

## BAB IV

### PEMBEBANAN PADA STRUKTUR JALAN REL

---

#### 1. TUJUAN INSTRUKSIONAL UMUM

Setelah mempelajari pokok bahasan ini, mahasiswa diharapkan mampu :

1. Mengetahui prinsip pembebanan yang bekerja pada struktur jalan rel.
2. Mengetahui perhitungan pembebanan pada komponen rel dan pola distribusi beban ke komponen struktur lainnya.

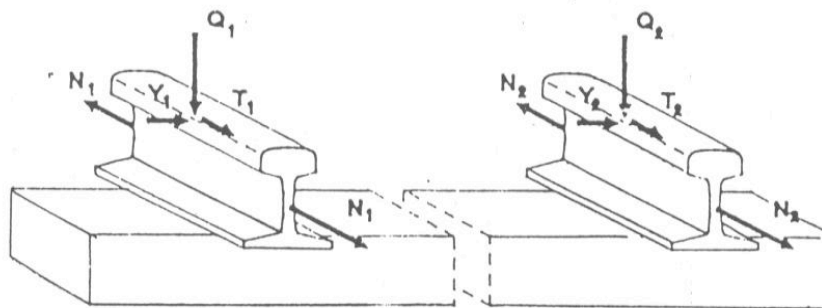
#### 2. TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Setelah mempelajari pokok bahasan ini, diharapkan mahasiswa mampu :

1. Mengetahui definisi beban vertical, lateral dan longitudinal yang terjadi pada komponen rel.
  2. Menghitung beban dinamis menggunakan persamaan TALBOT.
  3. Menjelaskan konsep dan prinsip pembebanan menggunakan teori balok di atas tumpuan elastis (*beam on elastic foundation*).
  4. Menghitung pola pembebanan kereta api pada rel hingga ke komponen pendukung (bantalan).
- 

#### A. BEBAN DAN GAYA PADA REL

Pembebanan dan pergerakan kereta api di atas struktur jalan rel menimbulkan berbagai gaya pada rel. Gaya-gaya tersebut diantaranya gaya vertikal, gaya transversal (lateral) dan gaya longitudinal.



Keterangan :

Gaya vertikal :  $Q$

Gaya lateral :  $Y$

Gaya longitudinal :  $T$

Gaya akibat perubahan suhu (termasuk gaya longitudinal) :  $N$

Gambar 4.1 Gaya yang bekerja pada rel

Secara umum, gaya-gaya yang bekerja pada rel dijelaskan dalam gambar 4.1. Perhitungan beban dan gaya ini perlu dipahami secara benar untuk dapat merencanakan dimensi, tipe dan disain rel, bantalan dan seterusnya pola distribusinya berfungsi untuk merencanakan tebal lapisan balas dan subbalas.

## 1. Gaya Vertikal

Gaya ini adalah beban yang paling dominan dalam struktur jalan rel. Gaya vertikal menyebabkan terjadinya defleksi vertikal yang merupakan indikator terbaik untuk penentuan kualitas, kekuatan dan umur jalan rel. Secara global, besarnya gaya vertikal dipengaruhi oleh pembebanan oleh lokomotif, kereta maupun gerbong.

- Gaya Lokomotif (*locomotive*),  
Jenis lokomotif akan menentukan jumlah *bogie* dan gandar yang akan mempengaruhi berat beban gandar di atas rel yang dihasilkannya.
- Gaya Kereta (*car, coach*),  
Karakteristik beban kereta dipengaruhi oleh jumlah bogie dan gandar yang digunakan. Selain itu, faktor kenyamanan penumpang dan kecepatan (faktor dinamis) mempengaruhi beban yang dihasilkan.
- Gaya Gerbong (*wagon*),  
Prinsip pembebanan pada gerbong adalah sama dengan lokomotif dan kereta. Meskipun demikian, kapasitas muatan gerbong sebagai angkutan barang perlu diperhatikan dalam perencanaan beban.

Perhitungan gaya vertikal yang dihasilkan beban gandar oleh lokomotif, kereta dan gerbong merupakan beban statik, sedangkan pada kenyataannya, beban yang terjadi pada struktur jalan rel merupakan beban dinamis yang dipengaruhi oleh faktor aerodinamik (hambatan udara dan beban angin), kondisi geometrik dan kecepatan pergerakan rangkaian kereta api. Oleh karena itu, diperlukan transformasi gaya statik ke gaya dinamik untuk merencanakan beban yang lebih realistis. Persamaan TALBOT (1918) memberikan transformasi gaya berupa pengkali faktor dinamis sebagai berikut :

$$I_P = 1 + 0,01 \left( \frac{V}{1,609} - 5 \right) \quad (4.1)$$

dimana,

$I_P$  = Faktor dinamis,

$V$  = Kecepatan rencana (dalam km/jam)

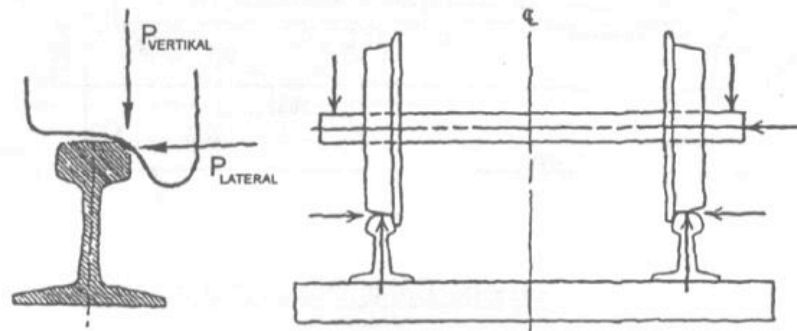
## 2. Gaya Transversal (Lateral)

Gaya ini terjadi akibat adanya gaya sentrifugal (ketika rangkaian kereta api berada di lengkung horizontal), gerakan ular rangkaian (*snake motion*) dan ketidakrataan geometrik jalan rel yang bekerja pada titik yang sama dengan gaya vertikal. Gaya ini dapat menyebabkan tercabutnya penambat akibat gaya angkat (*uplift force*), pergeseran pelat andas dan memungkinkan terjadinya *derailment* (anjlog atau keluarnya roda kereta dari rel). Syarat pembatasan besarnya gaya lateral supaya tidak terjadi anjlog adalah :

$$\frac{P_{\text{lateral}}}{P_{\text{vertikal}}} < 1,2 \quad (4.2)$$

$$\frac{P_{\text{lateral}}}{P_{\text{vertikal}}} < 0,75, \text{ untuk rel dan roda yang aus} \quad (4.3)$$

Secara skematis gaya lateral dapat diberikan dalam gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.2 Skematik gaya lateral pada komponen rel

### 3. Gaya Transversal (Lateral)

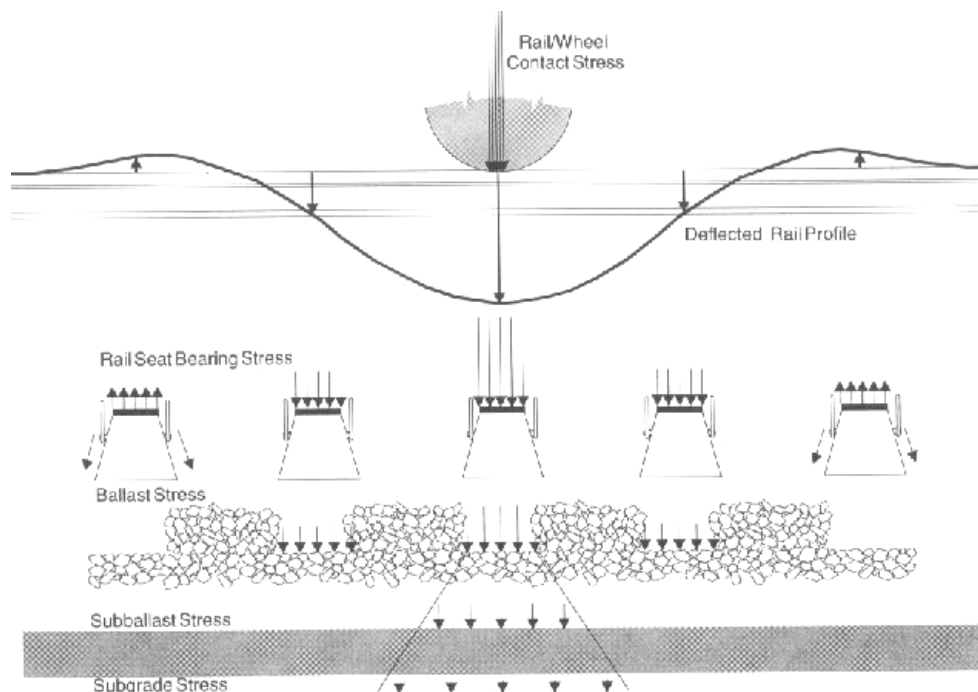
Gaya longitudinal dapat diakibatkan oleh perubahan suhu pada rel (*thermal stress*). Gaya ini sangat penting di dalam analisis gaya terutama untuk konstruksi KA yang menggunakan rel panjang (*long welded rails*). Gaya longitudinal juga merupakan gaya adhesi (akibat gesekan roda dan kepala rel) dan gaya akibat pengereman roda terhadap rel. Efek gaya ini akan dibahas pada perhitungan stabilitas rel panjang menerus dalam Bab V.

## B. POLA DISTRIBUSI GAYA PADA STRUKTUR JALAN REL

Pola distribusi gaya vertikal beban kereta api dapat dijelaskan secara umum sebagai berikut :

1. Beban dinamik diantara interaksi roda kereta api dan rel merupakan fungsi dari karakteristik jalur, kendaraan dan kereta, kondisi operasi dan lingkungan. Gaya yang dibebankan pada jalur oleh pergerakan kereta api merupakan kombinasi beban statik dan komponen dinamik yang diberikan kepada beban statik. Beban dinamik diterima oleh rel dimana terjadi tegangan kontak diantara kepala rel dan roda, oleh sebab itu, sangat berpengaruh dalam pemilihan mutu baja rel.
2. Beban ini selanjutnya didistribusikan dari dasar rel ke bantalan dengan perantara pelat andas ataupun alas karet.
3. Beban vertikal dari bantalan akan didistribusikan ke lapisan balas dan subbalas menjadi lebih kecil dan melebar. Pola distribusi beban yang melebar dan menghasilkan tekanan yang lebih kecil yang dapat diterima oleh lapisan tanah dasar.

Prinsip pola distribusi gaya pada struktur rel bertujuan untuk menghasilkan reduksi tekanan kontak yang terjadi diantara rel dan roda ( $\pm 6000 \text{ kg/cm}^2$ ) menjadi tekanan yang sangat kecil pada tanah dasar ( $\pm 2 \text{ kg/cm}^2$ ). Gambar 4.3 di bawah ini menjelaskan pola distribusi beban pada struktur jalan rel.



Gambar 4.3 Pola distribusi beban pada struktur jalan rel

### C. KONSEP PERHITUNGAN BEBAN MENGGUNAKAN TEORI BALOK DI ATAS TUMPUAN ELASTIK

Teori *Beam on Elastik Foundation* (BEF) atau *Balok di atas Tumpuan Elastik*, dikembangkan pertama kali oleh Winkler pada tahun 1867 untuk perhitungan tegangang komponen jalan rel. Rel didisain menggunakan konsep "*beam-on-elastic-foundation model*" dengan mengasumsikan bahwa setiap rel akan berperilaku sebagai balok menerus yang diletakkan di atas tumpuan elastik. Modulus fondasi jalan rel (sebagai tumpuan),  $k$ , didefinisikan sebagai gaya tumpuan per unit panjang rel per unit defleksi rel. Modulus fondasi jalan rel disini termasuk juga pengaruh penambat, bantalan, balas, subbalas dan subgrade. Gambar 4.5 menunjukkan pola beban dan reksi yang dihasilkan oleh teori BEF. Model dapat dituliskan dalam persamaan umum (4.4) dan diferensial (4.5) sebagai :

$$F(x) = -k \cdot y(x) \quad (4.4)$$

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k \cdot y = 0 \quad (4.5)$$

dimana,

- $F(x)$  : Reaksi merata per satuan panjang
- $k$  : Modulus elastisitas jalan rel
- $y$  : Defleksi akibat beban pada rel
- $E$  : Modulus elastisitas baja penyusun rel
- $I$  : Momen inersia rel

#### Bab IV Pembebanan pada Struktur Jalan Rel

Penyelesaian persamaan diferensial tersebut untuk defleksi rel,  $y(x)$  pada setiap jarak  $x$  sepanjang rel akibat dari pembebanan titik terpusat  $P$ , adalah :

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

$$\lambda = \left( \frac{k}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.6)$$

Kemiringan (*slope*), momen (*bending moment*), dan gaya geser (*shear force*) pada setiap titik di sepanjang rel akibat beban titik terpusat  $P$  diberikan sebagai :

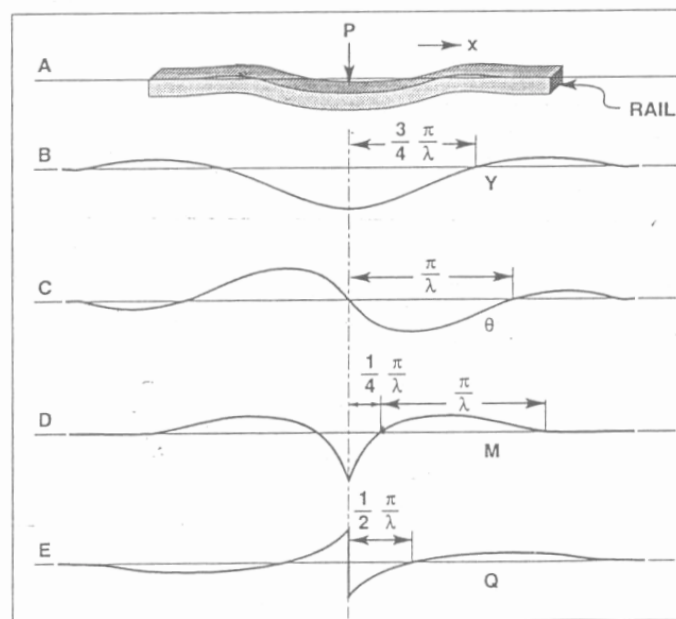
$$\theta(x) = -\frac{P\lambda^2}{k} e^{-\lambda x} (\sin \lambda x)$$

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

$$V(x) = -\frac{P}{2} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x)$$

$$(4.7)$$

Nilai maksimum defleksi, momen dan gaya geser terletak tepat di bawah beban terpusat  $P$ , jika nilai trigonometri persamaan 4.7 bernilai 1. Gambar 4.4 menunjukkan diagram defleksi, momen dan gaya geser maksimum akibat beban titik  $P$ .



Gambar 4.4 Diagram defleksi (B), kemiringan (C), momen (D) dan gaya geser (Q) pada rel (A) akibat beban titik  $P$

Nilai maksimum defleksi, momen dan gaya geser pada setiap titik di sepanjang rel akibat gaya titik terpusat  $P$  dapat dituliskan sebagai :

$$\begin{aligned}
 Y_m &= \frac{P}{2k} \\
 M_m &= \frac{P}{4} \\
 F_m &= k \cdot Y_m
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Distribusi beban pada batas atas rel (Q) yang selanjutnya menjadi beban merata dasar rel yang membebani struktur bantalan dapat dihitung sebagai :

$$Q_m = F_m \cdot S, \tag{4.9}$$

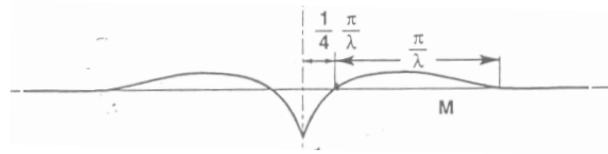
dimana, S = jarak bantalan

Tekanan balas ( $P_b$ ) pada luas tekanan bantalan ( $A_b$ ) dapat diestimasi sebagai :

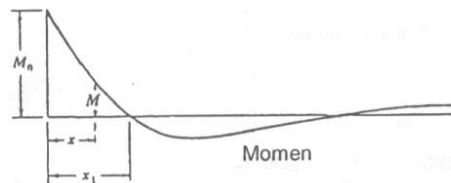
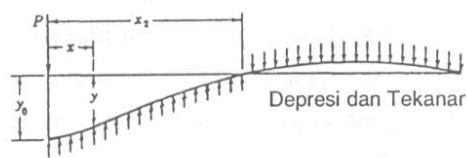
$$P_b = \frac{2Q_m}{A_b} \tag{4.10}$$

Untuk mempermudah perhitungan pada konstruksi bantalan, analisis pembebanan dapat disubstitusikan sebagai fungsi beban dinamik, jarak bantalan dan fungsi sumbu X (jarak horizontal sepanjang rel).

Analisis pembebanan ditinjau untuk kondisi momen nol ( $M = 0$ ) :



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



Momen nol ( $M = 0$ ) terjadi jika :  $\cos \lambda x - \sin \lambda x = 0$ , maka posisi momen nol terletak pada :

$$x_1 = \frac{1}{4} \frac{\pi}{\lambda}, \text{ untuk } \lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI_x}}, \text{ maka :}$$

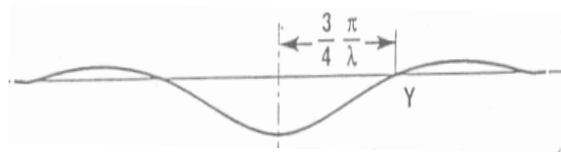
## Bab IV Pembebanan pada Struktur Jalan Rel

$$\lambda = \frac{\pi}{4X_1} \quad (4.11)$$

Persamaan 4.11 dapat disubstitusikan pada kondisi momen maksimum (persamaan 4.8), maka :

$$M_m = \frac{P_d}{4} = \frac{P \cdot X_1}{\pi} = 0,318 PX_1$$

Persamaan 4.11 juga dapat disubstitusikan pada kondisi defleksi maksimum (persamaan 4.8), maka :



$$Y_m = \frac{P_d}{2k} = \frac{P_d \cdot \pi}{8 \cdot k \cdot X_1} = 0,393 \frac{Pd}{k \cdot X_1} \quad (4.12)$$

---

### Contoh Soal 1

Hitunglah komponen tegangan pada rel untuk Kelas Jalan I dengan kecepatan rencana 150 m/jam. Beban gandar kereta api sebesar 18 ton dan modulus kekakuan jalan rel diperhitungkan sebagai 180 kg/cm<sup>2</sup>. Hitunglah momen maksimum yang terjadi pada rel apabila digunakan tipe rel 54 dengan  $E = 2 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup> dan momen inersia 2346 cm<sup>4</sup>.

1. Perhitungan beban dinamis menggunakan persamaan TALBOT

Beban dinamis ( $P_d$ ) dihitung dengan mengkalikan beban statik gandar ( $P_s$ ) dengan faktor dinamis ( $I_p$ ).  $P_s$  merupakan beban roda kereta yang diperoleh dari beban statik gandar dibagi 2 (karena setiap gandar terdapat 2 komponen roda).

$$P_d = P_s \left( 1 + 0,01 \left( \frac{V}{1,609} - 5 \right) \right)$$

$$P_d = 9000 \left( 1 + 0,01 \left( \frac{150}{1,609} - 5 \right) \right) = 16940,30 \text{ kg}$$

2. Perhitungan faktor reduksi/pengurangan (*damping factor*,  $\lambda$ )

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 2 \times 10^6 \times 2346}} = 0.0098960 \text{ cm}^{-1}$$

3. Perhitungan momen maksimum

$$M_m = \frac{P_d}{4}$$

$$M_m = \frac{16940.30}{4 \times 0.00989} = 427958.266 \text{ kgcm}$$

### Contoh Soal 2

Berapakah defleksi yang timbul pada jarak 3 meter dari titik beban roda pada contoh soal 1.

Defleksi pada jarak 3 meter = 300 cm dari titik defleksi maksimum di bawah roda.

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

dimana,  $\lambda x = 0.0098960 \text{ cm}^{-1} (300 \text{ cm}) = 2.9688$

$$\begin{aligned} \text{maka, } y(3 \text{ meter}) &= \frac{16940.30(0.0098960)}{2(180)} e^{-(2.9688)} [\cos(2.988) + \sin(2.988)] \\ &= 0.025126 \text{ cm.} \end{aligned}$$

### **D. LATIHAN SOAL**

- 1) Jelaskan konsep pembebanan yang terjadi pada struktur jalan rel ! Berikan penjelasan dalam gambar !
- 2) Jelaskan beban dan gaya yang terjadi pada rel oleh pergerakan kereta api !
- 3) Bagaimana cara menentukan beban dinamis dari beban kereta api ! Jelaskan dalam rumus Talbot !
- 4) Jelaskan konsep teori balok di atas tumpuan elastik yang digunakan dalam perencanaan pembebanan rel !
- 5) Rencanakan momen maksimum yang terjadi untuk kelas jalan III dengan beban gandar kereta api 12 ton dan nilai modulus kekakuan rel 180 kg/cm<sup>2</sup>. Jika digunakan rel tipe R50 dengan modulus elastik  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  dan momen inersia 1960 cm<sup>4</sup>.

### **E. DAFTAR PUSTAKA**

1. Banks, J.H. 2002. Introduction to Transportation Engineering. MacGraw Hill. 2<sup>nd</sup> Edition. Boston. 502 p.



#### **Bab IV Pembebanan pada Struktur Jalan Rel**

2. Esveld, C. 1989. Modern Railway Track. MRT Publication. Germany.
3. Hay, W.W. 1982. Railroad Engineering. Second Edition. Wiley.
4. Hidayat, H. & Rachmadi. 2001. Rekayasa Jalan Rel. Catatan Kuliah. Penerbit ITB. Bandung.
5. PJKA. 1986. Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10). Bandung.
6. Selig, E.T. dan Waters, J.M. 1994. Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford.