

## BAB VII

### BANTALAN REL

---

#### 1. TUJUAN INSTRUKSIONAL UMUM

Setelah mempelajari pokok bahasan ini, mahasiswa diharapkan mampu :

1. Mengetahui pengertian, fungsi, bentuk dan sifat bantalan rel untuk struktur jalan rel.
2. Mengetahui metode perencanaan bantalan rel untuk perencanaan struktur jalan rel yang sesuai PD 10 tahun 1986.

#### 2. TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Setelah mempelajari pokok bahasan ini, diharapkan mahasiswa mampu :

1. Mengetahui pengertian dan fungsi bantalan rel.
  2. Mengetahui klasifikasi dan jenis bantalan rel yang digunakan di Indonesia.
  3. Menjelaskan spesifikasi bantalan rel untuk struktur jalan rel yang terkait dengan perencanaan stabilitas dan keamanan.
  4. Menghitung dimensi bantalan yang diperlukan sesuai dengan jenis rel dan kelas jalan rencana.
- 

#### A. PENGERTIAN UMUM

Bantalan merupakan suatu struktur untuk mengikat rel (dengan penambat) sedemikian sehingga kedudukan rel menjadi kokoh dan kuat. Bantalan juga membentuk sistem pembebanan dari kendaraan rel terdistribusi secara lebih ringan dan merata kepada struktur fondasi. Bantalan mempunyai fungsi yang sangat penting dalam membentuk *super-structure* (struktur bagian atas) dalam struktur jalan rel. Oleh karena itu diperlukan perencanaan yang baik mengenai jenis dan karakteristiknya, inter-koneksi daerah yang akan dilayani oleh jalan rel (daerah timbunan atau galian) terhadap fungsi drainasi, ukuran bantalan yang akan digunakan dan berbagai pertimbangan teknis lainnya.

#### B. FUNGSI DAN JENIS BANTALAN

##### 1. Fungsi Bantalan

Bantalan merupakan salah satu bagian dari struktur jalan rel yang mampu melayani fungsi sebagai berikut :

- a. Mengikat/memegang rel dengan alat penambat, pelat andas dan *bout*, sehingga geometrik rel yang terkait dengan konsistensi lebar sepur tetap dapat terjaga (1067 mm untuk Indonesia) akibat gerakan rel arah lateral dan longitudinal.
- b. Menerima beban vertikal dan lateral yang disebabkan oleh beban statis rel dan beban dinamis akibat pergerakan kereta dengan baik.

## Bab VII Bantalan Rel

- c. Mendistribusikan beban yang diterima bantalan kepada struktur fondasi yang ada di bawahnya dengan tegangan arah vertikal yang lebih kecil dan merata.
- d. Menstabilisasikan struktur jalan rel terhadap gaya lateral yang memaksa rel untuk bergeser ke arah luar (penyimpangan arah lateral).
- e. Menghindari kontak langsung antara rel dengan air tanah.

### 2. Jenis Bantalan

- Jenis struktur bantalan dapat dibagi sesuai dengan bahan dan karakteristik penyusunnya<sup>1</sup>, yaitu :
  1. Bantalan Kayu (*Wooden Sleeper*),
  2. Bantalan Besi (*Steel Sleeper*),
  3. Bantalan Beton (*Concrete Sleeper*),
  4. Bantalan Slab-Track (*Slab Track*).
- Pemilihan jenis bantalan pada umumnya ditentukan oleh faktor :
  - a. karakteristik beban yang dilayani,
  - b. umur rencana,
  - c. harga bantalan dan
  - d. kondisi tanah dasarnya.

### 3. Bentuk Bantalan

Bentuk bantalan dapat dibagi menurut arah pemasangannya yaitu Bantalan Arah Melintang (Bantalan Kayu, Baja dan Beton) yang dipasang tegak lurus arah rel, dan Bantalan Arah Membujur (*Concrete Slab-Track*) yang dipasang searah rel. Pemasangan bantalan melintang banyak digunakan di Indonesia. Pemasangan bantalan arah membujur perlu memperhatikan beberapa pertimbangan berikut ini :

- a. Air hujan akan terbendung di antara slab track, sehingga dibutuhkan kondisi balas yang prima dengan demikian penyaluran air hujan dapat berlangsung dengan baik. Implikasi dari penggunaan bantalan ini, adalah diperlukannya frekuensi pemeliharaan (pembersihan) balas yang tinggi dimana akan menyebabkan anggaran pemeliharaan semakin tinggi.
- b. Diperlukan konstruksi penambat arah melintang supaya jarak antar bantalan tetap terpelihara dengan baik.
- c. Bahan konstruksi yang tepat untuk bantalan membujur adalah konstruksi beton mengingat pertimbangan praktis dan teknisnya.

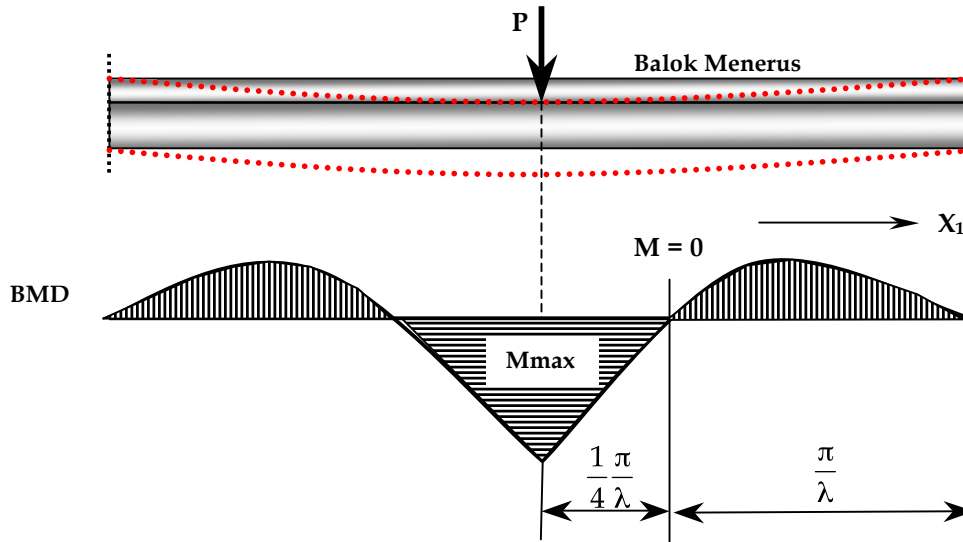
## C. PERHITUNGAN PEMBEBANAN PADA BANTALAN

### 1. Konsep Pembebanan pada Rel

Pembebanan pada bantalan diperhitungkan menggunakan model balok di atas tumpuan elastik. Gambar berikut menjelaskan perhitungan momen dan defleksi rel untuk mendapatkan persamaan untuk menentukan letak titik momen dan defleksi maksimum pada rel.

---

<sup>1</sup> Berbagai gambar jenis bantalan dapat dilihat dalam **Lampiran 3**



Persamaan Momen :

Gambar 7.1. Distribusi Momen

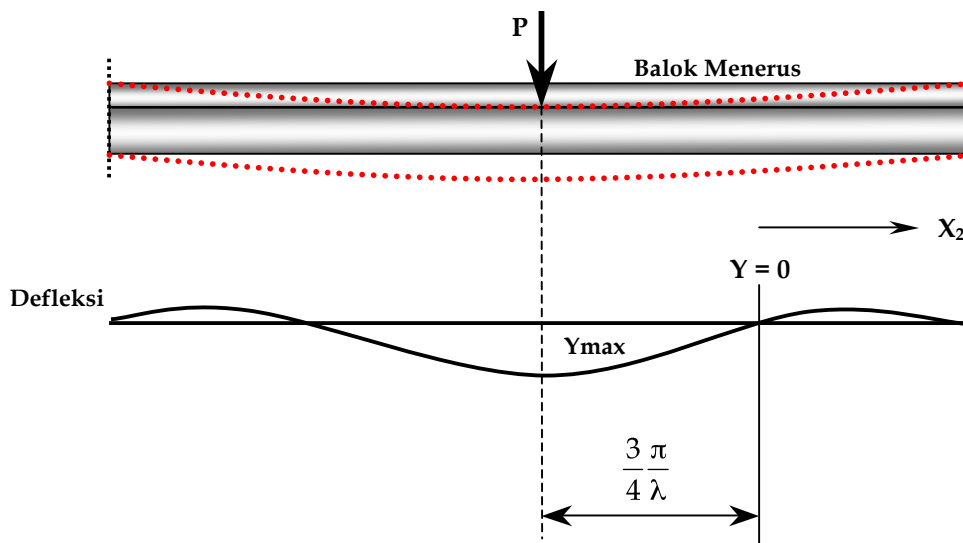
$$M(x) = \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \quad (7.1)$$

- Jika :  $\cos \lambda x_1 - \sin \lambda x_1 = 0$ , maka Momen = 0.  
Jika : Momen = 0, maka :

$$x_1 = \frac{1}{4} \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{4} \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \quad \text{dan} \quad \lambda = \frac{\pi}{4x_1} \quad (7.2)$$

- Jika :  $\cos \lambda x_1 - \sin \lambda x_1 = 1$ , maka Momen = Maksimum.

$$M_m = \frac{P_d}{4} = \frac{P \cdot X_1}{\pi} = 0,318 P X_1 \quad (7.3)$$



Persamaan Defleksi :

Gambar 7.2. Distribusi Defleksi

**Bab VII Bantalan Rel**

$$y(x) = \frac{P\lambda}{2k} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \tag{7.4}$$

$$\lambda = \left( \frac{k}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}}$$

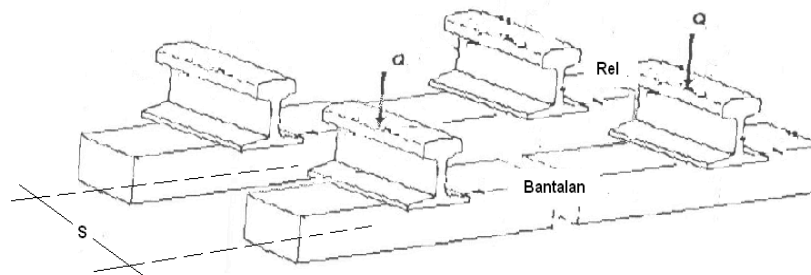
- Jika :  $\cos \lambda x_2 + \sin \lambda x_2 = 0$ , maka Defleksi = 0.  
 Jika :  $Y = 0$ , maka :

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

- Jika :  $\cos \lambda x_2 + \sin \lambda x_2 = 1$ , maka Defleksi = Maksimum.

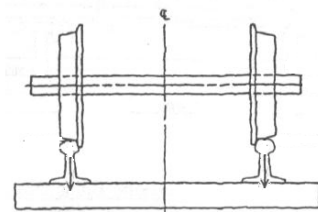
$$Y_m = \frac{P_d \lambda}{2k} = \frac{P_d \cdot \pi}{8 \cdot k \cdot X_1} = 0,393 \frac{P_d}{k \cdot X_1} \tag{7.5}$$

**2. Konsep Pembebanan pada Bantalan**



Gambar 7.3 Sket distribusi beban rel ke bantalan

Dari Gambar di atas dapat dilihat bahwa beban yang didistribusikan kepada struktur bantalan merupakan beban merata tepi bawah rel, sehingga dapat (dari konsep *beam on elastic foundation*) digunakan persamaan fungsi elastik tumpuan bantalan sebagai :



$$F = k \times Y_{maks}$$

Jika  $Y_{maks} = 0,393 \frac{P_d}{k \cdot X_1}$ , dan diperhitungkan pengaruh superposisi gandar pada kereta api, maka distribusi beban ke bantalan dapat dituliskan sebagai :

$$Q_1 = 2 \times F \times S = 2 \times \left( k \times \frac{P_d}{k \cdot X_1} \right) \times S = 0,786 \frac{P_d \cdot S}{X_1} \tag{7.6}$$

dimana : S = jarak antar bantalan (PD. No.10 Tahun 1986)

**Contoh :**

Jika digunakan R.54 ( $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ , dan  $I_x = 2346 \text{ cm}^4$ ) yang dipasang pada Kelas Jalan I,  $S = 60 \text{ cm}$  dan  $k$  (nilai modulus jalan rel) =  $180 \text{ kg/cm}^2$ . Tentukan beban yang didistribusikan dari rel ke bantalan !

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

$$x_1 = \frac{1}{4} \frac{\pi}{\lambda} = \frac{1}{4} \left( \frac{\pi}{0,0098} \right) = 80,14 \text{ cm}$$

$$Q_1 = 0,786 \frac{Pd \cdot S}{x_1} = 0,786 \frac{Pd \cdot 60}{80,14} = 0,59 Pd \approx 60 \% Pd$$

( $Q_1$  : beban dari kendaraan kereta api ke bantalan)

**Asumsi** : Jika digunakan dalam perencanaan adalah beban gandar maksimum (18 ton), maka  $P_s = 9000 \text{ kg}$ . Untuk Kelas Jalan 1 (Vrencana =  $150 \text{ km/jam}$ ), beban dinamik ( $P_d$ ) dapat ditentukan sebagai :

$$P_d = \left[ 1 + 0,01 \times \left( \frac{V}{1,609} - 5 \right) \right] P_s = 16.940,3 \text{ kg}$$

$$Q_1 = 60\% P_d = 60\% (16.940,3) \text{ kg} = 10.164,18 \text{ kg}.$$

---

## D. BANTALAN KAYU

Bantalan kayu dipilih sebagai struktur bantalan pada jalan rel dengan pertimbangan bahannya yang mudah diperoleh (jika masih memungkinkan dari hutan tropis) dan mudah dalam pembentukan dimensi (tidak melibatkan peralatan yang berat dan rumit). Meskipun demikian, penggunaan bantalan kayu saat ini di Indonesia saat ini sangat jarang dipilih karena pertimbangan konservasi hutan terkait dengan semakin jarangnyanya kayu kelas kuat I dan II yang terpilih, dan jika adapun, harganya tinggi. Masalah yang ada dalam bantalan kayu, hanyalah pengawetan yang harus merata dan sempurna.

### 1. Syarat Mutu, Kekuatan dan Keawetan Bantalan Kayu

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan material kayu harus memenuhi persyaratan berikut ini.

a. Syarat umum bantalan kayu adalah :

- Utuh dan padat
- Tidak bermata
- Tidak ada lubang bekas ulat
- Tidak ada tanda-tanda permulaan lapuk kayu.
- Kadar air maksimum 25 %.

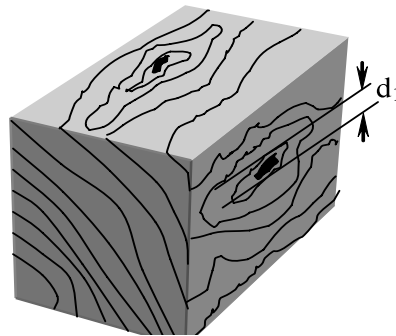
b. Bantalan kayu harus terbuat dari kayu mutu A dengan kelas kuat I atau II dan kelas awet I atau II (Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia, 1961).

Persyaratan kayu bermutu A adalah kayu yang memenuhi persyaratan berikut ini :

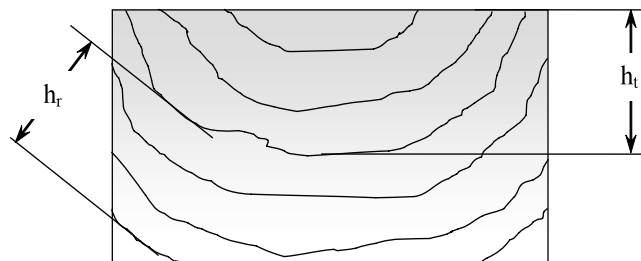
- Kayu harus kering udara

## Bab VII Bantalan Rel

- Besarnya mata kayu tidak melebihi  $\frac{1}{6}$  dari lebar bantalan dan tidak boleh lebih dari 3,5 cm (Gambar 7.4).
- Balok tidak boleh mengandung *wanvlak* (sisi lengkung) yang lebih besar daripada  $\frac{1}{10}$  tinggi bantalan dan  $\frac{1}{10}$  lebar bantalan.
- Kemiringan arah serat ( $\text{tg } \alpha$ ) tidak boleh melebihi  $\frac{1}{10}$ .
- Retak-retak arah radial ( $h_r$ ) tidak boleh melebihi  $\frac{1}{4}$  lebar bantalan, dan retak-retak menurut lingkaran tumbuh ( $h_t$ ) tidak boleh melebihi  $\frac{1}{5}$  tebal bantalan (Gambar 7.5).



Gambar 7.4 Mata kayu ( $d_1$ ) pada bantalan



Gambar 7.5 Arah retak radial dan lingkaran tumbuh

### 2. Contoh Kayu untuk Bantalan

Beberapa contoh kayu yang biasa digunakan untuk bantalan diberikan dalam Tabel 7.1 berikut ini.

Tabel 7.1 Contoh jenis kayu untuk bantalan

Nama Botanik	Nama Perdagangan	Kelas Kuat	Kelas Awet
<i>Intsia spec. div</i>	Merbau	I - II	I - II
<i>Eusideroxylon zwageri</i> T. et B	Ulin, Borneo, Kayu Besi	I	I
<i>Manikara kauki</i>	Sawo Kecil	I	I
<i>Adina minutiflora</i> val	Berumbung Gerunggang	I - II	II
<i>Tectona grandis</i> L.f	Jati	II	I - II
<i>Dalbergia Latifolia</i> Roxb	Sonokeling	II	I

Sumber : Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia, 1961

### 3. Umur Bantalan Kayu



## Bab VII Bantalan Rel

Lentur ( $\sigma_{lt}$ dalam $\text{kg/cm}^2$ )	125	83
Tekan Sejajar Serat ( $\sigma_{tk//}$ dalam $\text{kg/cm}^2$ )	108	71
Tarik Sejajar Serat ( $\sigma_{tr//}$ dalam $\text{kg/cm}^2$ )	108	71
Tekan Tegak Lurus Serat ( $\sigma_{tk\perp}$ dalam $\text{kg/cm}^2$ )	33	21
Geser ( $\tau$ dalam $\text{kg/cm}^2$ )	17	10

Sumber : PKKI Tahun 1961

### 6. Perencanaan Dimensi Bantalan Kayu

Dalam perencanaan dimensi bantalan, bantalan sepenuhnya menahan tegangan lentur yang persamaannya dituliskan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_x} \quad (7.7)$$

Apabila penampang bantalan adalah persegi panjang Persamaan 7.7 dapat dituliskan sebagai :

$$\sigma = \frac{6M}{b \cdot h^2} \quad (7.8)$$

Momen pada persamaan di atas, dapat dihitung berdasarkan teori balok berhingga di atas perletakan elastis (*finite beam on elastic foundation*) sebagaimana dijelaskan dalam Bab IV. Momen maksimum yang dapat dipikul dihitung berdasarkan tegangan ijin kayu berdasarkan kelas kuatnya sebagaimana diberikan dalam Tabel 7.2.

### 7. Perhitungan Dimensi Bantalan Kayu

Analisis tegangan pada bantalan didasarkan pada balok terbatas (*finite beam*) dengan perhitungan pada faktor kekakuan tertentu.

#### Perhitungan untuk Dimensi Bantalan Kayu Kelas I

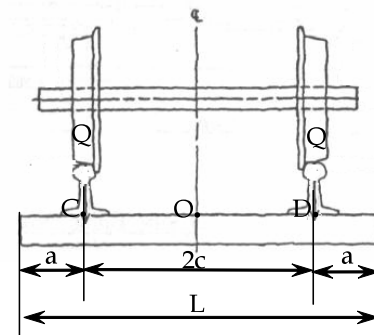
Data Bantalan : biasanya digunakan bantalan kayu ( $200 \times 22 \times 13$ )  $\text{cm}^3$  (PD. 10 Tahun 1986) dengan  $\sigma_{lt} = 125 \text{ kg/cm}^2$ , E (modulus elastisitas kayu) =  $1,25 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  dan k (modulus jalan rel = reaksi balas) =  $180 \text{ kg/cm}^2$ .

#### Prosedur perhitungan dijelaskan berikut ini :

1. Perhitungan  $\lambda$  Bantalan Kayu :

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

2. Perhitungan Momen di Titik C dan D, tepat di bawah kaki rel (lihat Gambar Samping Kanan) :





$$M_{C/D} = \frac{Q}{4\lambda} \frac{1}{\sin\lambda L + \sinh\lambda L} [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda L) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda L) - \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda L) - \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c + \sin \lambda L)] \quad (7.9)$$

3. Perhitungan Momen di Titik O (Tengah Bantalan) :

$$M_O = - \frac{Q}{2\lambda} \frac{1}{\sin\lambda L + \sinh\lambda L} [\sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda(L-c)) + \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda(L-c)) + \cosh \lambda c \cos \lambda (L - c) - \cos \lambda c \cosh \lambda (L - c)] \quad (7.10)$$

4. Perhitungan Momen Ijin Bantalan

$$M = \overline{\sigma_{it}} \times W \quad (7.11)$$

dimana,

- $\lambda$  = Damping factor
- $I_x$  = Momen inersia rel pada sumbu x - x
- $M$  = Momen pada bantalan
- $P_d$  = Beban dinamis dari kendaraan
- $Q$  = Beban yang dapat diterima oleh bantalan
- $W$  =  $\frac{1}{6} b \times h^2$  (untuk bantalan berbentuk persegi panjang)

**Contoh :**

Jika digunakan data bantalan :  $(200 \times 22 \times 13) \text{ cm}^3$  (PD. 10 Tahun 1986) dengan  $\sigma_{it} = 125 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E$  (modulus elastisitas kayu) =  $1,25 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  dan  $k$  (modulus jalan rel = reaksi balas) =  $180 \text{ kg/cm}^2$ . Hitunglah momen yang terjadi pada bantalan akibat pengaruh superposisi beban dan momen ijin bahan bantalan, untuk mendapatkan beban yang dapat diterima oleh bantalan !

**Catatan :** Perhitungan momen di titik C / D dan O, dapat dilakukan dengan mudah dengan menuliskan terlebih dahulu penyelesaian persamaan-persamaan trigonometri dan fungsi hiperbolikusnya dari fungsi  $\lambda$  dan data dimensi bantalan yang digunakannya.

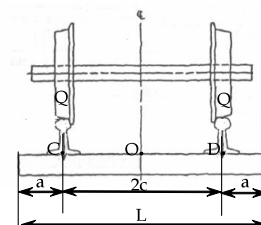
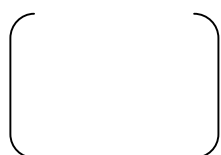
**Jawaban :**

1. Data :

- Damping Factor :

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 1,25 \times 10^5 \times \left(\frac{1}{12} \cdot 22 \cdot 13^3\right)}} = 0,01729/\text{cm}$$

- Dimensi Bantalan :



## Bab VII Bantalan Rel

$$\begin{aligned}
 L &= 200 \text{ cm} \\
 a &= 45 \text{ cm} \\
 c &= 55 \text{ cm}
 \end{aligned}
 \longrightarrow$$

2. Penyelesaian fungsi trigonometri dan hiperbolikusnya :

### MOMEN CALC.:

$\sin \lambda L$	=	-0.311
$\sinh \lambda L$	=	15.861
$\cosh \lambda a$	=	1.318
$\cosh 2 \lambda c$	=	3.424
$\cosh \lambda L$	=	15.892
$\cos \lambda a$	=	0.712
$\sinh 2 \lambda a$	=	2.265
$\sin 2 \lambda c$	=	0.946
$\sinh 2 \lambda c$	=	3.275
$\sin 2 \lambda a$	=	1.000
$\cos 2 \lambda c$	=	-0.325
$\cos \lambda L$	=	-0.950
$\sinh \lambda c$	=	1.101
$\sin \lambda c$	=	0.814
$\sin \lambda (L-c)$	=	0.593
$\sinh \lambda (L-c)$	=	6.094
$\cosh \lambda c$	=	1.487
$\cos \lambda (L-c)$	=	-0.805
$\cos \lambda c$	=	0.581
$\cosh \lambda (L-c)$	=	6.175

3. Menggunakan persamaan (7.9) dan (7. 10), diperoleh nilai momen di titik C/D dan O sebagai :

$$M_{D/C} = 9.830283 Q$$

$$M_O = - 4.87223 Q$$

dimana, Q = beban yang dapat diterima oleh bantalan

4. Momen ijin bantalan dapat dihitung menggunakan persamaan (7. 11) :

$$M_{ijin} = \overline{\sigma}_l \times W = 125 \times \frac{1}{6} 22 \times 13^2 = 77.458,33 \text{ kg.cm}$$

5. Beban yang dapat diterima oleh bantalan :

$$M_{D/C} = M_{ijin}$$

$$9.830283 Q = 77.458,33$$

$$Q = 7.879,56 \text{ kg.}$$

6. Dari perhitungan beban kendaraan dinamik jika digunakan dalam perencanaan adalah beban gandar maksimum (18 ton), maka  $P_s = 9000$  kg. Untuk Kelas Jalan 1 ( $V_{rencana} = 150$  km/jam), beban dinamik ( $P_d$ ) dapat ditentukan sebagai :

$$P_d = \left[ 1 + 0,01 \times \left( \frac{V}{1,609} - 5 \right) \right] P_s = 16.940,3 \text{ kg.}$$

maka, beban yang diterima bantalan dari kendaraan kereta api :

$$Q_1 = 60 \% P_d = 10.164,18 \text{ kg.}$$

sehingga :

$$Q (7.879,56 \text{ kg}) < Q_1 (10.164,18 \text{ kg}), \dots \text{tidak OK !}$$

**Kesimpulan :** Bantalan kayu tidak dapat menerima beban kereta api untuk Kelas Jalan 1 dengan beban gandar 18 ton.

---

## E. BANTALAN BESI

Bantalan kayu dipilih sebagai struktur bantalan pada jalan rel dengan pertimbangan bahannya yang mudah diperoleh (jika masih memungkinkan dari hutan tropis) dan mudah dalam pembentukan dimensi (tidak melibatkan peralatan yang berat dan rumit). Meskipun demikian, penggunaan bantalan kayu saat ini di Indonesia saat ini sangat jarang dipilih karena pertimbangan konservasi hutan yang terkait dengan semakin mahalnya harga kayu untuk Kelas Kuat I dan II. Oleh karena itu, sebagai alternatifnya digunakan bantalan besi.

### 1. Keunggulan Bantalan Besi

Penggunaan bantalan baja dalam jalan kereta api mempertimbangkan beberapa keunggulan, antara lain : umur bantalan yang relatif panjang memiliki berat struktur bantalan yang ringan, kemudahan dalam pemasangan dan pengangkutan. Bantalan besi terbuat dari bahan baja dapat menghindari keretakan yang terdapat pada bantalan beton dan kayu. Keretakan dapat tereliminasi karena besi/baja memiliki elastisitas yang lebih besar.

### 2. Kelemahan Bantalan Besi

Meskipun demikian, jika dilihat dari penampang bantalan besi, tipe ini memiliki kelemahan dalam stabilitas lateral dan axialnya yang kurang baik dibandingkan bantalan kayu dan beton. Ini disebabkan berat sendiri bantalan besi yang kecil (47,1 kg) dan gesekan di antara permukaan bantalan dengan balas relatif lebih kecil sehingga tidak bisa dipakai untuk jalan dengan kecepatan tinggi dan pemakaian rel yang menerus.

Selain itu, untuk meminimalkan adanya karat, bantalan besi harus senantiasa kering sehingga struktur bawah jalan rel harus mampu meloloskan air secara baik. Demikian seterusnya, pemakaian bantalan besi untuk daerah yang sulit kering dan sering terendam (misalnya: daerah perlintasan), maka tidak diperbolehkan memakai bantalan besi.

## Bab VII Bantalan Rel

### 3. Dimensi dan Bentuk Bantalan Besi

Dimensi bantalan besi pada jalur lurus mempunyai ukuran :

- Panjang : 2000 mm
- Lebar Atas : 144 mm
- Lebar Bawah : 232 mm
- Tebal Baja : minimal 7 mm

Bentuk penampang melintang bantalan besi harus mempunyai kaitan keluar pada ujung bawahnya, sedangkan bentuk penampang memanjang bantalan besi harus mempunyai kaitan ke dalam pada ujung-ujung bawah.

### 4. Syarat Kekuatan Bantalan Besi

Bantalan besi pada bagian tengah bantalan dan bagian bawah rel harus mampu menahan momen sebesar 650 kgm, sedangkan tegangan ijin bantalan besi adalah 1600 kg/cm<sup>2</sup> dan momen tahanan bantalan besi minimal 40,6 cm<sup>3</sup>.

### 5. Perencanaan Dimensi Bantalan Besi

Sebagaimana bantalan kayu, perencanaan bantalan besi juga menggunakan teori tegangan lentur dengan momen lentur dihitung berdasarkan teori balok berhingga di atas tumpuan elastis. Dengan persyaratan tahanan momen dan tegangan ijin yang dipakai, maka beban yang dapat diterima akan dihitung, baik beban statis maupun dinamis. Dengan demikian, beban gandar dan kecepatan kendaraan dapat ditentukan selanjutnya.

## F. BANTALAN BETON

PT. Kereta Api (Indonesia) saat ini, telah menggunakan bantalan beton di hampir seluruh jaringan jalan rel di Indonesia. Beberapa pertimbangan yang terkait dengan penggunaan bantalan beton dibandingkan bantalan kayu dan besi adalah faktor ketahanan, faktor workability, dan faktor ekonomi pemeliharaan. Penggunaan bantalan beton lebih diutamakan juga karena semakin sulitnya mendapatkan kayu yang memenuhi standar untuk bantalan dan berbagai kelemahan penggunaan bantalan besi. Selain itu, industri dalam negeri telah dapat membuat bantalan beton dengan baik.

### 1. Keunggulan Bantalan Beton

Penggunaan bantalan beton memiliki keunggulan sebagai berikut :

- Stabilitas baik karena berat sendiri satu balok bantalan mencapai 160 – 200 kg, sehingga tahanan terhadap gaya vertikal, longitudinal dan lateral menjadi lebih baik.
- Kereta api dengan tonase berat dan kecepatan tinggi lebih sesuai menggunakan bantalan beton
- Umur konstruksi lebih panjang.
- Biaya pemeliharaan yang rendah.

- Pengendalian mutu bahan lebih mudah.
- Bentuk dan proses pembuatannya bebas dan relatif mudah pembuatannya.
- Komponen-komponennya lebih sedikit dibandingkan dengan jenis lainnya.

## **2. Kelemahan Bantalan Beton**

Meskipun demikian, terdapat beberapa kelemahan yang harus diperhatikan, diantaranya :

- Kurang memiliki sifat elastik dibandingkan bantalan kayu dan besi.
- Pemasangan secara manual sukar karena beratnya bantalan.
- Kemungkinan terjadinya kerusakan pada saat mobilisasi ke lokasi dari pabrik.
- Memiliki masalah kebisingan dan getaran karena sifatnya yang kurang mampu menahan getaran.
- Nilai sisa konstruksi kemungkinan negatif.

## **3. Keunggulan Bantalan Beton**

Menurut geometriknnya, bantalan beton (pratekan) dibagi dalam dua (2) jenis bantalan, yaitu :

### **a. Bantalan Beton Blok Tunggal (Monoblok/Monolithic)**

Penelitian mengenai bantalan blok tunggal telah dirintis sebelum Perang Dunia II, namun pemakaian dalam jumlah yang banyak baru terjadi setelah perang dunia berakhir, yaitu pada saat banyak negara di Eropa memulai membangun kembali prasarana perhubungan termasuk didalamnya jalan rel. Kebutuhan pembangunan prasarana jalan rel yang cukup besar memaksa perlunya produksi bantalan-bantalan baru dalam relatif singkat dimana tidak dapat dipenuhi hanya dengan mengandalkan bantalan kayu saja. Selanjutnya kondisi ini memacu berdirinya pabrik-pabrik pembuat bantalan beton.

Ide awal pembuatan bantalan beton blok tunggal pratekan bermula dari usaha mengurangi keretakan-keretakan yang timbul pada bagian-bagian yang mengalami tegangan tarik. Pada bantalan beton pratekan, setelah beban lewat, keretakan relatif dapat merapat kembali karena adanya gaya tekan dari kabel-kabel pratekannya.

### **b. Bantalan Beton Blok Ganda (Bi-Block)**

Bantalan beton blok ganda terdiri dari dua buah blok beton bertulang yang satu dengan lainnya dihubungkan oleh batangan baja. Sebagai batang penghubung dapat digunakan juga potongan rel bekas (PD 10 tahun 1986). Penggunaan bantalan blok ganda mulai dicoba setelah Perang Dunia I berakhir di Perancis, yang disebut sebagai *Magneux*. Pada tahun 1949, setelah diadakan berbagai penelitian terhadap bantalan *Magneux*, dilakukan penyempurnaan struktur bantalan dengan dibuatnya bantalan beton blok ganda tipe R.S. (R.S. mengambil nama pembuatnya : *R. Someville*). Bantalan blok ganda ini memiliki kestabilan yang lebih baik daripada bantalan kayu dikarenakan lebih berat dan stabil. Penulangan bantalan blok ganda terdiri dua jaringan tulangan yang masing-masing dipasang di sebelah atas dan bawah, serta tulangan spiral yang mengitari batang penghubung di dalam beton. Tulangan spiral ini berfungsi sebagai penahan terhadap vibrasi dengan frekuensi tinggi.

## Bab VII Bantalan Rel

Bantalan blok ganda memiliki keunggulan dibandingkan bantalan blok tunggal, antara lain :

1. Memiliki berat yang lebih ringan,
2. Berkemampuan menahan gaya lateral yang lebih besar karena bidang permukaan tegaknya lebih banyak,
3. Mutu campuran beton tidak perlu setinggi untuk beton pra-tekan,
4. Batang penghubung dapat menggunakan potongan rel bekas, sehingga ada pemanfaatan barang bekas,
5. Pembuatannya lebih sederhana dan dapat dibuat di tempat,
6. Harganya lebih murah.

### 4. Proses Pembuatan/Konstruksi Bantalan Beton

- Menurut metode produksinya, proses konstruksi bantalan beton dapat dibagi dalam dua bagian yaitu :

#### a. *Longline Production*,

Kabel-kabel pratekan sepanjang 600 m ditegangkan dalam cetakan, dan *shoulder* penambat diletakkan pada posisi yang benar. Selanjutnya dilakukan pengecoran, penggetaran dan perawatan (*curing*), dan setelah dinilai cukup memiliki kekuatan, cetakan beton dipotong setiap 2 meteran.

#### b. *Thosti Operation*,

Bantalan dicetak dalam cetakan (*mould*) 2 meteran, yang terdiri dari 2 buah bantalan. Setelah *shoulder* diletakkan dalam posisi yang benar, kabel-kabel ditegangkan dan selanjutnya dicor, digetarkan dan dirawat lebih kurang selama 1 hari, bantalan dapat dilepas dari cetakannya.

- Menurut sistem penegangan kabelnya, bantalan pratekan blok tunggal dibedakan dalam dua metode yaitu :

#### a. *Sistem Prategang (pre-tension)*,

Kabel pada bantalan ditarik terlebih dahulu sebelum pengecoran, contoh tipe bantalan : Inggris (Dow-Mac, Stent), Jerman (Ev-53), Perancis (SNCF-VW) dan Indonesia (WIKA, Kodya, Adhi Karya, BSD).

#### b. *Sistem Pegangan Kemudian (post-tension)*,

Kabel pada bantalan ditarik setelah pengecoran, contoh tipe bantalan : Jerman (B-55), Belgia (Franki Bagon).

### 5. Persyaratan Konstruksi Bantalan Beton Pratekan Blok Tunggal

- **Konsep Bantalan Beton Blok Tunggal dengan Proses Pre-tension**

#### 01. Ukuran Bantalan

Pada jalan lurus, bantalan beton pra-tekan dengan proses pre-tension mempunyai ukuran panjang sebagai berikut :

$$L = \square + 2 \alpha \phi \quad (7.12)$$

- dimana :  $\square$  = Jarak antara kedua sumbu vertikal rel (mm)  
 $\alpha$  = Koefisien di antara 80 - 160  
 $\phi$  = Diameter kabel baja pra-tegang bantalan (mm)

02. Mutu campuran beton harus mempunyai kuat tekan karakteristik tidak kurang dari 500 kg/cm<sup>2</sup>, mutu baja tarik untuk tulangan geser tidak kurang dari U-24 dan mutu baja prategang ditetapkan dengan tegangan putus minimum sebesar 17.000 kg/cm<sup>2</sup>.
03. Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 7.3.

Tabel 7.4 Momen minimum bantalan beton pratekan dengan pre-tension

Bagian Bantalan	Momen Positif (kg-m)	Momen Negatif (kg-m)
Bawah Rel ( $M_R$ )	1.500*	750 <sup>2</sup>
Tengah Bantalan ( $M_T$ )	660 <sup>1</sup>	930 <sup>3</sup> (765*)

Keterangan : \* PD.10 Tahun 1986 Hal. 3-46

<sup>1</sup>  $M_T (+) = 0,44 M_R (+)$

<sup>2</sup>  $M_R (-) = 0,50 M_R (+)$

<sup>3</sup>  $M_T (-) = 0,62 M_R (+)$

04. Pada setiap titik potong vertikal pada kedudukan rel, tegangan minimum adalah 3,5 MPa pada kondisi pratekan awal.
05. Gaya cabur *shoulder* minimum 5500 kg/buah pada kondisi *un-crack*.
06. Bentuk penampang bantalan beton harus menyerupai trapezium dengan luas penampang bagian tengah bantalan tidak kurang dari 85 % luas penampang bagian bawah rel.
07. Pusat berat baja prategang diusahakan sedekat mungkin dengan pusat berat beton.
08. Perhitungan kehilangan pada gaya prategang cukup diambil sebesar 25 % gaya prategang awal, kecuali apabila diadakan perhitungan teoritis, maka dapat diambil nilai selain dari 25 %.

• **Konsep Bantalan Beton Blok Tunggal dengan Proses Post-tension**

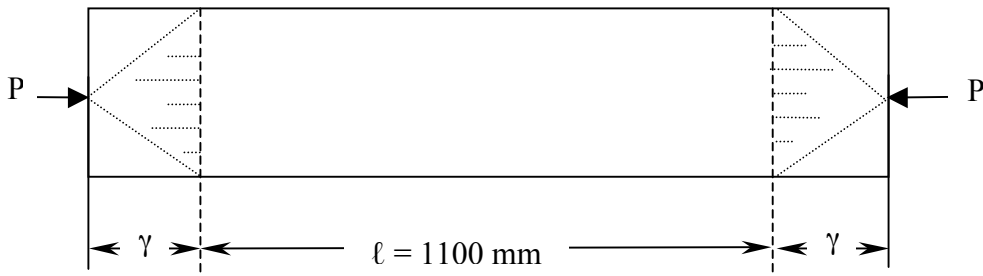
01. Ukuran Bantalan

Pada jalan lurus, bantalan beton pra-tekan dengan proses post-tension mempunyai ukuran panjang sebagai berikut :

$$L = \square + 2 \gamma \tag{7.13}$$

- dimana :  $\square$  = Jarak antara kedua sumbu vertikal rel (mm)  
 $\gamma$  = Panjang daerah regularisasi tegangan (penyaluran) yang tergantung dengan jenis angker yang digunakan (mm)

Panjang daerah penyaluran (regularisasi) merupakan jarak titik tangkap tegangan akibat gaya terpusat pada seluruh penampang (Gambar 7.6). Panjang penyaluran dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut (Khrisna Murthy Marshall dalam Penjelasan PD.10 tahun 1986, Hal. 3-51):



Gambar 7.6 Daerah panjang penyaluran

$$\gamma = \sqrt{\frac{10^3 \sqrt{f_{cu}}}{\beta}} \tag{7.14}$$

dimana :  $f_{cu}$  = kuat tekan beton saat transfer (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\beta$  = konstanta yang tergantung diameter kabel pratekan (Tabel 7.5).

Tabel 7.5 Nilai  $\beta$

Jenis Kabel	$\beta$
2 mm, wire	0,144
5 mm, wire	0,0235
7 mm, wire	0,0174
10 mm, wire	0,144
12,5 mm, wire	0,058

Sumber : Penjelasan PD No.10 tahun 1986

02. Mutu campuran beton harus mempunyai kuat tekan karakteristik tidak kurang dari 500 kg/cm<sup>2</sup>, mutu baja tarik untuk tulangan geser tidak kurang dari U-24 dan mutu baja prategang ditetapkan dengan tegangan putus minimum sebesar 17.000 kg/cm<sup>2</sup>.
03. Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 7.4.
04. Pada setiap titik potong vertikal pada kedudukan rel, tegangan minimum adalah 3,5 MPa pada kondisi pratekan awal.
05. Gaya cabur *shoulder* minimum 5500 kg/buah pada kondisi *un-crack*.
06. Bentuk penampang bantalan beton harus menyerupai trapezium dengan luas penampang bagian tengah bantalan tidak kurang dari 85 % luas penampang bagian bawah rel.
07. Pusat berat baja prategang harus selalu terletak pada daerah galih sepanjang tubuh bantalan.
08. Perhitungan kehilangan pada gaya prategang cukup diambil sebesar 20 % gaya prategang awal, kecuali apabila diadakan perhitungan teoritis, maka dapat diambil nilai selain dari 20 %.

### 6. Perencanaan Bantalan Beton Pratekan Blok Tunggal

Kekuatan tarik beton jauh lebih rendah daripada kekuatannya, contohnya untuk beton mutu K-350 memiliki kuat tarik 17,5 kg/cm<sup>2</sup> dan kuat tekan 120 kg/cm<sup>2</sup>. Momen lentur akibat beban pada bantalan akan mengakibatkan terjadinya tegangan tarik dan tegangan tekan. Supaya tegangan tarik yang terjadi lebih rendah



daripada tegangan yang diijinkan, maka dalam balok bantalan diberikan gaya tekan yang dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$\sigma = -\frac{N}{A} \pm \frac{M \cdot y}{I_x} \quad (7.15)$$

Gaya tekan N dihasilkan oleh kabel yang ditarik terlebih dahulu dan mengakibatkan kabel bertambah panjang. Jika gaya tarik pada kabel dihilangkan, maka kabel akan memendek kembali menjadi seperti panjang semula/asal. Meskipun demikian, beton akan menghalangi (menahan) kabel untuk melakukan pergerakan, oleh karena itu, terjadilah gaya tekan pada beton itu. Gejala ini merupakan proses pra-tekan yang dilakukan terhadap bantalan beton, sehingga bantalan akan dikenai gaya tekan terlebih dahulu.

Momen (M) dihitung berdasarkan teori balok di atas tumpuan elastik sebagaimana telah dijelaskan pada perhitungan bantalan kayu. Gaya tarik dan tekan ijin pada bantalan beton untuk mutu K-350 dan K-500 dapat dilihat dalam Tabel 7.6 berikut ini.

Tabel 7.6 Tegangan ijin beton

Mutu Beton	Tegangan Ijin Tekan (kg/cm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin Tarik (kg/cm <sup>2</sup> )
K-350	120	17,5
K-500	200	35

### 7. Perhitungan untuk Dimensi Bantalan Beton Blok Tunggal

Analisis tegangan pada bantalan didasarkan pada balok terbatas (*finite beam*) dengan perhitungan pada faktor kekakuan tertentu.

#### Prosedur perhitungan dijelaskan berikut ini :

1. Perhitungan Modulus Elastisitas berdasarkan nilai  $f_{cu}$

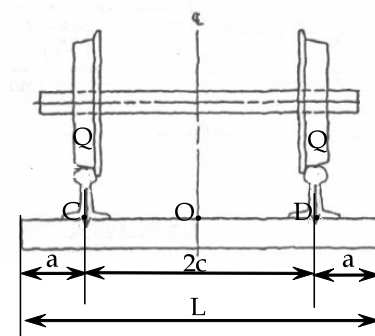
$$E = 6400 \sqrt{f_{cu}} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (7.16)$$

2. Perhitungan  $\lambda$  Bantalan Beton pada Bagian di Bawah Rel dan Tengah Bantalan:

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

3. Perhitungan Momen di Titik C dan D, tepat di bawah kaki rel dalam Persamaan 9 (lihat Gambar Samping Kanan) :

$$M_{C/D} = \frac{Q}{4\lambda} \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} [ 2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda L) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda L) - \sinh \lambda L ]$$



## Bab VII Bantalan Rel

$$2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda L) - \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c + \sinh \lambda L)]$$

dimana :  $Q = 60 \% Pd$

4. Perhitungan Momen di Titik O (Tengah Bantalan) dalam Persamaan 10:

$$M_O = - \frac{Q}{2\lambda} \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} [\sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda(L-c)) + \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda(L-c)) + \cosh \lambda c \cos \lambda(L-c) - \cos \lambda c \cosh \lambda(L-c)]$$

dimana :  $Q = 60 \% Pd$

5. Analisis Tegangan Tahap Pratekan Awal

$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} - \frac{P_{initial} \cdot e}{W} \text{ (sisi atas bagian bantalan bawah rel)} \quad (7.17)$$

$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} + \frac{P_{initial} \cdot e}{W} \text{ (sisi bawah bagian bantalan bawah rel)} \quad (7.18)$$

$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} + \frac{P_{initial} \cdot e}{W} \text{ (sisi atas bagian tengah bantalan)} \quad (7.19)$$

$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} - \frac{P_{initial} \cdot e}{W} \text{ (sisi bawah bagian tengah bantalan)} \quad (7.20)$$

6. Analisis Tegangan Tahap Pratekan Efektif

$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} - \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} + \frac{M}{W} \text{ (sisi atas bagian bantalan bawah rel)} \quad (7.21)$$

$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} + \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} - \frac{M}{W} \text{ (sisi bawah bagian bantalan bawah rel)} \quad (7.22)$$

$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} + \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} - \frac{M}{W} \text{ (sisi atas bagian tengah bantalan)} \quad (7.23)$$

$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} - \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} + \frac{M}{W} \text{ (sisi bawah bagian tengah bantalan)} \quad (7.24)$$

dimana,

$\lambda$  = *Dumping factor*

$I_x$  = Momen inersia rel pada sumbu x - x

$M$  = Momen pada bantalan

$Pd$  = Beban dinamis dari kendaraan

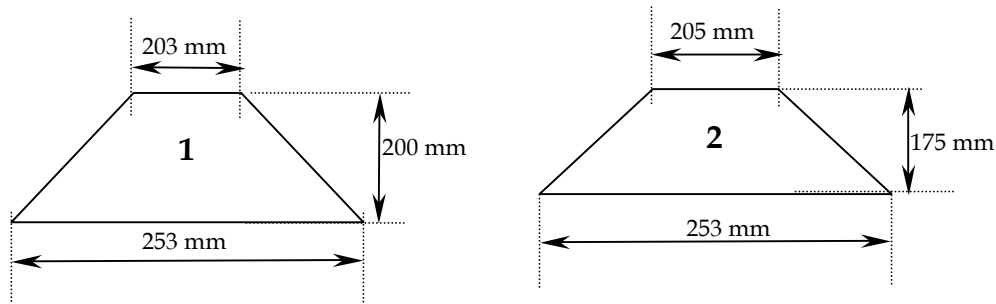
$Q$  = Beban yang dapat diterima oleh bantalan

$W$  = Momen tahanan

**Contoh :**

Data Bantalan Produksi Dalam Negeri : bantalan beton dengan bentuk trapesium dengan baja prategang sebanyak 18 buah dengan diameter 5,08 mm, tegangan putus  $\sigma = 16.000 \text{ kg/cm}^2$ . Pada saat kondisi transfer = 70 % kapasitas maksimum sehingga  $P_{\text{initial}} = 18 \times 2.270,24 \text{ kg}$ , dan pada saat kondisi efektif = 55 % kapasitas maksimum sehingga  $P_{\text{initial}} = 18 \times 1.783,76 \text{ kg}$ . Mutu beton menggunakan K-500, dan k (modulus jalan rel = reaksi balas) =  $180 \text{ kg/cm}^2$ .

Dimensi Bantalan :



**(1) Bagian Bawah Rel :**

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

$$I_{X-1} = 15.139,09 \text{ cm}^4$$

$$Y_{1(a)} = 10,368 \text{ cm}$$

$$Y_{1(b)} = 9,64 \text{ cm}$$

$$W_{1(a)} = 1460,6 \text{ cm}^3$$

$$W_{1(b)} = 1571,26 \text{ cm}^3$$

**(2) Bagian Tengah Bantalan :**

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

$$I_{X-2} = 10.190,02 \text{ cm}^4$$

$$Y_{1(a)} = 9,055 \text{ cm}$$

$$Y_{1(b)} = 8,445 \text{ cm}$$

$$W_{1(a)} = 1125,35 \text{ cm}^3$$

$$W_{1(b)} = 1206,63 \text{ cm}^3$$

**Keterangan :**

$Y_{1(a)}$  = letak garis netral dari sisi atas  
 $Y_{1(b)}$  = letak garis netral dari sisi bawah  
 $W_{1(a)}$  = momen tahanan sisi atas  
 $W_{1(b)}$  = momen tahanan sisi bawah

- Perhitungan Modulus Elastisitas berdasarkan nilai  $f_{cu}$

$$E = 6400 \sqrt{500} = 1,431083506 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

- Perhitungan  $\lambda$  Bantalan Beton pada Bagian di Bawah Rel dan Tengah Bantalan:

$$\text{Bawah Rel} = \lambda_r = \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 1,43 \times 10^5 \times 15.139,09}} = 0,012 \text{ cm}^{-1}$$

$$\text{Tengah Bantalan} = \lambda_t = \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 1,43 \times 10^5 \times 10190,02}} = 0,013 \text{ cm}^{-1}$$

- Perhitungan Momen di Titik C dan D, tepat di bawah kaki rel (C dan D) dan tengah bantalan (O) :

**Bab VII Bantalan Rel**

Dari perhitungan beban kendaraan dinamik jika digunakan dalam perencanaan adalah beban gandar maksimum (18 ton), maka  $P_s = 9000$  kg. Untuk Kelas Jalan 1 (Vrencana = 150 km/jam), beban dinamik ( $P_d$ ) dapat ditentukan sebagai :

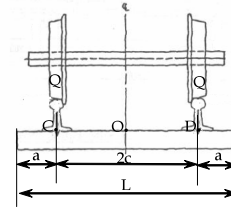
$$P_d = \left[ 1 + 0,01 \times \left( \frac{V}{1,609} - 5 \right) \right] P_s = 16.940,3 \text{ kg.}$$

maka, beban yang diterima bantalan dari kendaraan kereta api :

$$Q_1 = 60 \% P_d = 10.164,18 \text{ kg.}$$

- Dimensi Bantalan :

$$\left( \begin{array}{l} L = 200 \text{ cm} \\ a = 45 \text{ cm} \\ c = 55 \text{ cm} \end{array} \right)$$



$$M_{C/D} = \frac{10.164,18}{4(0,012)} \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} [ 2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda L) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda L) - \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda L) - \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c + \sin \lambda L) ]^{\#}$$

$$M_{C/D} = 102.123,2 \text{ kg-cm.}$$

#Perhitungan Fungsi Trigonometri dan Hiperbolikus diberikan dalam Tabel 7.7.

$$M_O = - \frac{10.164,18}{2(0,013)} \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} [ \sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda(L-c)) + \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda(L-c)) + \cosh \lambda c \cos \lambda(L-c) - \cos \lambda c \cosh \lambda(L-c) ]^{\#}$$

$$M_O = -50.572,43389 \text{ kg-cm.}$$

#Perhitungan Fungsi Trigonometri dan Hiperbolikus diberikan dalam Tabel 7.7.

Tabel 7.7 Perhitungan fungsi trigonomteri untuk momen di bagian bantalan bawah rel dan tengah bantalan

**MOMEN CALC.UNDER RAIL.**

$\sin^{\wedge} L$	=	0.675
$\sinh^{\wedge} L$	=	5.466
$\cosh^{\wedge} a$	=	1.149
$\cosh 2^{\wedge} c$	=	2.005
$\cosh^{\wedge} L$	=	5.557
$\cos^{\wedge} a$	=	0.858
$\sinh 2^{\wedge} a$	=	1.303
$\sin 2^{\wedge} c$	=	0.969
$\sinh 2^{\wedge} c$	=	1.738
$\sin 2^{\wedge} a$	=	0.882
$\cos 2^{\wedge} c$	=	0.248
$\cos^{\wedge} L$	=	-0.737
$\sinh^{\wedge} c$	=	0.709
$\sin^{\wedge} c$	=	0.613
$\sin^{\wedge} (L-c)$	=	0.986
$\sinh^{\wedge} (L-c)$	=	2.761
$\cosh^{\wedge} c$	=	1.226
$\cos^{\wedge} (L-c)$	=	-0.168
$\cos^{\wedge} c$	=	0.790
$\cosh^{\wedge} (L-c)$	=	2.936

**MOMEN CALC.MIDDLE OF SLEEPER**

$\sin^{\wedge} L$	=	0.516
$\sinh^{\wedge} L$	=	6.695
$\cosh^{\wedge} a$	=	1.176
$\cosh 2^{\wedge} c$	=	2.209
$\cosh^{\wedge} L$	=	6.769
$\cos^{\wedge} a$	=	0.834
$\sinh 2^{\wedge} a$	=	1.456
$\sin 2^{\wedge} c$	=	0.990
$\sinh 2^{\wedge} c$	=	1.970
$\sin 2^{\wedge} a$	=	0.921
$\cos 2^{\wedge} c$	=	0.140
$\cos^{\wedge} L$	=	-0.857
$\sinh^{\wedge} c$	=	0.777
$\sin^{\wedge} c$	=	0.656
$\sin^{\wedge} (L-c)$	=	0.951
$\sinh^{\wedge} (L-c)$	=	3.217
$\cosh^{\wedge} c$	=	1.267
$\cos^{\wedge} (L-c)$	=	-0.309
$\cos^{\wedge} c$	=	0.755
$\cosh^{\wedge} (L-c)$	=	3.369

• Analisis Tegangan Tahap Pratekan Awal

1. Bagian bantalan di bawah rel

Sisi bagian atas :

$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} - \frac{P_{initial} \cdot e}{W}$$

$$\sigma = \frac{18 \times 2270,24}{456} - \frac{18 \times 2270,24 \times 0,135}{1460,46} = 85,84 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

Sisi bagian bawah :

$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} + \frac{P_{initial} \cdot e}{W}$$

$$\sigma = \frac{18 \times 2270,24}{456} + \frac{18 \times 2270,24 \times 0,135}{1571,26} = 93,12 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

2. Bagian tengah bantalan rel

Sisi bagian atas :

$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} + \frac{P_{initial} \cdot e}{W}$$

$$\sigma = \frac{18 \times 2270,24}{400,75} + \frac{18 \times 2270,24 \times 1,055}{1125,35} = 140,28 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

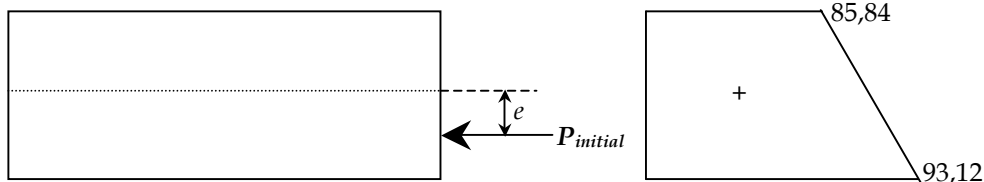
Sisi bagian bawah :

## Bab VII Bantalan Rel

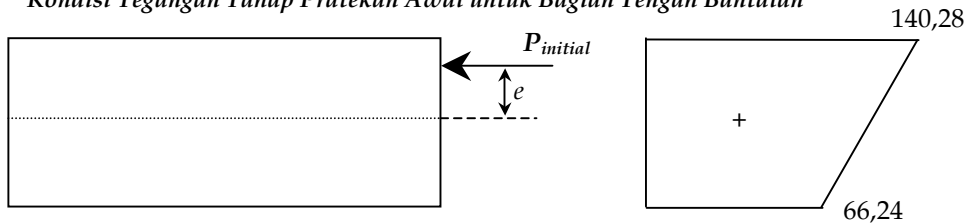
$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} - \frac{P_{initial} \cdot e}{W}$$

$$\sigma = \frac{18 \times 2270,24}{400,75} - \frac{18 \times 2270,24 \times 1,055}{1206,63} = 66,24 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

*Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal untuk Bagian Bawah Rel*



*Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal untuk Bagian Tengah Bantalan*



Catatan : + adalah tegangan tekan

### • Analisis Tegangan Tahap Pratekan Efektif

#### 1. Bagian bantalan di bawah rel

Sisi bagian atas :

$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} - \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} + \frac{M}{W}$$

$$\sigma = \frac{18 \times 1783,76}{456} - \frac{18 \times 1783,76 \times 0,135}{1460,46} + \frac{102.123,2}{1460,46} = 137,37 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

Sisi bagian bawah :

$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} + \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} - \frac{M}{W}$$

$$\sigma = \frac{18 \times 1783,76}{456} + \frac{18 \times 1783,76 \times 0,135}{1571,26} - \frac{102.123,2}{1571,26} = 8,175 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

#### 2. Bagian tengah bantalan rel

Sisi bagian atas :

$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} + \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} - \frac{M}{W}$$

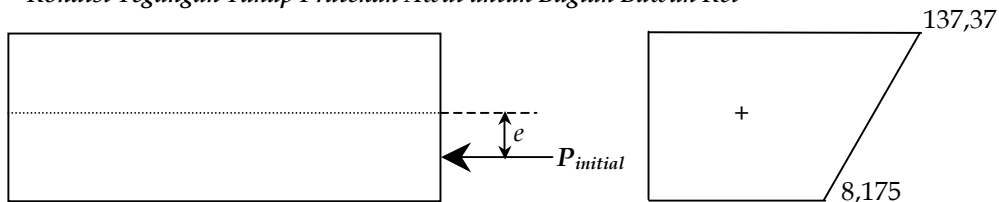
$$\sigma = \frac{18 \times 1783,76}{400,75} + \frac{18 \times 1783,76 \times 1,055}{1125,35} - \frac{50.572,43}{1125,35} = 65,28 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

Sisi bagian bawah :

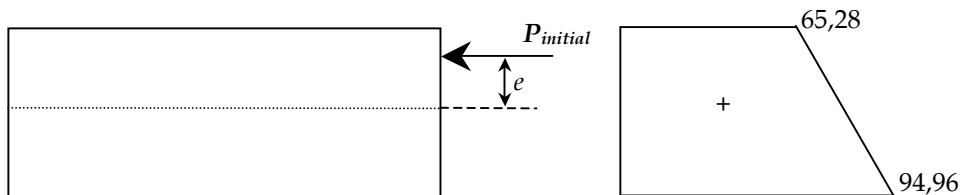
$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} - \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} + \frac{M}{W}$$

$$\sigma = \frac{18 \times 1783,76}{400,75} - \frac{18 \times 1783,76 \times 1,055}{1125,35} + \frac{50.572,43}{1125,35} = 94,96 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal untuk Bagian Bawah Rel



Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal untuk Bagian Tengah Bantalan



Catatan : + adalah tegangan tekan

## 8. Perencanaan Tulangan Geser pada Bantalan Pra-tekan

Sebagaimana perencanaan balok beton yang biasa dilakukan untuk bangunan, di dalam perencanaan bantalan beton pra-tekan pun harus dilakukan pengawasan terhadap tegangan gesernya. Apabila tegangan geser yang dihitung melebihi tegangan geser yang diijinkan, maka perlu dipasang tulangan geser pada bantalan.

Pada balok, tulangan geser dapat berupa tulangan miring atau sengkang. Bantalan beton KP3BAKA dan KODJA tidak menggunakan tulangan geser, sedangkan pada bantalan beton WIKA menggunakan tulangan geser  $\varnothing$  6 mm (Penjelasan PD.10 tahun 1986).

Peraturan Beton Bertulang Indonesia (1971) mensyaratkan bahwa suatu balok tidak memerlukan tulangan geser apabila tegangan geser ( $\tau$ ) :

$$\tau < 0,43 \sqrt{\sigma_{bk}'} \quad (7.25)$$

## Bab VII Bantalan Rel

Selain itu, tegangan geser tidak boleh melebihi dari :

$$\tau < 1,08 \sqrt{\sigma_{bk}'} \quad (7.26)$$

dimana :  $\sqrt{\sigma_{bk}'}$  merupakan tegangan tekan beton karakteristik.

### 9. Perencanaan Bantalan Beton Pratekan Bi-Blok

#### a. Dimensi Bantalan Bi-Blok

Dimensi bantalan bi-blok telah diatur dalam PD.10 tahun 1986 yang diberikan dalam Tabel 7.8 berikut ini, beserta perbandingan bantalan bi-blok dari negara lainnya.

Tabel 7.8 Dimensi bantalan bi-blok

	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tinggi sisi luar (cm)	Tinggi sisi dalam (cm)
Pakistan	75,24	35,56	19,685	19,685
Perancis	79,05	31,75	22,86	20,32
Jerman	72,2	29	22,0	19,0
Indonesia	70	30	20,0 (tinggi rata-rata)	

Sumber : PD.10 tahun 1986

#### b. Mutu Campuran Beton

- Mutu campuran beton harus mempunyai kuat tekan karakteristik tidak kurang dari K-385 (385 kg/cm<sup>2</sup>) yang dihasilkan dari asumsi dan perhitungan dari Penjelasan Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986 seperti di bawah ini.

Jika : Bantalan beton bi-blok dengan ukuran sebagaimana pada Tabel 7.8, dengan Faktor Beban untuk Beban Statik = 1,7 dan q (beban merata asumsi) = 7,3 kg/cm<sup>2</sup>. Maka penampang kritis bantalan di bawah rel dapat dihitung tegangan normalnya sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{1}{2}ql^2b}{\frac{1}{6}bh^2} \quad (7.27)$$

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2} \times 7,3 \times (35)^2 \times 30}{\frac{1}{6} \times 30 \times (20)^2} = 67 \text{ kg/cm}^2$$

Kontrol tegangan normal :  $\sigma = 0,33 \sigma_{bk}'$   
 untuk,  $\sigma = 67 \text{ kg/cm}^2$ , maka :  $\sigma_{bk}' \geq 200 \text{ kg/cm}^2$

dan tegangan geser ( $\tau_{pons}$ ) dihitung sebagai :

$$\tau_{pons} = \frac{Q}{2(bh)} = \frac{Ps \times FB}{2(bh)} \quad (7.28)$$

$$\tau_{pons} = \frac{9000 \times 1,7}{2(30 \times 20)} = 12,75 \text{ kg/cm}^2$$

Dengan menganggap bahwa penampang tidak ditunjang oleh tulangan geser, maka :



Kontrol Tegangan Geser :  $\tau_{pons} \leq 0,65 \sqrt{\sigma_{bk}'}$

Untuk  $\tau_{pons} = 12,75 \text{ kg/cm}^2 \leq 0,65 \sqrt{\sigma_{bk}'}$ , maka  
 $\sigma_{bk}' > 385 \text{ kg/cm}^2$

Dari dua pengawasan mutu di atas, diambil harga terbesar yaitu  $\sigma_{bk}' > 385 \text{ kg/cm}^2$ , dengan demikian disyaratkan dari PD.10 tahun 1986 untuk menggunakan mutu beton lebih dari K-385.

- Mutu baja untuk tulangan lentur tidak boleh kurang dari U-32 dan mutu baja untuk batang penghubung juga tidak boleh kurang dari U-32. Panjang batang penghubung harus dibuat sedemikian sehingga cukup untuk meletakkan anker penambat.

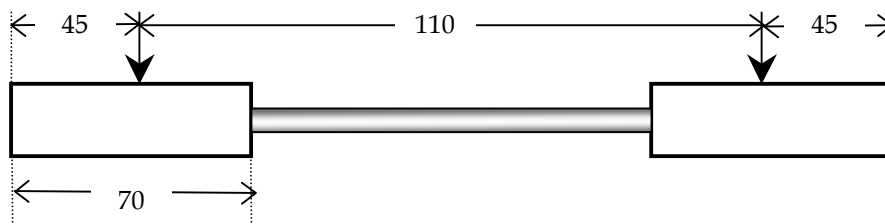
### c. Perhitungan Mutu Bantalan Beton Bi Blok

#### Prosedur Perhitungan :

1. Tentukan dimensi bantalan bi-blok yang akan digunakan (sebagai referensi gunakan Tabel 7.8).
2. Perhitungan tegangan di bawah bantalan, yaitu dengan mengasumsikan bahwa tegangan merata yang terjadi di bawah bantalan merupakan tegangan merata dalam satu blok yang dihitung dari beban luar yang bekerja pada bantalan (beban kendaraan).
3. Kontrol tegangan tekan yang terjadi pada beton terhadap mutu beton yang akan digunakan (Persamaan 7.27).
4. Kontrol tegangan geser tekan yang terjadi pada beton terhadap mutu beton yang akan digunakan (Persamaan 7.28).

#### Contoh :

##### 1. Digunakan dimensi bantalan bi-blok, sebagai berikut :



Tipe bantalan bi-blok

##### 2. Tegangan di bawah bantalan :

- Beban luar :  $Q = 60 \% Pd$   
Dari perhitungan beban kendaraan dinamik jika digunakan dalam perencanaan adalah beban gandar maksimum (18 ton), maka  $P_s = 9000 \text{ kg}$ . Untuk Kelas Jalan 1 (Vrencana = 150 km/jam), beban dinamik ( $P_d$ ) dapat ditentukan sebagai :

$$P_d = \left[ 1 + 0,01 \times \left( \frac{V}{1,609} - 5 \right) \right] P_s = 16.940,3 \text{ kg.}$$

## Bab VII Bantalan Rel

maka, beban yang diterima bantalan dari kendaraan kereta api :  
 $Q_1 = 60 \% Pd = 10.164,18 \text{ kg}$ .

- Beban merata ( $q$ ) =  $\frac{Q}{\text{luas balok}} = \frac{10.164,18}{(70 \times 30)} = 4,84 \text{ kg/cm}^2$
- Momen di bawah rel =  $M_R = \frac{1}{2}ql^2b = \frac{1}{2}(4,84) \times (45)^2 \times 30 = 147.015 \text{ kg-cm}$ .
- Tahanan momen =  $W = \frac{1}{6}bh^2 = \frac{1}{6}(30)(20)^2 = 2000 \text{ cm}^3$

### 3. Kontrol Tegangan Normal di bawah bantalan terhadap mutu beton :

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{1}{2}ql^2b}{\frac{1}{6}bh^2}$$

$$\sigma = \frac{147.015}{2000} = 73,5075 \text{ kg/cm}^2$$

Kontrol tegangan normal :

$$\sigma = 0,33 \sigma_{bk}'$$

untuk,  $\sigma = 73,5075 \text{ kg/cm}^2$ , maka :  $\underline{\sigma_{bk}' \geq 222,75 \text{ kg/cm}^2}$

### 4. Kontrol Tegangan Geser di bawah bantalan terhadap mutu beton :

$$\tau_{\text{pons}} = \frac{Q}{2(bh)} = \frac{10.164,18}{2(20 \times 30)} = 8,47 \text{ kg/cm}^2$$

Kontrol Tegangan Geser :

$$\tau_{\text{pons}} \leq 0,65 \sqrt{\sigma_{bk}'}$$

untuk  $\tau_{\text{pons}} = 8,47 \text{ kg/cm}^2 \leq 0,65 \sqrt{\sigma_{bk}'}$ , maka :  $\underline{\sigma_{bk}' > 169,8 \text{ kg/cm}^2}$

**Kesimpulan** : Dari dimensi bantalan yang diberikan dan berdasarkan tegangan normal/tekan ( $\underline{\sigma_{bk}' \geq 222,75 \text{ kg/cm}^2}$ ) dan tegangan gesernya ( $\underline{\sigma_{bk}' > 169,8 \text{ kg/cm}^2}$ ) maka dapat digunakan mutu beton K-225 yang memiliki  $\sigma_{bk}' = 225 \text{ kg/cm}^2$ .

---

## 10. Kehilangan Tegangan (Prestressing Loose)

Dalam bantalan beton, biasanya terjadi bermacam-macam kejadian fisik yang mengakibatkan gaya tekan  $N$  yang bekerja pada beton menjadi lebih kecil daripada gaya  $P$  yang ditegangkan. Berkurangnya gaya tekan ini disebut sebagai kehilangan tegangan, yang pada umumnya disebabkan oleh adanya kejadian fisik perpendekan elastis, rangkai beton (*creep*), susut beton (*shrinkage*) dan relaksasi baja.

## 11. Pemasangan Jarak Bantalan pada Jalur

Pemasangan bantalan kayu, beton maupun baja menurut PD No.10 tahun 1986, pada jalan yang lurus harus memiliki jumlah bantalan 1.667 buah setiap kilometer. Ukuran ini diambil dari spesifikasi Proyek Bukit Asam No. BAS 350-0204 Rev. 2 Oktober, 26, 1983. Pada lengkung horizontal (alinemen), jarak bantalan dapat diambil sebesar 60 cm, yang diukur pada rel bagian luar.

## 12. Pengujian Kualitas Bantalan

Sebelum perencanaan jalan rel selesai, bantalan kayu, beton maupun baja harus terlebih dahulu diuji kekuatannya dengan pengujian sebagai berikut :

1. Pengujian Beban Statis
2. Pengujian Beban Dinamis
3. Pengujian Cabut

Khusus untuk bantalan beton, juga perlu dilakukan pengujian tekan sebelum diadakan pengecoran. Ini dilakukan untuk mengetahui kualitas mutu betonnya. Keterangan lebih rinci mengenai pengujian ini dapat dibaca dalam Peraturan Bahan Jalan Rel Indonesia.

### **G. LATIHAN SOAL**

1. Sebutkan faktor-faktor apasajakah yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan jenis bantalan untuk struktur jalan rel ?
2. Mengapa penggunaan bantalan beton menjadi primadona dan yang paling dominan digunakan untuk seluruh jaringan jalan kereta api saat ini di Indonesia?
3. Sebutkan faktor-faktor apakah yang membatasi penggunaan bantalan baja/besi untuk struktur jalan rel?
4. Sebutkan kriteria fisik yang harus dipenuhi untuk bantalan kayu?
5. Jelaskan logika distribusi pembebanan pada bantalan dari beban kendaraan kereta api? Bagaimana cara menghitungnya ?
6. Jika diketahui Data Bantalan Produksi Dalam Negeri : bantalan beton *monolithic* dengan bentuk trapesium dengan baja prategang sebanyak 20 buah dengan diameter 5,08 mm, tegangan putus  $\sigma = 16.000 \text{ kg/cm}^2$ . Pada saat kondisi transfer = 70 % kapasitas maksimum sehingga  $P_{\text{initial}} = 20 \times 2.270,24 \text{ kg}$ , dan pada saat kondisi efektif = 55 % kapasitas maksimum sehingga  $P_{\text{initial}} = 20 \times 1.783,76 \text{ kg}$ . Mutu beton menggunakan K-500, dan k (modulus jalan rel = reaksi balas) = 180  $\text{kg/cm}^2$ . Bantalan beton tersebut dipasang untuk Kelas Jalan I dengan Beban Gandar 16 Ton. Tentukan mutu beton yang dapat digunakan ?
7. Jika digunakan bantalan kayu dengan ukuran :  $(200 \times 22 \times 13) \text{ cm}^3$  (PD. 10 Tahun 1986) dengan  $\sigma_t = 125 \text{ kg/cm}^2$ , E (modulus elastisitas kayu) =  $1,10 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  dan k (modulus jalan rel = reaksi balas) = 180  $\text{kg/cm}^2$ , dan bantalan kayu tersebut dipasang untuk Kelas Jalan II dengan beban gandar maksimum rencana 14 Ton, tentukan apakah bantalan kayu tersebut dapat digunakan ?
8. Tentukan panjang bantalan beton *monolithic* dengan proses konstruksi post-tension, yang dapat digunakan apabila digunakan mutu beton K-400 pada saat transfer tegangan tekan beton adalah 85 % dari kapasitas maksimum, dan diameter kabel yang digunakan 7 mm !

### **H. DAFTAR PUSTAKA**

1. Esveld, C. 1989. Modern Railway Track. MRT Publication. Germany.
2. Hay, W.W. 1982. Railroad Engineering. Second Edition. Wiley.
3. Hidayat, H. & Rachmadi. 2001. Rekayasa Jalan Rel. Catatan Kuliah. Penerbit ITB. Bandung.
4. PJKA. 1986. Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10). Bandung.
5. PJKA. 1986. Penjelasan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Penjelasan Peraturan Dinas No.10). Bandung.

## **Bab VII Bantalan Rel**

6. Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. 1961. Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia NI-5. Direktorat Jenderal Cipta Karya. Departemen Pekerjaan Umum. Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan. Bandung.
7. Direktorat Jenderal Cipta Karya. 1971. Peraturan Beton Bertulang Indonesia.