

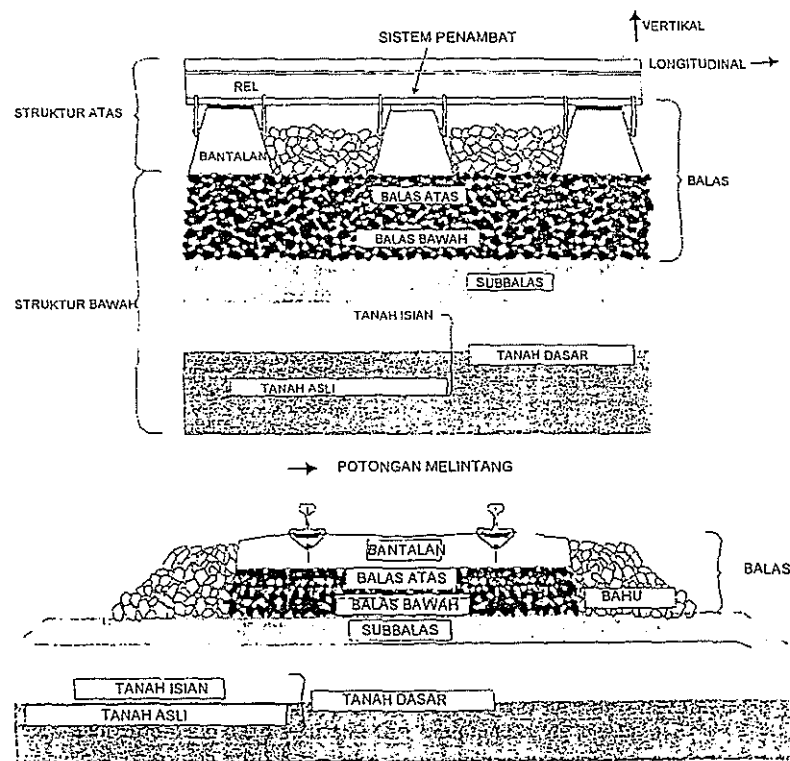
BAB I

KOMPONEN STRUKTUR JALAN REL DAN PEMBEBANANNYA

1.1 STRUKTUR JALAN REL

Struktur jalan rel adalah struktur elastis, dengan pola distribusi beban yang cukup rumit, sebagai gambaran adalah tegangan kontak antara rel dan roda adalah sekitar 6000 kg/cm^2 , dan harus ditransfer ke tanah dasar yang berkekuatan hanya sekitar 2 kg/cm^2 .

Secara grafis struktur jalan rel dapat digambarkan sebagai berikut :



Sumber : Track Geotechnology and Substructure Management

Gambar 1.1
Struktur Jalan Rel dan Komponennya

Secara garis besar struktur jalan rel yang baik, harus dapat menjamin keamanan, kenyamanan, umur teknis dan geometri (lebar sepur, ketidakrataan), dan dapat dipelihara dengan biaya yang optimal, sehingga harus memenuhi kriteria sebagai berikut :

- **Kekakuan (*stiffness*)**, untuk menjaga deformasi vertikal, dimana deformasi vertikal ini merupakan indikator utama dari umur, kekuatan dan kualitas jalan rel.
Deformasi vertikal yang berlebihan akan menyebabkan geometri jalan rel tidak baik dan keausan yang besar diantara komponen-komponen struktur jalan rel.
- **Elastisitas (*Resilience*)**, diperlukan untuk kenyamanan perjalanan kereta api, menjaga patahnya as, roda, meredam kejutan, impact, getaran vertikal. Jika jalan rel terlalu kaku misalnya dengan pemakaian bantalan beton, maka untuk menjamin elastisitas diperlukan alas karet (*rubber pads*) yang dipasang dibawah kaki rel.
- **Ketahanan terhadap Deformasi Tetap**, Deformasi vertikal yang berlebihan akan cenderung menjadi deformasi tetap, sehingga geometri jalan rel (ketidak rataan vertikal dan horizontal, puntir) menjadi tidak baik, yang pada akhirnya kenyamanan dan keamanan menjadi terganggu.
- **Stabilitas**, Jalan rel yang stabil adalah mampu tetap pada posisi semula (vertikal dan horizontal) setelah pembebanan terjadi. Untuk ini dibutuhkan balas dengan mutu dan kepadatan yang baik, bantalan dengan penambat yang selalu terikat, dan drainase yang baik.
- **Adjustability**, Jalan rel harus bisa diatur/dipelihara untuk dikembalikan ke posisi geometri yang benar, jika terjadi perubahan geometri karena beban yang berjalan.

Struktur jalan rel, secara garis besar dapat dibagi dua yaitu :

- a. Struktur bangunan atas dengan komponen-komponen, rel (*rail*), penambat (*fastening*) dan bantalan (*sleeper, tie*)
- b. Struktur bangunan bawah, dengan komponen-komponen, balas (*ballast*), subballas (*subballast*), tanah dasar (*improve subgrade*) dan tanah asli (*natural ground*).
Pada kondisi tertentu balas dapat dibagi 2 lapisan yaitu balas atas (*top ballast*) dan ballast bawah (*bottom ballast*).

1.2 BEBAN- BEBAN YANG BEKERJA PADA STRUKTUR JALAN REL

1.2.1 Gaya Vertikal

Gaya ini adalah beban yang paling dominan dalam struktur jalan rel, gaya ini menyebabkan defleksi vertikal, dan defleksi vertikal ini adalah indikator terbaik dari kualitas, kekuatan dan umur jalan rel. Secara garis besar besarnya beban vertikal dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Gaya Lokomotif (*Locomotive*), Jenis lokomotif dapat dilihat dari cara penomorannya,
 - Lokomotif BB artinya beban ditumpu oleh 2 bogie, yang masing-masing bogie terdiri 2 gandar dan satu gandar terdiri dari dua roda
Sehingga: Jika berat lokomotif (W_{lok}) = 56 ton, maka ;
Gaya kepada bogie ($P_{bogie} = P_b$) = $W_{lok}/2 = 56/2 \text{ ton} = 28 \text{ ton}$;
Gaya gandar ($P_{gandar} = P_g$) = $P_b/2 = 28/2 \text{ ton} = 14 \text{ ton}$
Gaya roda statis ($P_{statis} = P_s$) = $P_g/2 = 14/2 \text{ ton} = 7 \text{ ton}$
Gaya gandar, lebih dikenal dengan beban gandar (*axle load*)
 - Lokomotif Jenis CC, lokomotif ditumpu 2 bogie, masing-masing bogie terdiri 3 gandar, dan masing-masing gandar terdiri 2 roda
Sehingga: Jika berat lokomotif (W_{lok}) = 84 ton, maka ;
Gaya kepada bogie ($P_{bogie} = P_b$) = $W_{lok}/2 = 84/2 \text{ ton} = 42 \text{ ton}$;
Gaya gandar ($P_{gandar} = P_g$) = $P_b/2 = 42/3 \text{ ton} = 14 \text{ ton}$
Gaya roda statis ($P_{statis} = P_s$) = $P_g/2 = 14/2 \text{ ton} = 7 \text{ ton}$
Di Indonesia, jenis lokomotif CC ada 2 jenis beratnya;
CC-202.. , dengan berat 108 ton, atau beban gandar 18 ton
CC-201.. dan CC-203.., dengan berat 84 ton atau beban gandar 14 ton
- Gaya Kereta (*Car, Coach*), Kereta dipakai untuk angkutan penumpang, sehingga karakteristiknya adalah kenyamanan (perlu ruang yang cukup) dan kecepatan yang tinggi (faktor gaya dinamis), Berat Kereta jika dimuati adalah sekitar 40 ton, dan ditumpu dengan 2 bogie ($P_b = 20 \text{ ton}$), dengan masing-masing bogie terdiri 2 gandar ($P_g = 10 \text{ ton}$), sehingga $P_s = 5 \text{ ton}$.
- Gaya Gerbong (*Wagon*), Gerbong dipakai untuk angkutan barang, dimana yang diperlukan terutama dari segi beratnya sehingga muatannya dapat besar (massal dan berat). Prinsip beban sama, dan satu gerbong dapat terdiri dari 2 gandar (tanpa bogie) dan 4 gandar (dengan 2 bogie)

- Faktor Dinamis,

Faktor dinamis diakibatkan oleh getaran-getaran dari kendaraan rel, akibat angin, dan kondisi geometri (ketidak rataan) jalan. Untuk mentransformasikan gaya statis kepada gaya dinamis, diformulasikan faktor dinamis sebagai berikut :

$$I_p = 1 + 0,01 (V/1,609 - 5)$$

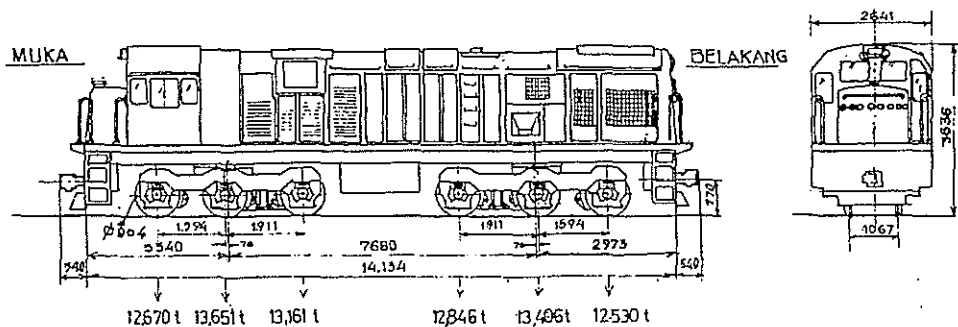
Dimana : V = kecepatan kereta api (km/jam)

Sebagai Contoh : Lok CC-201..., dengan V = 100 km/jam dan Ps = 7 ton, maka:

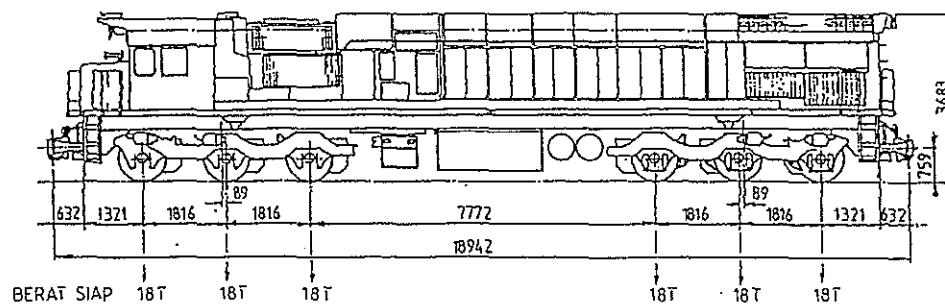
$$I_p = 1 + 0,01 (0,62 \times 100 - 5) = 1,57$$

$$P_d = P_s \times I_p = 7 \times 1,57 \text{ ton} = 10,99 \text{ ton}$$

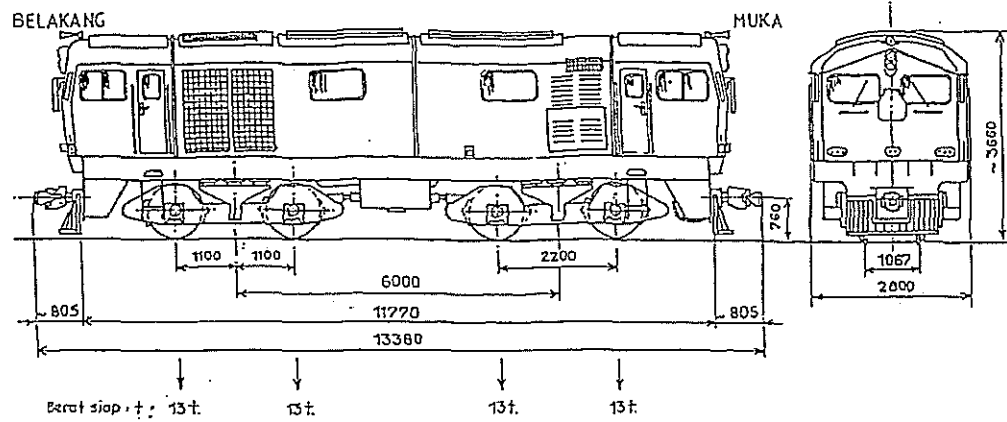
Gambaran beban vertikal yang diakibatkan oleh kendaraan rel, dapat dilihat pada gambar-1.2 berikut:



Lokomotif CC.201 01 - 201 72 ⁽⁶⁾



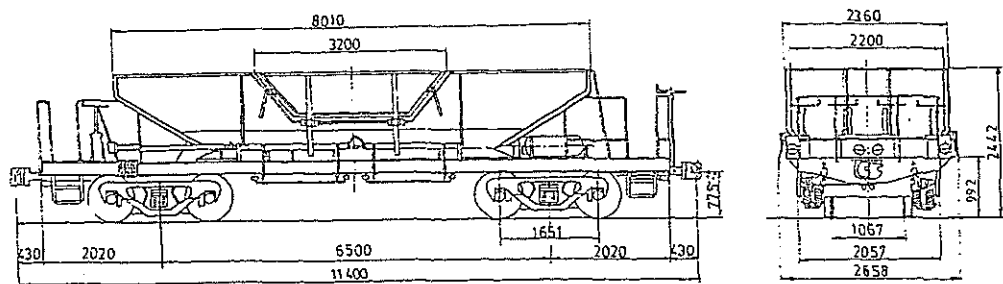
Lokomotif CC.202 01 - 202 30 ⁽⁶⁾



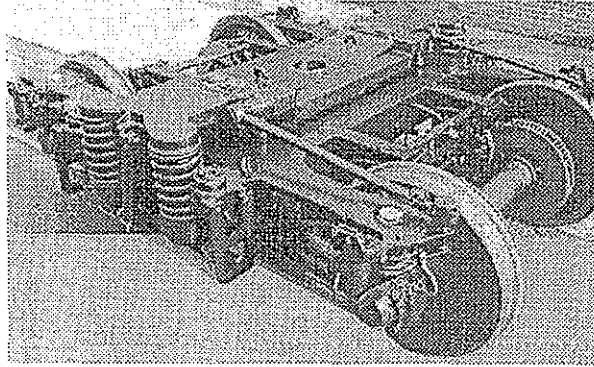
Lokomotif BB.301 51 - 301 55 ⁽⁶⁾



Kereta Tipe XR-6100 ⁽¹⁾



Gerbong Balas, No Seri B 51 ⁽⁴⁾



Bogie ⁽¹⁾

Gambar 1.2

Gambar Lok CC, BB, Kereta , Gerbong Balas dan Bogie

1.2.2 Gaya Transversal (Lateral)

Gaya ini disebabkan adanya gaya sentrifugal, 'Snake motion', dan ketidak rataan geometri jalan rel, bekerja pada titik yang sama dengan gaya vertikal di rel.

Gaya ini menyebabkan tercabutnya 'terpon' dan geseran pelat landas (*base plate*) pada bantalan kayu, sehingga dapat merubah geometri jalan rel, dan pada kondisi tertentu dapat mengakibatkan loncatnya roda keluar rel (*anjlogan, derailment*).

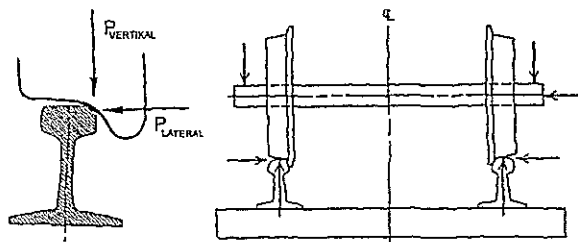
Besarnya gaya lateral, dibatasi agar rel roda tidak keluar rel, besarnya adalah :

$$P_{\text{lateral}} / P_{\text{vertikal}} < 1,2$$

Pada kondisi dimana rel dan roda sama-sama aus, maka pembatasan lebih kecil, yaitu :

$$P_{\text{lateral}} / P_{\text{vertikal}} < 0,75$$

Secara skematis gaya lateral dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 1.3

Gaya Lateral

1.2.3 Gaya Longitudinal

Gaya ini diakibatkan terutama oleh perubahan suhu pada rel ('thermal stresses'), dan untuk konstruksi kereta api modern, dimana dipakai rel panjang (long welded rails), gaya ini sangat memegang peranan penting. Tambahan pada gaya longitudinal ini adalah gaya adhesi (akibat gesekan roda dan rel) dan gaya rem (akibat pengereman kendaraan rel).

Penjelasan lebih rinci, dapat dilihat pada pembahasan rel panjang menerus.

1.3 PERHITUNGAN KOMPONEN-KOMPONEN JALAN REL

1.3.1 Distribusi gaya pada struktur jalan rel

Secara garis besar distribusi gaya vertikal dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Beban dari roda (dinamis) diterima oleh rel, disini tegangan kontak yang terjadi sangat besar, sehingga menentukan dalam pemilihan mutu baja rel.
- Beban rel didistribusikan dari dasar rel ke bantalan dengan perantara pelat andas (baseplate, bantalan kayu), ataupun alas karet (rubber pad, bantalan beton)
- Beban bantalan didistribusikan dari dasar bantalan ke balas, yang seterusnya didistribusikan ke tubuh jalan rel

Secara skematis distribusi gaya vertikal dapat dilihat pada Gambar-1.4.

1.3.2 Teori perhitungan tegangan-tegangan pada komponen jalan rel

Teori balok diatas tumpuan elastis, dikembangkan pertama kali oleh Winkler pada tahun 1867, untuk perhitungan tegangan komponen-komponen jalan rel, teori ini berkembang terus dalam aplikasinya, misalnya perhitungan pondasi tiang pancang akibat beban horizontal.

Rel dianggap sebagai balok, dengan panjang tak berhingga, beban terpusat, ditumpu pada tumpuan elastis, dengan modulus elastisitas jalan rel (track stiffness') k ;

Persamaan umum diturunkan sebagai berikut :

$$p = -ky \quad (1)$$

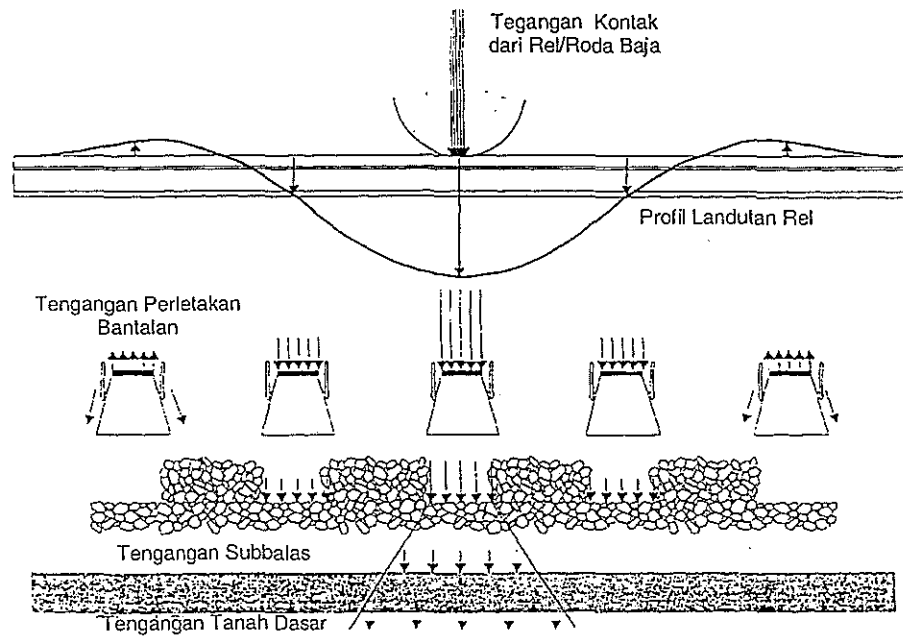
dimana: p = reaksi (merata)/satuan panjang

k = modulus elastisitas jalan rel

y = defleksi

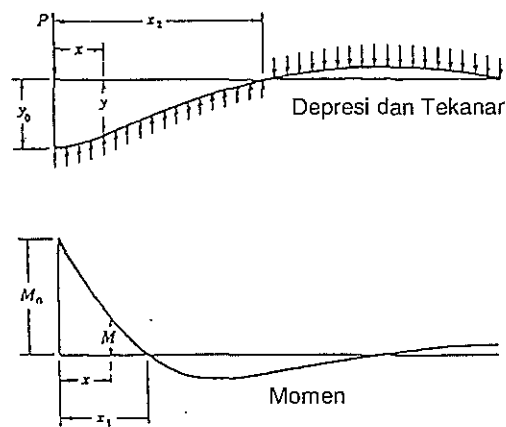
Persamaan diferensial dari persamaan (1) adalah:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0 \quad (2)$$



Gambar 1.4

Distribusi Gaya Vertikal yang bekerja pada struktur jalan rel ⁽⁹⁾



Gambar 1.5

Gaya Roda vs Defleksi dan Bidang Momen di Rel ⁽³⁾

Solusi untuk beban terpusat P

$$y = \frac{P\lambda}{2k} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (3)$$

$$M = \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \quad (4)$$

dimana:

k = modulus elastisitas jalan rel

λ = dumping factor/characteristic of the system

$$= \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

I = momen inersia rel pada sumbu x-x

E = modulus elastisitas rel $= 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

P = P_d = beban vertikal (dinamis roda)

$M = 0$, jika $\cos \lambda x_1 - \sin \lambda x_1 = 0$

$$x_1 = \frac{\pi}{4\lambda} = \frac{\pi}{4} \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}}$$

$M_{\text{maksimum}} (M_o)$, jika $\cos \lambda x_1 - \sin \lambda x_1 = 0$

$$M_o = \frac{P}{4\lambda} = \frac{Px_1}{\pi} = 0.318 Px_1 \quad (5)$$

$Y = 0$, jika $\cos \lambda x_2 + \sin \lambda x_2 = 0$

$$x_2 = \frac{3\pi}{4\lambda} = \frac{3\pi}{4} \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} = 3x_1$$

Y maksimum (Y_o)

$$Y_o = \frac{P\lambda}{2k} = \frac{P\pi}{8kx_1} = 0.393 \frac{P}{kx_1} \quad (6)$$

Beban ke bantalan

Maksimum beban merata di kaki rel adalah:

Persamaan (1) dan (6)

$$P = ky = 0.392 P/x_1$$

$$Q = P \times S = 0.392 PS/ x_1$$

Akibat dari superposisi beberapa beban dan kemungkinan kondisi track yang kurang baik maka beban ke bantalan biasanya diambil dua kali lipat sehingga:

$$Q = 2 \times (0.392 PS/ x_1) = 0.786 PS/ x_1 \quad (7)$$

1.4 KELAS JALAN DAN KOMPONEN STRUKTUR JALAN REL

Dalam menentukan komponen jalan rel, selalu dihitung berdasarkan beban (tegangan, *passing tonnage*), umur ekonomis konstruksi, jenis konstruksi dan cara pemeliharaan.

Berdasarkan hal-hal tersebut, maka struktur jalan rel dibagi menjadi lima kelas, dengan pembagian sebagai berikut :

Tabel 1.1 Kelas Jalan Rel dan Komponennya ⁽⁸⁾

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)	V maks (km/jam)	Pmaks gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan Jarak (mm)	Jenis Penambat	Tebal Balas Atas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
I	> 20.10 ⁶	120	18	R.60/R.54	Beton 600	EG	30	50
II	10.10 ⁶ - 20.10 ⁶	110	18	R.54/R.50	Beton/Kayu 600	EG	30	50
III	5.10 ⁶ - 10.10 ⁶	100	18	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/Baja 600	EG	30	40
IV	2,5.10 ⁶ – 5.10 ⁶	90	18	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/Baja 600	EG / ET	25	40
V	< 2,5.10 ⁶	80	18	R.42	Kayu/Baja 600	ET	25	35

Catatan: ET = Elastik Tunggal ; EG = Elastik Ganda

1.5 CONTOH PERHITUNGAN DIMENSI KOMPONEN JALAN REL

Sebagai contoh perhitungan dalam menghitung tegangan-tegangan pada komponen jalan rel adalah sebagai berikut :

Kelas I dengan $V_{rencana} = 150$ km/jam dan beban gandar 18 ton serta rel R54, transformasi beban roda yang dinamis ke statis ekuivalen memakai persamaan TALBOT

$$P_d = P_s + 0.01 P (V-5) \quad ; \quad V \text{ dalam mil/jam}$$

$$P_d = [9000 + 0,01 \times 9000 (150/1,609-5)] \text{ kg} = 16940,3 \text{ kg}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI_x}} = \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 2,1 \times 10^6 \times 2346}} = 0,0098 \text{ cm}^{-1}$$

$$M_o = \frac{P_d}{4\lambda} = 432150,51 \text{ kg cm}$$

$$\sigma = \frac{M_1 y}{I_x}$$

dimana:

y = jarak tepi bawah rel ke garis netral

M_1 = 0,85 M_o akibat superposisi beberapa gandar

I_x = momen inersia terhadap sumbu x-x = 2346 cm⁴

$$\sigma = \frac{0,85 \times 4322150,51 \times 7,62}{2346} \quad \text{kg/cm}^2$$

$$= 1193,1 \quad \text{kg/cm}^2 < 1325 \text{ kg/cm}^2$$

Perhitungan untuk kelas lainnya dapat ditabelkan sebagai berikut:

Kelas	Rel	Tegangan dasar Rel (kg/cm ²)	Tegangan ijin (kg/cm ²)
I	R60	1042	1325
	R54	1196	
II	R54	1146	1325
	R50	1236	
III	R54	1097	1663
	R50	1183	
	R42	1474	
IV	R54	1048	1843
	R50	1130	
	R42	1409	
V	R42	1343	1843

Perhitungan Dimensi Bantalan

Beban merata pada tepi bawah rel yang membebani bantalan:

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

$$y_o = \frac{P_d \lambda}{2k} = 0,393 \frac{P_d}{kx_1}$$

Superposisi dari beberapa gandar, beban ke bantalan menjadi:

$$Q = 2pS = 0,786 \frac{P_d S}{x_1}$$



dimana: P_d = beban dinamis roda
 S = jarak bantalan

Contoh dengan rel R-54 kelas I maka beban ke bantalan jika jarak bantalan 60 cm.

$$x_1 = \frac{\pi}{4\lambda} = \frac{\pi}{4 \times 0,0098} = 80,14 \text{ cm}$$

$$Q = 0,786 \times P_d \times 60/80,14 = 0,59 P_d$$

$$Q = 60 \% P_d = 10164,18 \text{ kg}$$

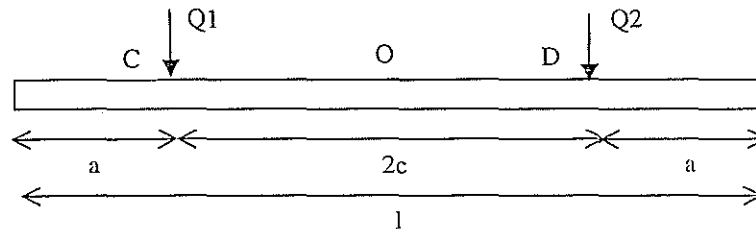
Analisis tegangan pada bantalan didasarkan pada balok finite (*finite beam*) dengan kekakuan balas sebagai berikut:

1.5.1 Bantalan kayu kelas I

$$\sigma_k = 125 \text{ kg/cm}^2; \quad \text{ukuran } (200 \times 22 \times 13) \text{ cm}^3$$

$$E = 1,25 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Keadaan balas sedang } k_b = 180 \text{ kg/cm}^2$$



$$a = 45 \text{ cm} ; \quad c = 55 \text{ cm} ; \quad l = 200 \text{ cm}$$

$$\lambda = \left(\frac{k_b}{4EI} \right)^{0,25}$$

$$\lambda = \left(\frac{180}{4 \times 125 \times 10^3 \times 1/12 \times 22 \times 13^3} \right)^{0,25} = 0,01729 \text{ cm}^{-1}$$

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

$$M_D = \frac{Q_1}{4 \times 0,01729 (15,861 - 0,311)} \left[3,4756 \times (-0,3251 + 15,892) \right. \\ \left. - 1,0147 \times (3,4239 - 0,950) - 2,2647 \times (0,9457 + 15,861) \right. \\ \left. - 1,000 \times (3,27466 + 0,311) \right] \\ = 9,830 Q_1$$

$$M_o = -\frac{Q_1}{2\lambda (\sinh \lambda l + \sin \lambda l)} \left\{ \sinh \lambda c [\sin \lambda c + \sin \lambda (1-c)] \right. \\ \left. + \sin \lambda c [\sinh \lambda c + \sinh \lambda (1-c)] + \cosh \lambda c \cos \lambda (1-c) - \cos \lambda c \cosh \lambda (1-c) \right\}$$

$$M_O = \frac{Q_1}{2 \times 0,01729 (15,861 - 0,311)} \left\{ 1,10 \times [0,8140 + 0,5928] \right. \\ \left. + 0,8140 [1,10 + 6,0936] + 1,487 \times (-0,8053) - 0,5809 \times 6,1751 \right\} \\ = 4,8696 Q_1$$

$$M = \sigma_k \times W = 5/6 \times 150 \times 1/6 \times 22 \times 13^2 \text{ kg cm} = 77458,33 \text{ kg cm}$$

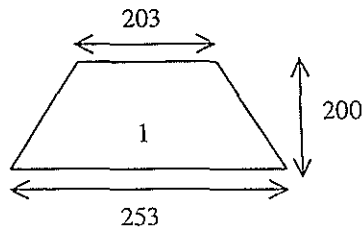
$$\text{Jika } M = M_D \rightarrow Q_1 = 7879,59 \text{ kg}$$

$Q_1 < Q \rightarrow$ kayu tidak dapat dipakai untuk jalan rel kelas I, karena beban yang dapat dipikul (Q_1) lebih kecil dari beban yang terjadi (Q)

1.5.2 Pemecahan dengan memakai bantalan beton

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

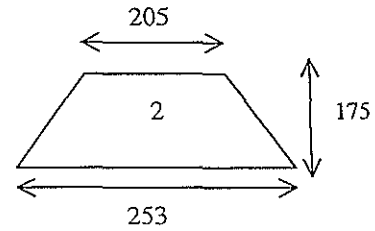
- dipakai baja prategang sebanyak 18 buah dengan diameter 5,08 mm, tegangan putus 16000 kg/cm^2
- pada saat kondisi transfer = 70% kapasitas maksimum, sehingga $P_{\text{initial}} = 18 \times 2270,24 \text{ kg}$
- pada saat kondisi efektif = 55% kapasitas maksimum, sehingga $P_{\text{efektif}} = 18 \times 1783,76 \text{ kg}$
- data geometri dan besaran karakteristik penampang:



Bawah Rel

$$A1 = 456 \text{ cm}^2$$

$$I1 = 15139,09 \text{ cm}^2$$



Tengah Bantalan

$$A2 = 400,75 \text{ cm}^2$$

$$I2 = 10190,02 \text{ cm}^2$$

Penampang Bawah Rel:

$$Y1(a) = \text{letak garis netral dari sisi atas} = 10,368 \text{ cm}$$

$$Y1(b) = \text{letak garis netral dari sisi bawah} = 9,64 \text{ cm}$$

$$W1(a) = \text{momen tahanan sisi atas} = 1460,6 \text{ cm}^3$$

$$W1(b) = \text{momen tahanan sisi bawah} = 1571,26 \text{ cm}^3$$

Penampang tengah bantalan:

$$Y2(a) = 9,055 \text{ cm}$$

$$Y2(b) = 8,445 \text{ cm}$$

$$W2(a) = 1125,35 \text{ cm}^3$$

$$W2(b) = 1206,63 \text{ cm}^3$$

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

- Besaran λ :

- Untuk daerah di bawah rel

$$\lambda = \left(\frac{180}{4 \times 143108,35 \times 15139,09} \right)^{0,25} = 0,012 \text{ cm}^{-1}$$

- Untuk daerah tengah bantalan

$$\lambda = \left(\frac{180}{4 \times 143108,35 \times 10190,02} \right)^{0,25} = 0,013 \text{ cm}^{-1}$$

- Momen pada daerah di bawah rel:

$$M_D = \frac{Pd \times 60\%}{4\lambda} \frac{1}{(\sinh \lambda l + \sin \lambda l)} [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda l) \\ - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda l) - \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda l) \\ - \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c + \sin \lambda l)]$$

$$M_D = \frac{16940,3 \times 60\%}{4 \times 0,01200} \frac{1}{(15,861 - 0,311)} [2,640 \times (0,250 + 15,560) \\ - 1,470 \times (2,0 - 0,74) - 1,3 \times (0,970 + 5,466) - 0,88 \times (0,023 - 1,675)] \\ = 34482 \times [15,3384 - 1,8522 - 8,3668 - 0,61424] \\ = 155346,9 \text{ kg cm}$$

- Momen pada daerah tengah bantalan:

$$M_O = - \frac{Pd \times 60\%}{2\lambda} \frac{1}{(\sinh \lambda l + \sin \lambda l)} [\sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda (1-c)) \\ + \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda (1-c)) + \cosh \lambda c \cos \lambda (1-c) - \cos \lambda c \cosh \lambda (1-c)]$$

$$M_O = - \frac{16940,3 \times 60\%}{2 \times 0,013} \frac{1}{(6,695 + 0,516)} [0,78 \times (0,66 + 0,95) \\ + 0,66 \times (0,78 + 3,22) - 1,27 \times -0,31 - 0,76 \times 3,371] \\ = - 54213 \times [1,2558 + 2,64 - 0,3937 - 2,5612] \\ = - 51009 \text{ kg cm}$$

- Analisis tegangan

- Tahap pratekan awal

- a. Bawah Rel

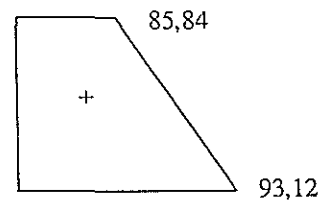
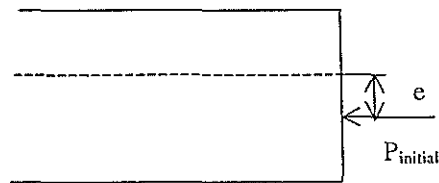
Sisi atas:

$$\sigma = \frac{P_{\text{initial}}}{A} - \frac{P_{\text{initial}} \times e}{W} \\ = \frac{18 \times 2270,24}{456} - \frac{18 \times 2270,24 \times 0,135}{1460,46} \\ = 85,84 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2)$$

Sisi bawah:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{initial}}}{A} + \frac{P_{\text{initial}} l \times e}{W} \\ &= \frac{18 \times 2270,24}{456} + \frac{18 \times 2270,24 \times 0,135}{1571,26} \\ &= 93,12 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

Kondisi tegangan:



b. Tengah bantalan

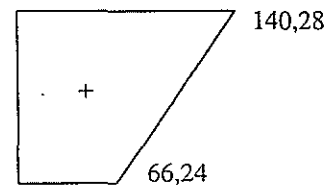
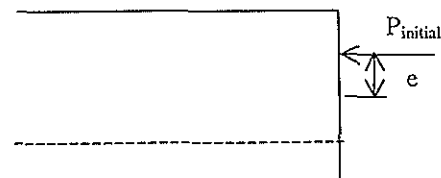
Sisi atas:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{initial}}}{A} + \frac{P_{\text{initial}} l \times e}{W} \\ &= \frac{18 \times 2270,24}{400,75} + \frac{18 \times 2270,24 \times 0,135}{1125,35} \\ &= 140,28 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

Sisi bawah:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{initial}}}{A} - \frac{P_{\text{initial}} \times e}{W} \\ &= \frac{18 \times 2270,24}{456} - \frac{18 \times 2270,24 \times 1,055}{1206,63} \\ &= 66,24 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

Kondisi tegangan:



- Tahap pratekan efektif

a. Bawah Rel:

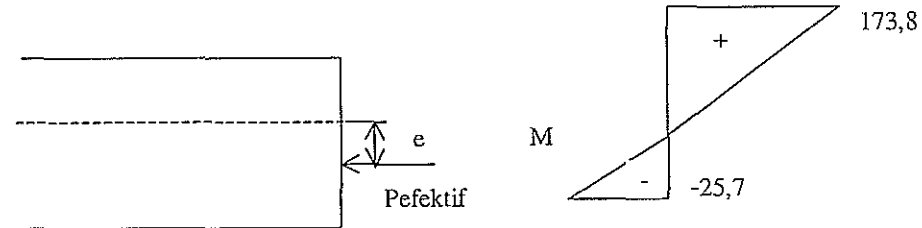
Sisi atas:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{efektif}}}{A} - \frac{P_{\text{efektif}} \times e}{W} + \frac{M}{W} \\ &= \frac{18 \times 1783,76}{456} - \frac{18 \times 1783,76 \times 0,135}{1460,46} + \frac{155346,9}{1460,46} \\ &= 173,8 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

Sisi bawah:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{efektif}}}{A} + \frac{P_{\text{efektif}} \times e}{W} - \frac{M}{W} \\ &= \frac{18 \times 1783,76}{456} + \frac{18 \times 1783,76 \times 0,135}{1571,26} - \frac{155346,9}{1571,26} \\ &= -25,7 \text{ kg/cm}^2 (> 35 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$

Kondisi tegangan:



b. Tengah Bantalan:

Sisi atas:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{\text{efektif}}}{A} + \frac{P_{\text{efektif}} \times e}{W} - \frac{M}{W} \\ &= \frac{18 \times 1783,76}{400,75} + \frac{18 \times 1783,76 \times 0,135}{1125,35} - \frac{51009}{1125,35} \\ &= 38,64 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2)\end{aligned}$$