

## BAB X

# PERENCANAAN GEOMETRIK JALAN REL

---

### 1. TUJUAN INSTRUKSIONAL UMUM

Setelah mempelajari pokok bahasan ini, mahasiswa diharapkan mampu :

1. Mengetahui kriteria yang perlu diperhatikan untuk merencanakan geometrik jalan rel.
2. Mengetahui teknik dan peraturan untuk merencanakan geometrik jalan rel yang digunakan di Indonesia.

### 2. TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Setelah mempelajari pokok bahasan ini, diharapkan mahasiswa mampu :

1. Memahami dasar-dasar, kriteria dan ketentuan umum perencanaan alinemen jalan rel yang baik sesuai dengan Peraturan Dinas No.10 tahun 1986.
2. Merencanakan alinemen horisontal geometrik jalan rel secara lengkap dan memahami hubungan diantara komponen jari-jari lengkung, peninggian rel dan kecepatan kereta api di lengkung.
3. Merencanakan alinemen vertikal geometrik jalan rel dan disain kelandaian curam yang disyaratkan.
4. Menggambar proyeksi lengkung horisontal dan vertikal serta membuat gambar superelevasi peninggian rel di lengkung dan pelebaran sepur.

---

### A. DEFINISI DAN KRITERIA PERENCANAAN GEOMETRIK JALAN REL

Alinemen jalan rel merupakan arah dan posisi sumbu rel yang terdiri dari bagian lurus, alinemen horisontal dan alinemen vertikal. Kriteria perencanaan alinemen yang baik mempertimbangkan beberapa faktor berikut ini :

1. Fungsi jalan rel  
Alinemen jalan rel harus memenuhi tujuan dari penggunaannya. Secara umum jalan tersebut berfungsi sebagai pelayanan transportasi/pergerakan orang atau barang yang menghubungkan tempat-tempat pusat kegiatan.
2. Keselamatan  
Jalan rel dirancang untuk menghindari adanya kecelakaan, baik keselamatan yang terjadi pada lalu lintas kereta api dan interaksi terhadap jalan raya.
3. Ekonomi  
Jalan rel dibangun dengan mempertimbangkan biaya pembangunan, pemeliharaan dan operasi, manfaat dari pembangunan jalan rel baik secara makro maupun mikro.
4. Aspek Lingkungan

## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

Pembangunan jalan rel harus mempertimbangkan dampak lingkungan yang ditimbulkan selain nilai estetika yang dipertimbangkan. Dampak lingkungan yang terjadi meliputi longsor, banjir, kerusakan hutan, dll.

### B. KETENTUAN UMUM PERENCANAAN GEOMETRIK JALAN REL

#### 1. Standar Jalan Rel

Segala ketentuan yang berkaitan dengan jenis komponen jalan rel di dalam perencanaan geometrik jalan rel tertuang dalam Tabel Klasifikasi Jalan Rel PD.10 tahun 1986.

Ketentuan tersebut diantaranya: kelas jalan, daya lintas/angkut, kecepatan maksimum, tipe rel, jenis bantalan dan jarak, jenis penambat rel dan struktur balasnya.

#### 2. Kecepatan dan Beban Gandar

Dalam ketentuan PD 10 tahun 1986, terdapat beberapa tipe kecepatan yang digunakan dalam perencanaan, yaitu :

##### a. Kecepatan Rencana

Kecepatan rencana adalah kecepatan yang digunakan untuk merencanakan konstruksi jalan rel. Adapun beberapa bentuk kecepatan rencana digunakan untuk :

a). Untuk perencanaan struktur jalan rel

$$V_{\text{rencana}} = 1,25 \times V_{\text{maksimum}} \quad (10.1)$$

b). Untuk perencanaan jari-jari lengkung lingkaran dan peralihan

$$V_{\text{rencana}} = V_{\text{maksimum}} \quad (10.2)$$

c). Untuk perencanaan peninggian rel

$$V_{\text{rencana}} = c \times \frac{\sum N_i V_i}{\sum N_i} \quad (10.3)$$

dimana :

c = 1,25

$N_i$  = Jumlah kereta api yang lewat

$V_i$  = Kecepatan operasi

##### b. Kecepatan Maksimum

Kecepatan maksimum adalah kecepatan tertinggi yang diijinkan untuk operasi suatu rangkaian kereta pada lintas tertentu. Ketentuan pembagian kecepatan maksimum dalam perencanaan geometrik dapat dilihat pada Tabel Klasifikasi Jalan Rel.

##### c. Kecepatan Operasi

Kecepatan operasi adalah kecepatan rata-rata kereta api pada petak jalan tertentu.

**d. Kecepatan Komersial**

Kecepatan komersial adalah kecepatan rata-rata kereta api sebagai hasil pembagian jarak tempuh dengan waktu tempuh.

Beban gandar maksimum yang dapat diterima oleh struktur jalan rel di Indonesia untuk semua kelas jalan adalah 18 ton (PD. No. 10 tahun 1986).

**3. Daya Angkut Lintas**

Daya angkut lintas (T) adalah jumlah angkutan anggapan yang melewati suatu lintas dalam jangka waktu satu tahun.

$$T = 360 \times S \times TE \tag{10.4}$$

$$TE = T_p + (K_b \times T_b) + (K_1 \times T_1) \tag{10.5}$$

dimana,

TE = tonase ekivalen (ton/hari)

T<sub>p</sub> = tonase penumpang dan kereta harian

T<sub>b</sub> = tonase barang dan gerbong harian

T<sub>1</sub> = tonase lokomotif harian

S = koefisien yang besarnya tergantung kualitas lintas

= 1,1 untuk lintas dengan kereta penumpang dengan V<sub>maksimum</sub> 120 km/jam

= 1,0 untuk lintas tanpa kereta penumpang

K<sub>1</sub> = Koefisien yang besarnya 1,4

K<sub>b</sub> = Koefisien yang besarnya tergantung pada beban gandar (1,5 untuk gandar < 18 ton dan 1,3 untuk gandar > 18 ton).

**4. Ruang Bebas dan Ruang Bangun**

a. Definisi

- Ruang Bebas

Ruang di atas sepur yang senantiasa harus bebas dari segala rintangan dan benda penghalang, ruang ini disediakan untuk lalu lintas rangkaian kereta api.

- Ruang Bangun

Ruang disisi sepur yang senantiasa harus bebas dari segala bangunan seperti tiang semboyan, tiang listrik dan pagar. Ruang bangun diukur dari sumbu sepur pada tinggi 1 meter sampai 3,55 meter.

b. Untuk Jalur Tunggal

- Menurut R-10, batas ruang untuk jalur lurus dan lengkung dibedakan sebagai berikut :

1). Batas ruang bebas untuk jalur lurus dan lengkung dengan jari-jari lebih besar dari 3000 m.

2). Untuk lengkung dengan jari-jari 300 sampai dengan 3000 m.

3). Untuk lengkung dengan jari-jari kurang dari 300 m.

## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

- Menurut JNR, batas ruang untuk jalur lurus dan lengkung dibedakan sebagai berikut :
  - 1). Batas ruang bebas untuk jalur lurus dan lengkung dengan jari-jari lebih besar dari 1100 m.
  - 2). Untuk lengkung dengan jari-jari kurang dari 1000 m, lebar dari ruang bebas bertambah besar sesuai dengan jari-jarinya yang ditunjukkan dengan hubungan :

$$M = \frac{22,5}{R} \quad (10.6)$$

- 3). Untuk lengkung dengan jari-jari kurang dari 300 m.
- Pada bagian bawah dari ruang bebas di stasiun disesuaikan dengan tinggi peron yang terdiri dari :
    - 1). Untuk Penumpang :
      - i. Peron tinggi, dengan ukuran tinggi 1000 mm di atas kepala rel (elevasi 0.00)
      - ii. Peron rendah, dengan ukuran tinggi 200 mm di atas kepala rel (elevasi 0.00)
    - 2). Untuk Barang : Tinggi peron 1000 mm di atas kepala rel (elevasi 0.00).
  - Untuk kereta listrik :  
Kereta listrik disediakan ruang bebas untuk memsang saluran-saluran kawat listrik beserta tiang pendukungnya dan *pantograph* listrik di kereta.
  - Untuk peti kemas :  
Ruang bebas didasarkan pada ukuran gerbong peti kemas standar ISO dengan ukuran *standard height*. Standar ini digunakan karena banyak negara yang menggunakannya dan cenderung untuk dipakai pada masa yang panjang.
- c. Untuk Jalur Ganda
- Jarak antar sumbu untuk jalur lurus dan lengkung sebesar 4,00 m.

### C. ALINEMEN HORIZONTAL

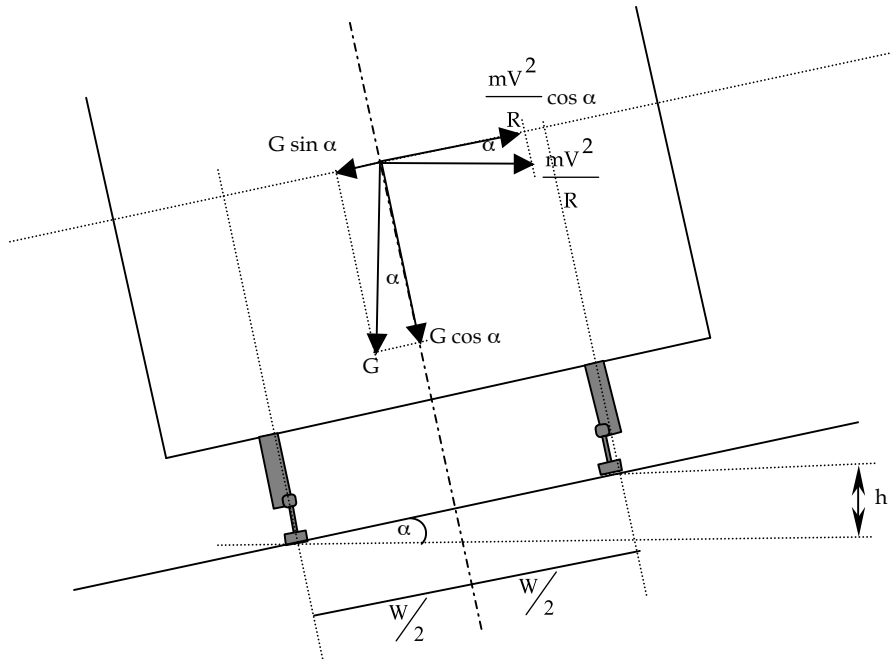
#### 1. Lengkung Lingkaran

Untuk berbagai kecepatan rencana, besar jari-jari minimum yang diijinkan ditinjau dari 2 kondisi, yaitu :

##### a. Gaya Sentrifugal diimbangi sepenuhnya oleh gaya berat.

Persamaan dasar :

Gaya Berat = Gaya Sentrifugal (Gambar 10.1)



Gambar 10.1 Skematik gaya pada kondisi gaya sentrifugal hanya diimbangi oleh gaya berat

$$G \sin \alpha = \frac{mV^2}{R} \cos \alpha \quad (10.7)$$

$$G \sin \alpha = \frac{GV^2}{gR} \cos \alpha \quad (10.8)$$

$$\tan \alpha = \frac{V^2}{gR} \quad (10.9)$$

$$\text{jika : } \tan \alpha = \frac{h}{W} \quad (10.10)$$

$$\frac{mV^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha \quad (10.11)$$

$$h = \frac{WV^2}{gR} \quad (10.12)$$

Dengan memasukkan satuan praktis :

$W$  = jarak diantara kedua titik kontak roda dan rel = 1120 mm

$R$  = jari-jari lengkung horizontal (m)

$V$  = kecepatan rencana (km/jam)

## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

$h$  = peninggian rel pada lengkung horizontal (mm)

$g$  = percepatan gravitasi (9,81 m/detik<sup>2</sup>)

maka :

$$R = \frac{8,8V^2}{h} \quad (10.13)$$

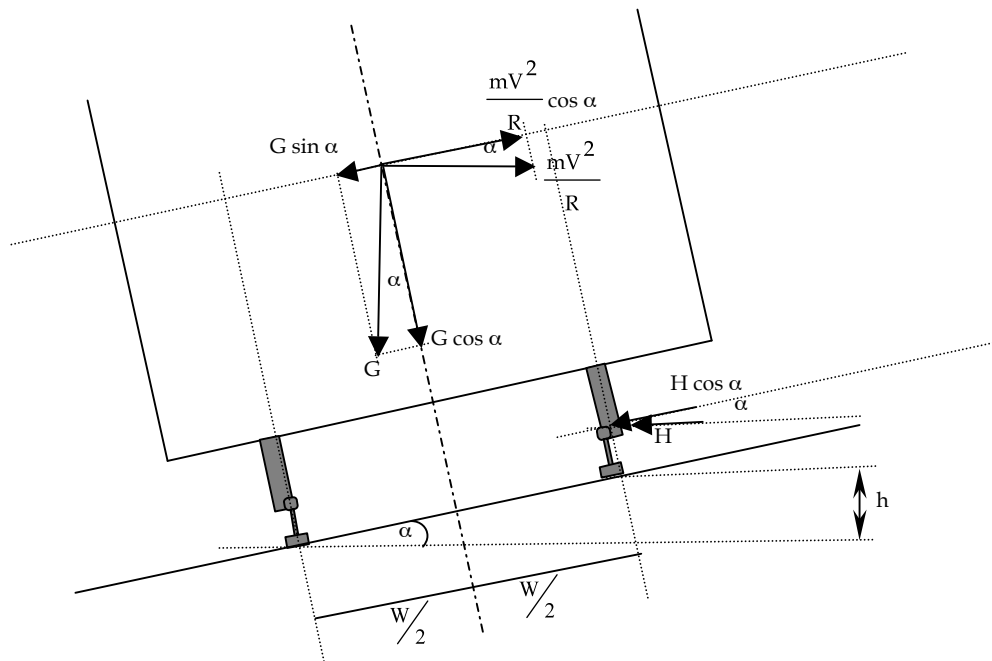
dan dengan peninggian rel maksimum 110 mm, maka :

$$R \text{ min} = 0,076 V^2 \quad (10.14)$$

### b. Gaya sentrifugal diimbangi oleh gaya berat dan daya dukung komponen jalan rel

Persamaan dasar :

Gaya Berat + Komp.Rel = Gaya Sentrifugal (Gambar 10.2)



Gambar 10.2 Skematik gaya pada kondisi gaya sentrifugal hanya diimbangi oleh gaya berat dan daya dukung komponen rel

$$G \sin \alpha + H \cos \alpha = \frac{mV^2}{R} \cos \alpha \quad (10.15)$$

$$G \sin \alpha = \left[ \frac{GV^2}{gR} - H \right] \cos \alpha \quad (10.16)$$

$$G \tan \alpha = \left[ \frac{GV^2}{gR} - H \right] \quad (10.17)$$

$$\text{jika : } \tan \alpha = \frac{h}{W} \quad (10.18)$$

$$\text{dan, } H = m \cdot a = \frac{G}{g} a \quad (10.19)$$

maka :

$$a = \frac{V^2}{R} - g \frac{h}{W} \quad (10.20)$$

dimana a = percepatan sentrifugal (m/detik<sup>2</sup>)

Percepatan sentrifugal maksimum ditentukan : **0,0478 g**, dengan mempertimbangkan faktor kenyamanan pada saat kereta di tikungan.

Dengan peninggian maksimum,  $h_{\text{maks}} = 110 \text{ mm}$ , maka :

$$R_{\text{min}} = 0,054 V^2 \quad (10.21)$$

**c. Jari-jari minimum untuk lengkung yang tidak memerlukan busur peralihan jika tidak ada peninggian rel yang harus dicapai ( $h = 0$ ), maka :**

$$R_{\text{min}} = 0,164 V^2 \quad (10.22)$$

## 2. Lengkung Peralihan

Lengkung peralihan ditetapkan untuk mengeliminasi perubahan gaya sentrifugal sedemikian rupa sehingga penumpang di dalam kereta terjamin nyaman dan keamanannya. Panjang lengkung peralihan merupakan fungsi dari perubahan gaya sentrifugal per satuan waktu, kecepatan dan jari-jari lengkung.

$$\text{Perubahan gaya sentrifugal} = \frac{\text{gaya}}{\text{waktu}} = \frac{m \cdot a}{t} \quad (10.23)$$

$$\frac{m \cdot a}{t} = \frac{m \frac{V^2}{R}}{\frac{L}{V}} \quad (10.24)$$

$$L = \frac{V^3 \cdot t}{a \cdot R} \quad (10.25)$$

$$\text{Jika : } a_{\text{maksimum}} = 0,0478 g \quad (10.26)$$

(g = percepatan gravitasi = 9.81 m/dtk<sup>2</sup>)

$$h = 5,95 \frac{V^2}{R} \quad (10.27)$$

dan dikonversi pada satuan praktis maka :

$$Lh = 0,01 \times h \times V \quad (10.28)$$

dimana,

Lh = panjang minimum lengkung peralihan (m)

h = peninggian pada rel luar di lengkung (mm)

V = kecepatan rencana untuk lengkung peralihan (km/jam)

R = jari-jari lengkung (m)

### 3. Peninggian Rel

Peninggian rel diperlukan untuk mengimbangi timbulnya gaya sentrifugal pada kereta saat memasuki suatu lengkung horisontal. Gaya sentrifugal tersebut mengakibatkan kereta cenderung terlempar ke luar dari lengkung. Besarnya gaya sentrifugal sebanding dengan massa dan kuadrat kecepatan kereta api, dan berbanding terbalik dengan jari-jari lengkung horizontal. Salah satu cara untuk membantu mereduksi gaya sentrifugal yang membebani kereta api adalah meninggikan rel luar secara relative terhadap rel bagian dalam di lengkung horizontal.

#### a. Peninggian rel minimum

Peninggian rel minimum didasarkan pada gaya maksimum yang mampu dipikul oleh rel dan kenyamanan bagi penumpang.

Persamaan dasar :

Gaya Sentrifugal = Gaya Berat + Komponen Rel

$$\frac{mV^2}{R} \cos \alpha = G \cdot \sin \alpha + H \cdot \cos \alpha \quad (10.29)$$

$$G \sin \alpha = \left[ \frac{GV^2}{gR} - H \right] \cos \alpha \quad (10.30)$$

$$G \tan \alpha = \left[ \frac{GV^2}{gR} - H \right] \quad (10.31)$$

$$\text{jika : } \tan \alpha = \frac{h}{W} \quad (10.32)$$

$$\text{dan, } H = m \cdot a = \frac{G}{g} a \quad (10.33)$$

maka :



$$a = \frac{V^2}{R} - g \frac{h}{W} \quad (10.34)$$

dimana  $a$  = percepatan sentrifugal (m/detik<sup>2</sup>)

$$h = \frac{WV^2}{gR} - \frac{Wa}{g} \quad (10.35)$$

Jika :  $W = 1120$  mm,  $g = 9,81$  m/detik<sup>2</sup>, dan  $a = 0,0478$  g (m/detik<sup>2</sup>),

maka :

$$h_{\min} = \frac{8,8 V^2}{R} - 53,5 \quad (\text{dalam satuan mm}) \quad (10.36)$$

### **b. Peninggian rel normal**

Peninggian rel normal didasarkan pada gaya maksimum yang mampu dipikul oleh gaya berat kereta api dan konstruksi rel tidak memikul gaya sentrifugal.

Persamaan dasar :

Gaya Sentrifugal = Gaya Berat

$$G \sin \alpha = \frac{mV^2}{R} \cos \alpha \quad (10.37)$$

$$G \sin \alpha = \frac{GV^2}{gR} \cos \alpha \quad (10.38)$$

$$\tan \alpha = \frac{V^2}{gR} \quad (10.39)$$

$$\text{jika : } \tan \alpha = \frac{h}{W} \quad (10.40)$$

$$\frac{mV^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha \quad (10.41)$$

$$h = \frac{WV^2}{gR} \quad (10.42)$$

Dengan memasukkan satuan praktis :

$W$  = jarak diantara kedua titik kontak roda dan rel = 1120 mm

$R$  = jari-jari lengkung horizontal (m)

$V$  = kecepatan rencana (km/jam)

$h$  = peniggaan rel pada lengkung horizontal (mm)

$g$  = percepatan gravitasi (9,81 m/detik<sup>2</sup>)

maka :

$$h_{\text{normal}} = \frac{8,8V^2}{R} \quad (\text{dalam mm}) \quad (10.43)$$

Dalam perhitungan peninggian digunakan kecepatan kereta api terbesar ( $V_{\text{maksimum}}$ ) yang melewati suatu lintas dengan jari-jari  $R$  sebagai suatu hubungan persamaan :

$$V = 4,3 \sqrt{R} \quad (10.44)$$

Jika :

$$h = k \frac{V^2}{R} \quad (10.45)$$

dan untuk  $V = 4,3 \sqrt{R}$ , digunakan peninggian rel,  $h = 110$  mm, maka :

$$110 = k \frac{(4,3\sqrt{R})^2}{R} \quad (10.46)$$

$$k = 5,95$$

Jadi peninggian rel normal ditentukan sebagai :

$$h_{\text{normal}} = 5,95 \frac{V^2}{R} \quad (\text{dalam mm}) \quad (10.47)$$

### c. Peninggian rel maksimum

Peninggian rel maksimum berdasarkan stabilitas kereta api pada saat berhenti di bagian lengkung, digunakan faktor keamanan (*safety factor*, SF) = 3,0 sehingga kemiringan maksimum dibatasi sampai 10 % atau  $h$  maksimum = 110 mm.

Gambar 10.3 di bawah ini menunjukkan filosofi penurunan peninggian maksimum yang merupakan faktor keamanan terhadap gaya guling.

Ditinjau seluruh Momen Gaya Berat terhadap titik 0 (di dasar rel bagian dalam) :

$$SF \times G \cdot \sin \alpha \times y = G \cdot \cos \alpha \times \frac{W}{2} \quad (10.48)$$

$$\tan \alpha = \frac{W}{SF \times 2 \times y} \quad \text{dan} \quad \tan \alpha = \frac{V^2}{gR} \quad (10.49)$$

$$\text{maka :} \quad \frac{h}{W} = \frac{W}{SF \times 2 \times y} \quad (10.50)$$

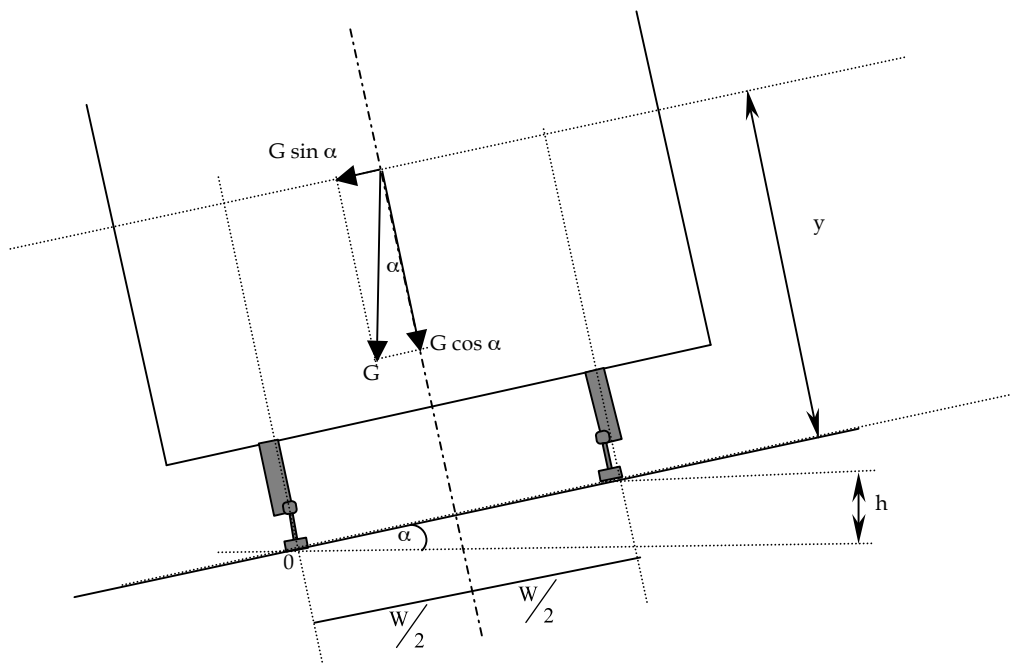
$$SF = \frac{W}{h_{\text{maksimum}} \times 2 \times y}, \quad (10.51)$$

Jika :

$$\begin{aligned} y &= 1700 \text{ mm (jarak titik berat gerbong/kereta terhadap titik 0)} \\ W &= 1120 \text{ mm (= 1067 mm + e)} \\ SF &= 3,325 \end{aligned}$$

maka :

$$h_{\text{maksimum}} = 110 \text{ mm} \quad (10.52)$$



Gambar 10.3 Skematik pengaruh peninggian maksimum yang merupakan faktor keamanan terhadap gaya guling

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa peninggian rel rencana/disain harus memenuhi syarat :

$$h_{\text{minimum}} < h_{\text{normal}} < h_{\text{maksimum}} \quad (10.53)$$

nilai  $h$  rencana dibulatkan menjadi bilangan kelipatan 5 mm di atasnya.

#### 4. Pelebaran sepur

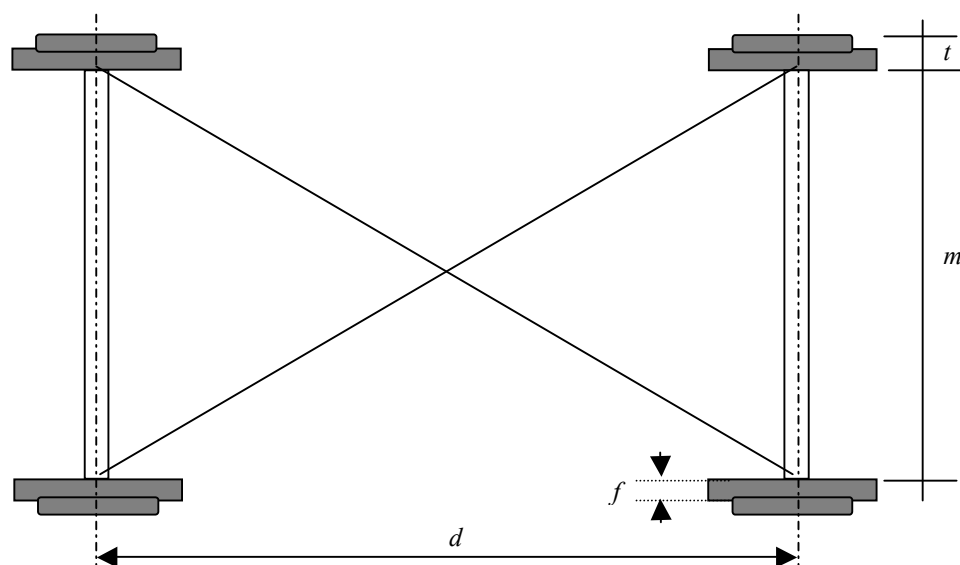
Pada saat gerbong dengan dua gandar kokoh melalui suatu tikungan, maka roda di muka bagian sisi terluar (pada rel luar) dapat akan menekan rel. Oleh karena gandar muka dan belakang gerbong merupakan satu kesatuan yang kaku (*rigid wheel base*), maka gandar belakang berada pada posisi yang sejajar dengan gandar muka akan memungkinkan tertekannya rel dalam oleh roda belakang. Flens roda luar akan membentuk sudut dalam posisi di tikungan, namun sumbu

## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

memanjang gerbong letaknya selalu tegak lurus terhadap gandar depan. Untuk mengurangi gaya tekan akibat terjepitnya roda kereta, maka perlu diadakan pelebaran rel agar rel dan roda tidak cepat aus.

Terdapat tiga faktor yang sangat berpengaruh terhadap besarnya pelebaran sepur, yaitu :

- Jari-jari lengkung ( $R$ ).
- Ukuran atau jarak gandar muka - belakang yang kokoh/*rigid wheel base* ( $d$ ), sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 10.4.
- Kondisi keausan roda dan rel.



Keterangan :

Indonesia :  $d = 3,00 \text{ m}, 4,00 \text{ m}$   
 $m = 1000 \text{ mm}$   
 $f = 30 \text{ mm}$   
 $t = 130 \text{ mm}$

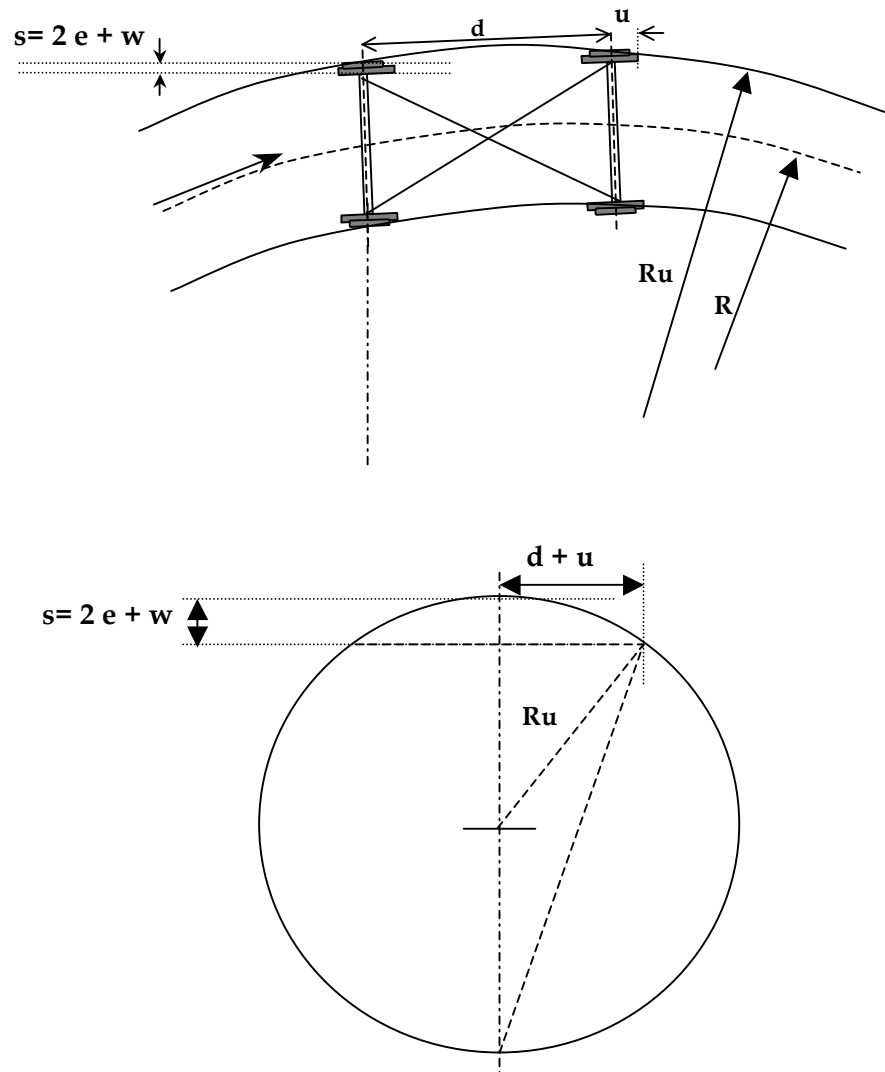
JNR :  $d = 4,60 \text{ m}$   
 $m = 988 \text{ mm}$   
 $f = 22 \text{ mm}$

Gambar 10.4 Skematik gandar muka - belakang kokoh

Jika  $R$  makin kecil dan  $d$  semakin besar, kemungkinan terjadi adalah terjepitnya kereta dalam rel. Supaya kedudukan roda dan rel tidak terjepit diperlukan pelebaran sepur ( $w$ ) dengan pendekatan matematis. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan Indonesia dan pendekatan Jepang (PD.No.10 tahun 1986).

- Pendekatan Indonesia :

Pendekatan Indonesia diturunkan dari pendekatan sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 10.5.



Gambar 10.5 Skematik pendekatan matematis model Indonesia

$$w = \frac{4500}{R} - 8 \text{ (mm)} \quad (10.54)$$

untuk  $d = 3.00 \text{ m}$  dan  $e = 4 \text{ mm}$  ( $S = 1067 \text{ mm}$ )

$$w = \frac{8000}{R} - 8 \text{ (mm)} \quad (10.55)$$

untuk  $d = 4.00 \text{ m}$  dan  $e = 4 \text{ mm}$  ( $S = 1067 \text{ mm}$ )

Persamaan 10.54 merupakan persamaan umum yang diaplikasikan oleh Peraturan Dinas No.10 tahun 1986 yang digunakan di Indonesia. Pelebaran sepur yang diijinkan maksimum adalah 20 mm. Pelebaran sepur dicapai dan dihilangkan secara berangsur-angsur sepanjang lengkung peralihan.

- Pendekatan Jepang atau JNR :

## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

JNR melakukan pendekatan terhadap besar pelebaran sepur dengan kondisi maksimum dan minimum pada saat kereta melalui tikungan. Kondisi maksimum terjadi apabila gandar roda muka tepat berada di rel sedangkan gandar roda belakang telah bergeser ke luar. Kondisi minimum dicapai bila flens rel luar sedemikian sehingga memungkinkan roda belakang melalui flens rel dalam.

$$\text{Kondisi maksimum : } w = \frac{(1,5d)^2}{8R} \quad (10.56)$$

$$\text{Kondisi minimum : } w = \frac{(d)^2}{4R} \quad (10.57)$$

Dengan melakukan kalibrasi terhadap ukuran yang digunakan di Indonesia, persamaan pelebaran sepur JNR diberikan berikut ini :

### **Kondisi Maksimum :**

$$\text{Untuk } d = 3.00 \text{ m, } w = \frac{2532}{R} - 4 \text{ (mm)} \quad (10.58)$$

$$\text{Untuk } d = 4.00 \text{ m, } w = \frac{4500}{R} - 4 \text{ (mm)} \quad (10.59)$$

### **Kondisi Minimum :**

$$\text{Untuk } d = 3.00 \text{ m, } w = \frac{2391}{R} - 6 \text{ (mm)} \quad (10.60)$$

$$\text{Untuk } d = 4.00 \text{ m, } w = \frac{4250}{R} - 6 \text{ (mm)} \quad (10.61)$$

## 5. Lengkung S

Lengkung S terjadi bila lengkung dari suatu lintas berbeda arah lengkungnya dan terletak bersambungan. Kedua lengkung harus dipisahkan oleh bagian lurus minimal 20 meter di luar lengkung peralihan.

## 6. Alur Perhitungan Lengkung Horisontal

### 1. Menghitung panjang lengkung

$$\theta_s = \frac{90 \times L_s}{\pi \times R} \quad (10.62)$$

$$\theta_c = \Delta_s - 2\theta_s \quad (10.63)$$

$$L_c = \frac{\theta_c}{360^\circ} \times 2\pi R \quad (10.64)$$

$$L = 2 L_s + L_c \quad (10.65)$$

2. Menghitung  $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $k$  dan  $p$

$$X_c = L_s - \frac{L_s^3}{40 \times R^2} \quad (10.66)$$

$$Y_c = \frac{L_s^2}{6 \times R} \quad (10.67)$$

$$p = Y_c - R(1 - \cos \theta_s) \quad (10.68)$$

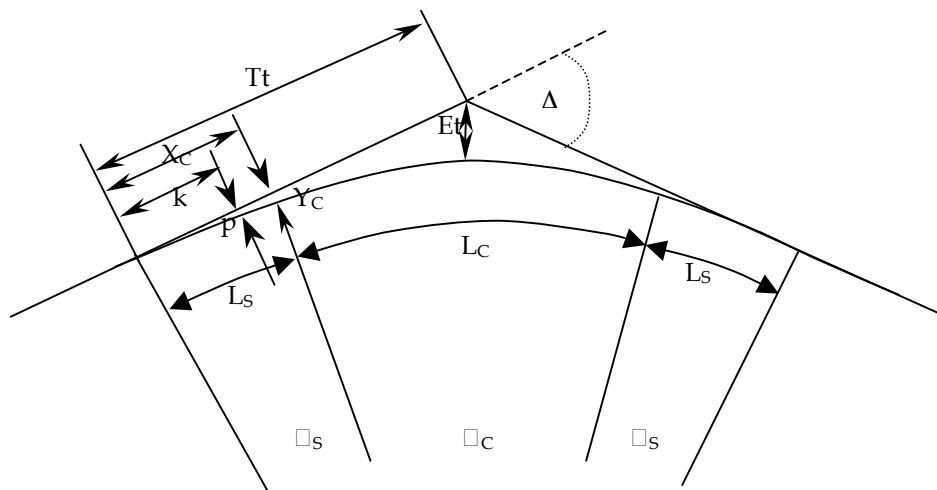
$$k = X_c - R \sin \theta_s \quad (10.69)$$

3. Menghitung  $T_t$  dan  $E_t$

$$T_t = (R + p) \operatorname{tg} \frac{\Delta_s}{2} + k \quad (10.70)$$

$$E_t = (R + p) \sec \frac{\Delta_s}{2} - R \quad (10.71)$$

4. Menggambar proyeksi lengkung horisontal :



Gambar 10.6 Proyeksi lengkung horisontal

## D. ALINEMEN VERTIKAL

### 1. Pengelompokan Lintas

Beberapa batas landai yang diijinkan disesuaikan dengan jenis kereta api, jika digunakan lokomotif adhesi maka landai maksimum yang diperkenankan 40 ‰, dan jika digunakan lokomotif bergigi, maka kelandaian maksimum dapat mencapai 60 – 80 ‰. Sementara itu, pada beberapa negara pengelompokan lintas, didasarkan pada besarnya kelandaian pada kondisi medan sebagaimana disebutkan sebagai berikut :

- Medan dengan lintas dasar jika kelandaianya 0 – 10 ‰.
- Medan dengan lintas pegunungan jika kelandaianya lebih dari 10 ‰

Untuk emplasemen, kelandaian maksimum ditentukan berdasarkan koefisien tahanan mula pada kereta atau gerbong dengan memakai tumpuan rol (roller

bearing). Sehingga pada landai tersebut kereta atau gerbong dalam keadaan seimbang atau diam. Tahanan mula ini berkisar antara 1,5 - 2,5 kg/ton. Berdasarkan ketentuan di atas, PD. No.10 tahun 1986 mengelompokkan lintas berdasarkan kelandaian sebagaimana dijelaskan sebagai berikut :

- Lintas Datar : 0 - 10 ‰.
- Lintas Pegunungan : 10 - 40 ‰.
- Lintas dengan Rel Gigi : 40 - 80 ‰.
- Landai pada emplasemen : 0 - 1,5 ‰.

## 2. Jari-Jari Minimum Lengkung

Alinemen vertikal merupakan proyeksi sumbu jalan rel pada bidang vertikal melalui sumbu jalan rel itu tersebut. Alinemen vertikal terdiri dari garis lurus dengan atau tanpa kelandaian dan lengkung vertikal yang berupa busur lingkaran, sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 10.7. Besar jari-jari minimum lengkung bergantung pada besar kecepatan rencana seperti dalam tabel jari-jari lengkung vertikal PD 10 tahun 1986, sebagaimana tertera berikut ini :

Untuk  $V$  rencana  $> 100$  km/jam, digunakan  $R_{\min} = 8000$  m

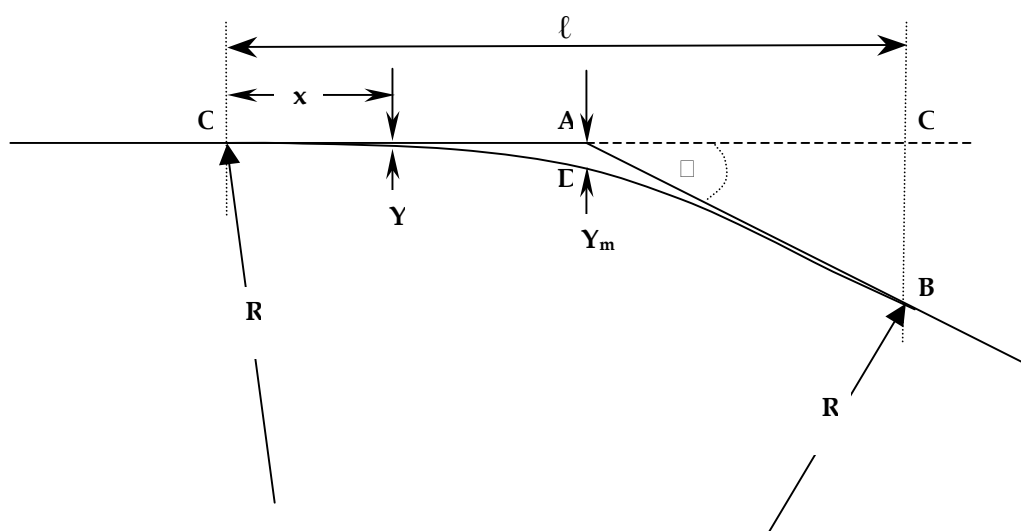
Untuk  $V$  rencana hingga 100 km/jam, digunakan  $R_{\min} = 6000$  m

Lengkung vertikal diusahakan dalam perencanaannya tidak berimpit atau bertumpangan dengan lengkung horizontal.

## 3. Letak Titik Lengkung dan Jarak Maksimum Proyeksi Titik Sumbu ke Lengkung Vertikal

Panjang lengkung vertikal berupa busur lingkaran yang menghubungkan dua kelandaian lintas yang berbeda dan ditentukan berdasarkan besarnya jari-jari lengkung vertikal dan perbedaan kelandaian.

$$\text{Rumus Dasar Lengkung : } \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{R} \quad (10.72)$$





Gambar 10.7 Skematik lengkung vertikal

Dimana :

- R : jari-jari lengkung peralihan
- $\ell$  : panjang lengkung peralihan
- A : titik tekuk lengkung vertikal
- $\Delta$  : perbedaan landai

Dari persamaan 10.72, diperoleh bahwa :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{R} + C_1 \quad (10.73)$$

Jika  $x = 0$ , maka  $\frac{dy}{dx} = 0$  dan  $C_1 = 0$  (10.74)

$$Y = \frac{x^2}{2R} + C_2 \quad (10.75)$$

Jika  $x = 0$ , maka  $Y = 0$  dan  $C_2 = 0$  (10.76)

Letak titik A (titik tekuk lengkung vertikal, lihat Gambar 10.7), diperoleh :

Diberikan :  $x = \ell$  (10.77)

a.  $\frac{dy}{dx} = \frac{\ell}{R}$ , dan  $\Delta = \ell R$  (10.78)

$$X_m = OA = \frac{1}{2} \ell \quad (10.79)$$

$$X_m = \frac{R}{2} \varphi \quad (10.80)$$

b.  $Y = \frac{x^2}{2R}$ , dan  $\Delta = \ell R$  (10.81)

Jika :  $Y = Y_m$  dan  $X = X_m = OA = \frac{1}{2} \ell$ , maka :

$$Y_m = \frac{\frac{1}{4} \ell^2}{2R} = \frac{\varphi^2 R^2}{8R} \quad (10.82)$$

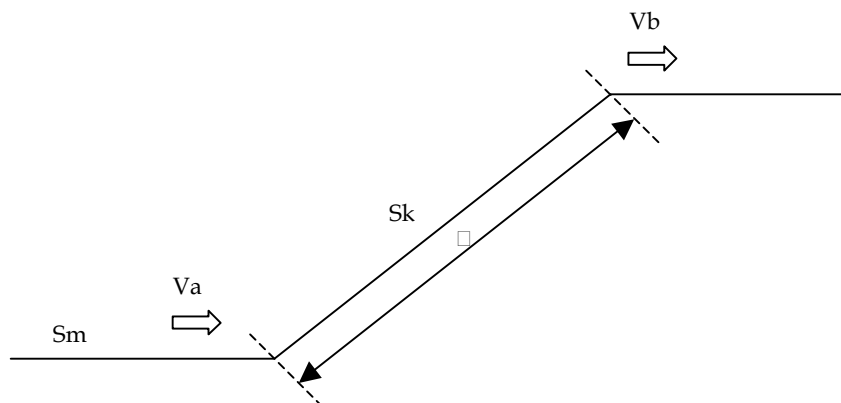
$$Y_m = \frac{R}{8} \varphi^2 \quad (10.83)$$

Menggunakan Persamaan 10.80 dan 10.83, selanjutnya dengan R yang ditentukan untuk berbagai harga kecepatan dan perbedaan kelandaian, maka dapat dihitung dimensi lengkung peralihan  $X_m$  dan  $Y_m$ .

#### 4. Landai Curam (Sk)

## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

Pada kondisi khusus sering terdapat lintas dengan kelandaian yang lebih besar dari landai penentu ( $S_m$ ) dengan alasan ekonomis untuk perancangan terutama pada daerah pegunungan. Dengan demikian diperlukan disain khusus untuk menentukan kelandaian tersebut yang dikenali sebagai landai curam ( $S_k$ ) dengan panjang landai yang harus memenuhi rumus pendekatan sebagai berikut :



Gambar 10.8 Skematik perencanaan panjang landai curam

$$\frac{1}{2} m \cdot V_a^2 - \frac{1}{2} m \cdot V_b^2 = G(S_k - S_m) \cdot \ell \quad (10.84)$$

$$\frac{1}{2} \frac{G}{g} \cdot (V_a^2 - V_b^2) = G(S_k - S_m) \cdot \ell \quad (10.85)$$

$$\square = \frac{(V_a^2 - V_b^2)}{2g(S_k - S_m)} \quad (10.86)$$

dimana,

- $V_a$  = kecepatan awal di kaki landai curam (m/detik)
- $V_b$  = kecepatan akhir di puncak landai curam (m/detik)
- $S_k$  = besar landai curam (‰)
- $S_m$  = besar landai penentu (‰)
- $\square$  = panjang landai curam (m)

### Contoh Soal 1

#### Perencanaan Kelas Jalan Rencana

Rencanakan kelas jalan rencana apabila terdapat data lalu lintas kereta api di bawah ini (Tabel 10.1), selanjutnya tentukan kecepatan operasi dan kecepatan maksimumnya untuk data perencanaan geometrik jalan rel.

Tabel 10.1 Data lalu lintas harian kereta api.

Kecepatan Operasi Rata-Rata (km/jam)	Jenis Kereta Api	Jumlah Lintas Operasi per Hari	Jumlah Kereta Penumpang/Barang pada Rangkaian	Tonase Lokomotif & Kereta Penumpang/Barang (ton)	Beban Gandar Rata-Rata (ton)
108	Kereta Api	2 kali	12 kereta	Lokomotif : 72	Lokomotif : 12

	Gatot Kaca			K.Penumpang: 104	K.Penumpang : 17.3
	Kereta Api Pundawa	2 kali	10 kereta	Lokomotif : 90 K.Penumpang: 106	Lokomotif : 15 K.Penumpang : 17.7
	Kereta Api Muda	2 kali	10 kereta	Lokomotif : 75 K.Penumpang: 108	Lokomotif : 18 K.Penumpang : 12.5
102	Kereta Api Tratas	1 kali	8 kereta	Lokomotif : 80 K.Penumpang: 105	Lokomotif : 13.3 K.Penumpang : 17.5
	Kereta Api Kencana	2 kali	12 kereta	Lokomotif : 82 K.Penumpang: 108	Lokomotif : 13.7 K.Penumpang : 18
95	Kereta Api Ekonomi 1	3 kali	12 kereta	Lokomotif : 80 K.Penumpang: 107	Lokomotif : 13.3 K.Penumpang : 17.8
100	Kereta Api Ekonomi 2	3 kali	12 kereta	Lokomotif : 85 K.Penumpang: 109	Lokomotif : 14.2 K.Penumpang : 17.9

**Jawaban :**

**A. Perhitungan Kelas Jalan**

Menggunakan Persamaan 10.4 dan 10.5 :

$$TE = T_p + (K_b \times T_b) + (K_1 \times T_1)$$

(1). Perhitungan Tonase Kereta Penumpang harian ( $T_p$ )

Kereta api Gatot Kaca	:	$2 \times 12 \times 104 = 2496$	ton
Kereta api Pundawa	:	$2 \times 10 \times 106 = 2120$	ton
Kereta api Muda	:	$2 \times 10 \times 108 = 2160$	ton
Kereta api Tratas	:	$1 \times 8 \times 105 = 840$	ton
Kereta api Kencana	:	$2 \times 12 \times 108 = 2592$	ton
Kereta api Ekonomi 1	:	$3 \times 12 \times 107 = 3852$	ton
Kereta api Ekonomi 2	:	$3 \times 12 \times 109 = 3924$	ton

Total = 17.984 ton

(2). Perhitungan Tonase Lokomotif ( $T_1$ )

Lokomotif Kereta api Gatot Kaca	:	$2 \times 72 = 144$	ton
Lokomotif Kereta api Pundawa	:	$2 \times 90 = 180$	ton
Lokomotif Kereta api Muda	:	$2 \times 75 = 150$	ton
Lokomotif Kereta api Tratas	:	$1 \times 80 = 80$	ton
Lokomotif Kereta api Kencana	:	$2 \times 82 = 164$	ton
Lokomotif Kereta api Ekonomi 1	:	$3 \times 80 = 240$	ton
Lokomotif Kereta api Ekonomi 2	:	$3 \times 85 = 255$	ton

Total = 1.213 ton

$$TE = 17.984 + (1,4 \times 1.213) = 19.682,2 \text{ ton}$$

$$T = 360 \times S \times TE$$

$$T = 360 \times 1,1 \times 19.682,2 = 7.794.151,2 \text{ ton/tahun}$$

**B. Perhitungan Kecepatan Operasi**

## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

$$\begin{aligned}\text{Kecepatan Rata- Rata Operasi} &= \frac{(\sum N_i \cdot V_i)}{\sum N_i} \\ &= \frac{[(2 \times 108) + (2 \times 108) + (2 \times 108) + (1 \times 102) + (2 \times 102) + (3 \times 95) + (3 \times 100)]}{(2 + 2 + 2 + 1 + 2 + 3 + 3)} \\ &= 102,6 \text{ km/jam}\end{aligned}$$

Oleh karena itu, berdasarkan data lalu lintas kereta api, jalan rel rencana memiliki :

- 1). Kelas Jalan III ( $5 \times 10^6 - 10 \times 10^6$  ton/tahun).
- 2). Kecepatan Operasi : 102,6 km/jam
- 3). Kecepatan Maksimum (Kelas Jalan III) : 100 km/jam

---

### Contoh Soal 2

#### Perencanaan Kelas Jalan Rencana

Jalan rel direncanakan untuk kondisi topografi pada daerah datar. Kecepatan operasional rata-rata untuk seluruh rangkaian kereta api yang lewat dan daya angkut lintas tahunan menggunakan **contoh soal 1**. Lebar sepur digunakan 1067 mm. Mengingat tidak ada landai curam dalam perencanaan maka setiap rangkaian kereta penumpang dan barang **hanya cukup dilayani** oleh 1 lokomotif saja. Trase jalan dibuat pada titik perpotongan yang membentuk sudut  $20^\circ 20' 5''$ . Rencanakan alinemen horizontalnya !

#### Jawaban :

- 1). Data Kecepatan Rencana :
  - Kelas Jalan III ( $5 \times 10^6 - 10 \times 10^6$  ton/tahun).
  - Kecepatan Operasi : 102,6 km/jam
  - Kecepatan Maksimum (Kelas Jalan III) : 100 km/jam
- 2). Kecepatan Rencana untuk Perencanaan Jari-Jari Lengkung dan Lengkung Peralihan :

$$V_{\text{rencana 1}} = V_{\text{maksium}} = 100 \text{ km/jam}$$

- 3). Perencanaan Jari-Jari Horisontal :

- $R_{\text{min}} = 0,076 V^2 = 0,076 (100)^2 = 760 \text{ m}$
- $R_{\text{min}} = 0,054 V^2 = 0,054 (100)^2 = 540 \text{ m}$
- $R_{\text{min}}$  dari Tabel 2.1 PD.10 tahun 1986 = 550 m
- $R_{\text{rencana}} = 600 \text{ m}$  (dicoba)

- 4). Perencanaan Peninggian Rel :

Kecepatan rencana untuk peninggian rel =  $1,25 \times$  kecepatan operasi rata-rata

$$V_{\text{rencana 2}} = 128,25 \text{ km/jam}$$

- $h_{\text{maksimum}} = 110 \text{ mm}$

$$- \quad h_{\text{normal}} = 5,95 \frac{V^2}{R} = 5,95 \frac{(128,25)^2}{600} = 163,109 \text{ mm} > 110 \text{ mm},$$

∴ R rencana = 600 m perlu diperbesar, misalnya diambil R rencana = 950 m, maka :

$$h_{\text{normal}} = 5,95 \frac{(128,25)^2}{950} = 103,017 \text{ mm} < 110 \text{ mm} \dots \text{OK!}$$

$$- \quad h_{\text{min}} = \frac{8,8 V^2}{R} - 53,5 = \frac{8,8 (128,25)^2}{950} - 53,5 = 98,861 \text{ mm}$$

- Memenuhi syarat :  $h_{\text{minimum}} < \underline{h_{\text{normal}}} < h_{\text{maksimum}}$

∴ peninggian rel yang direncanakan = 103,017 ≈ 105 mm

5). Perencanaan Lengkung Peralihan :

$$L_s = L_h = 0,01 \times h \times V_{\text{maksimum}} = 0,01 \times 105 \times 100 = 105 \text{ m}$$

6). Perencanaan Lengkung Lingkaran :

$$\theta_s = \frac{90 \times L_s}{\pi \times R} = \frac{90 \times 105}{\pi \times 950} = 3,166 = 3^\circ 09' 58,85''$$

$$\theta_c = \Delta_s - 2\theta_s = 20^\circ 20' 5'' - (2 \times 3^\circ 09' 58,85'') = 14,002 = 14^\circ 0' 07,31''$$

$$L_c = \frac{c}{360^\circ} \times 2\pi R = \frac{14^\circ 0' 07,31''}{360^\circ} \times 2\pi \times (950) = 232.162 \approx 233 \text{ m}$$

$$L = 2 L_s + L_c = 2 (105) + 235 = 445 \text{ m}$$

7). Perencanaan Komponen Lengkung Lingkaran :

$$X_c = L_s - \frac{L_s^3}{40 \times R^2} = 105 - \left( \frac{(105)^3}{40 \times 950^2} \right) = 104,968 \approx 105 \text{ m}$$

$$Y_c = \frac{L_s^2}{6 \times R} = \frac{105^2}{6 \times 950} = 1,934 \text{ m}$$

$$p = Y_c - R(1 - \cos \theta_s) = 1,934 - 950(1 - \cos 3^\circ 09' 58,85'') = 0,484 \approx 0,5 \text{ m}$$

$$k = X_c - R \sin \theta_s = 105 - 950(\sin 3^\circ 09' 58,85'') = 52,526 \approx 53 \text{ m}$$

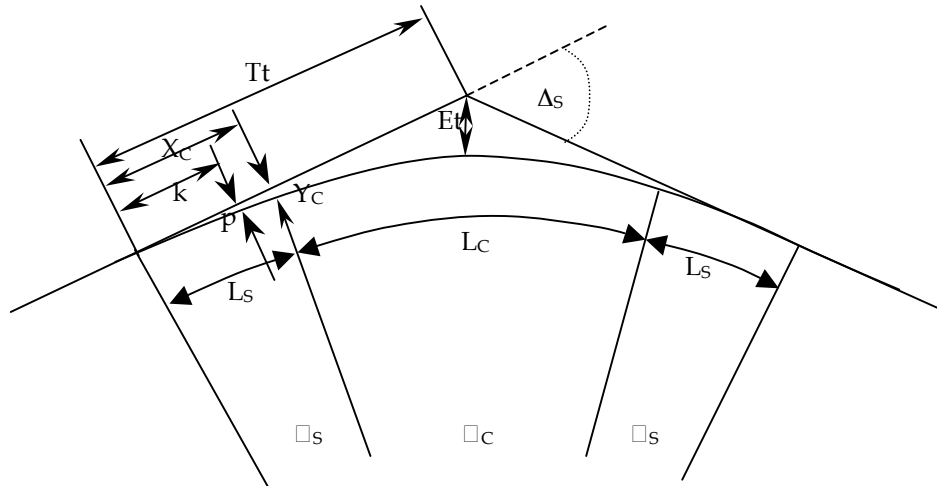
8). Perencanaan Komponen Lengkung Lingkaran :

$$T_t = (R + p) \operatorname{tg} \frac{\Delta_s}{2} + k = (950 + 0,5) \operatorname{tg} \frac{20^\circ 20' 5''}{2} + 53 = 223,46 \approx 224 \text{ m}$$

$$E_t = (R + p) \operatorname{sec} \frac{\Delta_s}{2} - R = (950 + 0,5) \operatorname{sec} \frac{20^\circ 20' 5''}{2} - 950 = 15,66 \approx 16 \text{ m}$$

## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

Skematik Lengkung Horisontal :



### Contoh Soal 3

#### Perencanaan Diagram Superelevasi

Dari contoh soal 2, tentukan diagram superelevasi lengkung horisontalnya dan juga tentukan perubahan peninggian rel pada lengkung peralihan !

**Jawaban :**

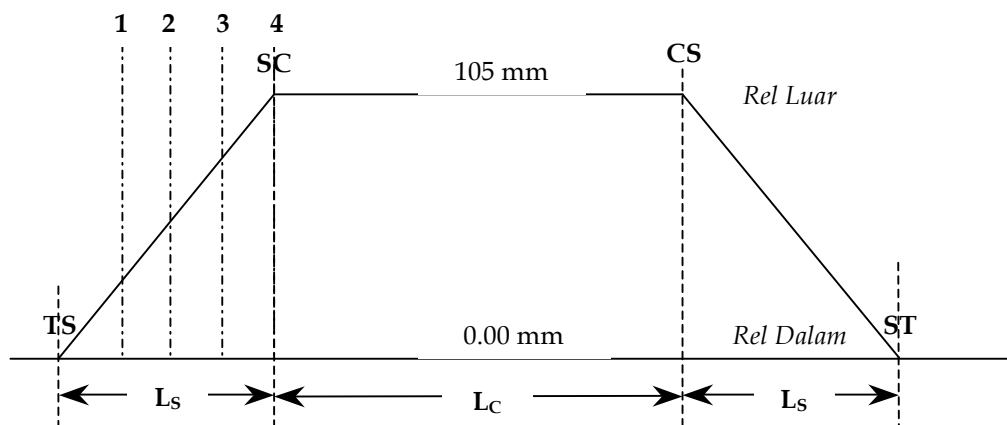
Data untuk diagram superelevasi :

Peninggian rencana rel : 105 mm

$L_s = 105$  m

$L_c = 233$  m

Diagram :



Perubahan peninggian rel pada lengkung peralihan :

Panjang lengkung peralihan yang ditinjau adalah titik pada  $\frac{1}{4} L_s$  (titik 1),  $\frac{1}{2} L_s$  (titik 2),  $\frac{3}{4} L_s$  (titik 3) dan  $L_s$  (titik 4).

$$\text{Titik 1} = \frac{1/4 L_S}{L_S} \times 105 \text{ mm} = 26,25 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 2} = \frac{1/2 L_S}{L_S} \times 105 \text{ mm} = 52,50 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 3} = \frac{3/4 L_S}{L_S} \times 105 \text{ mm} = 78,75 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 4} = \frac{L_S}{L_S} \times 105 \text{ mm} = 105 \text{ mm}$$

---

#### **Contoh Soal 4**

##### **Perencanaan Pelebaran Sepur**

Dari **contoh soal 2**, jika gerbong dan kereta memiliki panjang antar gandar kokoh 4,00 m, tentukan nilai pelebaran sepur pada alinemen rencana menggunakan pendekatan cara Indonesia.

##### **Jawaban :**

Data untuk perhitungan pelebaran sepur :

$$R = 950 \text{ m}$$

$$d = 4,00 \text{ m}$$

$$w = \frac{8000}{R} - 8 = \frac{8000}{950} - 8 = 0,42 \text{ mm} \approx 0 \text{ mm}$$

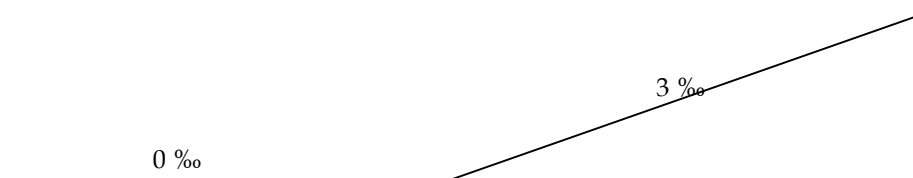
Karena nilai  $w$  sangat kecil maka pada alinemen rencana tidak memerlukan pelebaran sepur.

---

#### **Contoh Soal 5**

##### **Perencanaan Alinemen Vertikal**

Rencanakan lengkung vertikal dengan rencana landai sebagaimana ditunjukkan dalam gambar, apabila digunakan kecepatan rencana untuk jari-jari lengkung sebagaimana pada **contoh soal 1**.



##### **Jawaban :**

$$V \text{ rencana} = 100 \text{ km/jam}$$

$$\square = (3 \text{ ‰}) - (0 \text{ ‰}) = 3 \text{ ‰}$$

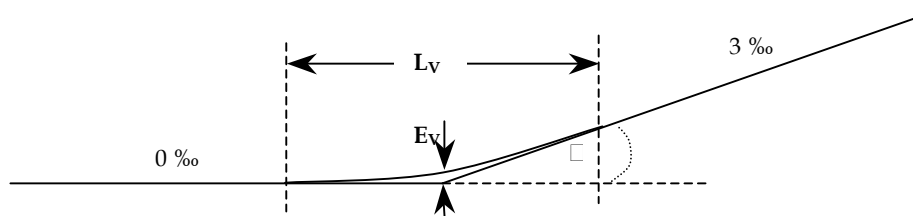
## Bab X Perencanaan Geometrik Jalan Rel

Dari PD.No.10 tahun 1986 dapat ditentukan R rencana = 7000 m (R min = 6000 untuk V rencana ≤ 100 km/jam).

$$L_v = \square = \square R = (3 \text{ ‰}) \times 7000 = 21 \text{ m}$$

$$E_v = Y_m = \frac{R}{8} \varphi^2 = \frac{7000}{8} (3 \text{ ‰})^2 = 7,875 \times 10^{-03} \text{ m}$$

Skematik Lengkung Vertikal rencana :



### E. LATIHAN SOAL

1. Jelaskan klasifikasi kecepatan yang perlu diketahui dalam perencanaan geometrik jalan rel ?
2. Jelaskan konsep ruang bebas dan ruang bangun pada jalur tunggal dalam perencanaan jalan rel ?
3. Kenapa diperlukan pelebaran sepur ? jelaskan ? dan metode apa saja yang dapat digunakan untuk menghitungnya ?
4. Jelaskan konsep persamaan turunan untuk menentukan jari-jari minimum alinemen horisontal berdasarkan anggapan bahwa gaya sentrifugal kereta didukung oleh gaya berat dan komponen rel ?
5. Jalan rel direncanakan untuk kondisi topografi pada daerah datar sebagaimana dijelaskan pada gambar di bawah. Mengingat tidak ada landai curam dalam perencanaan maka setiap rangkaian kereta penumpang dan barang **hanya cukup dilayani** oleh 1 lokomotif saja. Trase jalan dibuat titik perpotongan dengan membentuk sudut  $21^{\circ}12'18''$ . Jika digunakan kelas jalan II dengan kecepatan operasi rata-rata 109.3 km/jam.
6. Dari soal no.5, tentukan perubahan peninggian rel luar pada daerah lengkung peralihan dan diagram superelevasinya.
7. Rencanakan lengkung vertikal apabila ditentukan selisih kelandaian 4,5 ‰ dengan kelas jalan rencana tipe I.
8. Tentukan panjang trase jalan berlandai curam dengan kecepatan kereta api sebelum memasuki landai 98 km/jam, dan kecepatan setelah mencapai landai 65 km/jam. Landai penentu ditetapkan sebagai 8,9 ‰ dan landai curam rencana 20 ‰.
9. Rencanakan kelas jalan dan kecepatan operasional, untuk perencanaan geometrik apabila data lalu lintas kereta sebagaimana diberikan dalam tabel berikut ini :

Kecepatan Operasi Rata-Rata (km/jam)	Jenis Kereta Api	Jumlah Lintas Operasi per Hari	Jumlah Kereta Penumpang/Barang pada Rangkaian	Tonase Lokomotif & Kereta Penumpang/Barang (ton)
102,5	Kereta Api Gatot Kaca	2 kali	15 kereta	Lokomotif : 72 K.Penumpang: 106
	Kereta Api	3 kali	12 kereta	Lokomotif : 90



	Pundawa			K.Penumpang: 108
	Kereta Api Muda	1 kali	12 kereta	Lokomotif : 75 K.Penumpang: 108
106,2	Kereta Api Tratas	4 kali	10 kereta	Lokomotif : 80 K.Penumpang: 107
	Kereta Api Kencana	2 kali	14 kereta	Lokomotif : 82 K.Penumpang: 109
92	Kereta Api Ekonomi 1	4 kali	12 kereta	Lokomotif : 80 K.Penumpang: 108
86	Kereta Api Ekonomi 2	3 kali	15 kereta	Lokomotif : 85 K.Penumpang: 109

## F. DAFTAR PUSTAKA

1. Banks, J.H. 2002. Introduction to Transportation Engineering. MacGraw Hill. 2<sup>nd</sup> Edition. Boston. 502 p.
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. Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel. (Peraturan Dinas No.10). Bandung.
6. PJKA. 1986. Penjelasan Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel. (Peraturan Dinas No.10). Bandung.