatu sistem yang *rigid body*, dimana ketika bantalan tersebut menerima gaya-gaya yang terjadi pada jalan rel, maka bantalan tersebut akan memberikan reaksi secara kesatuan.

5.1.5 Tipe Bantalan *Slab Track*

Sedangkan untuk tipe bantalan *slab track*, dari hasil perhitungan secara kekuatan strukturnya tipe bantalan ini, masih menjamin kelayakan dalam menerima beban dari konstruksi jalan rel yang berjalan di atasnya. Pada model ini digambarkan rel sebagai balok elastis yang bertumpuan pada landasan slab. Dimana pada tipe bantalan slab ini merupakan tipe bantalan yang tidak mempergunakan lapisan balas yang pada umumnya digunakan sebagai pondasi untuk menyalurkan beban yang bekerja dari permukaan struktur jalan rel di atasnya, hingga terdistribusi ke tanah dasar yang ada dibawahnya. Jika dilihat dari penggunaannya jalur slab ini merupakan jalur yang menggunakan perkuatan material yang stabil seperti konstruksi pelat beton bertulang yang biasa digunakan pada perkerasan jalan bebas hambatan. Demikian juga, pada jalur slab ini tekanan atau tegangan yang terjadi pada daerah dibawah slab jauh lebih kecil dibandingkan dengan bantalan yang menggunakan jalur balas. Sehingga untuk kondisi daya dukung tanah dasar yang beragam, maka penggunaan jalur slab ini sangat membantu dalam memberikan dukungan terhadap kekokohan struktur jalan rel yang ada di atasnya, agar kondisi stabilitasnya tetap terjaga. Untuk mengetahui besarnya tegangan yang terjadi pada bantalan *slab* ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 5.5 Perhitungan tegangan pada bantalan *slab track*

	Peninjauan	Satuan	Berdasarkan analisis simulasi dengan SAP 2000
A.	Momen	Kg-cm	
1	Pada daerah di bawah rel		540.944,8
2	Pada daerah di tengah <i>slab</i>		-245.906
B.	Tegangan	Kg/cm ²	
1	Pada daerah di bawah rel		40,571
2	Pada daerah di tengah <i>slab</i>		-18,443

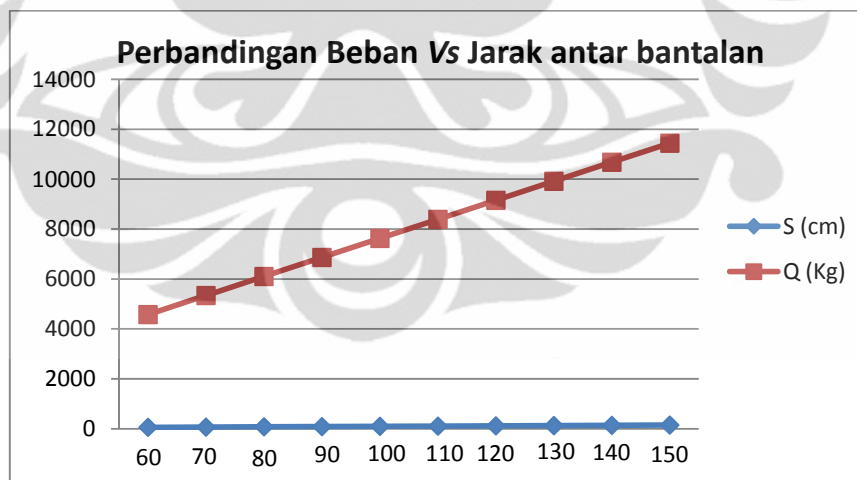
Dari tabel di atas dapat diketahui tegangan yang terjadi pada bantalan jenis slab akibat pengaruh momen maksimum pada daerah di bawah rel sebesar = 40,571 kg/cm² dan pada daerah di tengah *slab* sebesar = - 18,443 kg/cm². Untuk identifikasi tegangan akibat momen maksimum positif terjadi pada bagian sisi ujung perletakan, diambil dari sumbu vertikal rel sisi luar, sedangkan untuk

tegangan akibat momen maksimum negatif, terjadi pada daerah di bagian bawah rel. Dari nilai-nilai tegangan tersebut, dapat diketahui bahwa tegangan yang terjadi pada permukaan bantalan slab akibat transfer beban yang diperoleh dari jalan rel memiliki nilai yang tidak terlalu besar, hal ini dikarenakan gaya berat yang diberikan ke bidang bantalan slab diimbangi dengan luas permukaannya, sehingga hal ini juga menguntungkan dalam hal pendistribusian beban ke lapisan bagian bawahnya menjadi lebih kecil. Untuk mengetahui lebih jelasnya dari gaya momen maksimum yang terjadi pada bantalan slab ini dapat dilihat pada lampiran 4.05 A.

5.2 Analisis Jarak Antar Bantalan

Berikut ini dilakukan analisis akibat pengaruh jarak antar bantalan terhadap kekuatan dari beberapa tipe bantalan yang digunakan dalam memikul beban-beban yang bekerja pada struktur jalan rel pada moda trem.

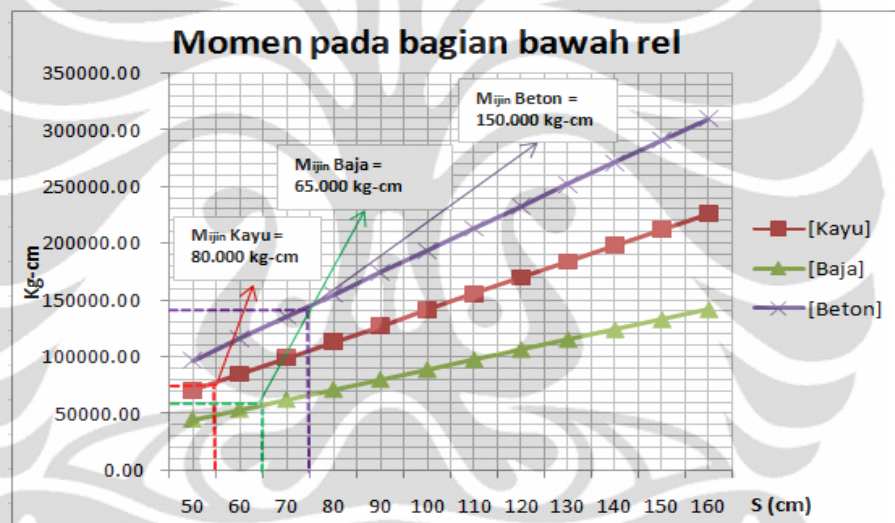
Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya pada bab empat, dapat dilihat perbandingan akibat beban dinamis dari moda trem yang harus dipikul oleh struktur bantalan berdasarkan variasi jarak antar bantalan yang digunakan yaitu digambarkan pada grafik dibawah ini.



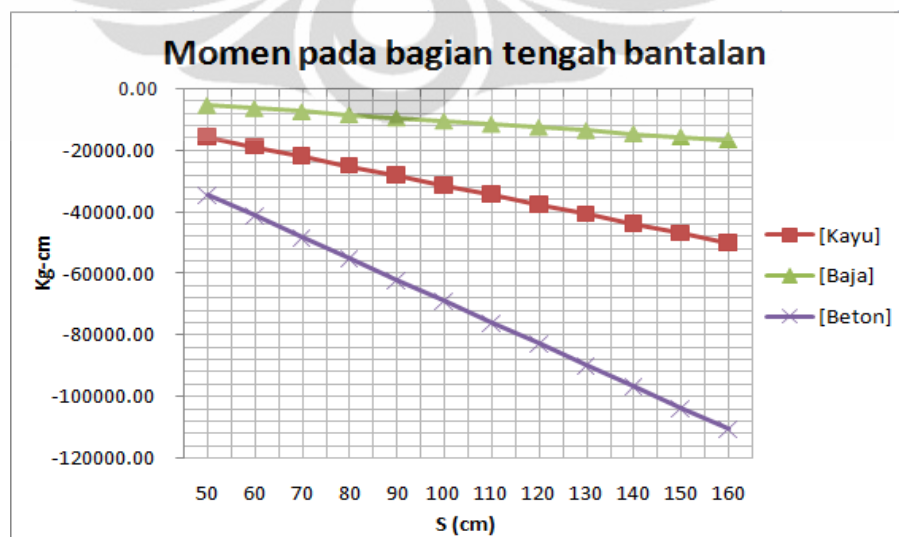
Gambar 5.3 Perbandingan beban terhadap variasi jarak antar bantalan

Pada grafik diatas dapat terlihat peningkatan besarnya beban ketika jarak antar bantalan tersebut diperbesar. Oleh karena itu semakin besar jarak antar bantalan yang digunakan, maka tentunya beban yang harus ditahan oleh struktur dari bantalan juga cukup besar.

Asumsi lain dari suatu hal yang berpengaruh akibat dari penentuan jarak antar bantalan yang digunakan terhadap beberapa tipe bantalan khususnya untuk tipe bantalan melintang yaitu besarnya momen maksimum yang bekerja pada struktur bantalan. Untuk itu dilakukan analisis perbandingan batas momen maksimum yang masih diperbolehkan berdasarkan peraturan dengan penentuan jarak antar bantalan yang tepat dan masih mampu memberikan dukungan terhadap gaya-gaya momen yang bekerja. Perbandingan momen yang terjadi baik pada bagian bawah rel maupun di tengah bantalan, akibat pengaruh variasi jarak antar bantalan yang digunakan oleh beberapa tipe bantalan melintang, dapat dilihat pada grafik berikut ini.



Gambar 5.4 Perbandingan momen pada bagian bawah rel



Gambar 5.5 Perbandingan momen pada bagian tengah bantalan

Pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa jarak maksimum antar bantalan yang masih dapat diambil pada beberapa alternatif tipe bantalan melintang ini untuk menahan momen maksimum yang di iijinkan yaitu untuk bantalan kayu = 50 cm, bantalan baja = 60 cm, dan bantalan beton = 70 cm.

5.3 Analisis Umur Rencana atau Ketahanan dan Pemeliharaan Bantalan

Umur layan dari suatu bantalan memiliki kontribusi terhadap biaya pemeliharaan yang perlu dikeluarkan selama masa layannya serta terhadap stabilitas dan tingkat keamanan dari kesatuan struktur jalan rel. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi umur layan dari suatu bantalan yaitu :

a. Akibat pengaruh alamiah

Beberapa tipe bantalan yang berbahan material kayu mudah sekali lapuk jika tidak diberikan penanganan khusus dalam hal pengawetan kayu sebelum dipasang pada jalan rel maupun pemeliharannya setelah terpasang. Selain itu pengaruh dari iklim juga dapat mengakibatkan proses kimiawi yang dapat merusak ketahanan dari bantalan kayu.

Sedangkan pada bantalan berbahan material dari baja pun sama memiliki faktor alamiah yang dapat mempengaruhi ketahanannya dalam menyalurkan beban dari struktur jalan rel. Pada umumnya Umur layanan bantalan baja dapat mencapai 30, 40 tahun (Mundrey J.S ,2000) jika pada keadaan balas yang baik. Pengaruh sifat korosi akibat perubahan iklim pada umumnya juga dapat mempengaruhi umur dari ketahanan bantalan baja. Untuk itu diperlukan pencegahan korosi pada bantalan baja dengan metode yang baik.

Pengaruh faktor alamiah pada bantalan beton umumnya dapat diminimalkan pada saat pengendalian mutu bahan yang direncanakan sebelumnya, sehingga bantalan beton pun memiliki umur layan yang dapat direncanakan.

b. Layanan dari penggunaan jalan rel

Beban dari moda trem yang berjalan di atas struktur jalan rel mendistribusikan sebagian besar bebannya melalui roda gandarnya yang kemudian akan disalurkan melalui struktur jalan rel yang salah satunya adalah bantalan. Dari besarnya beban serta banyaknya frekuensi lintasan yang intensif pada jalan rel tersebut akan mempengaruhi tingkat kelelahan dari setiap material penyusun yang ada pada struktur jalan rel. Tidak terkecuali pada bantalan yang

berfungsi dalam menjamin kokohnya kedudukan sepur di dalam balas serta menjamin kedudukan yang tetap bagi rel-rel, agar lebar sepur tetap. Dari besarnya tekanan yang terjadi pada bantalan yang mempergunakan balas sebagai tumpuan perletakkannya akan berpengaruh terhadap kekuatan dari struktur jalan rel, khususnya jika dipasang pada jalan rel untuk moda trem yang permukaan atasnya terlapisi oleh perkerasan jalan raya. Dimana beban yang bergerak diatas jalan rel dengan tumpuan balas yang bersifat elastis, akan menimbulkan getaran yang terjadi dari hari ke hari secara berulang terus-menerus dan dapat menyebabkan perubahan-perubahan pada susunan dan kedudukan konstruksi yang menahannya. Setiap kali beban bergerak melaluinya, terjadilah perubahan yang semakin lama semakin membesar dan tentunya hal tersebut tidak hanya merubah susunan dan kedudukan dari struktur jalan relnya saja, tetapi juga akan merubah kekuatan struktur dari lapisan perkerasan jalan raya yang ada diatasnya. Hal tersebut dikarenakan daya angkut lintas yang terjadi setiap tahunnya semakin meningkat seiring dengan bertambahnya beban yang diangkut dari moda yang berjalan diatas jalan relnya sendiri maupun dari moda darat lainnya yang saling berbagi jalur. Untuk itu diperlukan program perencanaan pemeliharaan secara berkala dalam jangka waktu yang direncanakan, agar struktur dari bantalan tersebut dapat mendukung kokohnya jalan rel serta jalan raya yang ada diatasnya dalam jangka waktu yang lebih lama.

Sedangkan berdasarkan referensi dari Peraturan Dinas No.10, Perencanaan Konstruksi Jalan Rel untuk klasifikasi kelas jalan rel ke-V adalah sebagai berikut :
Tabel 5.6 Umur rencana dan siklus perawatan tahunan pada kelas jalan rel khusus moda trem.

Tahun	Beton	Kayu	Baja
Umur Rencana/Ketahanan	*20-30	10-15 (untuk kayu tahun, merbau)	30-40
		16-20 (untuk kayu jati)	
Siklus Perawatan	10	8	*15

Sumber : Telah diolah kembali berdasarkan buku pedoman Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10,1986), Ket : * menurut asumsi dari perkiraan yang ada

5.4 Analisis Biaya Konstruksi Bantalan Dengan Metode Net Present Value

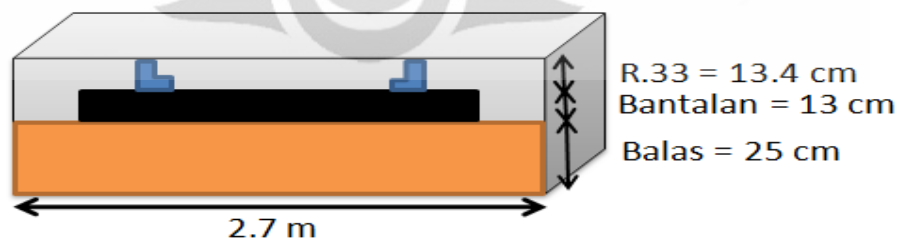
Sebelum menganalisis estimasi biaya yang diperlukan dalam perencanaan konstruksi dari bantalan ini, terlebih dahulu dilakukan identifikasi pekerjaan apa saja yang diperlukan dalam pelaksanaan berdasarkan biaya dan volume dari pekerjaan tersebut, yang bertujuan untuk mengetahui jumlah total dari biaya investasi yang diperlukan dalam menjalankan proyek konstruksi dari bantalan.

Adapun biaya yang diperlukan dalam proyek konstruksi ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu :

1. Biaya pengadaan dari kelengkapan bahan material yang digunakan termasuk bantalan dan material penyusun lapisan balas. Untuk besarnya jumlah bantalan yang dipergunakan dalam satuan km-panjang diasumsikan berdasarkan batas toleransi dari jarak antar bantalan yang masih diperbolehkan dalam hal ketahanan, dari kekuatan setiap struktur bahan material yang dipergunakan pada bantalan.

2. Biaya pelaksanaan konstruksi yang meliputi biaya atas beberapa pekerjaan dalam pemasangan bantalan pada jalan rel, diantaranya yaitu
 - a. Biaya pekerjaan galian tanah dan pemadatan tanah

Pada pekerjaan ini diasumsikan volume pekerjaan yang dilakukan sepanjang 1 km dari jalan rel yang akan dibangun. Misalnya, untuk perhitungan besarnya volume pekerjaan galian tanah pada pemasangan bantalan kayu dapat dilihat pada ilustrasi gambar di bawah ini.

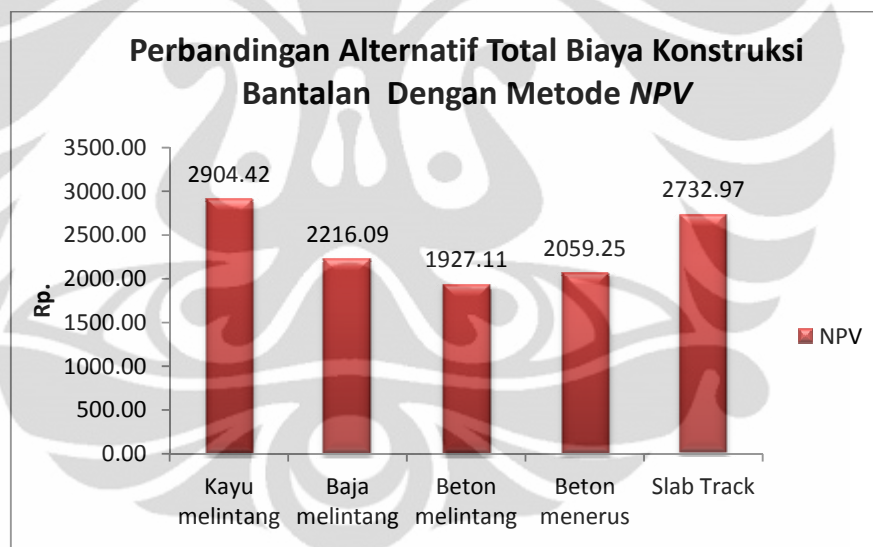


Gambar 5.6 Potongan melintang struktur jalan rel pada moda trem

Dimana dari hasil perhitungan diperoleh volume tanah galian = $1387,8 \text{ m}^3$. Serta luas tanah yang dipadatkan = 2700 m^2 . Untuk besarnya volume pekerjaan galian tanah yang diperlukan dari pekerjaan pemasangan tipe bantalan lainnya dapat dilihat pada lampiran 4.06.B.

- b. Biaya pemasangan bantalan di lokasi
 - c. Biaya untuk menghampar atau memasukkan lapisan balas dengan material batu kricak (untuk biaya ini hanya dimasukkan pada tipe bantalan melintang dan bantalan menerus, sedangkan untuk tipe bantalan *slab track* diasumsikan tidak menggunakan balas sebagai perletakkannya dan sebagai gantinya dibangun lantai kerja dengan perkuatan stabilisasi beton mutu rendah).
3. Biaya pemeliharaan secara berkala yang direncanakan dalam jangka periode waktu yang ditentukan serta biaya re-investasi dari beberapa tipe bantalan, berdasarkan umur layanan yang berbeda-beda untuk setiap bahan material yang digunakan.

Hasil perhitungan estimasi biaya investasi pada beberapa alternatif bentuk bantalan dapat dilihat pada grafik batang berikut ini.



Gambar 5.7 Grafik perbandingan estimasi alternatif total biaya konstruksi bantalan dengan metode *NPV*

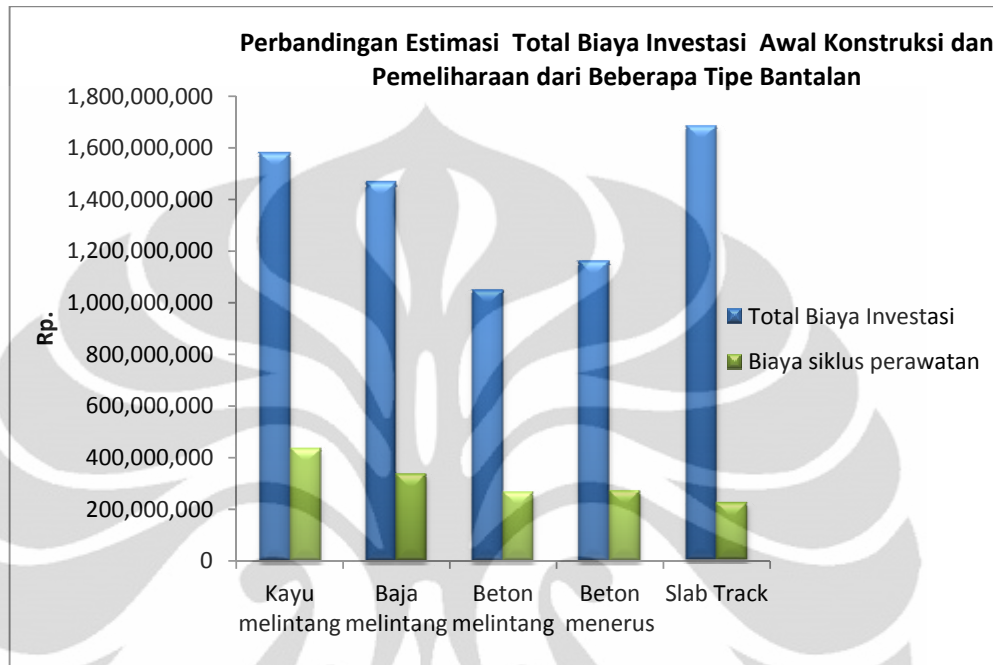
Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa biaya investasi yang diperlukan dalam proyek konstruksi pemasangan dari beberapa alternatif bentuk bantalan yang membutuhkan biaya yang paling minimal adalah tipe bantalan beton melintang dan tipe bantalan beton menerus dengan nilai *NPV* masing-masing sebesar Rp. 1927.11 jt dan 2059.25 jt. Dilihat dari total nilai *NPV* dari konstruksi antara bantalan beton melintang dengan bantalan beton menerus, perbedaannya tidak terlalu jauh. Hal ini dimungkinkan karena, harga dari setiap pekerjaan yang

dialokasikan untuk kedua konstruksi bantalan tersebut diasumsikan ada beberapa nilai pekerjaan yang relatif sama ataupun juga dapat disebabkan oleh harga bahan antara bantalan beton melintang memiliki nilai yang lebih minim dibandingkan dengan nilai bahan untuk bantalan beton menerus, namun dilihat dari kebutuhan jumlah dari kedua bantalan tersebut jauh berbeda pula. Dimisalkan untuk penggunaan bantalan beton melintang dalam satuan panjang-km dari jalan rel yang akan dibangun membutuhkan sekitar ± 1429 batang, sedangkan untuk bantalan beton menerus hanya membutuhkan ± 334 blok/segmen dalam satuan panjang per-meter sepur, lebih spesifiknya yaitu sekitar per-enam meter sepur. Oleh karena itu, nilai investasi antara kedua tipe bantalan tersebut terlihat tidak jauh berbeda.

Dari perbandingan biaya alternatif ini diharapkan dapat dijadikan dasar untuk mengetahui nilai bersih dari total investasi sekarang (*Net Present Value*) pada proses konstruksi yang berjalan selama periode waktu tertentu. Terkait dengan proses pengambilan keputusan mengenai kelayakan biaya konstruksi dari beberapa alternatif bantalan ini, diperlukan suatu analisis yang dapat mendukung dalam berbagai segi yaitu ditinjau dari segi kelebihan maupun kekurangan yang terdapat pada setiap alternatif bantalan tersebut, selain itu juga dilihat dari kelayakan secara ekonomi, dimana dari beberapa alternatif tersebut dapat menunjang tercapainya efisiensi dalam meminimalisasi biaya yang diperlukan selama masa layanan dari bantalan tersebut dapat berfungsi dengan baik.

Dari hasil perhitungan biaya investasi dan pemeliharaan beberapa alternatif tipe bantalan yang direncanakan, maka tipe bantalan yang layak dari segi efisiensi biaya ekonomi yang dikeluarkan maupun dari segi kekuatan strukturnya bila digunakan pada konstruksi jalan rel bagi moda trem yaitu dapat dipilih dengan menggunakan tipe bantalan beton melintang. Adapun selain dari hal tersebut, manfaat yang didapatkan pada tipe bantalan ini yakni dari unsur pemilihan jenis bahan material yang digunakan yaitu beton, dimana beton merupakan bahan material yang kekuatan maupun umur rencana ketahanannya dapat direncanakan sesuai yang dibutuhkan sesuai dengan teknologi penelitian dari pengendalian mutu bahan yang terus berkembang sampai saat ini, selain itu juga material yang

diperlukan untuk mendesain bantalan beton ini, mudah untuk didapat dari berbagai sumber daya alam yang dapat terbaharui.



Gambar 5.8 Grafik perbandingan estimasi biaya investasi awal konstruksi dari beberapa tipe bantalan

Pada grafik diatas dapat diketahui perbandingan total biaya investasi awal serta pemeliharaan dari setiap alternatif tipe bantalan, pada nilai total biaya investasi awal tersebut didasarkan atas perhitungan biaya diantaranya biaya untuk pengadaan bahan dan material, serta biaya untuk pelaksanaan pekerjaan konstruksi pada awal tahun pertama. Sedangkan untuk biaya pemeliharaan didasarkan atas perhitungan biaya untuk pemeliharaan/perawatan bantalan yang direncanakan untuk jangka waktu tertentu. Misalnya untuk pemeliharaan bantalan kayu, diperkirakan siklus perawatan berulangnya sekitar 8 tahun, sedangkan untuk bantalan beton sekitar 10 tahun. Pengambilan umur dari siklus perawatan tersebut tentunya didasari oleh teori yang ada pada perencanaan konstruksi jalan rel untuk kereta api pada umumnya, dimana pada kondisi normal dari jalan rel tersebut dapat berfungsi dengan baik. Sebagai contoh, untuk tipe bantalan jalur slab, dari segi biaya investasi awal konstruksi untuk pembuatan jalur slab ini berdasarkan perhitungan, memang memakan biaya yang cukup besar, dibandingkan tipe

bantalan lainnya yang menggunakan bahan material dari beton. Biaya yang dibutuhkan untuk investasi awal dari konstruksi jalur *slab* ini diperkirakan sekitar $\pm 1,4$ kali dari biaya untuk tipe bantalan beton melintang yang menggunakan jalur balas, hal ini dapat dilihat pada grafik perbandingan pada gambar grafik (5.8).

Namun suatu hal yang diharapkan, pada biaya pemeliharaan/perawatan untuk mempertahankan kekokohan jalan rel yang menggunakan jalur slab dapat diperkirakan akan jauh lebih rendah dibandingkan dengan biaya pemeliharaan yang menggunakan jalur balas. Diambil contoh berdasarkan referensi penggunaan jalur slab untuk kereta *shinkansen* di Jepang, diperkirakan biaya pemeliharaan jalan rel yang diperlukan sekitar 18% - 30% lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan jalur balas. Pernyataan tersebut dapat dibenarkan, dari perhitungan hasil perbandingan biaya pemeliharaan untuk jalur slab ini diperoleh kira-kira sekitar 18,11 % jauh lebih rendah dibandingkan dengan bantalan beton yang menggunakan jalur balas. Setelah mengidentifikasi dari hal-hal yang telah dijelaskan tersebut, memang bantalan yang menggunakan jalur *slab* ini dapat dikatakan membutuhkan biaya investasi awal yang relatif cukup besar, namun dilihat dari segi biaya pemeliharannya mungkin masih dapat dijadikan bahan pertimbangan lebih lanjut untuk memilih tipe bantalan jalur slab ini jika dipergunakan pada jalan rel untuk moda trem.

Lain halnya dengan tipe bantalan kayu maupun baja, yang pada umumnya kekuatan maupun umur rencananya berdasarkan pengaruh sifat alamiahnya maupun karakteristik dari properti material yang ada pada bahan tersebut. Misalnya kedua bahan material tersebut hanya mampu memiliki kekuatan untuk memikul sejumlah beban kira-kira sekitar ± 4.113 kg untuk kayu jati, ± 11.984 kg untuk baja dengan tebal 7 mm, dan kemungkinan direncanakannya untuk memikul beban yang jauh lebih besar lagi ialah sangat sulit. Jika ditinjau dari masa umur layanan yang dapat diberikan oleh bantalan kayu ini sekitar ± 15 tahun, maka dalam kurun waktu rencana 60 tahun, diperlukan biaya re-investasi yang terbilang cukup besar dibandingkan tipe bantalan lainnya yaitu sebanyak tiga kali untuk mengganti seluruh bantalan yang telah mencapai batas umur layannya. Dari segi lain, yang dapat dilihat dari kurang menguntungkannya, apabila bahan material kayu bila dipergunakan sebagai bantalan yaitu dimana

kayu merupakan bahan material yang saat ini sangat sulit untuk diperoleh, karena sumber daya alamnya yang terbatas sehingga kayu tentunya akan memiliki nilai (*value*) yang jauh lebih menguntungkan jika dipergunakan sebagai bahan baku untuk membuat *meubel* ataupun *furniture* dibandingkan untuk bantalan.

Sedangkan untuk bantalan yang mempergunakan bahan material dari baja, memiliki beberapa kelemahan dan kurang menguntungkan, hal ini dapat dilihat dari pengadaan untuk material baja sangatlah sulit diperoleh, karena pabrik-pabrik yang dapat memproduksi material dari baja itu sendiri masih sangat sedikit. Selain itu, bahan untuk membuat material baja ini diperoleh dari sumber daya alam yang terbatas juga, sehingga biaya untuk memproduksi baja sangatlah mahal. Sedangkan kelemahan lain dari bantalan baja jika dipasang pada jalan rel, yaitu tingkat kenyamanan dari pengguna moda yang berjalan di atas jalan rel sangatlah rendah, dikarenakan sifat ke-elastisan dari bantalan baja yang kurang mampu dalam meredam getaran yang terjadi akibat gesekan antara roda kereta dengan rel, hal ini dapat menyebabkan ketika moda trem berjalan di atasnya, akan merasakan suatu getaran yang cukup membuat tidak nyaman. Jika ditinjau dari masa umur layanan yang dapat diberikan oleh bantalan kayu ini sekitar ± 30 tahun, maka dalam kurun waktu rencana 60 tahun, diperlukan biaya re-investasi hanya satu kali saja untuk mengganti keseluruhan bantalan yang telah mencapai batas umur layannya.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diperoleh secara keseluruhan dari hasil analisis penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut :

- Dalam rangka perencanaan pembangunan konstruksi jalan rel pada moda trem , pada umumnya membutuhkan alokasi sumber daya yang terbilang cukup besar, baik itu bahan material maupun biaya untuk pelaksanaan konstruksinya dalam persatuan panjang lintasan yang akan dibangun, untuk itu perlu direncanakan suatu langkah yang dapat mensiasati agar pengeluaran biaya yang diperlukan tersebut dapat sedemikian mungkin di minimalisasi, sehingga diperoleh ke-efisienan dalam segi pemberdayaan sumber daya material maupun biaya untuk konstruksi pembangunannya.
- Salah satu bagian dari konstruksi yang menunjang dalam menyusun jalan rel pada moda trem secara keseluruhan serta yang paling banyak membutuhkan anggaran biaya yang relatif besar yaitu tidak terkecuali pada banyaknya jumlah penggunaan bantalan dalam persatuan panjang dari ruas jalur rel tersebut.
- Berdasarkan perbandingan kekuatan/ketahanan dari kelima alternatif bentuk bantalan yang direncanakan, yaitu :
 - Pada tipe bantalan kayu melintang memiliki kekuatan dan umur ketahanan yang terbatas, sehingga diperlukan pemakaian volume bantalan yang relatif cukup besar, dalam masa periode jangka waktu umur ketahanannya sekitar $\pm 10-15$ tahun.
 - Pada tipe bantalan baja melintang pun memiliki kekuatan yang terbatas, sehingga memerlukan pemakaian volume bantalan yang relatif cukup besar dalam masa periode jangka waktu umur ketahanannya sekitar $\pm 30-40$ tahun.
 - Pada tipe bantalan yang menggunakan bahan material dari beton seperti bantalan beton melintang, bantalan beton menerus, dan bantalan *slab track*, pada umumnya memiliki karakteristik kekuatan

yang dapat disesuaikan berdasarkan yang direncanakan, melalui teknologi pengendalian mutu bahan yang telah berkembang sampai saat ini, sehingga dari hal tersebut dapat diminimalisasinya penggunaan volume bantalan yang akan dibangun pada suatu ruas dari jalur rel. Pada umumnya umur ketahanan dari tipe bantalan yang menggunakan bahan bermaterial dari beton ini dapat menunjang masa layanan dari konstruksi jalan rel selama \pm 20-30 tahun.

- Berdasarkan perbandingan biaya investasi dan pemeliharaan yang perlu dialokasikan pada pembangunan konstruksi dari beberapa alternatif bantalan berdasarkan total nilai biaya waktu sekarang (*Net Present Value*), diantaranya sebagai berikut :
 - Tipe bantalan kayu melintang membutuhkan biaya Rp. 2.904.420.000
 - Tipe bantalan baja melintang membutuhkan biaya Rp. 2.216.090.000
 - Tipe bantalan beton melintang membutuhkan biaya Rp. 1.927.110.000
 - Tipe bantalan beton menerus membutuhkan biaya Rp. 2.059.250.000
 - Tipe bantalan *slab track* membutuhkan biaya Rp. 2.732.970.000
- Kesimpulan akhir yang dapat diperoleh dari tulisan ini adalah suatu perencanaan dalam rangka untuk memilih alternatif bantalan yang paling sesuai diperuntukkan untuk konstruksi jalan rel pada moda trem baik dari segi kekuatan dan ketahanan yang dimiliki oleh tipe bantalan tersebut dalam menunjang keberlangsungan masa layanan dari jalan rel secara menyeluruh maupun dari segi pembiayaan yang dibutuhkan untuk pembangunannya, maka setelah dianalisis berdasarkan komparasi dari kelima alternatif bantalan yang direncanakan, tipe bantalan yang paling sesuai dan efisien jika digunakan pada konstruksi jalan rel bagi moda trem, yaitu dapat dipilih dengan menggunakan tipe bantalan beton melintang.

6.2 Saran

Saran yang dirasa perlu dalam pembahasan lebih lanjut, antara lain:

- Dikarenakan oleh terbatasnya sumber data atau informasi yang diperoleh dalam perencanaan bantalan ini, maka dalam perhitungan kekuatan yang di analisis hanyalah sebatas perhitungan yang sederhana. Oleh Karena itu untuk memperdalam lebih jauh penelitian selajutnya yang saling berhubungan, sebaiknya diupayakan untuk lebih memfokuskan pada segi kekuatan pada setiap bahan material yang digunakan pada beberapa alternatif bentuk bantalan yang akan direncanakan. Sehingga diperoleh ketelitian dalam mengetahui karakteristik kekuatan dari masing-masing tipe bantalan tersebut.
- Untuk memperkuat landasan literatur mengenai besarnya biaya konstruksi yang menyangkut penggunaan bahan material, alat, dan upah tenaga kerja terhadap jumlah biaya pekerjaan secara keseluruhan pada biaya investasi dan pemeliharaan dari suatu konstruksi bantalan, maka untuk penelitian selanjutnya perlu diketahui jumlah nilai koefisien analisa untuk setiap bahan material, alat serta tenaga kerja yang dibutuhkan, untuk tiap-tiap jenis pekerjaan yang ada.

DAFTAR REFERENSI

- Iman Subarkah. (1981). *Jalan Kereta Api*. Bandung: Idea Dharma Bandung,
- Peraturan Dinas No.10. (1986). *Perencanaan Konstruksi Jalan Rel*. Bandung: Perusahaan Jawatan Kereta Api.
- Peraturan Dinas No.10. (1986). *Penjelasan Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel*. Bandung: Perusahaan Jawatan Kereta Api,
- Tri Utomo, S.H. (2006). *Jalan Rel*. Yogyakarta : Beta Offset Perum FT-UGM,.
- Alamsyah, A.A. (2003). *Rekayasa Jalan Rel* (Edisi pertama). Malang: Bayumedia Publishing.
- Hasan Basri. (2002). *Album Bangunan Atas*. Bekasi: Balai Pelatihan Teknik Perkeretaapian.
- K.H. Felix Yap. (1999). *Konstruksi Kayu*. Bandung: CV. Trimitra Mandiri
- Proposal *Tramway UI*. “*Tramway Kampus UI Depok Sebagai Pilot Project Penerapan Tram di Indonesia*”
- William, W. Hay. (1982). *Railroad Engineering* (2nd ed). (chapter 22-23, pp. 436-482). New York : Jhon Wiley & Sons Inc.
- Mundrey, J.S. (2000). *Railway Track Engineering* (3rd ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Bilow, David N. and Randich, Gene M. (2002). Portland Cement Association. “*Slab Track For The Next 100 Years*”. Skokie, IL.
- Leland B. and Anthony T. (2002). *Engineering Economy* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- J. William Petty. (1996). *Basic Financial Management*.
- Khalid HM, Muhammad. (2008). *Studi Analisa Harga Satuan Pekerjaan Pada Konstruksi Gedung Dengan Metode BOW, SNI Dan Penawaran Kontraktor*. Yogyakarta: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
- Bachtiar Ibrahim. (1993). *Analisa Harga Satuan Bahan dan Upah*.
- Dani Kurniawan. (2004). *Analisa Harga Satuan Bahan dan Upah*.

Rail Road Tie. Wikipedia_the free encyclopedia. Ed.16 November 2008.

http://www.wikipedia.com/railroad_tie.html

Light Rail. Wikipedia_the free encyclopedia. Ed. 4 April 2007.

<http://www.wikipedia.com/lightrail.html>

Rail Future Conference 15th. Wikipedia_the free encyclopedia. Ed. Nov 2008.



LAMPIRAN A



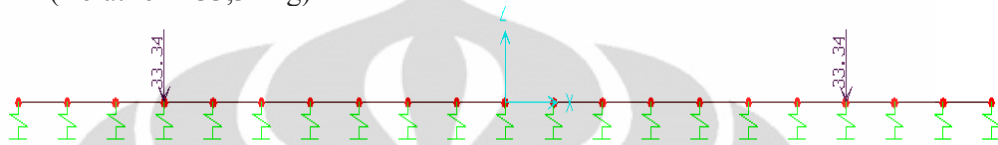
**SIMULASI PEMODELAN
PADA BEBERAPA
ALTERNATIF TIPE BANTALAN**

Lampiran 4.01A Simulasi Pemodelan bantalan kayu melintang

4.01A. Simulasi pemodelan bantalan kayu melintang dengan SAP 2000

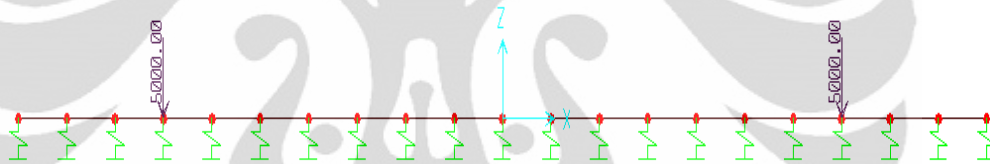
Berdasarkan analisis perhitungan dengan menggunakan bantuan program SAP 2000 adalah sebagai berikut :

- Penentuan asumsi input pembebanan
1. Pembebanan akibat beban rel :
(Berat rel = 33,34 kg)



Pada pembebanan akibat beban dari rel ini di definisikan sebagai beban mati, dan diasumsikan ditaruh pada posisi jarak sepur sebesar 1,435 m yang ditumpu oleh beberapa perletakan elastis (*springs*) dengan penentuan jarak antar *springs* yang diambil yaitu sebesar 10 cm.

2. Pembebanan akibat beban gandar :
(Pgandar = 5 ton)

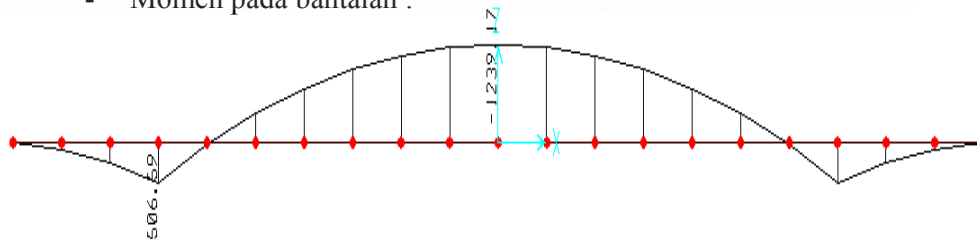


Sedangkan pada pembebanan akibat beban gandar dari roda trem di definisikan sebagai beban hidup, dan asumsi perletakannya sama dengan pembebanan akibat beban rel.

Dalam hal ini nilai kekakuan balas diasumsikan sebagai pondasi elastis yang menopang bantalan, dengan nilai keadaan balas sedang sebesar $K = 180 \text{ kg/cm}^2$.

Dengan mengkombinasikan pembebanan = 1.2 DL + 1.6 LL diperoleh hasil sebagai berikut :

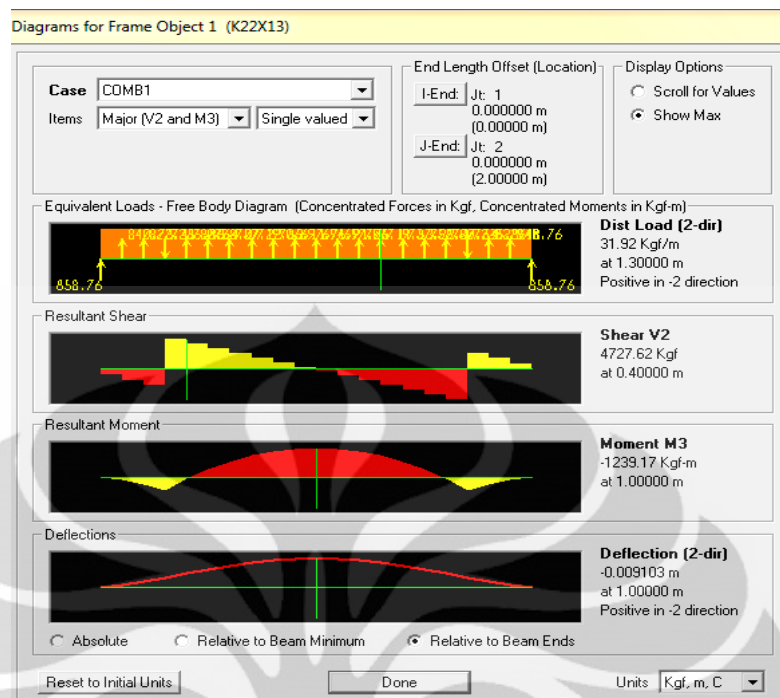
- Momen pada bantalan :



Gambar 4.01 a. Diagram momen maksimum pada bantalan kayu melintang

$$M_{\text{maks}} \text{ tengah bantalan} = -1239,17 \text{ kg-m}$$

$$M_{\text{maks}} \text{ bawah rel} = 606,69 \text{ kg-m}$$



Gambar 4.01 b. Diagram gaya-gaya maksimum yang terjadi pada bantalan kayu melintang

Pada gambar diagram diatas dapat diketahui momen maksimum yang terjadi di bawah rel sebesar -1239,17 kg-m, sedangkan untuk momen yang terjadi dibawah rel sebesar 606,69 kg-m dan kemungkinan terjadinya defleksi maksimum pada tengah bantalan sebesar 0,009103 m. Untuk hasil *output* gaya lintang; serta momen pada setiap titik (*node*) secara jelas dapat di lihat pada tabel di bawah ini.

- Gaya lintang (V_2) dan Momen (M_3)

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	CaseType	V2	M3
m	Text	Kgf	Kgf-m
0	Combination	-858.76	2.301E-11
0.1	Combination	-855.57	85.72
0.1	Combination	-1696.33	85.72
0.2	Combination	-1693.14	255.19
0.2	Combination	-2515.62	255.19
0.3	Combination	-2512.43	506.59
0.3	Combination	4724.43	506.59
0.4	Combination	4727.62	33.99
0.4	Combination	3946.98	33.99
0.5	Combination	3950.17	-360.87
0.5	Combination	3192.11	-360.87
0.6	Combination	3195.3	-680.24
0.6	Combination	2458.08	-680.24
0.7	Combination	2461.27	-926.21
0.7	Combination	1741.74	-926.21
0.8	Combination	1744.94	-1100.54
0.8	Combination	1038.82	-1100.54
0.9	Combination	1042.01	-1204.58
0.9	Combination	344.26	-1204.58
1	Combination	347.46	-1239.17

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	CaseType	V2	M3
m	Text	Kgf	Kgf-m
1	Combination	-347.46	-1239.17
1.1	Combination	-344.26	-1204.58
1.1	Combination	-1042.01	-1204.58
1.2	Combination	-1038.82	-1100.54
1.2	Combination	-1744.94	-1100.54
1.3	Combination	-1741.74	-926.21
1.3	Combination	-2461.27	-926.21
1.4	Combination	-2458.08	-680.24
1.4	Combination	-3195.3	-680.24
1.5	Combination	-3192.11	-360.87
1.5	Combination	-3950.17	-360.87
1.6	Combination	-3946.98	33.99
1.6	Combination	-4727.62	33.99
1.7	Combination	-4724.43	506.59
1.7	Combination	2512.43	506.59
1.8	Combination	2515.62	255.19
1.8	Combination	1693.14	255.19
1.9	Combination	1696.33	85.72
1.9	Combination	855.57	85.72
2	Combination	858.76	3.738E-11

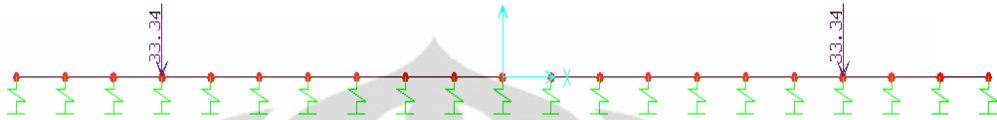
Lampiran 4.02 A. Simulasi pemodelan bantalan baja melintang

4.02A. Simulasi pemodelan bantalan baja melintang dengan SAP 2000

- Penentuan asumsi input pembebanan

1. Pembebanan akibat beban rel :

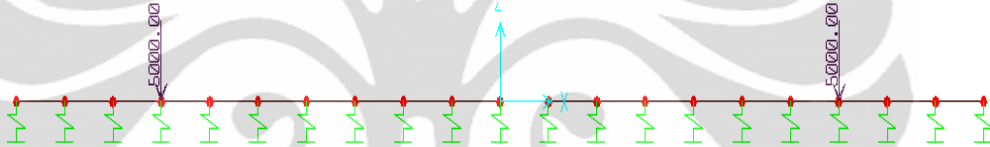
(Berat rel = 33,34 kg)



Pada pembebanan akibat beban dari rel ini di definisikan sebagai beban mati, dan diasumsikan diletakkan pada posisi jarak sepur sebesar 1,435 m yang ditumpu oleh beberapa perletakan elastis (*springs*) dengan penentuan jarak antar *springs* yang diambil yaitu sebesar 10 cm.

2. Pembebanan akibat beban gandar :

(Pgandar = 5 ton)

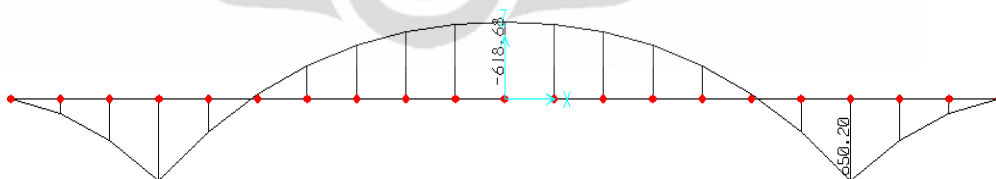


Sedangkan pada pembebanan akibat beban gandar dari roda trem di definisikan sebagai beban hidup, dan asumsi perletakannya sama dengan pembebanan akibat beban rel.

Dalam hal ini nilai kekakuan balas diasumsikan sebagai pondasi elastis yang menopang bantalan, dengan nilai keadaan balas sedang sebesar $K = 180 \text{ kg/cm}^2$.

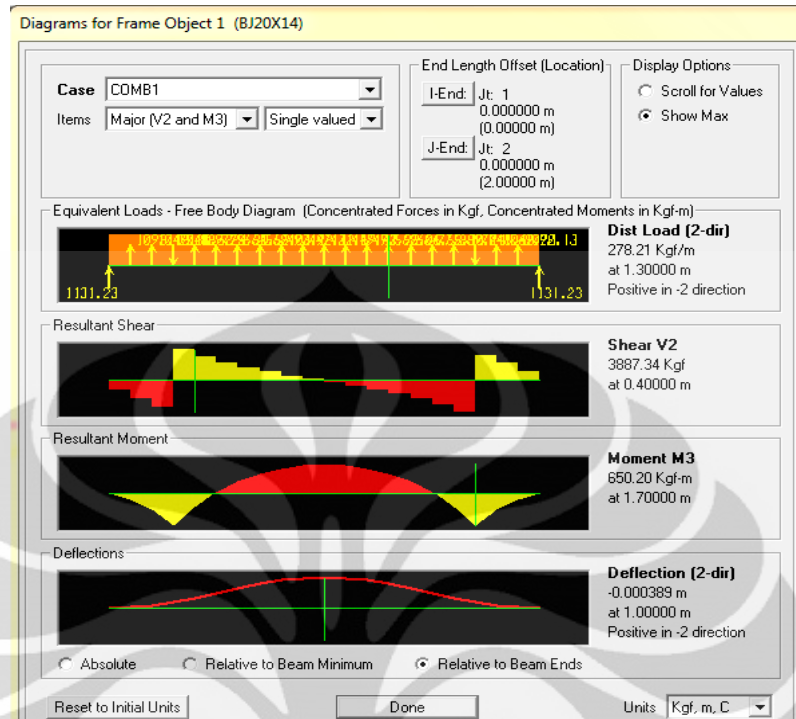
Dengan kombinasi pembebanan = 1.2 DL + 1.6 LL diperoleh hasil sebagai berikut :

- Momen Pada bantalan baja :



Gambar 4.02 a. Diagram gaya momen maksimum pada bantalan baja melintang

- M_{maks} tengah bantalan = -618,68 kg-m
- M_{maks} bawah rel = 650,2 kg-m



Gambar 4.02 b. Diagram gaya-gaya maksimum yang terjadi pada bantalan baja melintang

Pada gambar diagram 4.19 dapat diketahui momen maksimum yang terjadi di bawah rel sebesar 650,20 kg-m, dan kemungkinan terjadinya defleksi maksimum pada tengah bantalan sebesar 0,389 mm. Untuk hasil *output* gaya lintang; serta momen pada setiap titik (*node*) secara jelas dapat di lihat pada tabel di bawah ini.

- Gaya lintang (V_2) dan Momen (M_3)

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	CaseType	V2	M3
m	Text	Kgf	Kgf-m
0	Combination	-1131.23	0
0.1	Combination	-1103.41	111.73
0.1	Combination	-2195.54	111.73
0.2	Combination	-2167.72	329.9
0.2	Combination	-3216.92	329.9
0.3	Combination	-3189.1	650.2
0.3	Combination	3859.52	650.2
0.4	Combination	3887.34	262.85
0.4	Combination	2998.1	262.85
0.5	Combination	3025.92	-38.35
0.5	Combination	2250.62	-38.35
0.6	Combination	2278.44	-264.8
0.6	Combination	1613.92	-264.8
0.7	Combination	1641.74	-427.58
0.7	Combination	1073.67	-427.58
0.8	Combination	1101.49	-536.34
0.8	Combination	607.57	-536.34
0.9	Combination	635.39	-598.49
0.9	Combination	187.97	-598.49
1	Combination	215.79	-618.68

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	CaseType	V2	M3
m	Text	Kgf	Kgf-m
1	Combination	-215.79	-618.68
1.1	Combination	-187.97	-598.49
1.1	Combination	-635.39	-598.49
1.2	Combination	-607.57	-536.34
1.2	Combination	-1101.49	-536.34
1.3	Combination	-1073.67	-427.58
1.3	Combination	-1641.74	-427.58
1.4	Combination	-1613.92	-264.8
1.4	Combination	-2278.44	-264.8
1.5	Combination	-2250.62	-38.35
1.5	Combination	-3025.92	-38.35
1.6	Combination	-2998.1	262.85
1.6	Combination	-3887.34	262.85
1.7	Combination	-3859.52	650.2
1.7	Combination	3189.1	650.2
1.8	Combination	3216.92	329.9
1.8	Combination	2167.72	329.9
1.9	Combination	2195.54	111.73
1.9	Combination	1103.41	111.73
2	Combination	1131.23	-1.918E-12

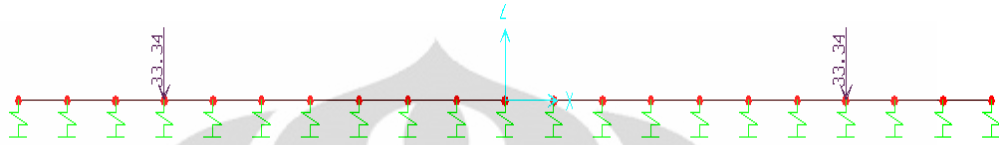
Lampiran 4.03 A. Simulasi pemodelan bantalan beton melintang

4.03A. Simulasi pemodelan bantalan beton melintang dengan SAP 2000

- Penentuan input pembebanan

1. Pembebanan akibat beban rel :

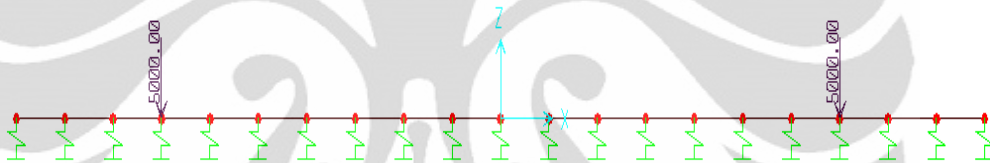
(Berat rel = 33,34 kg)



Pada pembebanan akibat beban dari rel ini di definisikan sebagai beban mati, dan diasumsikan ditaruh pada posisi jarak sepur sebesar 1,435 m yang ditumpu oleh beberapa perletakan elastis (*springs*) dengan penentuan jarak antar *springs* yang diambil yaitu sebesar 10 cm.

2. Pembebanan akibat beban gandar :

(Pgandar = 5 ton)

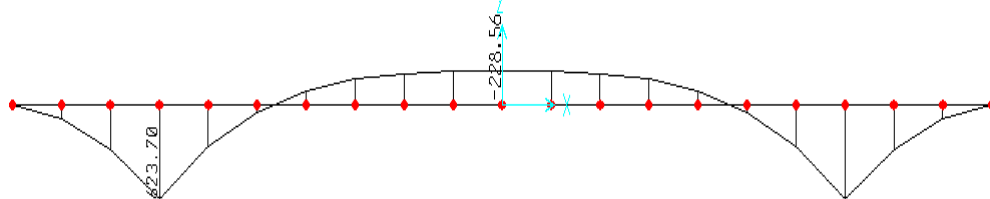


Sedangkan pada pembebanan akibat beban gandar dari roda trem di definisikan sebagai beban hidup, dan asumsi perletakannya sama dengan pembebanan akibat beban rel.

Dalam hal ini nilai kekakuan balas diasumsikan sebagai pondasi elastis yang menopang bantalan, dengan nilai keadaan balas sedang sebesar $K = 180 \text{ kg/cm}^2$.

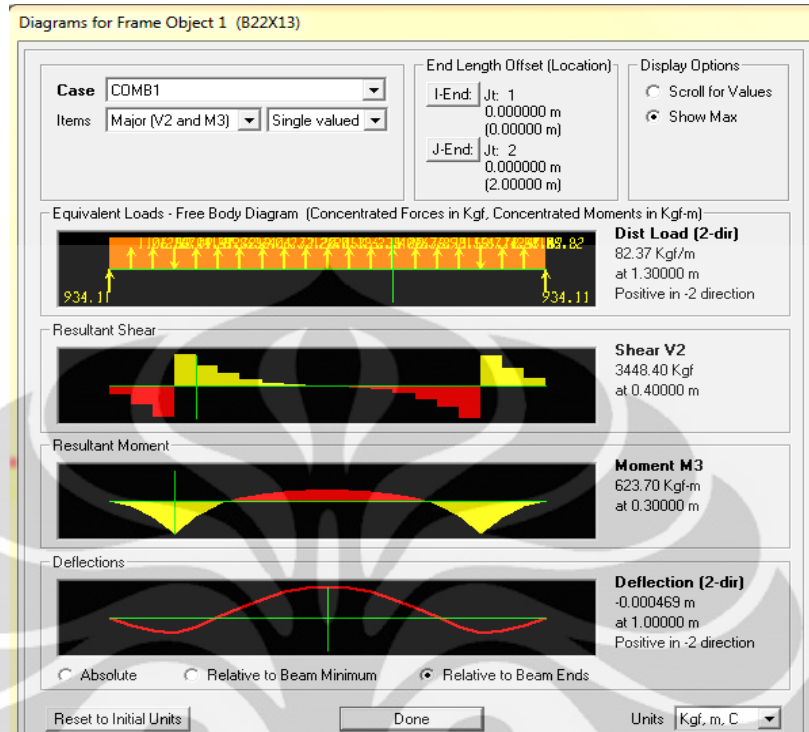
Dengan mengkombinasikan pembebanan = 1.2 DL + 1.6 LL diperoleh hasil sebagai berikut :

- Momen yang terjadi pada bantalan beton :



Gambar 4.03 a. Diagram momen pada bantalan beton melintang

- M_{maks} tengah bantalan = -228,56 kg-m
- M_{maks} bawah rel = 623,70 kg-m



Gambar 4.03 b. Diagram gaya-gaya maksimum pada bantalan beton melintang

Pada gambar diagram diatas dapat diketahui momen maksimum yang terjadi di bawah rel sebesar 623,70 kg-m, dan kemungkinan terjadinya defleksi maksimum pada tengah bantalan sebesar 0,469 mm. Untuk hasil *output* gaya lintang; serta momen pada setiap titik (*node*) secara jelas dapat di lihat pada tabel di bawah ini

- Gaya lintang (V_2) dan Momen (M_3)

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	CaseType	V2	M3
m	Text	Kgf	Kgf-m
0	Combination	-1060.77	0
0.1	Combination	-1052.53	105.66
0.1	Combination	-2177.94	105.66
0.2	Combination	-2169.7	323.05
0.2	Combination	-3345.8	323.05
0.3	Combination	-3337.56	657.22
0.3	Combination	3527.85	657.22
0.4	Combination	3536.09	304.02
0.4	Combination	2507.91	304.02
0.5	Combination	2516.15	52.81
0.5	Combination	1683.85	52.81
0.6	Combination	1692.09	-115.98
0.6	Combination	1061.53	-115.98
0.7	Combination	1069.77	-222.55
0.7	Combination	617.86	-222.55
0.8	Combination	626.09	-284.74
0.8	Combination	311.67	-284.74
0.9	Combination	319.91	-316.32
0.9	Combination	91.42	-316.32
1	Combination	99.66	-325.88

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	CaseType	V2	M3
m	Text	Kgf	Kgf-m
1	Combination	-99.66	-325.88
1.1	Combination	-91.42	-316.32
1.1	Combination	-319.91	-316.32
1.2	Combination	-311.67	-284.74
1.2	Combination	-626.09	-284.74
1.3	Combination	-617.86	-222.55
1.3	Combination	-1069.77	-222.55
1.4	Combination	-1061.53	-115.98
1.4	Combination	-1692.09	-115.98
1.5	Combination	-1683.85	52.81
1.5	Combination	-2516.15	52.81
1.6	Combination	-2507.91	304.02
1.6	Combination	-3536.09	304.02
1.7	Combination	-3527.85	657.22
1.7	Combination	3337.56	657.22
1.8	Combination	3345.8	323.05
1.8	Combination	2169.7	323.05
1.9	Combination	2177.94	105.66
1.9	Combination	1052.53	105.66
2	Combination	1060.77	1.867E-12

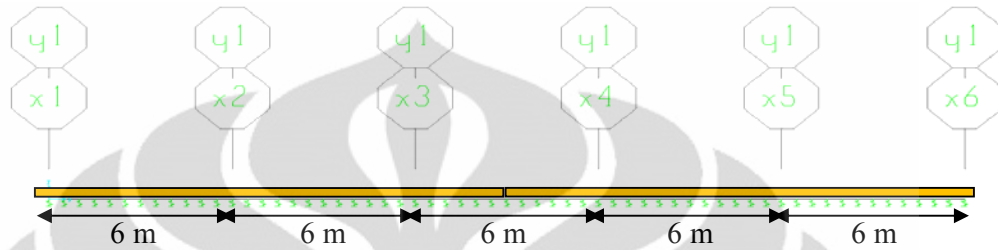
Lampiran 4.04 A. Simulasi pemodelan pada bantalan beton menerus

4.04A. Simulasi pemodelan bantalan beton menerus dengan SAP 2000

- Penentuan input pembebanan

1. Pembebanan akibat beban rel :

(Berat rel = 33,34 kg)

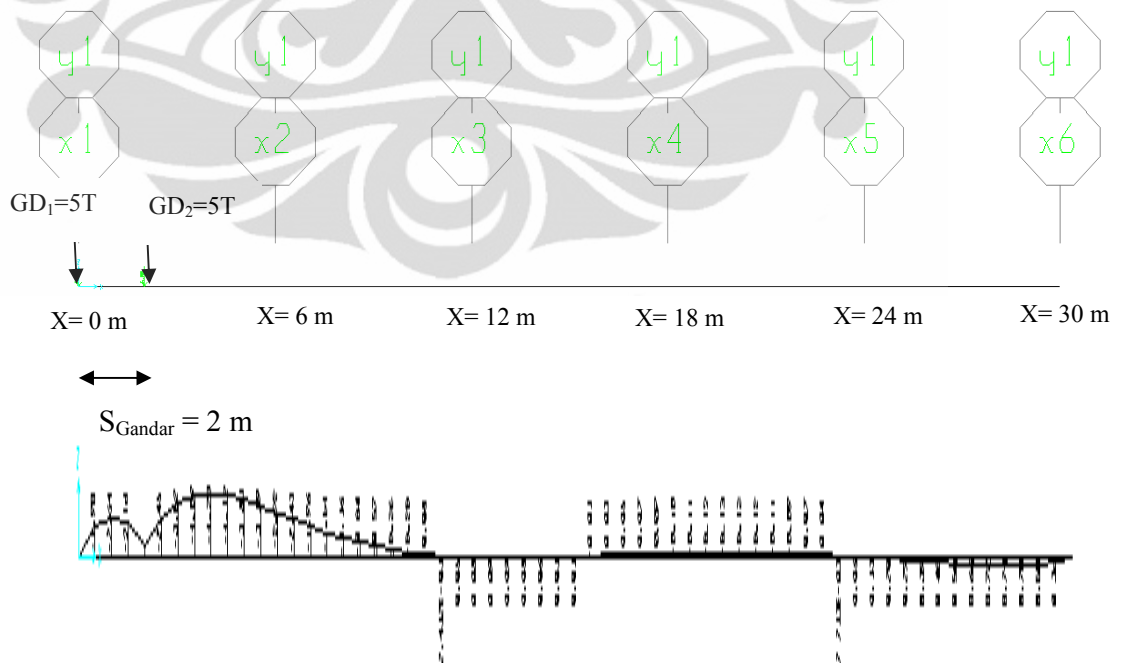


Pada pembebanan akibat beban dari rel ini di definisikan sebagai beban mati yang terbagi merata, dan diasumsikan ditaruh pada posisi sepanjang bantalan yang ditumpu oleh beberapa perletakan elastis (*springs*) dengan penentuan jarak antar *springs* yang diambil yaitu sebesar 10 cm.

2. Pembebanan akibat beban gandar terpusat pada boogie :

CASE 1

Beban Gandar (GD₁ = 5T & GD₂ = 5T), Jarak antar gandar ($S_{\text{gandar}} = 2 \text{ m}$)

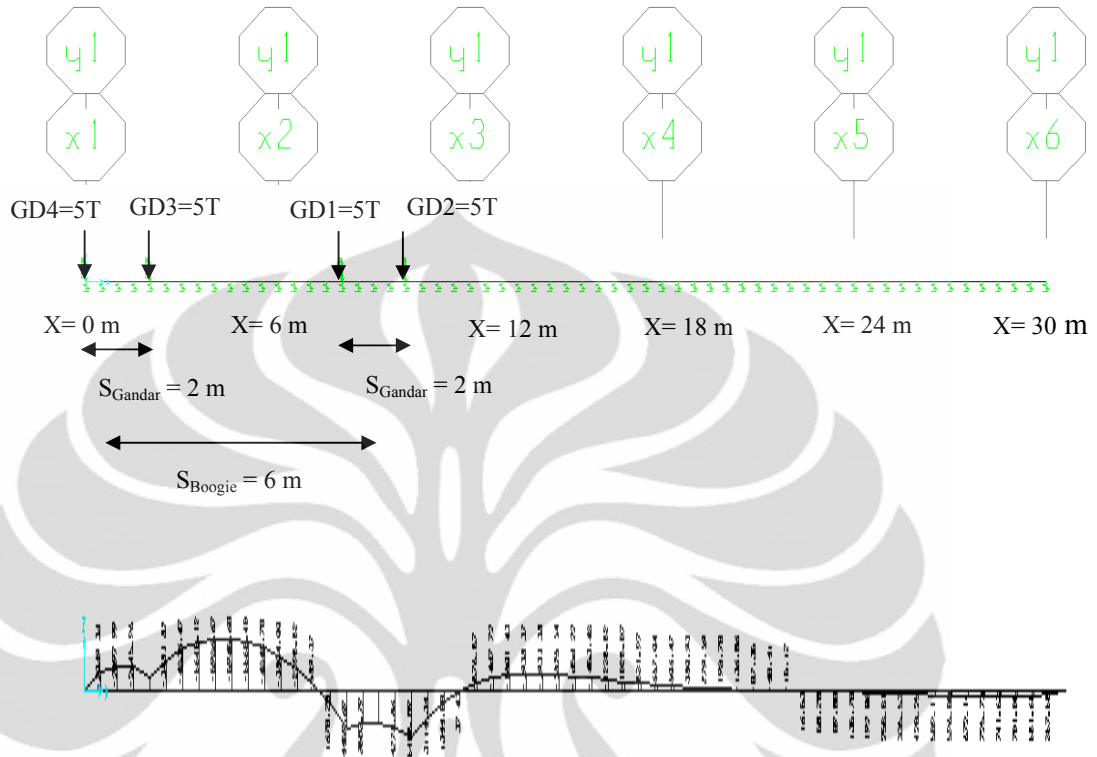


Gambar. Diagram Momen CASE 1

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	OutputCase	M3	FrameElem
m	Text	Kgf-m	Text
0	COMB1	1.397E-10	1
0.5	COMB1	-1977.45	1
0	COMB1	-1977.45	2
0.5	COMB1	-2638.79	2
0	COMB1	-2638.79	3
0.5	COMB1	-2161.07	3
0	COMB1	-2161.07	4
0.5	COMB1	-710.66	4
0	COMB1	-710.66	5
0.5	COMB1	-2445.25	5
0	COMB1	-2445.25	6
0.5	COMB1	-3517.96	6
0	COMB1	-3517.96	7
0.5	COMB1	-4071.78	7
0	COMB1	-4071.78	8
0.5	COMB1	-4234.78	8
0	COMB1	-4234.78	9
0.5	COMB1	-4117.51	9
0	COMB1	-4117.51	10
0.5	COMB1	-3812.26	10
0	COMB1	-3812.26	11
0.5	COMB1	-3393.51	11
0	COMB1	-3393.51	12
0.5	COMB1	-2919.25	12
0	COMB1	-2919.25	13
0.5	COMB1	-2432.78	13
0	COMB1	-2432.78	14
0.5	COMB1	-1964.86	14
0	COMB1	-1964.86	15
0.5	COMB1	-1535.77	15
0	COMB1	-1535.77	16
0.5	COMB1	-1157.46	16
0	COMB1	-1157.46	17
0.5	COMB1	-835.38	17
0	COMB1	-835.38	18
0.5	COMB1	-570.21	18
0	COMB1	-570.21	19
0.5	COMB1	-359.25	19
0	COMB1	-359.25	20
0.5	COMB1	-197.65	20
0	COMB1	-197.65	21
0.5	COMB1	-79.29	21
0	COMB1	-79.29	22
0.5	COMB1	2.43	22
0	COMB1	2.43	23
0.5	COMB1	54.14	23
0	COMB1	54.14	24
0.5	COMB1	82.05	24
0	COMB1	82.05	25
0.5	COMB1	91.79	25
0	COMB1	91.79	26
0.5	COMB1	88.22	26
0	COMB1	88.22	27
0.5	COMB1	75.43	27
0	COMB1	75.43	28
0.5	COMB1	56.73	28
0	COMB1	56.73	29
0.5	COMB1	34.73	29
0	COMB1	34.73	30
0.5	COMB1	11.37	30
0	COMB1	11.37	31
0.5	COMB1	-11.93	31

0	COMB1	11.37	31
0.5	COMB1	-11.93	31
0	COMB1	-11.93	32
0.5	COMB1	-34.18	32
0	COMB1	-34.18	33
0.5	COMB1	-54.74	33
0	COMB1	-54.74	34
0.5	COMB1	-73.2	34
0	COMB1	-73.2	35
0.5	COMB1	-89.29	35
0	COMB1	-89.29	36
0.5	COMB1	-102.81	36
0	COMB1	-102.81	37
0.5	COMB1	-113.54	37
0	COMB1	-113.54	38
0.5	COMB1	-121.2	38
0	COMB1	-121.2	39
0.5	COMB1	-125.4	39
0	COMB1	-125.4	40
0.5	COMB1	-125.58	40
0	COMB1	-125.58	41
0.5	COMB1	-121.04	41
0	COMB1	-121.04	42
0.5	COMB1	-110.87	42
0	COMB1	-110.87	43
0.5	COMB1	-94.05	43
0	COMB1	-94.05	44
0.5	COMB1	-69.44	44
0	COMB1	-69.44	45
0.5	COMB1	-35.88	45
0	COMB1	-35.88	46
0.5	COMB1	7.71	46
0	COMB1	7.71	47
0.5	COMB1	62.19	47
0	COMB1	62.19	48
0.5	COMB1	127.97	48
0	COMB1	127.97	49
0.5	COMB1	204.81	49
0	COMB1	204.81	50
0.5	COMB1	291.5	50
0	COMB1	291.5	51
0.5	COMB1	385.51	51
0	COMB1	385.51	52
0.5	COMB1	482.67	52
0	COMB1	482.67	53
0.5	COMB1	576.66	53
0	COMB1	576.66	54
0.5	COMB1	658.66	54
0	COMB1	658.66	55
0.5	COMB1	716.89	55
0	COMB1	716.89	56
0.5	COMB1	796.28	56
0	COMB1	796.28	57
0.5	COMB1	698.21	57
0	COMB1	698.21	58
0.5	COMB1	580.42	58
0	COMB1	580.42	59
0.5	COMB1	337.21	59
0	COMB1	337.21	60
0.5	COMB1	2.728E-10	60

CASE 2



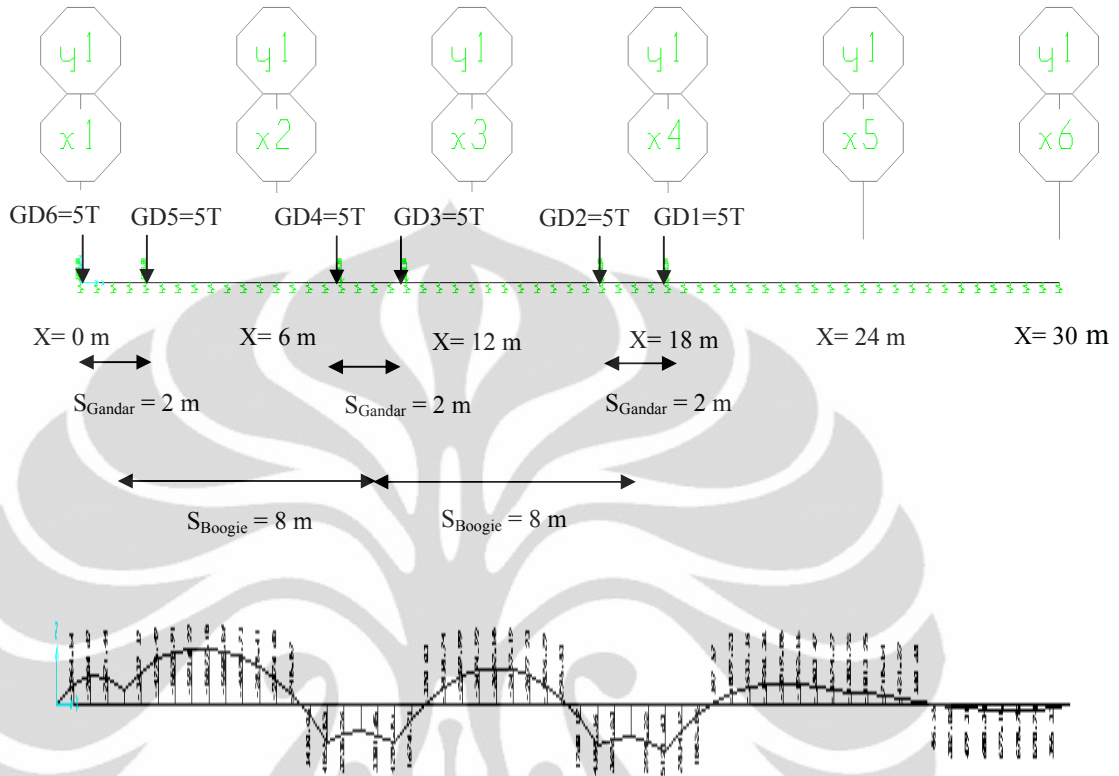
Gambar. Diagram Momen CASE 2

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	OutputCase	M3	FrameElem
m	Text	Kgf-m	Text
0	COMB1	1.397E-10	1
0.5	COMB1	-2069.36	1
0	COMB1	-2069.36	2
0.5	COMB1	-2897.99	2
0	COMB1	-2897.99	3
0.5	COMB1	-2645.96	3
0	COMB1	-2645.96	4
0.5	COMB1	-1461.45	4
0	COMB1	-1461.45	5
0.5	COMB1	-3481.82	5
0	COMB1	-3481.82	6
0.5	COMB1	-4836.47	6
0	COMB1	-4836.47	7
0.5	COMB1	-5640.12	7
0	COMB1	-5640.12	8
0.5	COMB1	-5986.67	8
0	COMB1	-5986.67	9
0.5	COMB1	-5945.6	9
0	COMB1	-5945.6	10
0.5	COMB1	-5560.4	10
0	COMB1	-5560.4	11
0.5	COMB1	-4848.7	11
0	COMB1	-4848.7	12
0.5	COMB1	-3804	12
0	COMB1	-3804	13

0.5	COMB1	-2398.82	13
0	COMB1	-2398.82	14
0.5	COMB1	-589.37	14
0	COMB1	-589.37	15
0.5	COMB1	1678.2	15
0	COMB1	1678.2	16
0.5	COMB1	4459.69	16
0	COMB1	4459.69	17
0.5	COMB1	3802.79	17
0	COMB1	3802.79	18
0.5	COMB1	3736.91	18
0	COMB1	3736.91	19
0.5	COMB1	4273.86	19
0	COMB1	4273.86	20
0.5	COMB1	5408.09	20
0	COMB1	5408.09	21
0.5	COMB1	3114.34	21
0	COMB1	3114.34	22
0.5	COMB1	1344.88	22
0	COMB1	1344.88	23
0.5	COMB1	37.43	23
0	COMB1	37.43	24
0.5	COMB1	-876.87	24
0	COMB1	-876.87	25
0.5	COMB1	-1467.72	25
0	COMB1	-1467.72	26
0.5	COMB1	-1801.43	26
0	COMB1	-1801.43	27
0.5	COMB1	-1938.37	27
0	COMB1	-1938.37	28
0.5	COMB1	-1931.38	28
0	COMB1	-1931.38	29
0.5	COMB1	-1825.14	29
0	COMB1	-1825.14	30
0.5	COMB1	-1656.22	30
0	COMB1	-1656.22	31
0.5	COMB1	-1453.48	31
0	COMB1	-1453.48	32
0.5	COMB1	-1238.82	32
0	COMB1	-1238.82	33
0.5	COMB1	-1028.07	33
0	COMB1	-1028.07	34
0.5	COMB1	-831.97	34
0	COMB1	-831.97	35
0.5	COMB1	-657.04	35
0	COMB1	-657.04	36
0.5	COMB1	-506.47	36
0	COMB1	-506.47	37
0.5	COMB1	-380.93	37
0	COMB1	-380.93	38
0.5	COMB1	-279.19	38
0	COMB1	-279.19	39
0.5	COMB1	-198.7	39
0	COMB1	-198.7	40
0.5	COMB1	-136.06	40
0	COMB1	-136.06	41
0.5	COMB1	-87.35	41
0	COMB1	-87.35	42
0.5	COMB1	-48.41	42
0	COMB1	-48.41	43

0.5	COMB1	-15.12	43
0	COMB1	-15.12	44
0.5	COMB1	16.53	44
0	COMB1	16.53	45
0.5	COMB1	50.2	45
0	COMB1	50.2	46
0.5	COMB1	89.08	46
0	COMB1	89.08	47
0.5	COMB1	135.78	47
0	COMB1	135.78	48
0.5	COMB1	192.08	48
0	COMB1	192.08	49
0.5	COMB1	258.81	49
0	COMB1	258.81	50
0.5	COMB1	335.53	50
0	COMB1	335.53	51
0.5	COMB1	420.25	51
0	COMB1	420.25	52
0.5	COMB1	509.11	52
0	COMB1	509.11	53
0.5	COMB1	596	53
0	COMB1	596	54
0.5	COMB1	672.14	54
0	COMB1	672.14	55
0.5	COMB1	725.73	55
0	COMB1	725.73	56
0.5	COMB1	741.63	56
0	COMB1	741.63	57
0.5	COMB1	701.08	57
0	COMB1	701.08	58
0.5	COMB1	581.68	58
0	COMB1	581.68	59
0.5	COMB1	357.58	59
0	COMB1	357.58	60
0.5	COMB1	2.728E-10	60

CASE 3



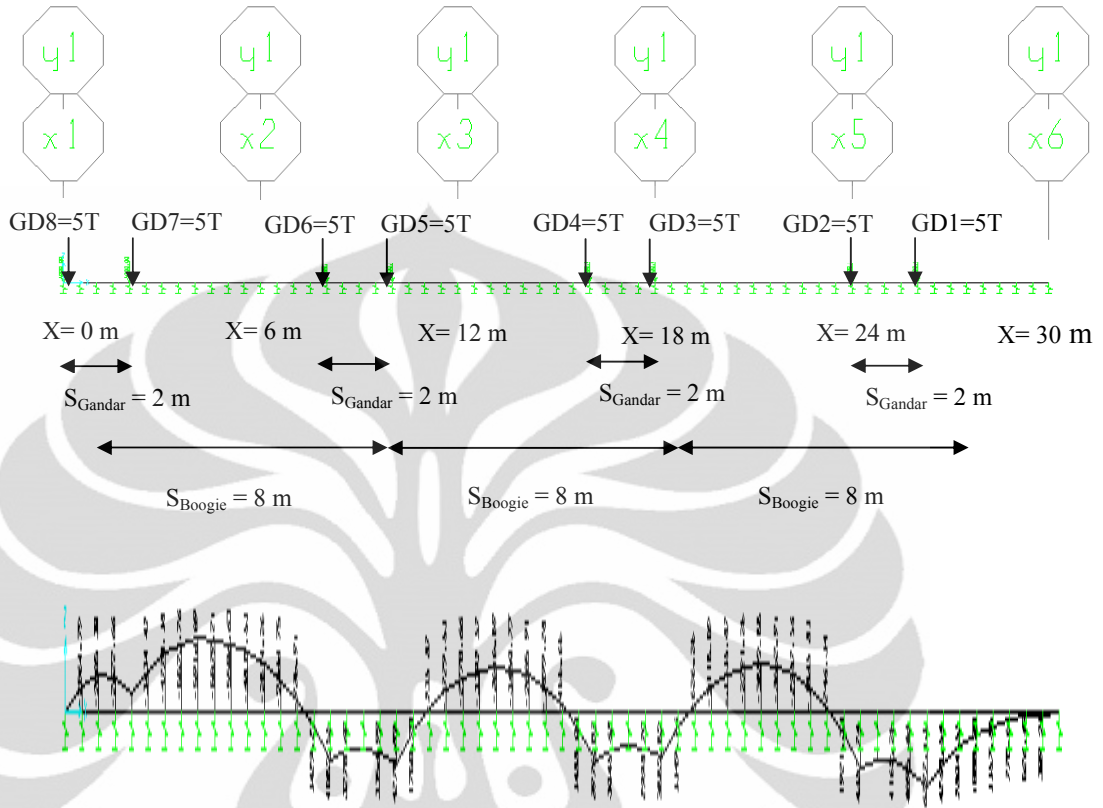
Gambar. Diagram Momen CASE 3

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	OutputCase	M3	FrameElem
m	Text	Kgf-m	Text
0	COMB1	1.397E-10	1
0.5	COMB1	-2064.54	1
0	COMB1	-2064.54	2
0.5	COMB1	-2884.62	2
0	COMB1	-2884.62	3
0.5	COMB1	-2621.44	3
0	COMB1	-2621.44	4
0.5	COMB1	-1424.39	4
0	COMB1	-1424.39	5
0.5	COMB1	-3432.12	5
0	COMB1	-3432.12	6
0.5	COMB1	-4775.49	6
0	COMB1	-4775.49	7
0.5	COMB1	-5570.91	7
0	COMB1	-5570.91	8
0.5	COMB1	-5914.22	8
0	COMB1	-5914.22	9
0.5	COMB1	-5877.18	9
0	COMB1	-5877.18	10
0.5	COMB1	-5505.84	10
0	COMB1	-5505.84	11
0.5	COMB1	-4820.71	11
0	COMB1	-4820.71	12
0.5	COMB1	-3818.41	12

0	COMB1	-1303.78	48
0.5	COMB1	-1013.25	48
0	COMB1	-1013.25	49
0.5	COMB1	-718.54	49
0	COMB1	-718.54	50
0.5	COMB1	-431.37	50
0	COMB1	-431.37	51
0.5	COMB1	-160.68	51
0	COMB1	-160.68	52
0.5	COMB1	86.15	52
0	COMB1	86.15	53
0.5	COMB1	302.08	53
0	COMB1	302.08	54
0.5	COMB1	479.31	54
0	COMB1	479.31	55
0.5	COMB1	608.34	55
0	COMB1	608.34	56
0.5	COMB1	677.18	56
0	COMB1	677.18	57
0.5	COMB1	670.78	57
0	COMB1	670.78	58
0.5	COMB1	570.74	58
0	COMB1	570.74	59
0.5	COMB1	355.33	59
0	COMB1	355.33	60
0.5	COMB1	2.719E-10	60

0	COMB1	-3818.41	13
0.5	COMB1	-2474.68	13
0	COMB1	-2474.68	14
0.5	COMB1	-748.87	14
0	COMB1	-748.87	15
0.5	COMB1	1410.06	15
0	COMB1	1410.06	16
0.5	COMB1	4055.83	16
0	COMB1	4055.83	17
0.5	COMB1	3235.26	17
0	COMB1	3235.26	18
0.5	COMB1	2978.71	18
0	COMB1	2978.71	19
0.5	COMB1	3301.45	19
0	COMB1	3301.45	20
0.5	COMB1	4204.81	20
0	COMB1	4204.81	21
0.5	COMB1	1674.71	21
0	COMB1	1674.71	22
0.5	COMB1	-320.03	22
0	COMB1	-320.03	23
0.5	COMB1	-1818.74	23
0	COMB1	-1818.74	24
0.5	COMB1	-2859.99	24
0	COMB1	-2859.99	25
0.5	COMB1	-3474.92	25
0	COMB1	-3474.92	26
0.5	COMB1	-3682.58	26
0	COMB1	-3682.58	27
0.5	COMB1	-3487.19	27
0	COMB1	-3487.19	28
0.5	COMB1	-2877.23	28
0	COMB1	-2877.23	29
0.5	COMB1	-1826.29	29
0	COMB1	-1826.29	30
0.5	COMB1	-295.83	30
0	COMB1	-295.83	31
0.5	COMB1	1760.17	31
0	COMB1	1760.17	32
0.5	COMB1	4388.36	32
0	COMB1	4388.36	33
0.5	COMB1	3626.83	33
0	COMB1	3626.83	34
0.5	COMB1	3495.72	34
0	COMB1	3495.72	35
0.5	COMB1	3998.33	35
0	COMB1	3998.33	36
0.5	COMB1	5121.63	36
0	COMB1	5121.63	37
0.5	COMB1	2834.12	37
0	COMB1	2834.12	38
0.5	COMB1	1083.06	38
0	COMB1	1083.06	39
0.5	COMB1	-197.57	39
0	COMB1	-197.57	40
0.5	COMB1	-1079.23	40
0	COMB1	-1079.23	41
0.5	COMB1	-1633.16	41
0	COMB1	-1633.16	42
0.5	COMB1	-1926.36	42
0	COMB1	-1926.36	43
0.5	COMB1	-2019.08	43
0	COMB1	-2019.08	44
0.5	COMB1	-1963.55	44
0	COMB1	-1963.55	45
0.5	COMB1	-1803.47	45
0	COMB1	-1803.47	46

CASE 4



Gambar. Diagram Momen CASE 4

TABLE: Element Forces - Frames			
Station	OutputCase	M3	FrameElem
m	Text	Kgf-m	Text
0	COMB1	1.397E-10	1
0.5	COMB1	-2064.79	1
0	COMB1	-2064.79	2
0.5	COMB1	-2885.3	2
0	COMB1	-2885.3	3
0.5	COMB1	-2622.66	3
0	COMB1	-2622.66	4
0.5	COMB1	-1426.17	4
0	COMB1	-1426.17	5
0.5	COMB1	-3434.42	5
0	COMB1	-3434.42	6
0.5	COMB1	-4778.18	6
0	COMB1	-4778.18	7
0.5	COMB1	-5573.76	7
0	COMB1	-5573.76	8
0.5	COMB1	-5916.89	8
0	COMB1	-5916.89	9
0.5	COMB1	-5879.21	9
0	COMB1	-5879.21	10
0.5	COMB1	-5506.63	10
0	COMB1	-5506.63	11
0.5	COMB1	-4819.53	11
0	COMB1	-4819.53	12
0.5	COMB1	-3814.36	12

0	COMB1	1921.34	48
0.5	COMB1	4687.74	48
0	COMB1	4687.74	49
0.5	COMB1	4094.1	49
0	COMB1	4094.1	50
0.5	COMB1	4162.35	50
0	COMB1	4162.35	51
0.5	COMB1	4895.46	51
0	COMB1	4895.46	52
0.5	COMB1	6277.13	52
0	COMB1	6277.13	53
0.5	COMB1	4268.54	53
0	COMB1	4268.54	54
0.5	COMB1	2804.55	54
0	COMB1	2804.55	55
0.5	COMB1	1800.3	55
0	COMB1	1800.3	56
0.5	COMB1	1157.85	56
0	COMB1	1157.85	57
0.5	COMB1	770.64	57
0	COMB1	770.64	58
0.5	COMB1	526.47	58
0	COMB1	526.47	59
0.5	COMB1	309.21	59
0	COMB1	309.21	60
0.5	COMB1	2.723E-10	60

0	COMB1	-3814.36	13
0.5	COMB1	-2466.75	13
0	COMB1	-2466.75	14
0.5	COMB1	-735.91	14
0	COMB1	-735.91	15
0.5	COMB1	1429.27	15
0	COMB1	1429.27	16
0.5	COMB1	4082.55	16
0	COMB1	4082.55	17
0.5	COMB1	3270.68	17
0	COMB1	3270.68	18
0.5	COMB1	3023.85	18
0	COMB1	3023.85	19
0.5	COMB1	3356.99	19
0	COMB1	3356.99	20
0.5	COMB1	4270.89	20
0	COMB1	4270.89	21
0.5	COMB1	1750.7	21
0	COMB1	1750.7	22
0.5	COMB1	-235.87	22
0	COMB1	-235.87	23
0.5	COMB1	-1729.53	23
0	COMB1	-1729.53	24
0.5	COMB1	-2770.66	24
0	COMB1	-2770.66	25
0.5	COMB1	-3392.57	25
0	COMB1	-3392.57	26
0.5	COMB1	-3616.89	26
0	COMB1	-3616.89	27
0.5	COMB1	-3450.77	27
0	COMB1	-3450.77	28
0.5	COMB1	-2885.91	28
0	COMB1	-2885.91	29
0.5	COMB1	-1899.28	29
0	COMB1	-1899.28	30
0.5	COMB1	-455.65	30
0	COMB1	-455.65	31
0.5	COMB1	1488.01	31
0	COMB1	1488.01	32
0.5	COMB1	3976.07	32
0	COMB1	3976.07	33
0.5	COMB1	3045.62	33
0	COMB1	3045.62	34
0.5	COMB1	2717.6	34
0	COMB1	2717.6	35
0.5	COMB1	2998.7	35
0	COMB1	2998.7	36
0.5	COMB1	3882.82	36
0	COMB1	3882.82	37
0.5	COMB1	1349.76	37
0	COMB1	1349.76	38
0.5	COMB1	-636.35	38
0	COMB1	-636.35	39
0.5	COMB1	-2118.09	39
0	COMB1	-2118.09	40
0.5	COMB1	-3135.87	40
0	COMB1	-3135.87	41
0.5	COMB1	-3721.35	41
0	COMB1	-3721.35	42
0.5	COMB1	-3892.88	42
0	COMB1	-3892.88	43
0.5	COMB1	-3652.91	43
0	COMB1	-3652.91	44
0.5	COMB1	-2987.16	44
0	COMB1	-2987.16	45
0.5	COMB1	-1865.81	45
0	COMB1	-1865.81	46

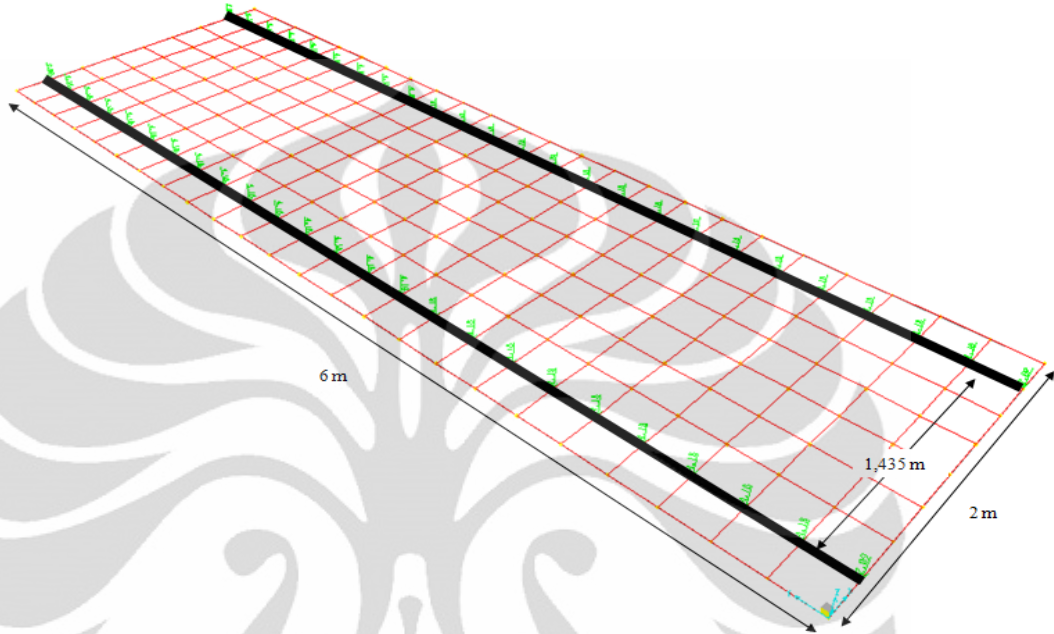
Tabel. Momen maks. dan min. akibat pengaruh beban gandar trem yang berpindah-pindah

CASE	$M_{Max} -$ (Kg-m)	$M_{Max} +$ (Kg-m)
1	-4234.78	736.28
2	-5986.67	5408.09
3	-5914.22	5121.63
4	-5916.89	6277.13

Dari hasil simulasi garis pengaruh momen yang terjadi sepanjang bantalan menerus tersebut dapat diketahui bahwa nilai momen maksimum positif yang terbesar terjadi pada bagian bawah bantalan diperoleh ketika beban gandar dari trem secara keseluruhan telah membebani bantalan yaitu pada simulasi case 4, dimana nilai momen maksimum yang diperoleh sebesar $M_{max (+)} = 6277,13$ kg-m. Sedangkan untuk momen maksimum negatif yang terbesar terjadi pada case 2 dengan nilai $M_{max (-)} = - 5986,67$ kg-m.

Lampiran 4.05 A. Simulasi pemodelan bantalan *slab track*
Simulasi Garis Pengaruh Momen Akibat Beban Gandar Trem

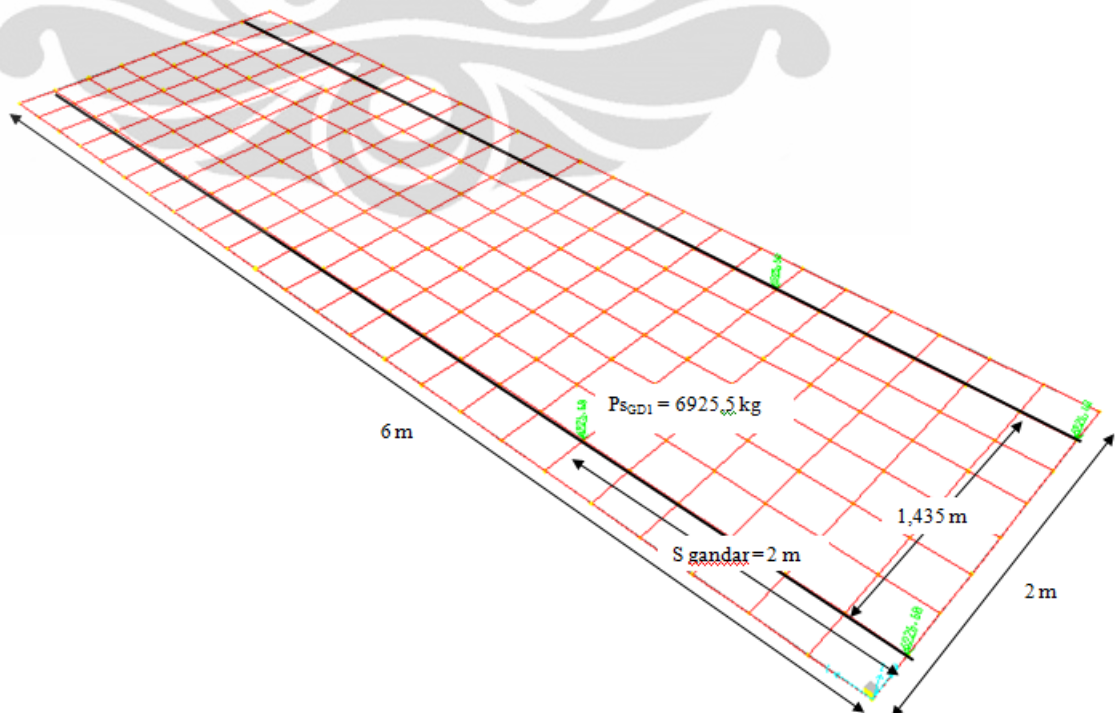
- Beban rel (DL = 33,34 kg/m)

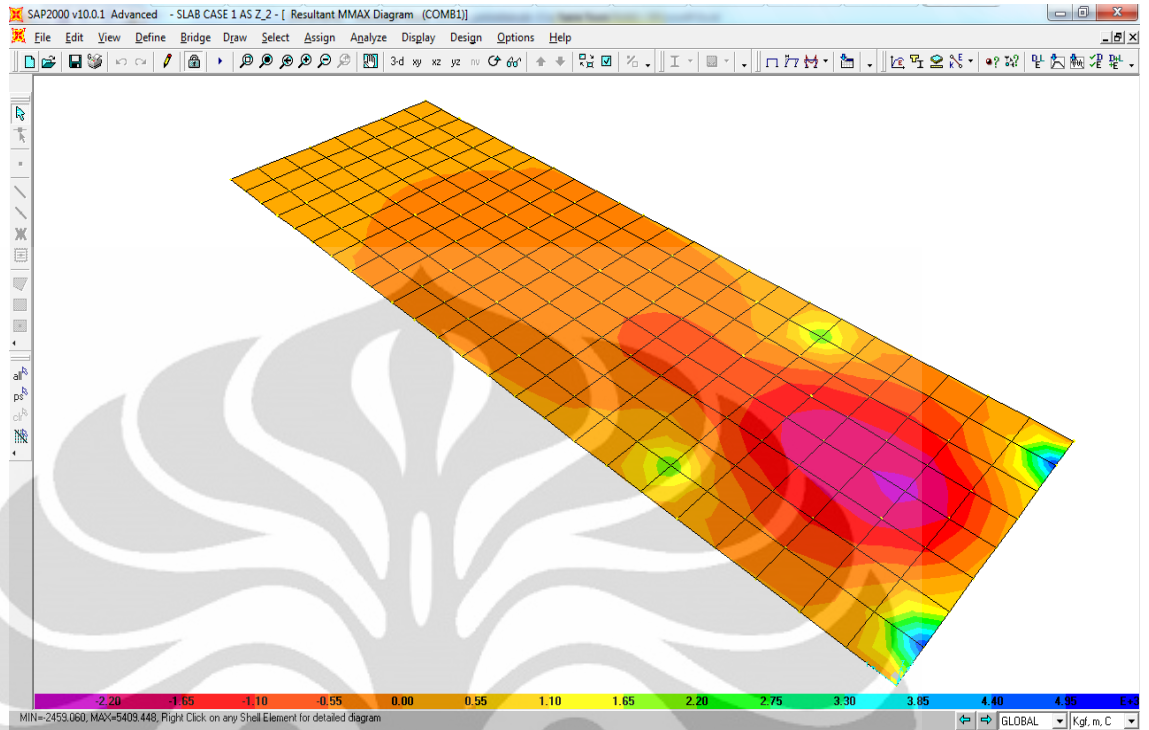


Gambar. Pembebanan akibat beban rel pada bantalan *Slab Track*

CASE 1

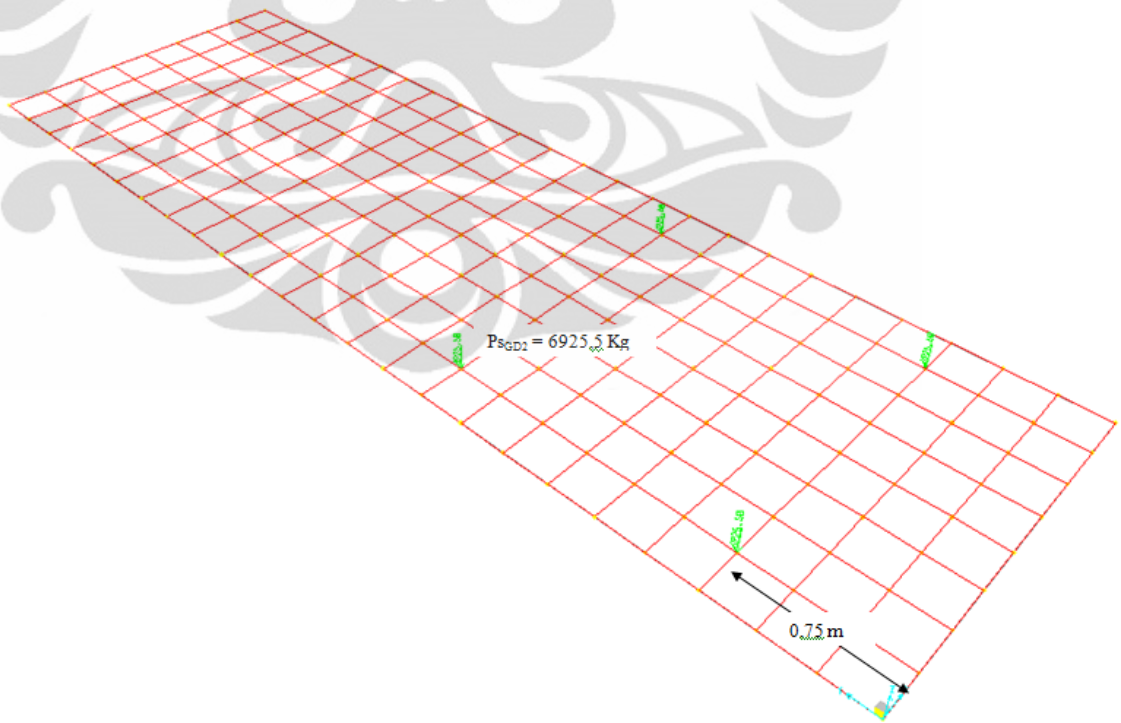
- Beban gandar trem statis ($P_{SGD1} = 6925,5 \text{ kg}$)

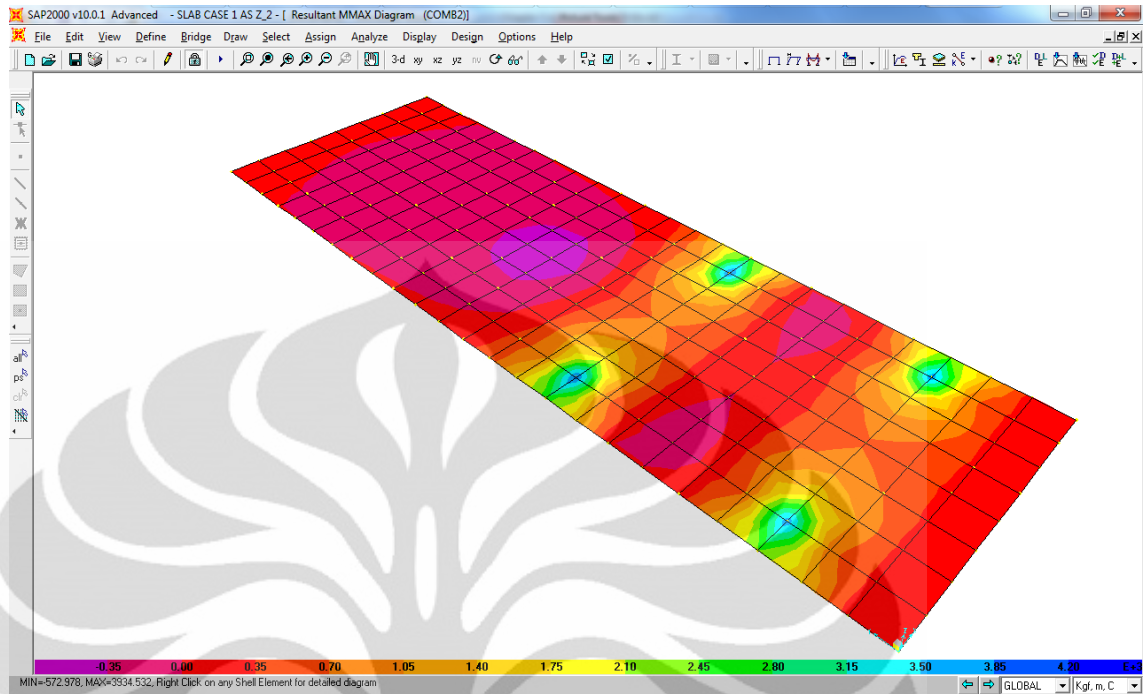




* M_{MAX} bawah rel = 5409,448 kg-m , M_{MIN} tengah bantalan = -2459,06 kg-m

• CASE 2

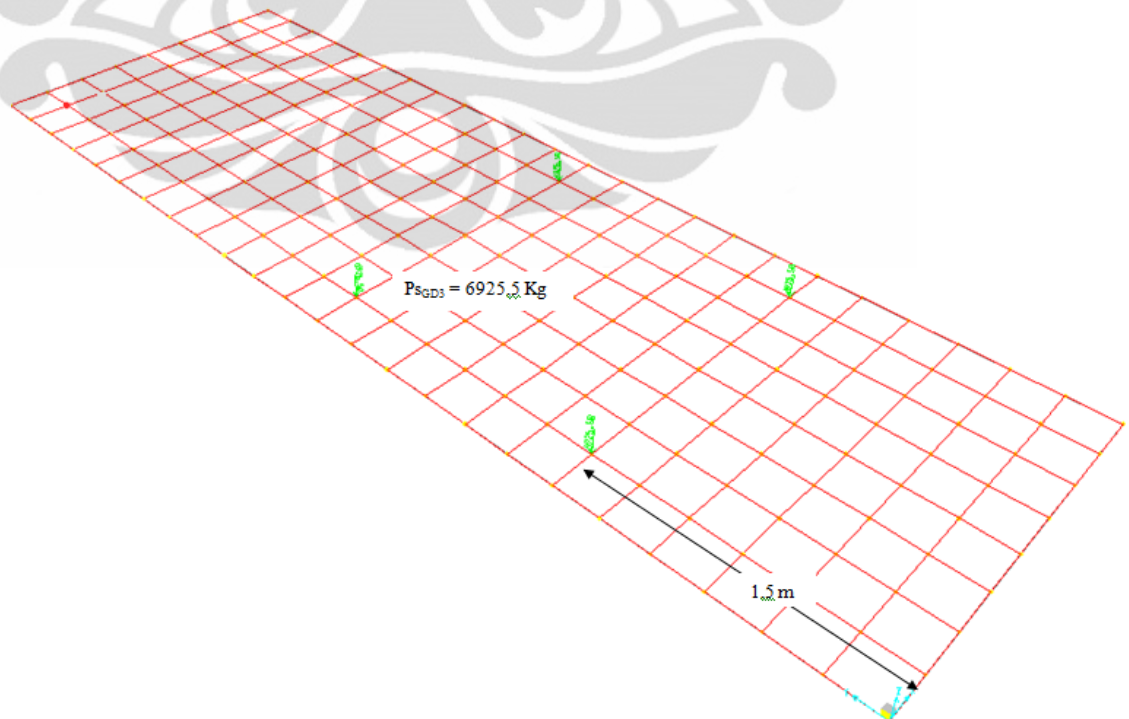


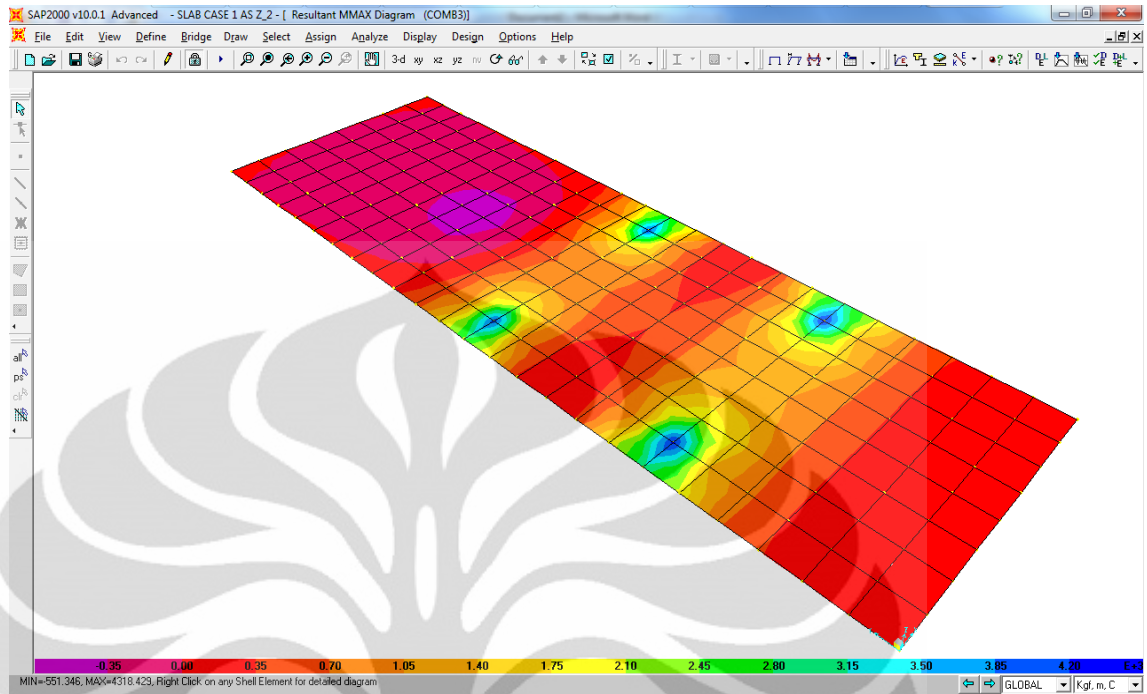


Gambar. Diagram Momen maksimum akibat pengaruh beban rel dan roda gandar trem pada *case 2*

* M_{MAX} bawah rel = 3934,532 kg-m , M_{MIN} tengah bantalan = -572,978 kg-m

• CASE 3

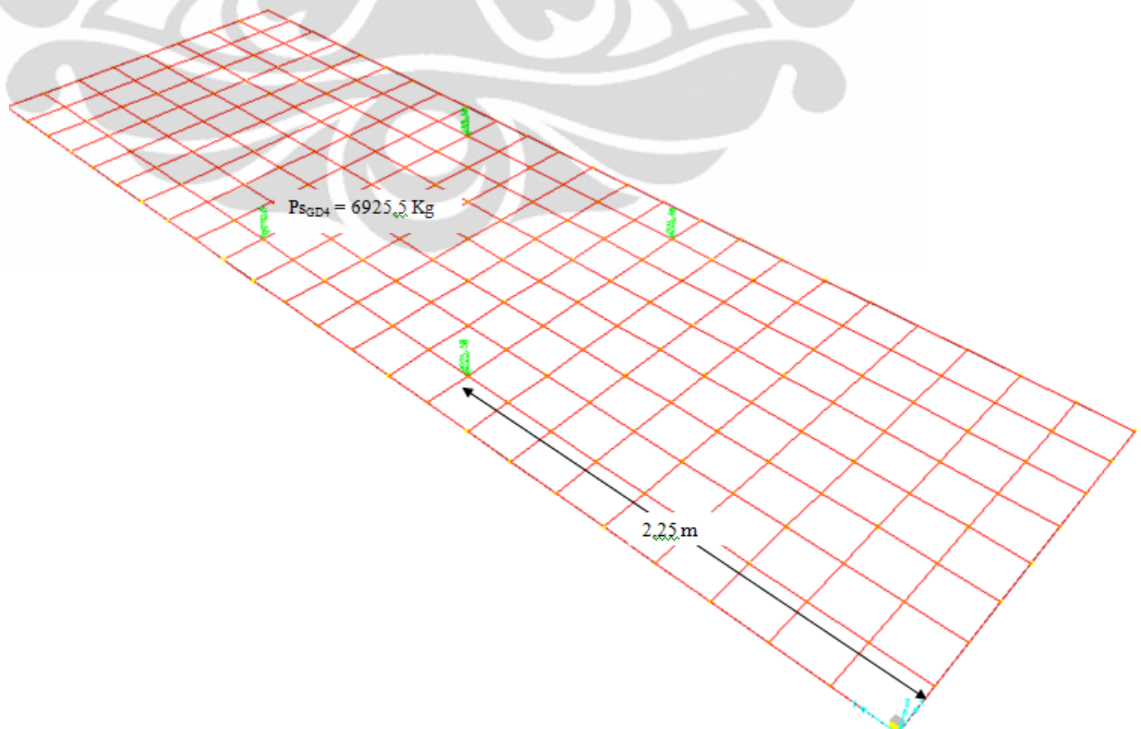


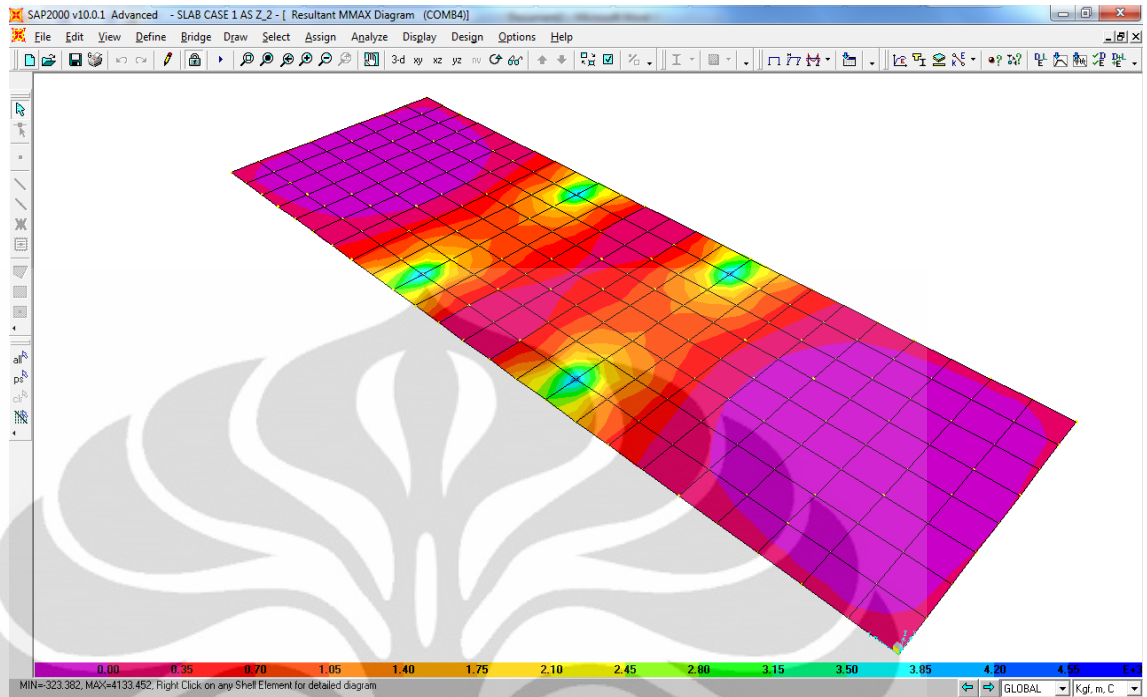


Gambar. Diagram Momen maksimum akibat pengaruh beban rel dan roda gandar trem pada *case 3*

* M_{MAX} bawah rel = 4318,429 kg-m , M_{MIN} tengah bantalan = -551,346 kg-m

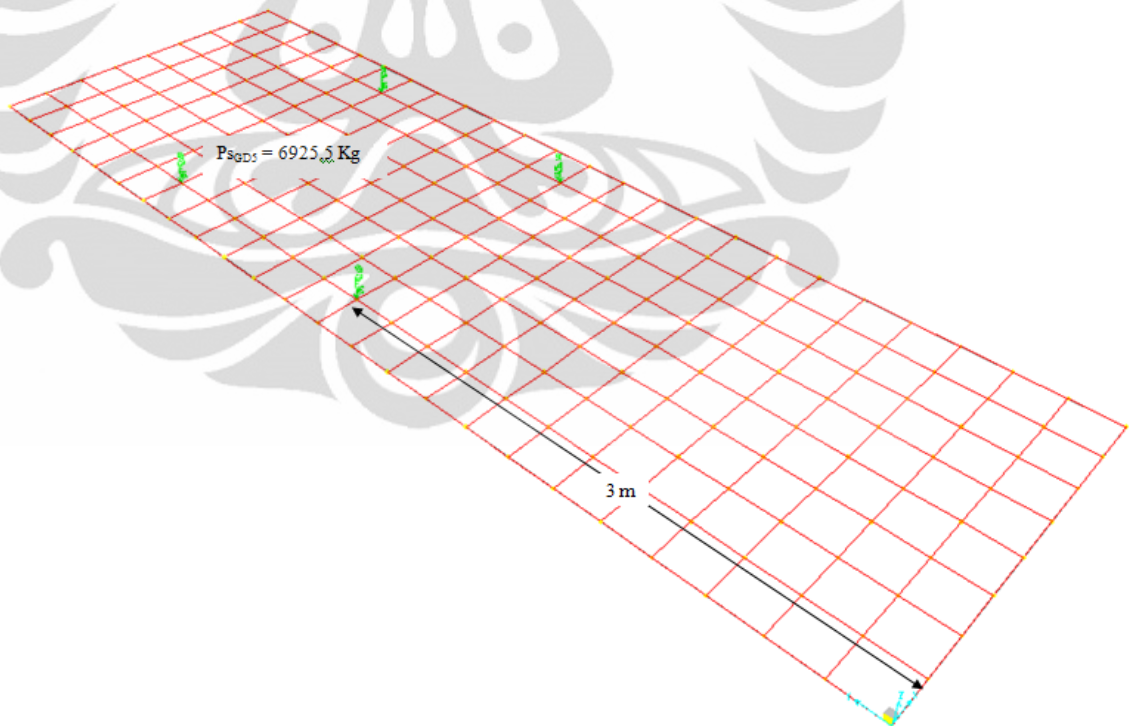
• CASE 4

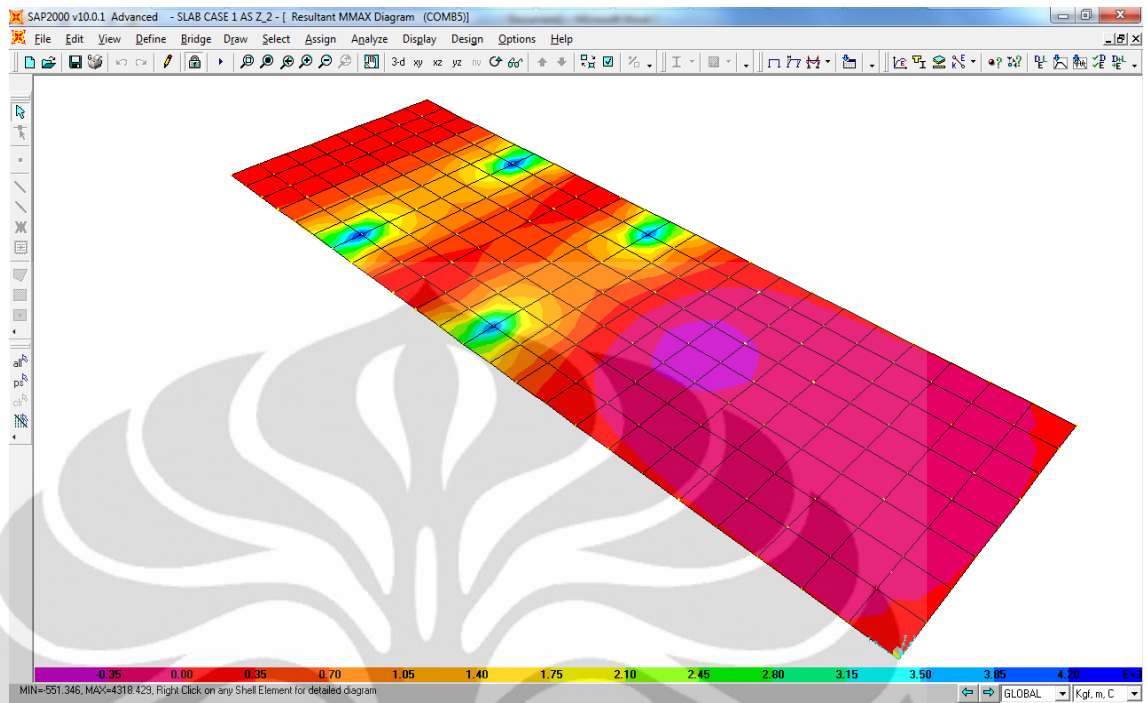




* M_{MAX} bawah rel = 4133,452 kg-m , M_{MIN} tengah bantalan = -323,382 kg-m

• CASE 5

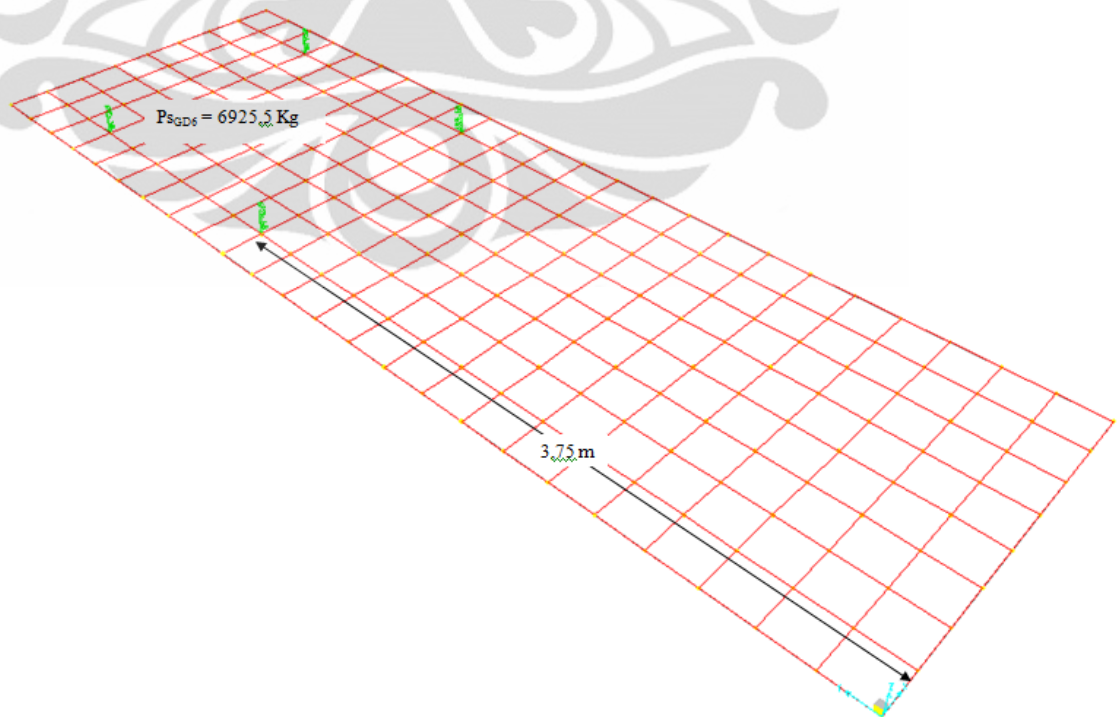


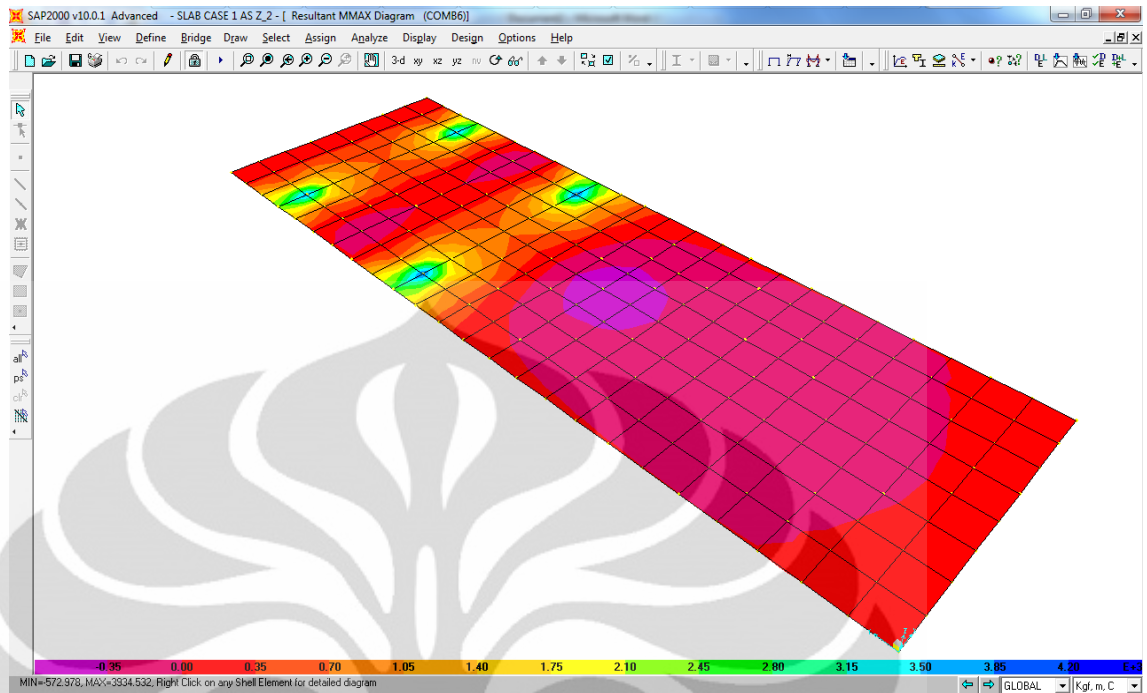


Gambar. Diagram Momen maksimum akibat pengaruh beban rel dan roda gandar trem pada case 5

* M_{MAX} bawah rel = 4318,429 kg-m , M_{MIN} tengah bantalan = -551,346 kg-m

• CASE 6

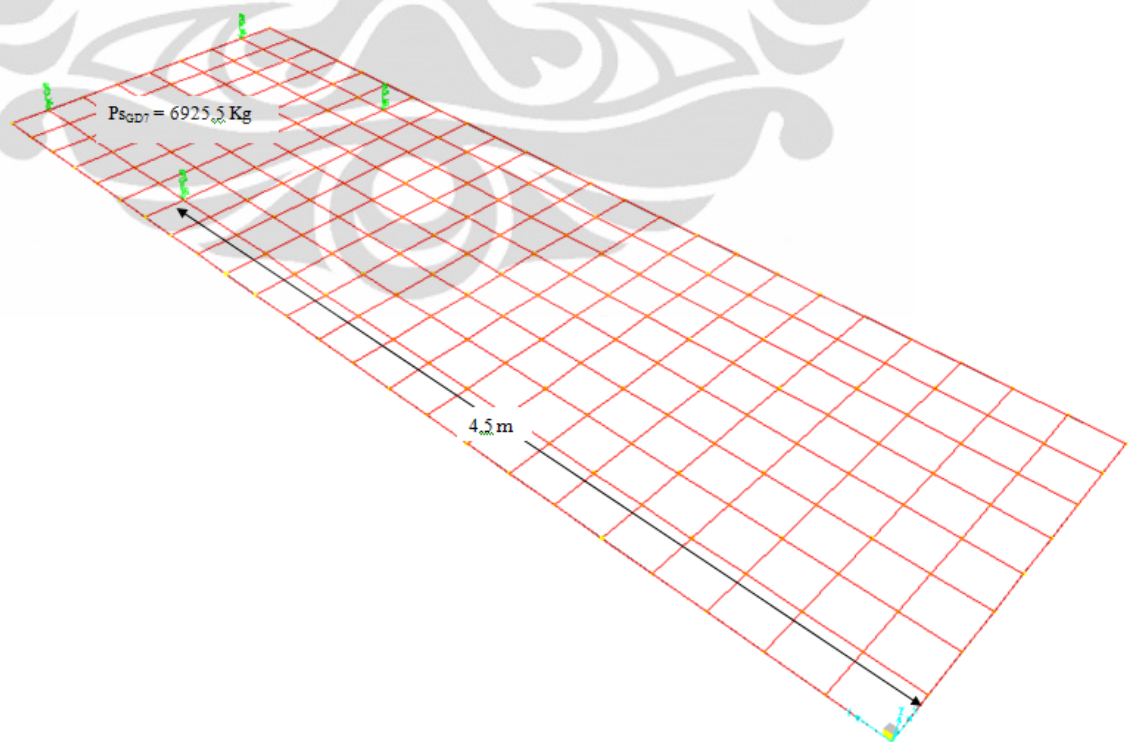


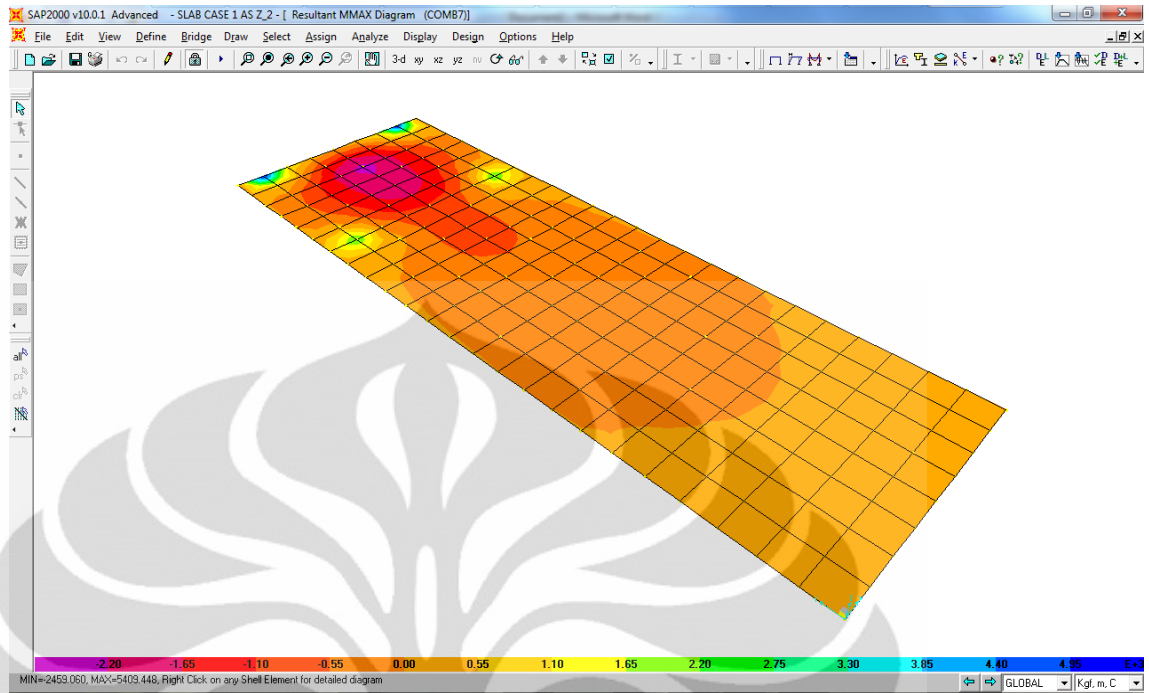


Gambar. Diagram Momen maksimum akibat pengaruh beban rel dan roda gandar trem pada *case 6*

* M_{MAX} bawah rel = 3934,532 kg-m , M_{MIN} tengah bantalan = -572,978 kg-m

• CASE 7





Gambar. Diagram Momen maksimum akibat pengaruh beban rel dan roda gandar trem pada *case 7*

* M_{MAX} bawah rel = 5409,448 kg-m , M_{MIN} tengah bantalan = -2459,06 kg-m

Tabel. Momen maks. positif dan negatif akibat pengaruh beban gandar trem yang berpindah-pindah

CASE	$M_{MAX} +$ (bawah rel / kg-m)	$M_{MAX} -$ (tengah bantalan / kg-m)
1	5409,448	-2459,06
2	3934,532	-572,978
3	4318,429	-551,346
4	4133,452	-323,382
5	4318,429	-551,346
6	3934,532	-572,978
7	5409,448	-2459,06

LAMPIRAN B



ANALISIS ESTIMASI BIAYA KONSTRUKSI ALTERNATIF TIPE BANTALAN

Lampiran 4.01.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan kayu

Biaya investasi kembali untuk mengganti bantalan yang telah mencapai batas waktu umur layannya (n = 15 th)

*Untuk Kayu tahun dan merbau

No Urut	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah (7= 2X5)	Bahan (8= 2X6)
				5	6	1	2
1	2	oh	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	2,000	btg	Pengadaan bantalan kayu lengkap dengan penambat terima didekat lokasi pekerjaan.	-	629,200	-	1,258,400,000
3	2,000	btg	Mengganti bantalan kayu yang rusak	25,750	6,104	51,500,000	12,208,000
4	2,000	btg	Angkut bantalan kayu bekas dari lokasi kerja ke tempat penimbunan	16,650	8,800	33,300,000	17,600,000
5	675	m ³	Mengeluarkan balas kotor	70,750	-	47,756,250	-
6	675	m ³	Memasukkan Balas baru dan mendandang/memecok balas batu pecah	38,925	140,000	25,274,375	94,500,000
7	10	oh	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan.	45,000	-	450,000	-
JUMLAH						159,370,625	1,382,708,000
TOTAL							1,542,078,625
DIBULATKAN							1,542,079,000
Terbilang : Satu milyar lima ratus empat puluh dua juta tujuh puluh sembilan ribu rupiah.							

Lampiran 4.02.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan baja

Biaya investasi kembali untuk mengganti bantalan yang telah mencapai batas waktu umur layannya (n = 30 th)

No Urut	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah (7= 2X5)	Bahan (8= 2X6)
				5	6	7	8
1	2	oh	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	1,667	btg	Pengadaan bantalan baja lengkap dengan penambat terima didekat lokasi pekerjaan.	-	607,500	-	1,012,702,500
3	1,667	btg	Mengganti bantalan baja yang rusak	42,375	71,800	70,639,125	119,690,600
4	1,667	btg	Angkut bantalan baja bekas dari lokasi kerja ke tempat penimbunan	22,500	8,800	37,507,500	14,669,600
5	675	m ³	Mengeluarkan balas kotor	70,750	-	47,756,250	-
6	675	m ³	Memasukkan Balas baru dan mendandang/memecok balas batu pecah	38,925	140,000	26,274,375	94,500,000
7	10	oh	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan.	45,000	-	450,000	-
JUMLAH						182,717,250	1,241,562,700
TOTAL							1,424,279,950
DIBULATKAN							1,424,280,000
Terbilang : Satu milyar empat ratus dua puluh empat juta dua ratus delapan puluh ribu rupiah.							

Lampiran 4.03B: Analisis estimasi biaya re-investasi bantalan beton melintang

Lampiran 4.03.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan beton melintang

Biaya investasi kembali untuk mengganti bantalan beton yang telah mencapai batas waktu umur layannya (n = 20 th)

No Urut	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah	Bahan
						(7= 2X5)	(8= 2X6)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	oh	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	1,429	btg	Pengadaan bantalan beton lengkap dengan penambat terima didekat lokasi pekerjaan.	-	505,000	-	721,645,000
3	1,429	btg	Mengganti bantalan beton yang rusak	42,800	-	61,161,200	-
4	1,429	btg	Angkut bantalan beton bekas dari lokasi kerja ke tempat penimbunan	16,650	8,800	23,792,850	12,575,200
5	675	m ³	Mengeluarkan balas kotor	70,750	-	47,756,250	-
6	675	m ³	Memasukkan Balas baru dan mendandang/memecok balas batu pecah	38,925	140,000	26,274,375	94,500,000
7	10	oh	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan.	45,000	-	450,000	-
JUMLAH						159,524,675	828,720,200
TOTAL							988,244,875
DIBULATKAN							988,245,000
Terbilang : Sembilan ratus delapan puluh delapan juta dua ratus empat puluh lima ribu rupiah.							

Lampiran 4.04B: Analisis estimasi biaya re-investasi bantalan beton menerus

Lampiran 4.04.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan beton menerus

Biaya investasi kembali untuk mengganti bantalan yang telah mencapai batas waktu umur layannya (n = 20 th)

No Urut	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah (7= 2X5)	Bahan (8= 2X6)
				5	6	7	8
1	2	oh	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	334	blok	Pengadaan bantalan beton menerus lengkap dengan penambat	-	2,390,000	-	798,260,000
3	1,667	Btg	Batang penghubung (Volume= 133,5x20x13,5 cm)	-	18,848.33	-	31,420,161
4	334	blok	Mengganti bantalan beton menerus yang rusak	83,300	-	27,822,200	-
5	334	blok	Angkut bantalan beton menerus bekas dari lokasi kerja ke tempat penimbunan	33,300	44,000	11,122,200	14,696,000
6	675	m ³	Mengeluarkan balas kotor	70,750	-	47,756,250	-
7	675	m ³	Memasukkan Balas baru dan mendandang/memecok balas batu pecah	38,925	140,000	26,274,375	94,500,000
8	25	oh	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan.	45,000	-	1,125,000	-
JUMLAH						114,190,025	938,876,161
TOTAL							1,053,066,186
DIBULATKAN							1,053,067,000
Terbilang : Satu milyar lima puluh tiga juta enam puluh tujuh ribu rupiah.							

Lampiran 4.05B: Analisis estimasi biaya re-investasi bantalan *slab track*

Lampiran 4.05.B Analisis estimasi biaya re-investasi dari bantalan *slab track*

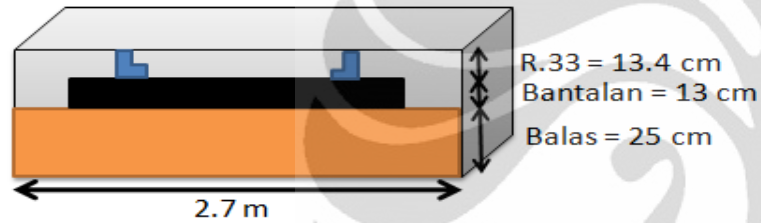
Biaya investasi kembali untuk mengganti bantalan yang telah mencapai batas waktu umur layannya (n = 20 th)

No Urut	Banyaknya	Satuan	PENJELASAN TENTANG PEKERJAAN	Harga Satuan (Rp)		Nilai Pekerjaan (Rp)	
				Jasa / Upah	Bahan	Jasa / Upah (7= 2X5)	Bahan (8= 2X6)
				5	6	7	8
1	2	oh	Ukur mengukur sesuai rencana	45,000	-	90,000	-
2	200	blok	Pengadaan bantalan <i>slab</i> lengkap dengan penambat terima didekat lokasi pekerjaan.	-	5,390,000	-	1,078,000,000
3	200	blok	Mengganti bantalan <i>slab</i> yang rusak	125,500	-	25,100,000	-
4	200	blok	Angkut bantalan <i>slab</i> bekas dari lokasi kerja ke tempat penimbunan	66,600	105,600	13,320,000	21,120,000
5	200	blok	Mengganti rantai kerja yang telah rusak	9,000.00	2,139,000	1,800,000	427,800,000
6	35	oh	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan.	45,000	-	1,575,000	-
JUMLAH						41,885,000	1,526,920,000
TOTAL							1,568,805,000
DIBULATKAN							1,568,805,000
Terbilang : Satu milyar lima ratus enam puluh delapan juta delapan ratus lima ribu rupiah.							

LAMPIRAN 4.06.B. Estimasi volume pekerjaan galian tanah

Bantalan Kayu

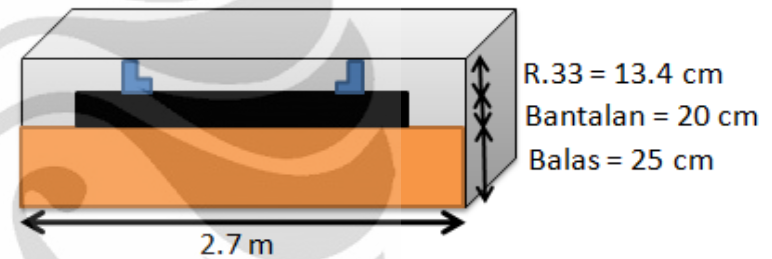
Estimasi volume tanah yang harus digali (persatuan panjang-km)



Total Tinggi tanah galian = 51,4 cm
Volume tanah galian = $(1000 \times 2,7 \times 0,514) \text{ m} = 1387,8 \text{ m}^3$
Luas tanah yang dipadatkan = $(1000 \times 2,7) \text{ m} = 2700 \text{ m}^2$

Bantalan Beton Melintang

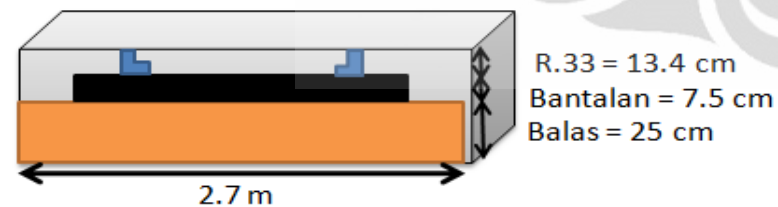
Estimasi volume tanah yang harus digali (persatuan panjang-km)



Total Tinggi tanah galian = 58,4 cm
Volume tanah galian = $(1000 \times 2,7 \times 0,584) \text{ m} = 1576,8 \text{ m}^3$
Luas tanah yang dipadatkan = $(1000 \times 2,7) \text{ m} = 2700 \text{ m}^2$

Bantalan Baja

Estimasi volume tanah yang harus digali (persatuan panjang-km)

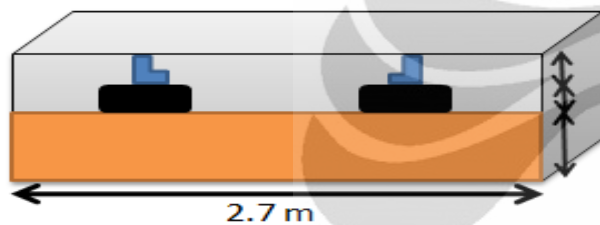


Total Tinggi tanah galian = 45,9 cm
Volume tanah galian = $(1000 \times 2,7 \times 0,459) \text{ m} = 1239,3 \text{ m}^3$
Luas tanah yang dipadatkan = $(1000 \times 2,7) \text{ m} = 2700 \text{ m}^2$

(Lanjutan)

Bantalan Beton Menerus

Estimasi volume tanah yang harus digali (persatuan panjang-km)

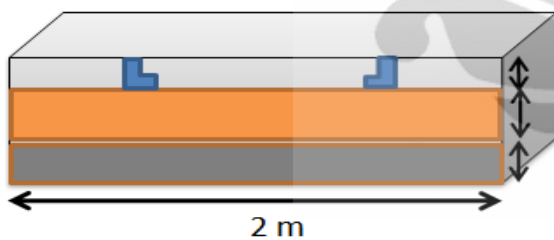


R.33 = 13.4 cm
Bantalan = 20 cm
Balas = 25 cm

Total Tinggi tanah galian = 58,4 cm
Volume tanah galian = $(1000 \times 2,7 \times 0,459) \text{ m} = 1576,8 \text{ m}^3$
Luas tanah yang dipadatkan = $(1000 \times 2,7) \text{ m} = 2700 \text{ m}^2$

Bantalan Slab

Estimasi volume tanah yang harus digali (persatuan panjang-km)



R.33 = 13.4 cm
Slab beton = 20 cm
Lantai kerja = 15 cm

Total Tinggi tanah galian = 48,4 cm
Volume tanah galian = $(1000 \times 2 \times 0,484) \text{ m} = 968 \text{ m}^3$
Luas tanah yang dipadatkan = $(1000 \times 2) \text{ m} = 2000 \text{ m}^2$

Lampiran 4.07B: RAB Konstruksi tipe bantalan kayu melintang

**Lampiran 4.07. B. RAB Konstruksi tipe bantalan kayu melintang
Analisis Harga Satuan**

NO	URAIAN PEKERJAAN	KOEFS	KOEFS RAP	SAT	HARGA SATUAN			JUMLAH			TOTAL
					bahan	upah	alat/angkut	bahan	upah	alat/angkut	
A	B	D	D'	E	F	G	H	I=D'x F	J=D'x G	K=D'x H	L=I+J+K
			1.000								
»	PEKERJAAN PERSIAPAN										
1	2 OH Ukur mengukur sesuai rencana	1.0000	2.000	OH		45,000.00		0.00	90,000.00	0.00	90,000.00
»	PEKERJAAN TANAH										
2	1 m3 Mengerjakan galian tanah							0.00	70,750.00	875.00	71,625.00
	Upah										
	Mandor	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
	Pekerja	1.5000	1.500	OH		45,000.00			67,500.00		
	Alat										
	Pacul	0.0250	0.025	bh			35,000.00			875.00	
3	1 m2 Pematatan tanah dasar							0.00	25,750.00	3750.00	29,500.00
	Upah										
	Mandor	0.0500	0.050			65,000.00			3,250.00		
	Pekerja	0.5000	0.500			45,000.00			22,500.00		
	Alat										
	Timbrisan Tanah	0.125	0.125				30,000.00			3,750.00	
»	PEKERJAAN BALAS										
	- Pengadaan material balas										
	- Menghampar balas kricak uk.2/6 cm (bongkar dan ecer di lokasi)										
4	1 m3 Pengadaan Material Balas batu pecah kricak							140,000.000	0.00	0.00	140,000.00
	Bahan										
	Balas kricak uk. 2/6 cm	1.0000	1.000	m3	140,000.00			140,000.00			
	Upah bongkar dan ecer di lokasi							0.00	16,335.00	0.00	16,335.00
	Mandor	0.0090	0.009	OH		65,000.00			585.00		
	Pekerja	0.3500	0.350	OH		45,000.00			15,750.00		

Lampiran 4.07B: RAB Konstruksi tipe bantalan kayu melintang (Lanjutan)

			Upah Pekerja	0.3700	0.370	OH		45,000.00					
			Bahan pendukung kawat pral	0.5000	0.500	kg	17,600.00		8,800.00		16,650.00		
			Mengganti dan Menguras Balas										
9	1	m3	Mengeluarkan balas kotor						0.00		70,750.00	0.00	70,750.00
			Upah Mandor	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
			Pekerja	1.5000	1.500	OH		45,000.00			67,500.00		
10	1	m3	Mengayak balas kotor dan memasukkan kembali balas bersih -25%						0.00		33,912.50	0.00	33,912.50
			Upah Mandor	0.0025	0.003	OH		65,000.00			163.00		
			Pekerja	0.7500	0.750	OH		45,000.00			33,750.00		
	1	m3	Memasukkan Balas baru dan mendandang/memecok balas batu pecah						0.00		38,925.00	0.00	38,925.00
			Upah Mandor	0.0027	0.027	OH		65,000.00			1,775.00		
			Pekerja	0.8260	0.826	OH		45,000.00			37,170.00		
11	10	OH	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan						0.00		450,000.00	0.00	450,000.00
			Upah Pekerja	10.0000	10.000	OH		45,000.00			450,000.00		

➤ Keterangan : Pada analisis ini menggunakan 2 koefisien yang berbeda

1. **Koefisien SNI** = Koefisien yang dijadikan standar oleh pemerintah, data koefisien di peroleh dari PUSLITBANG
2. **Koefisien RAP (Rencana Anggaran Proyek)** = Koefisien yang real di lapangan sesuai dengan analisa dari berbagai proyek dan kesanggupan/penawaran Mandor.

Lampiran 4.08B: RAB Konstruksi tipe bantalan baja melintang

**Lampiran 4.08.B. RAB Konstruksi tipe bantalan baja melintang
Analisis Harga Satuan**

NO	URAIAN PEKERJAAN	KOEf	KOEf RAP	SAT	HARGA SATUAN			JUMLAH			TOTAL
					bahan	upah	alat/angkut	bahan	upah	alat/angkut	
A	B	D	D'	E	F	G	H	I=D'xF	J=D'xG	K=D'xH	L=I+J+K
			1.000								
»	PEKERJAAN PERSIAPAN										
1	2 OH Ukur mengukur sesuai rencana	1.0000	2.000	OH		45,000.00		0.00	90,000.00	0.00	90,000.00
»	PEKERJAAN TANAH										
2	1 m3 Mengerjakan galian tanah							0.00	70,750.00	875.00	71,625.00
	Upah	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
	Mandor	1.5000	1.500	OH		45,000.00			67,500.00		
	Pekerja										
	Alat	0.0250	0.025	bh			35,000.00			875.00	
	Pacul										
3	1 m2 Pematatan tanah dasar							0.00	25,750.00	3750	29,500.00
	Upah	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
	Mandor	0.5000	0.500	OH		45,000.00			22,500.00		
	Pekerja										
	Alat	0.125	0.125	bh			30,000.00			3,750.00	
	Timbrisan Tanah										
»	PEKERJAAN BALAS										
	- Pengadaan material balas										
	- Menghampar balas kricak uk.2/6 cm (bongkar dan ecer di lokasi)										
4	1 m3 Pengadaan Material Balas batu kricak							140,000.000	0.00	0.00	140,000.00
	Bahan										
	Balas kricak uk. 2/6 cm	1.0000	1.000	m3	140,000.00			140,000.00			
	Upah bongkar dan ecer di lokasi							0.00	16,335.00	0.00	16,335.00
	Mandor	0.0090	0.009	OH		65,000.00			585.00		

Lampiran 4.08B: RAB Konstruksi tipe bantalan baja melintang (Lanjutan)

»		Pekerja	0.3500	0.350	OH		45,000.00		15,750.00		
		PEKERJAAN KONSTRUKSI BANTALAN									
		- Pengadaan bantalan lengkap dengan penambat							607,500.00		
		- Memasang bantalan di lokasi sekaligus mengangkat dan mengecer bantalan (mengelas baseplat pada bantalan baja/btg)							71,800.00	33,825.00	
5	1	btg Pengadaan bantalan kayu melintang lengkap dengan penambat	1.0000	1.000	btg	607,500.00		607,500.00	0.00	0.00	607,500.00
6	1	btg Memasang bantalan di lokasi						0.00	10,700.00	0.00	10,700.00
		Upah									
		Mandor	0.0400	0.040	OH		65,000.00		2,600.00		
		Pekerja	0.1800	0.180	OH		45,000.00		8,100.00		
	1	btg Mengelas baseplat pada bantalan baja						71,800.00	23,125.00	0.00	
		Upah									
		Tukang Las	0.1500	0.150	OH		60,000.00		9,000.00		
		Tukang gerinda	0.0950	0.095	OH		55,000.00		5,225.00		
		Pengawas Las	0.0850	0.085	OH		65,000.00		5,525.00		
		Pekerja	0.0750	0.075	OH		45,000.00		3,375.00		
		Bahan dan Alat									
		Oxigen	0.0300	0.030	tbg	90,000.00		2,700.00			
		Acetylin	0.0100	0.010	tbg	104,500.00		1,045.00			
		Bensin	0.0500	0.050	ltr	6,500.00		325.00			
		Oli SAE 40	0.0100	0.010	ltr	29,000.00		290.00			
		Batu gerinda tangan	0.0800	0.080	bh	44,000.00		3,520.00			
		Solar	0.7500	0.750	ltr	5,500.00		4,125.00			
		Kawat Las elektroda	0.8500	0.850	kg	62,500.00		53,125.00			
		Kain Lap	0.0200	0.020	bh	8,500.00		170.00			
		Sewa mesin las	0.0500	0.050	hr	130,000.00		6,500.00			
»		PEKERJAAN PEMELIHARAAN BANTALAN BAJA									
		- Melepas alat penambat dan mengeluarkan bantalan lama									
		- Mengorek balas dan memecok kembali sampai padat									
		- Memasang bantalan baja									
7	1	btg Mengganti bantalan baja melintang yang rusak di lokasi dan mengelas baseplat						71,800.00	42,375.00	0.00	
		Upah									
		Mandor	0.0400	0.040	OH		65,000.00		2,600.00		

Lampiran 4.08B: RAB Konstruksi tipe bantalan baja melintang (Lanjutan)

			Pekerja Mengelas baseplat pada bantalan baja Upah Bahan dan Alat	0.3700	0.370	OH		45,000.00					
									71,800.00	16,650.00			
										23,125.00			
8	1	btg	Angkut bantalan baja bekas dari lokasi kerja ke tempat penimbunan										
			- Muat dan bongkar bantalan baja/btg Upah Pekerja Bahan pendukung kawat pral	0.5000	0.500	OH		45,000.00		22,500.00			
				0.5000	0.500	kg	17,600.00		8,800.00				
			Mengganti dan Menguras Balas										
9	1	m3	Mengeluarkan balas kotor										
			Upah Mandor Pekerja	0.0500 1.5000	0.050 1.500	OH OH		65,000.00 45,000.00		3,250.00 67,500.00			
10	1	m3	Mengayak balas kotor dan memasukkan kembali balas bersih -25%										
			Upah Mandor Pekerja	0.0025 0.7500	0.003 0.750	OH OH		65,000.00 45,000.00		163.00 33,750.00			
	1	m3	Memasukkan Balas baru dan mendandang/memecok balas batu pecah										
			Upah Mandor Pekerja	0.0027 0.8260	0.027 0.826	OH OH		65,000.00 45,000.00		1,775.00 37,170.00			
11	10	OH	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan										
			Upah Pekerja	10.0000	10.000	OH		45,000.00		450,000.00			

➤ Keterangan : Pada analisis ini menggunakan 2 koefisien yang berbeda

1. **Koefisien SNI** = Koefisien yang dijadikan standar oleh pemerintah, data koefisien di peroleh dari PUSLITBANG
2. **Koefisien RAP (Rencana Anggaran Proyek)** = Koefisien yang real di lapangan sesuai dengan analisa dari berbagai proyek dan kesanggupan/penawaran Mandor.

Lampiran 4.09B: RAB Konstruksi tipe bantalan beton melintang

**Lampiran 4.09.B. RAB Konstruksi tipe bantalan beton melintang
Analisis Harga Satuan**

NO	URAIAN PEKERJAAN		KOEK	KOEK RAP	SAT	HARGA SATUAN			JUMLAH			TOTAL
						bahan	upah	alat/angkut	bahan	upah	alat/angkut	
A	B		D	D'	E	F	G	H	I=D'x F	J=D'x G	K=D'x H	L=I+J+K
				1.000								
»	PEKERJAAN PERSIAPAN											
1	2	OH Ukur mengukur sesuai rencana	1.0000	2.000	OH		45,000.00		0.00	90,000.00	0.00	90,000.00
»	PEKERJAAN TANAH											
2	1	m3 Pekerjaan galian tanah							0.00	70,750.00	875.00	71,625.00
		Upah										
		Mandor	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
		Pekerja	1.5000	1.500	OH		45,000.00			67,500.00		
		Alat										
		Pacul	0.0250	0.025	bh			35,000.00			875.00	
3	1	m2 Pematatan tanah dasar							0.00	25,750.00	3750	29,500.00
		Upah										
		Mandor	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
		Pekerja	0.5000	0.500	OH		45,000.00			22,500.00		
		Alat										
		Timbrisan Tanah	0.125	0.125	bh			30,000.00			3,750.00	
»	PEKERJAAN BALAS											
		- Pengadaan material balas										
		- Menghampar balas kricak uk.2/6 cm (bongkar dan ecer di lokasi)										
4	1	m3 Pengadaan Material Balas batu pecah							140,000.000	0.00	0.00	140,000.00
		Bahan										
		Balas kricak uk. 2/6 cm	1.0000	1.000	m3	140,000.00			140,000.00			
		Upah bongkar dan ecer di lokasi							0.00	16,335.00	0.00	16,335.00
		Mandor	0.0090	0.009	OH		65,000.00			585.00		
		Pekerja	0.3500	0.350	OH		45,000.00			15,750.00		

Lampiran 4.09B: RAB Konstruksi tipe bantalan beton melintang (Lanjutan)

9	1	m3	Mengeluarkan balas kotor					0.00	70,750.00	0.00	70,750.00
			Upah Mandor Pekerja	0.0500 1.5000	0.050 1.500	OH OH	65,000.00 45,000.00		3,250.00 67,500.00		
10	1	m3	Mengayak balas kotor dan memasukkan kembali balas bersih -25%					0.00	33,912.50	0.00	33,912.50
			Upah Mandor Pekerja	0.0025 0.7500	0.003 0.750	OH OH	65,000.00 45,000.00		163.00 33,750.00		
	1	m3	Memasukkan Balas baru dan mendandang/memecok balas batu pecah					0.00	38,925.00	0.00	38,925.00
			Upah Mandor Pekerja	0.0027 0.8260	0.027 0.826	OH OH	65,000.00 45,000.00		1,775.00 37,170.00		
11	10	OH	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan					0.00	450,000.00	0.00	450,000.00
			Upah Pekerja	10.0000	10.000	OH	45,000.00		450,000.00		

➤ Keterangan : Pada analisis ini menggunakan 2 koefisien yang berbeda

1. **Koefisien SNI** = Koefisien yang dijadikan standar oleh pemerintah, data koefisien di peroleh dari PUSLITBANG
2. **Koefisien RAP (Rencana Anggaran Proyek)** = Koefisien yang real di lapangan sesuai dengan analisa dari berbagai proyek dan kesanggupan/penawaran Mandor.

Lampiran 4.10B: RAB Konstruksi tipe bantalan beton menerus

**Lampiran 4.10.B. RAB Konstruksi tipe bantalan beton menerus
Analisis Harga Satuan**

NO	URAIAN PEKERJAAN	KOEK	KOEK RAP	SAT	HARGA SATUAN			JUMLAH			TOTAL
					bahan	upah	alat/angkut	bahan	upah	alat/angkut	
A	B	D	D'	E	F	G	H	I=D'xH	J=D'xG	K=D'xH	L=I+J+K
			1.000								
»	PEKERJAAN PERSIAPAN										
1	2 OH Ukur mengukur sesuai rencana	1.0000	2.000	OH		45,000.00		0.00	90,000.00	0.00	90,000.00
»	PEKERJAAN TANAH										
2	1 m3 Pekerjaan galian tanah							0.00	70,750.00	875	71,625.00
	Upah										
	Mandor	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
	Pekerja	1.5000	1.500	OH		45,000.00			67,500.00		
	Alat										
	Pacul	0.0250	0.025	bh			35,000.00			875.00	
3	1 m2 Pematatan tanah dasar							0.00	25,750.00	3750	29,500.00
	Upah										
	Mandor	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
	Pekerja	0.5000	0.500	OH		45,000.00			22,500.00		
	Alat										
	Timbrisan Tanah	0.125	0.125	bh			30,000.00			3,750.00	
»	PEKERJAAN BALAS										
	- Pengadaan material balas										
	- Menghampar balas kricak uk.2/6 cm (bongkar dan ecer di lokasi)										
4	1 m3 Pengadaan Material Balas batu pecah							140,000.000	0.00	0.00	140,000.00
	Bahan										
	Balas kricak uk. 2/6 cm	1.0000	1.000	m3	140,000.00			140,000.00			
	Upah bongkar dan ecer di lokasi							0.00	16,335.00	0.00	16,335.00
	Mandor	0.0090	0.009	OH		65,000.00			585.00		
	Pekerja	0.3500	0.350	OH		45,000.00			15,750.00		
»	PEKERJAAN KONSTRUKSI BANTALAN										
	- Pengadaan bantalan lengkap dengan penambat							2,390,000.00			

Lampiran 4.10B: RAB Konstruksi tipe bantalan beton menerus (Lanjutan)

			- Memasang bantalan di lokasi sekaligus mengangkat dan mengecer bantalan (menyetel dan mengebor pada bagian alat penambat)					44,000.00	59,900.00	75.75	
5	1	blok	Pengadaan bantalan beton menerus lengkap dengan penambat	1.0000	1.000	blok	2,390,000.00	2,390,000.00	0.00	0.00	2,390,000.00
	1	btg	Batang penghubung	0.0360	0.036	m3	522,911.00	18,848.33			18,848.33
6	1	blok	Memasang bantalan di lokasi					44,000.00	59,900.00	75.75	
			Upah								
			Mandor	0.1600	0.160	OH	65,000.00		10,400.00		
			Pekerja	1.1000	1.100	OH	45,000.00		49,500.00		
			Alat								
			Alat bantu	0.0010	0.001	buah		75,750.00		75.75	
			Bahan pendukung								
			kawat pral	2.5000	2.500	kg	17,600.00	44,000.00			
			PEKERJAAN PEMELIHARAAN BANTALAN BETON MENERUS								
			- Melepas alat penambat dan mengeluarkan bantalan lama								
			- Mengorek balas dan memecok kembali sampai padat								
			- Memasang bantalan beton								
7	1	blok	Mengganti bantalan beton menerus yang rusak di lokasi					0.00	83,300.00	0.00	83,300.00
			Upah								
			Mandor	0.1600	0.160	OH	65,000.00		10,400.00		
			Pekerja	1.6200	1.620	OH	45,000.00		72,900.00		
8	1	btg	Angkut bantalan beton menerus bekas dari lokasi kerja ke tempat penimbunan					44,000.00	33,300.00	0.00	
			- Muat dan bongkar bantalan beton menerus/btg								
			Upah								
			Pekerja	0.7400	0.740	OH	45,000.00		33,300.00		
			Bahan pendukung								
			kawat pral	2.5000	2.500	kg	17,600.00	44,000.00			
			Mengganti dan Menguras Balas								
9	1	m3	Mengeluarkan balas kotor					0.00	70,750.00	0.00	70,750.00
			Upah								

Lampiran 4.10B: RAB Konstruksi tipe bantalan beton menerus (Lanjutan)

			Mandor	0.0500	0.050	OH		65,000.00		3,250.00			
			Pekerja	1.5000	1.500	OH		45,000.00		67,500.00			
10	1	m3	Mengayak balas kotor dan memasukkan kembali balas bersih - 25%							0.00	33,912.50	0.00	33,912.50
			Upah Mandor	0.0025	0.003	OH		65,000.00		163.00			
			Pekerja	0.7500	0.750	OH		45,000.00		33,750.00			
	1	m3	Memasukkan Balas baru dan mendandang/memecok balas batu pecah							0.00	38,925.00	0.00	38,925.00
			Upah Mandor	0.0027	0.027	OH		65,000.00		1,775.00			
			Pekerja	0.8260	0.826	OH		45,000.00		37,170.00			
11	25	OH	Merapihkan kembali bekas lokasi pekerjaan							0.00	1,125,000.00	0.00	1,125,000.00
			Upah Pekerja	1.0000	25.000	OH		45,000.00		1,125,000.00			

- Keterangan : Pada analisis ini menggunakan 2 koefisien yang berbeda
1. **Koefisien SNI** = Koefisien yang dijadikan standar oleh pemerintah, data koefisien di peroleh dari PUSLITBANG
 2. **Koefisien RAP (Rencana Anggaran Proyek)** = Koefisien yang real di lapangan sesuai dengan analisa dari berbagai proyek dan kesanggupan/penawaran Mandor.

Lampiran 4.11B: RAB Konstruksi tipe bantalan *slab track*

**Lampiran 4.11.B. RAB Konstruksi tipe bantalan *slab track*
Analisis Harga Satuan**

NO	URAIAN PEKERJAAN	KOEK	KOEK RAP	SAT	HARGA SATUAN			JUMLAH			TOTAL
					bahan	upah	alat/angkut	bahan	upah	alat/angkut	
A	B	D	D'	E	F	G	H	I=D'xH	J=D'xG	K=D'xH	L=I+J+K
			1.000								
»	PEKERJAAN PERSIAPAN										
1	2 OH Ukur mengukur sesuai rencana	1.0000	2.000	OH		45,000.00		0.00	90,000.00	0.00	90,000.00
»	PEKERJAAN TANAH										
2	1 m3 Pekerjaan galian tanah							0.00	70,750.00	875.00	71,625.00
	Upah	0.0500	0.050	OH		65,000.00			3,250.00		
	Mandor	1.5000	1.500	OH		45,000.00			67,500.00		
	Pekerja										
	Alat										
	Pacul	0.0250	0.025	bh			35,000.00			875.00	
3	1 m2 Pemadatan tanah dasar							0.00	25,750.00	3750.00	29,500.00
	Upah	0.0500	0.050			65,000.00			3,250.00		
	Mandor	0.5000	0.500			45,000.00			22,500.00		
	Pekerja										
	Alat										
	Timbrisan Tanah	0.125	0.125				30,000.00			3,750.00	
»	PEKERJAAN KONSTRUKSI BANTALAN										
	- Pengadaan bantalan lengkap dengan penambat							5,390,000.00			
	- Membuat lantai kerja dengan stabilisasi beton mutu rendah							2,139,000.00	67,500.00		
	- Memasang bantalan di lokasi sekaligus mengangkut dan mengecer bantalan							105,600.00	85,900.00	75.75	
	(menyetel dan mengebor pada bagian alat penambat)										
5	1 blok Pengadaan bantalan <i>slab track</i> lengkap dengan penambat	1.0000	1.000	blok	5,390,000.00			5,390,000.00	0.00	0.00	5,390,000.00
6	Membuat lantai kerja vol. 5x2x0.15 m' = 1.5 m3							2,139,000.00	67,500.00	0.00	
	Upah	0.7500	0.750	OH		90,000.00			67,500.00		
	Pekerja										

Lampiran 4.11B: RAB Konstruksi tipe bantalan slab track (Lanjutan)

		Bahan Pelat beton mutu K-175/Blok Besi beton ulir U.320	1.5000 80.0000	1.500 80.000	m3 kg	850,000.00 10,800.00		1,275,000.00 864,000.00			
7	1	blok Memasang bantalan di lokasi						105,600.00	85,900.00	75.75	
»		Upah Mandor Pekerja Alat Alat bantu Bahan pendukung kawat pral	0.2000 1.6200 0.0010 6.0000	0.200 1.620 0.001 6.000	OH OH buah kg	65,000.00 45,000.00 75,750.00 17,600.00		105,600.00	13,000 72,900.00	75.75	
		PEKERJAAN PEMELIHARAAN BANTALAN - Melepas alat penambat dan mengeluarkan bantalan lama - Mengorek balas dan memecok kembali sampai padat - Memasang bantalan									
7	1	blok Mengganti bantalan slab track yang rusak di lokasi						0.00	125,500.00	0.00	125,500.00
		Upah Mandor Pekerja	0.2000 2.5000	0.200 2.500	OH OH	65,000.00 45,000.00			13,000.00 112,500.00		
8	1	blok Angkut bantalan slab track bekas dari lokasi kerja ke tempat penimbunan - Muat dan bongkar bantalan slab/blok						105,600.00	66,600.00	0.00	
		Upah Pekerja Bahan pendukung kawat pral	1.4800 6.0000	1.480 6.000	OH kg	45,000.00 17,600.00		105,600.00	66,600.00		
9	1	blok Mengganti lantai kerja yang telah rusak - bongkar dan membuat lantai kerja baru/blok						2,139,000.00	9,000.00	0.00	
		Upah Pekerja Bahan Pelat beton mutu K-175/Blok Besi beton ulir U.320	0.1000 1.5000 80.0000	0.100 1.500 80.000	OH m3 kg	90,000.00 850,000.00 10,800.00		1,275,000.00 864,000.00	9,000.00		

Lampiran 4.12.B. Perhitungan bahan bantalan beton menerus

1. 1 Blok/Segmen bantalan beton menerus

RINCIAN ANGGARAN BIAYA UNTUK MEMBUAT 1 BLOK BANTALAN BETON MENERUS

No.	Bahan	SAT	KOEF	HARGA SATUAN BAHAN (Rp)	JUMLAH HARGA (Rp)
1	BALOK BETON - K-500	m ³	0.36	1,500,000.00	540,000.00
2	PEMBESIAN ULIR U-32	kg	100.00	10,800.00	1,080,000.00
3	ALAT PENAMBAT				
	SHOULDER	bh	10	30,000.00	300,000.00
	PANDROL CLIP	bh	10	23,500.00	235,000.00
	INSULATOR	bh	10	12,000.00	120,000.00
	RAILPAD	bh	10	11,500.00	115,000.00
				TOTAL =	2,390,000.00
				PEMBULATAN	2,390,000.00

2. RAB pembuatan 1 m³ batang penghubung

KEBUTUHAN		SATUAN	INDEKS	HARGA SATUAN BAHAN/UPAH (Rp.)	JUMLAH (Rp.)
Bahan	PC	kg	448	400	179,200
	PB	kg	667	63	42,021
	KR (maksimum 30 mm)	kg	1,000	57	57,000
	Air	Liter	215	5	1,075
Tenaga kerja	Pekerja	OH	2.100	30,000	63,000
	Tukang batu	OH	0.350	40,000	14,000
	Kepala tukang	OH	0.035	50,000	1,750
	Mandor	OH	0.105	60,000	6,300
Jumlah harga satuan pekerjaan (Rp.)					364,346

Sumber : (SNI 7394:2008) Tata cara perhitungan harga satuan pekerjaan beton

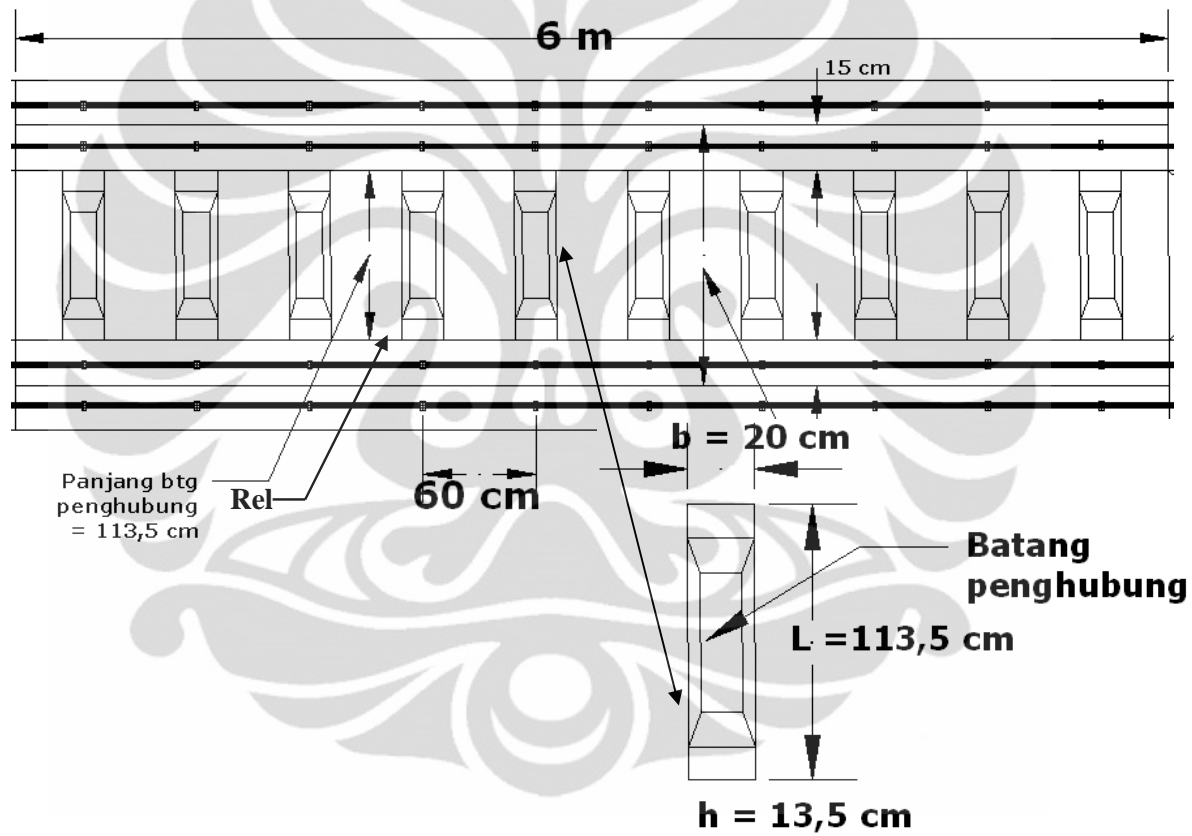
Ket. : Membuat 1m³ beton mutu $f_c' = 31,2$ MPa (K 350), slump (12 ± 2) cm, w/c = 0,48.

- Pembesian

Kebutuhan		Satuan	Indeks	Harga Satuan Bahan/Upah (Rp.)	Jumlah (Rp.)
Bahan	Besi ulir U.32	kg	10.5	8,500	89,250
	Kawat beton	kg	0.15	19,500	2,925
Tenaga kerja	Pekerja	OH	2.100	30,000	63,000
	Tukang besi	OH	0.070	40,000	2,800
	Kepala tukang	OH	0.007	50,000	350
	Mandor	OH	0.004	60,000	240
Jumlah harga satuan pekerjaan (Rp.)					158,565

- Jadi untuk pembuatan 1 m³ batang penghubung diperlukan biaya = Rp. 364,346 + Rp. 158,565 = Rp. 522,911. *Jadi harga 1 batang penghubung dengan volume (133,5 x 20 x 13,5) cm : koef x harga satuan bahan = 0,036 m³ x Rp. 522,911 = Rp. 18,848.33

Desain bantalan beton menerus/segmen



Lampiran 4.13.B. Perhitungan bahan bantalan *slab track*

1. 1 Blok/segmen bantalan *Slab Track*

Rincian anggaran biaya untuk membuat 1 blok bantalan slab track

No.	BAHAN	SAT	KOEF	HARGA SATUAN BAHAN (Rp)	JUMLAH HARGA (Rp)
1	PELAT BETON - K-500 (vol= 5x2x0.2) m	m ³	2.00	1,500,000.00	3,000,000.00
2	PEMBESIAN ULIR U-32	kg	150.00	10,800.00	1,620,000.00
3	ALAT PENAMBAT				
	SHOULDER	bh	10	30,000.00	300,000.00
	PANDROL CLIP	bh	10	23,500.00	235,000.00
	INSULATOR	bh	10	12,000.00	120,000.00
	RAILPAD	bh	10	11,500.00	115,000.00
				TOTAL =	5,390,000.00

2. 1 Blok/segmen rantai kerja

No.	BAHAN	SAT	KOEF	HARGA SATUAN BAHAN (Rp)	JUMLAH HARGA (Rp)
1	PELAT BETON - K-175/Blok	m3	1.50	850,000.00	1,275,000.00
2	Pembesian Ulir	kg	80.000	10,800.00	864,000.00
3	Upah Tk.Batu+Kenek	hr	0.750	90,000.00	67,500.00
HARGA BAHAN					2,139,000.00
HARGA UPAH PEKERJAAN					67,500.00

TIPE BANTALAN BETON



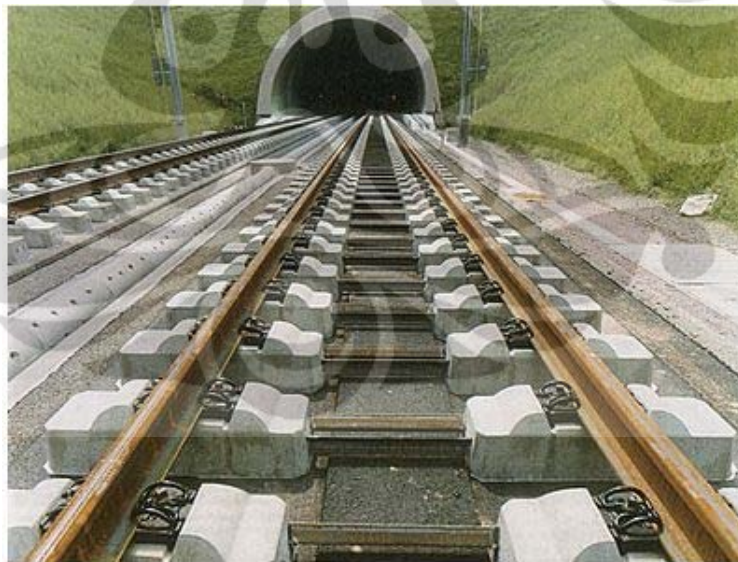
BANTALAN BETON MELINTANG



TIPE BANTALAN BETON



Figure 1. Independent Dual-Block Track (IDBT) at the demonstration site.



BANTALAN BETON BLOK GANDA

Lampiran 4.14B: Gambar variasi
jenis tipe bantalan beton

TIPE BANTALAN BETON



BANTALAN BETON MENERUS

TIPE BANTALAN BETON



BANTALAN *SLAB TRACK*