



Kriteria Teknik dan Perencanaan Struktur Bantalan Jalan Rel

Teknik Sipil



Outlines

- Deskripsi Mengenai Fungsi dan Berbagai Jenis Bantalan yang digunakan.
- Persyaratan Bantalan Kayu
- Persyaratan Bantalan Besi
- Persyaratan Bantalan Beton
- Perencanaan Bantalan



Fungsi Bantalan

1. Mengikat rel sehingga lebar sepur tetap terjaga.
2. Menerima beban vertikal dan lateral oleh beban di atasnya dan mendistribusikannya ke balas sebagai gaya vertikal.
3. Menjaga stabilitas pergerakan struktur rel ke arah luar dengan mendistribusikan gaya longitudinal dan lateral dari rel ke balas.
4. Menghindari kontak langsung rel dengan air tanah.



Jenis Bantalan

- Bantalan Kayu
- Bantalan Besi
- Bantalan Beton
- Slab-Track



Pemilihan Jenis Bantalan

Pemilihan jenis bantalan ditentukan oleh :

1. Umur rencana,
2. Karakteristik beban,
3. Harga bantalan,
4. Kondisi lingkungan dan tanah dasar.



Pertimbangan Penggunaan Slab Track

- ▶ 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.
- ▶ Diperlukan konstruksi penambat arah melintang supaya jarak antar bantalan tetap terpelihara dengan baik.
- ▶ Bahan konstruksi yang tepat untuk bantalan membujur adalah konstruksi beton mengingat pertimbangan praktis dan teknisnya.



Bantalan Kayu

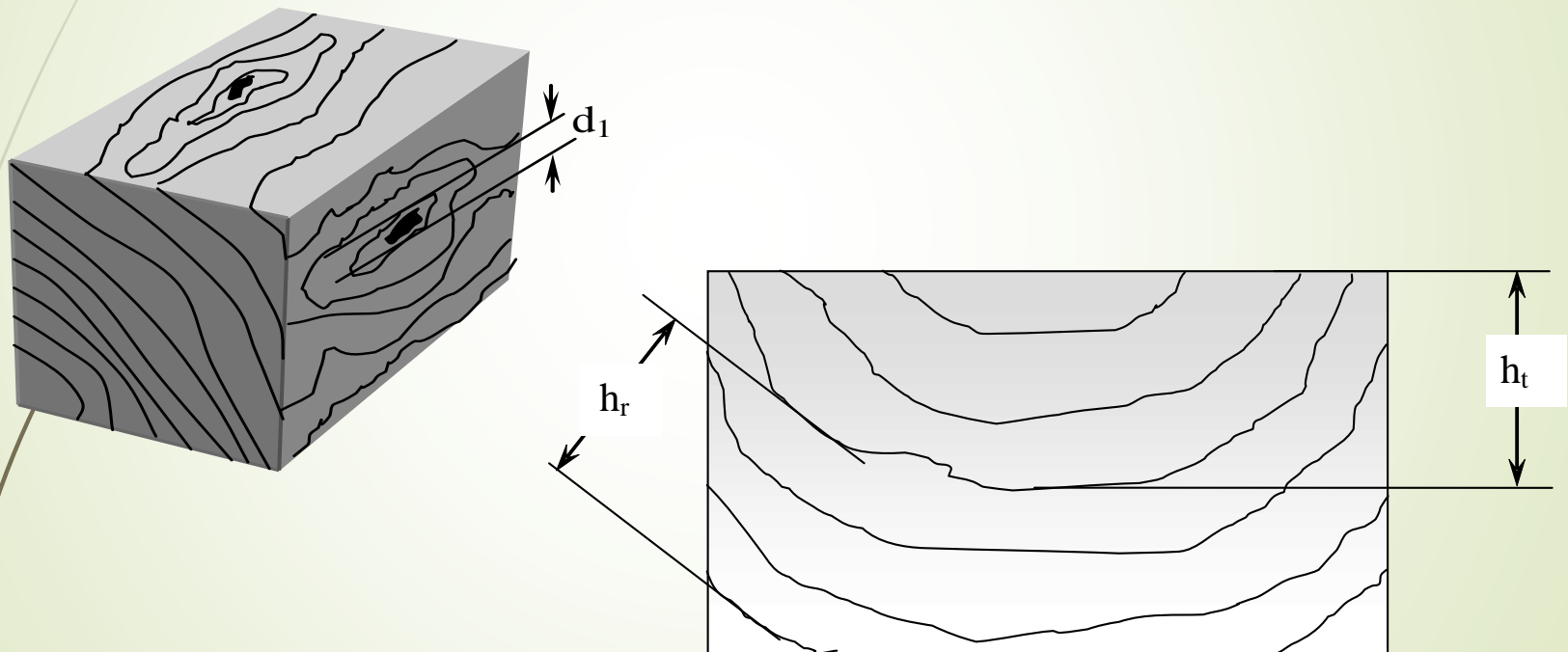
SYARAT MUTU, KEKUATAN & KEAWETAN

1. Kayu utuh, padat, tidak bermata, tidak ada bekas ulat dan tidak ada tanda mulai lapuk.
2. Kadar air maksimum 25 %
3. Bantalan kayu terbuat dari kayu mutu A dengan kelas kuat/awet I atau II

Persyaratan Kayu Mutu A

1. Kayu harus kering udara
2. Besar mata kayu tidak melebihi $\frac{1}{6}$ lebar bantalan (atau lebih dari 3,5 cm)
3. Bantalan tidak boleh mengandung sisi lengkung yang lebih besar daripada $\frac{1}{10}$ tinggi dan $\frac{1}{10}$ lebar bantalan
4. Miring arah serat (tangensial α) tidak melebihi $\frac{1}{10}$
5. Retak arah radial tidak boleh lebih dari $\frac{1}{4}$ tebal bantalan dan retak-retak menurut lingkaran tumbuh tidak melebihi $\frac{1}{5}$ tebal bantalan.

Gambar Mata Kayu dan Arah Retak pada Bantalan Kayu



Contoh Jenis Kayu untuk Bantalan

Nama Botanis	Nama Perdagangan	Kelas Kuat	Kelas Awet
Intsia Spec.Div	Merbau	I – II	I – II
Euisderoxylon zwageri T.et B	Ulin, Borneo, Kayu Besi	I	I
Manilkara Kauki (L)	Sawo Kecil	I	I
Adina Minutiflora Val	Berumbung Gerunggung	I – II	II
Tectona Grandis L.f	Jati	II	I – II
Dalbergia Latifolia Roxb	Sonokeling	II	I



Umur Bantalan

- Umur kelas awet I = 8 tahun dan umur kelas awet II = 5 tahun, pada kondisi terbuka dan berhubungan dengan tanah lembab tanpa adanya serangan rayap dan bubuk.
- Perawatan untuk memperpanjang umur bantalan dengan perendaman terhadap bahan-bahan kimia misalnya *retensi pengawetan 10*.



Ukuran Bantalan Kayu Indonesia Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986

Bantalan Kayu pada Jalan Lurus :

200 x 22 x 13 (PJKA)

210 x 20 x 14 (JNR)

Bantalan Kayu pada Jembatan :

180 x 22 x 20 (PJKA)

180 x 22 x 24 (JNR)

Toleransi yang diperbolehkan untuk :

panjang bantalan : + 40 mm s.d. – 20 mm,

lebar bantalan : + 20 mm s.d. – 10 mm

tinggi bantalan : + 10 mm.

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

Syarat Kekuatan Bantalan

Kelas Kayu	Momen Maksimum (kg.m)
I	800
II	530

Jenis Tegangan Ijin	Kelas Kuat	
	I	II
Lentur (σ_{lt} dalam kg/cm^2)	125	83
Tekan Sejajar Serat ($\sigma_{tk//}$ dalam kg/cm^2)	108	71
Tarik Sejajar Serat ($\sigma_{tr//}$ dalam kg/cm^2)	108	71
Tekan Tegak Lurus Serat ($\sigma_{tk\perp}$ dalam kg/cm^2)	33	21
Geser (τ dalam kg/cm^2)	17	10



Perkuatan Tahanan Balas pada Bantalan Kayu

Salah satu cara untuk memperbesar parameter tahanan balas (*ballast resistance*) adalah memperluas permukaan bantalan yang biasa disebut *anchoring device*, *safety caps* atau angker bantalan kayu. Dengan meningkatnya permukaan bantalan maka nilai resistensi balas menjadi tinggi.



Kerusakan Bantalan

1. Penurunan kekuatan akibat pelapukan
2. Kerusakan bantalan akibat tingginya beban gandar yang mengakibatkan alat penambat tidak berfungsi baik sehingga beban langsung diterima oleh bantalan secara vertikal dan lateral.
3. Susutnya kayu



Bantalan Besi

1. Umur bantalan relatif panjang dan ringan sehingga mudah dalam pengangkutan dan pemasangan.
2. Stabilitasnya kurang baik (arah lateral, vertikal atau longitudinal) karena berat yang ringan dan gesekan diantara permukaan bantalan dengan balas relatif kecil (tidak sesuai dengan lalu lintas kecepatan tinggi dan menerus)
3. Bantalan harus selalu kering untuk mengurangi korosi sehingga diperlukan konstruksi balas yang mampu meloloskan air dan tidak sesuai untuk daerah yang sering terendam (misal: perlintasan).

Syarat Kekuatan

- ▶ Bantalan Besi Bagian Tengah dan Bawah harus mampu menahan momen 650 kgm.
- ▶ Tegangan ijin bantalan besi 1600 kg/cm² sehingga momen tahanan bantalan besi minimal 40,6 cm³.
- ▶ Ukuran Bantalan :
 - Panjang : 2000 mm
 - Lebar Atas: 144 mm
 - Lebar Bawah : 232 mm
 - Tebal Baja : minimal 7 mm



Perkuatan Bantalan Besi

- Anchoring Device
- Safety Caps
- Merubah Geometri menjadi Y-sleeper



Bantalan Beton

- Bantalan beton memiliki stabilitas baik, umur lama, biaya pemeliharaan rendah dan komponen yang sedikit.
- Berat bantalan 160-200 kg/buah sehingga memiliki tahanan vertikal, lateral dan longitudinal yang baik.
- Pemakaian bantalan beton digalakkan mengingat bantalan kayu semakin sulit.



Jenis Bantalan Beton

1. Bantalan Beton Pratekan Blok Tunggal dengan Jenis Pembuatan secara PostTension dan PreTension.
2. Bantalan Beton Blok Ganda (Bi-Block Concrete Sleeper)



Penarikan Kabel

Proses pretension, penyaluran kabel melalui tegangan geser antara kabel dan beton sedangkan proses post tension melalui sistem penjangkaran di ujung kabel.

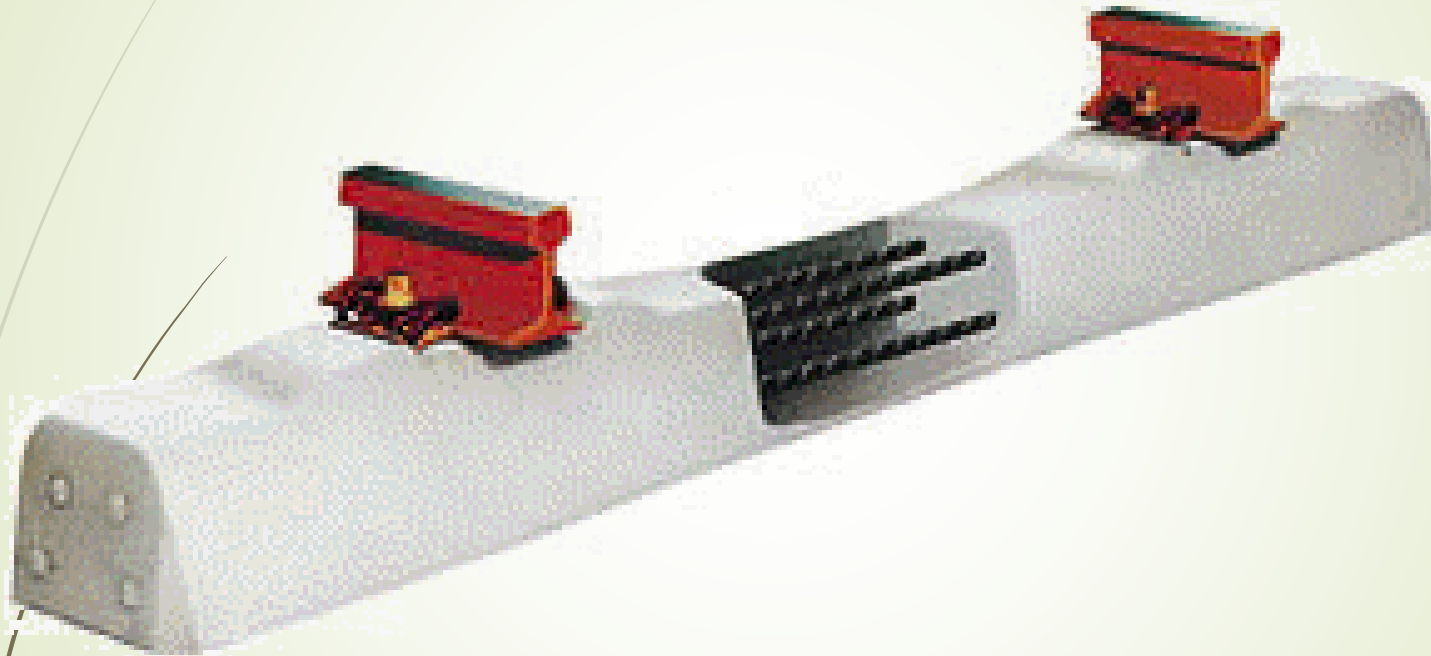
- Pre Tension

Misal : WIKA, Adhi Karya, BSD, Bv 53 (Jerman), Dow-Mac (Inggris).

- Post Tension

Misal : B 55 (Jerman), Franki Bagon (Belgia).

Bantalan Pre-Tension & Post-Tension





Aspek Produksi

- ▶ Longline Production

Kabel pretekan (600 m) ditegangkan, shoulder penambat diletakkan pada posisi yang benar kemudian dicor. Digetarkan, di-curing dan setelah kuat dipotong dalam 2 meter-an.

- ▶ Thosti Operation

Bantalan dicetak dalam mould 2 meter-an, terdiri dari 2 buah bantalan, setelah shoulder diletakkan pada posisis yang benar, kabel ditegangkan, kemudian dicor dan di-curing selama lebih 1 hari dan baru dilepas dari cetakan.

Fabrikasi Bantalan Beton



Syarat Bantalan Beton Pratekan Blok Tunggal Proses Pretension

➤ Ukuran Bantalan

Pada bagian lurus : $L = 1 + 2 \alpha \Phi$

l = jarak di antara dua sumbu vertikal (dalam mm)

α = konstanta 80 – 160

Φ = diameter kabel (dalam mm)

➤ Mutu Campuran


Kuat Tekan < 500 kg/cm² untuk tulangan geser mutu U-24 dan baja prategang pada tegangan putus 17000 kg/cm²

Syarat Bantalan Beton Pratekan Blok Tunggal Proses Pretension

- Bantalan harus dapat memikul momen minimum pada bawah rel sebesar +15000 kgm dan -750 kgm. Momen di tengah bantalan +660 kgm dan -930(-750) kgm.
- Bentuk penampang trapesium
- Pusat berat baja prategang dekat dengan pusat berat beton
- Kehilangan tegangan diambil 25 % gaya prategang awal
- Ketentuan lain lihat PD 10 tahun 1986

Syarat Bantalan Beton Pratekan Blok Tunggal Proses Post tension

- Pada jalur lurus beton pratekan mempunyai ukuran panjang : $L = 1 + 2 \gamma$
 γ = panjang penyaluran, daerah regulasi tegangan yang tergantung pada angker.
- Mutu campuran memiliki kuat tekan 500 kg/cm^2 , dan tulangan geser U-24 dengan mutu tulangan prategang 17000 kg/m^2 .
- Kehilangan tegangan dihitung 20 % gaya prategang awal.



Untuk Materi Kuliah Sessi Berikutnya:

- Perencanaan Bantalan Kayu
- Perencanaan Bantalan Beton Monolithic
- Perencanaan Bantalan Beton Bi-Block
- Beberapa Pengujian Laboratorium Bantalan



Perhitungan Dimensi Bantalan

OUTLINES MATERI :

- Perhitungan Distribusi Beban pada Bantalan dari Beban Kereta Api
- Perhitungan Dimensi Bantalan Kayu
- Perhitungan Dimensi Bantalan Beton



Analisis Pembeebanan Pada Bantalan

- Analisis Persamaan Momen
- Analisis Persamaan Defleksi
- Analisis Distribusi Beban pada Bantalan

Analisis Pembebanan Pada Bantalan ... (1)

PERSAMAAN MOMEN :

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

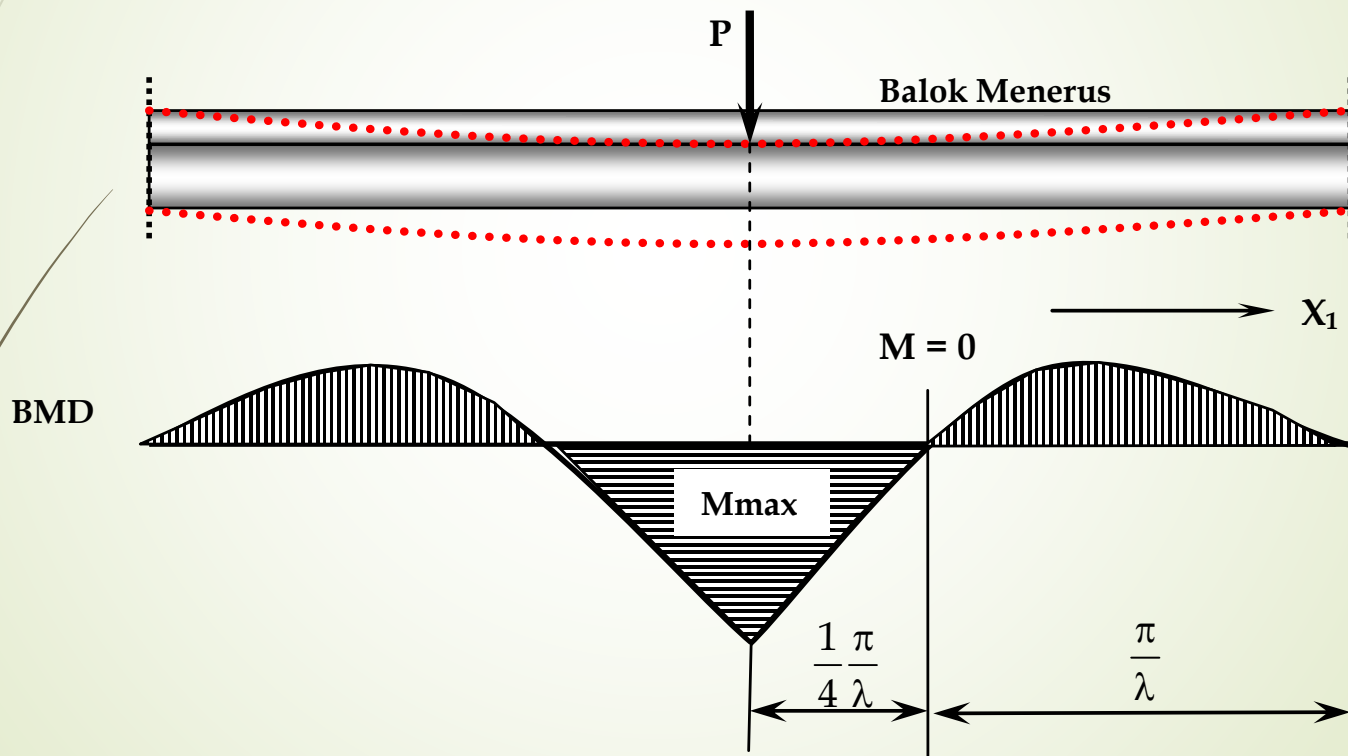
- Jika : $\cos \lambda x_1 - \sin \lambda x_1 = 0$, maka Momen = 0.
Jika : Momen = 0, maka :

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

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

$$M_m = \frac{P_d}{4\lambda} = \frac{P \cdot X_1}{\pi} = 0,318 P X_1$$

Konsep Persamaan Momen



Analisis Pembeebanan Pada Bantalan ... (2)

PERSAMAAN DEFLEKSI :

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

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

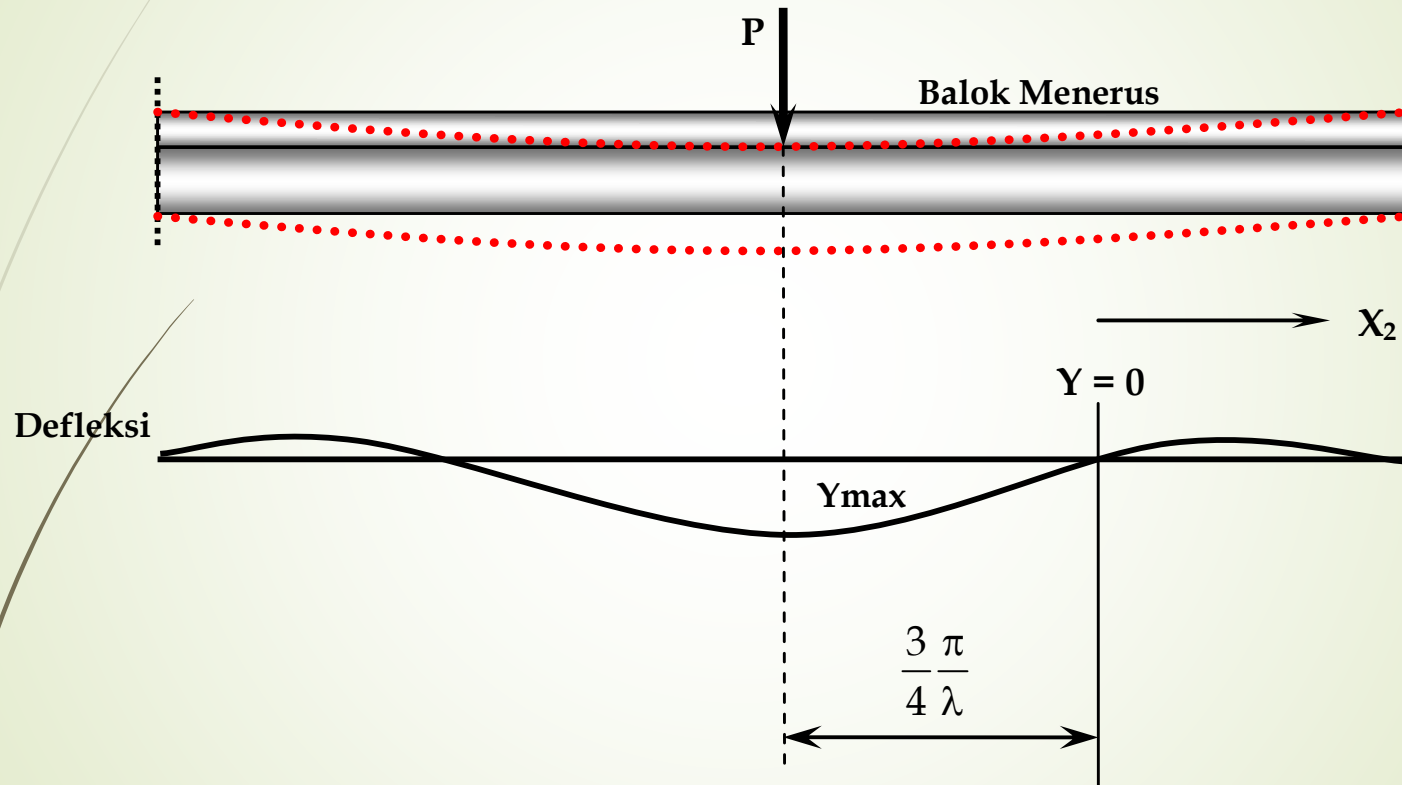
- Jika : $\cos \lambda x_2 + \sin \lambda x_2 = 0$, maka Defleksi = 0.
Jika : $Y = 0$, maka :

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

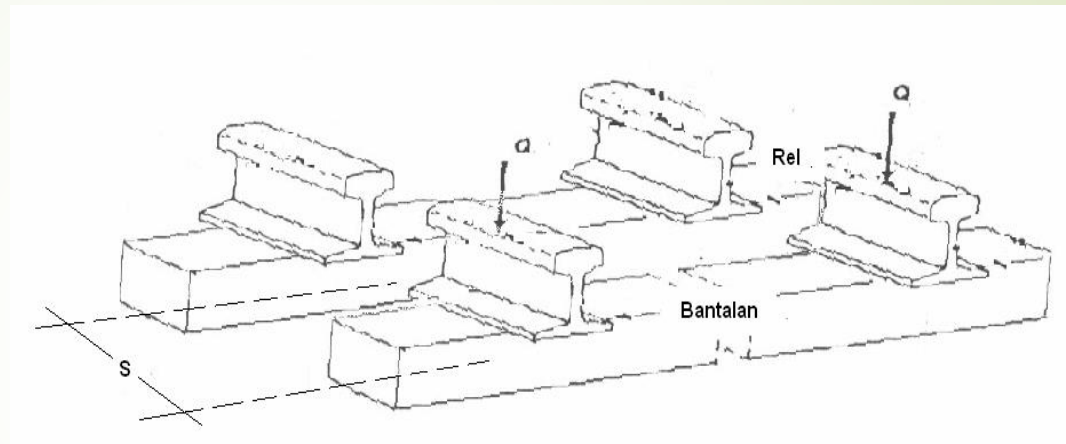
- Jika : $\cos \lambda x_2 + \sin \lambda x_2 = 1$, maka Defleksi = Maksimum.

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

Konsep Persamaan Defleksi



Analisis Pembebanan Pada Bantalan ... (3)



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

Jika $Y_{\text{maks}} = 0,393 \frac{Pd}{k \cdot X_1}$, dan diperhitungkan pengaruh superposisi gandar,

Maka distribusi beban ke bantalan dapat dituliskan sebagai :

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

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

Contoh Kasus

- 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 kg/cm^2 . Tentukan beban yang didistribusikan dari rel ke bantalan !

Jawaban :

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

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

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

(Q_1 : beban dari kendaraan kereta api ke bantalan)

Contoh Kasus

Asumsi :

Jika digunakan dalam perencanaan adalah beban gandar maksimum (18 ton), maka $P_s = 9000$ kg.

Untuk Kelas Jalan I ($V_{rencana} = 150$ km/jam), Beban Dinamik (P_d) dapat ditentukan sebagai :

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

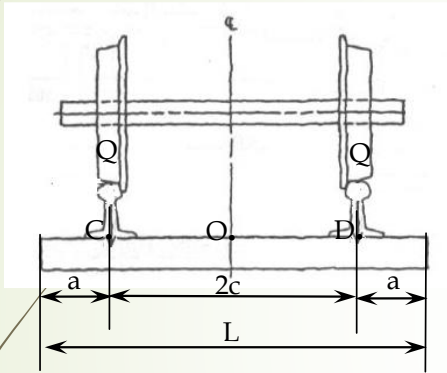
$$Q_1 = 60\% P_d = 60\% (16.940,3) \text{ kg} = \underline{10.164,18 \text{ kg}}$$



Perhitungan Dimensi Bantalan Kayu

- Prosedur Perhitungan
- Studi Kasus

Prosedur Perhitungan Bantalan Kayu ... (1)



Komponen Panjang Bantalan dibagi atas bagian a (jarak sumbu vertikal rel terhadap bantalan ke tepi) dan c (setengah jarak antar sumbu rel).

Prosedur perhitungan dijelaskan berikut ini :

1. Perhitungan λ Bantalan Kayu :

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

Dikarenakan bantalan kayu merupakan persegi empat simetris maka nilai *damping factor*-nya (λ) hanya ada satu saja.

Prosedur Perhitungan Bantalan Kayu ... (2)

2. Perhitungan Momen di Titik C dan D, tepat di bawah kaki rel :

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

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

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

4. Perhitungan Momen Ijin Bantalan

$$M = \overline{\sigma}_{lt} \times W$$

Prosedur Perhitungan Bantalan Kayu ... (3)

Nomen Klatur :

λ = *Dumping 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)

Rumus Hiperbolikus :

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

Catatan : nilai x untuk persamaan trigonometri dan hiperbolikus dalam satuan radian (rad)

Studi Kasus

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

Studi Kasus

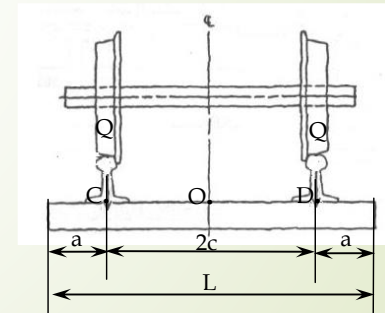
1. Perhitungan Damping Factor :

- *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* :

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



Studi Kasus

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

Studi Kasus

3. 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 :

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

5. Beban yang dapat diterima oleh bantalan :

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

$$9.830283 Q = 77.458,33, \text{ dan } \mathbf{Q = 7.879,56 \text{ kg.}}$$

Studi Kasus

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 :

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

sehingga :

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

Studi Kasus

- **Kesimpulan** : Bantalan kayu yang direncanakan berdimensi $(200 \times 22 \times 13)$ cm^3 dengan $\sigma_{ft} = 125 \text{ kg/cm}^2$ dan E (modulus elastisitas kayu) $= 1,25 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ **tidak dapat digunakan** pada Kelas Jalan Rencana, dengan demikian perlu dicoba menggunakan bantalan besi atau bantalan beton.



Perhitungan Dimensi Bantalan Beton

- **Prosedur Perhitungan Bantalan Beton Monolithic.**
- **Prosedur Perhitungan Bantalan Beton Bi-Blok.**
- **Studi Kasus**

Prosedur Perhitungan Bantalan Beton Monolithic (Blok Tunggal) ... (1)

1. Perhitungan Modulus Elastisitas berdasarkan nilai f_{cu}

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

2. Perhitungan λ 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 :

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

dimana : $Q = 60 \% Pd$

Prosedur Perhitungan Bantalan Beton Monolithic (Blok Tunggal) ... (2)

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

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

dimana : $Q = 60 \% Pd$

5. Analisis Tegangan Tahap Pratekan Awal

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

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

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

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

Prosedur Perhitungan Bantalan Beton Monolithic (Blok Tunggal) ... (3)

6. Analisis Tegangan Tahap Pratekan Efektif

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

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

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

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

Nomen Klatur,

λ = *Dumping 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 = Momen tahanan

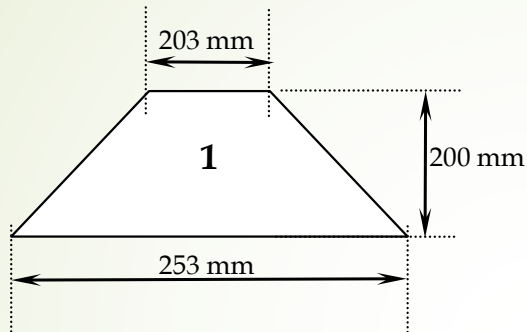
Studi Kasus

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 kg/cm^2 .

Studi Kasus

Dimensi Bantalan :



(1) Bagian Bawah Rel :

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

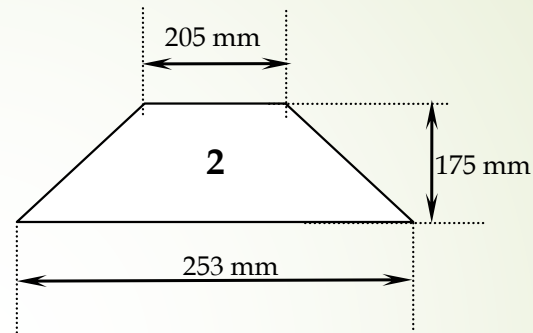
$$I_{X-1} = 15.139,09 \text{ cm}^4$$

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

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

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

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



(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

Studi Kasus

- Perhitungan Modulus Elastisitas berdasarkan nilai f_{cu}

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

- **Perhitungan λ Bantalan Beton pada Bagian di Bawah Rel dan Tengah Bantalan:**

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

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

Studi Kasus

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

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 :

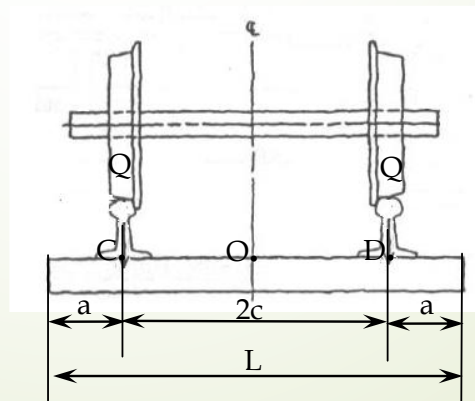
$$P_d = \left[1 + 0,01 \times \left(\frac{V}{1,609} - 5 \right) \right] P_s = 16.940,3 \text{ kg.}$$

maka, beban yang diterima bantalan dari kendaraan kereta api :

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

- Dimensi Bantalan :

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



Studi Kasus

MOMEN CALC.UNDER RAIL.

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

MOMEN CALC.MIDDLE OF SLEEPER

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

Studi Kasus

Momen di Bawah Rel

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

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

Momen pada Tengah Bantalan

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

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

Studi Kasus (Analisis Tegangan 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 :

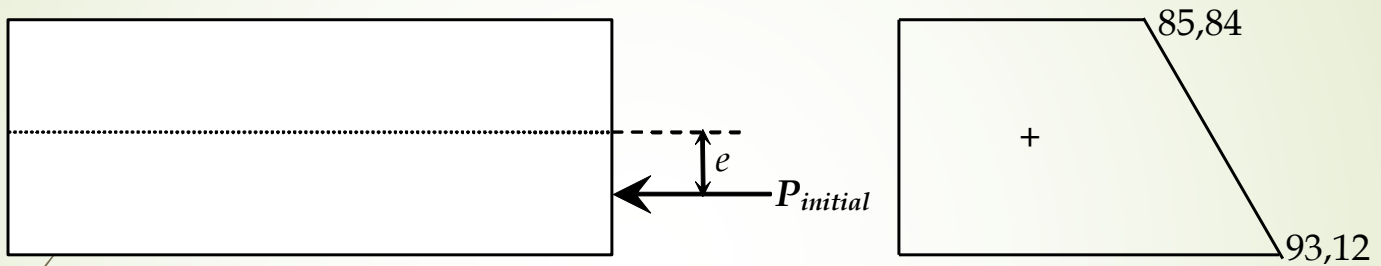
$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} + \frac{P_{initial} \cdot e}{W}$$
$$\sigma = \frac{18 \times 2270,24}{400,75} + \frac{18 \times 2270,24 \times 1,055}{1125,35} = 140,28 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

Sisi bagian bawah :

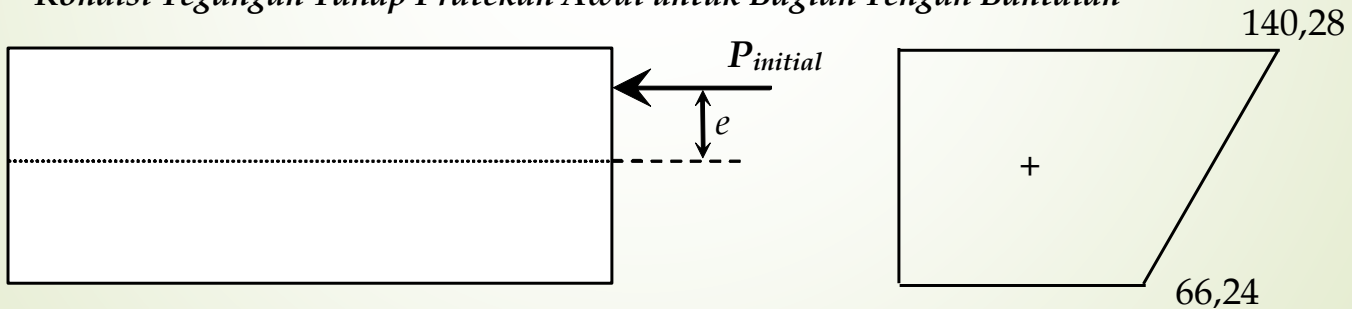
$$\sigma = \frac{P_{initial}}{A} - \frac{P_{initial} \cdot e}{W}$$
$$\sigma = \frac{18 \times 2270,24}{400,75} - \frac{18 \times 2270,24 \times 1,055}{1206,63} = 66,24 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

Studi Kasus

Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal untuk Bagian Bawah Rel



Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal untuk Bagian Tengah Bantalan



Studi Kasus (Analisis Tegangan 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 :

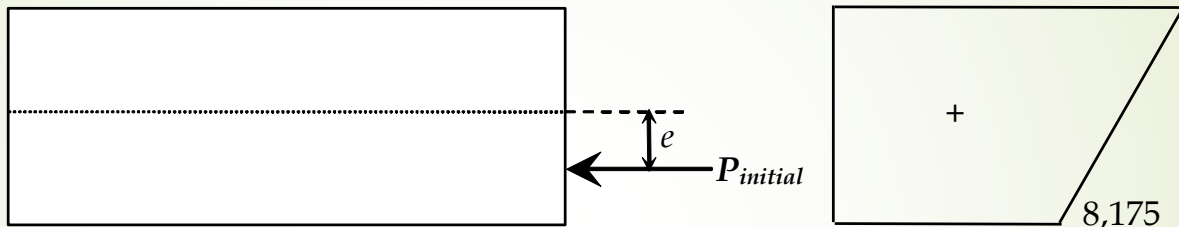
$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} + \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} - \frac{M}{W}$$
$$\sigma = \frac{18 \times 1783,76}{400,75} + \frac{18 \times 1783,76 \times 1,055}{1125,35} - \frac{50.572,43}{1125,35} = 65,28 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

Sisi bagian bawah :

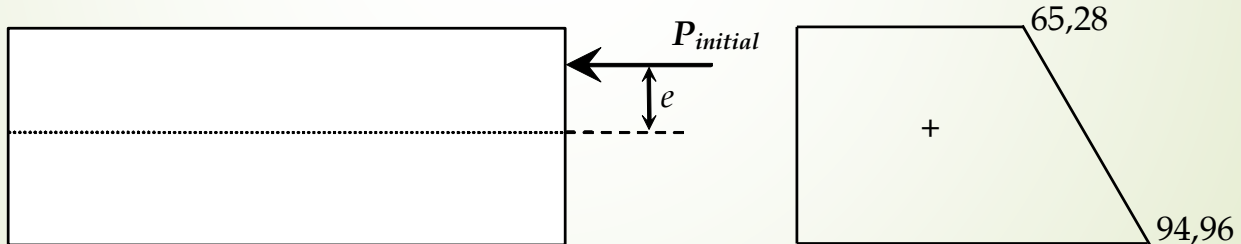
$$\sigma = \frac{P_{efektif}}{A} - \frac{P_{efektif} \cdot e}{W} + \frac{M}{W}$$
$$\sigma = \frac{18 \times 1783,76}{400,75} - \frac{18 \times 1783,76 \times 1,055}{1125,35} + \frac{50.572,43}{1125,35} = 94,96 \text{ kg/cm}^2 (< 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ untuk K-500})$$

Studi Kasus

Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal untuk Bagian Bawah Rel



Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal untuk Bagian Tengah Bantalan



Catatan : + adalah tegangan tekan

Kontrol Tegangan Ijin

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

Perhitungan Bantalan Bi-Blok

Dimensi Bantalan Bi-Blok

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

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 (<i>tinggi rata-rata</i>)	

Sumber : PD.10 tahun 1986

Alur Perhitungan Bantalan Bi-Blok

Prosedur Perhitungan :

- Tentukan dimensi bantalan bi-blok yang akan digunakan.
- 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).
- Kontrol tegangan tekan yang terjadi pada beton terhadap mutu beton yang akan digunakan.
- Kontrol tegangan geser tekan yang terjadi pada beton terhadap mutu beton yang akan digunakan.

Kontrol Mutu Bantalan Bi-Blok

Jika : Bantalan beton bi-blok dengan ukuran sebagaimana ketentuan dengan Faktor Beban untuk Beban Statik = 1,7 dan q (beban merata asumsi) = 7,3 kg/cm². Maka penampang kritis bantalan di bawah rel dapat dihitung tegangan normalnya sebagai berikut :

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

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 (τ_{pons}) dihitung sebagai :

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

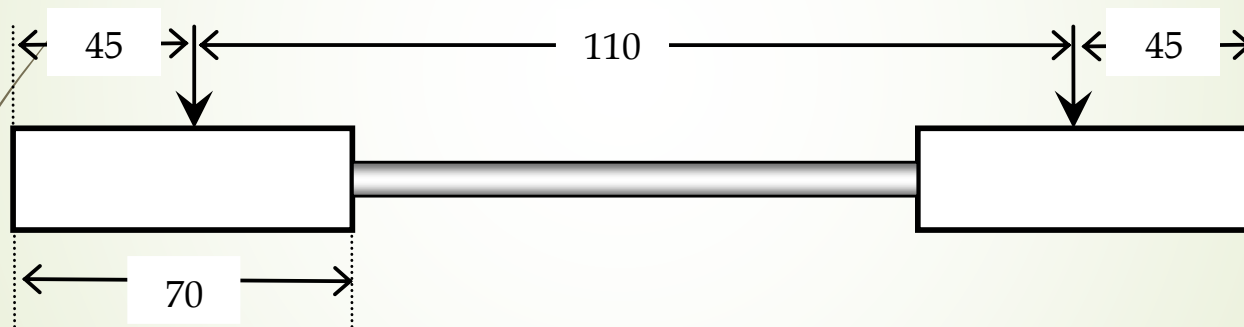
Dengan menganggap bahwa penampang tidak ditunjang oleh tulangan geser, maka :

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
 $\sigma_{bk}' > 385 \text{ kg/cm}^2$

Studi Kasus

Contoh :

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



Tipe bantalan bi-blok

Studi Kasus

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 $P_s = 9000$ kg. Untuk Kelas Jalan 1 ($V_{rencana} = 150$ km/jam), beban dinamik (P_d) dapat ditentukan sebagai :

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

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 = $M_R = \frac{1}{2} q l^2 b = \frac{1}{2} (4,84) \times (45)^2 \times 30 = 147.015 \text{ kg-cm.}$
- Tahanan momen = $W = \frac{1}{6} b h^2 = \frac{1}{6} (30)(20)^2 = 2000 \text{ cm}^3$

Studi Kasus

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 : $\sigma_{bk}' \geq 222,75 \text{ kg/cm}^2$

Studi Kasus

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 : $\sigma_{bk}' > 169,8 \text{ kg/cm}^2$

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

Pengujian Bahan Bantalan

► 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.



THANK YOU ..