

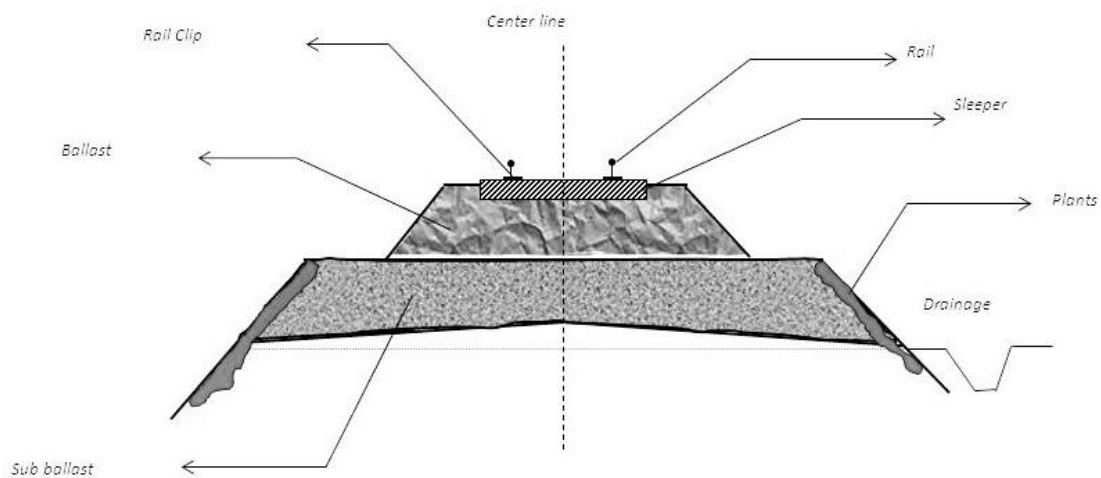
BAB III

LANDASAN TEORI

A. STRUKTUR JALAN REL

Struktur jalan rel merupakan suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana atau infrastruktur perjalanan kereta api. Konsep struktur jalan rel adalah rangkaian super dan sub-struktur yang menjadi suatu kesatuan komponen yang mampu mendukung pergerakan kereta api secara aman. Karena menopang pergerakan kereta api, maka struktur jalan rel merupakan sistem dinamik antar komponen penyusunan yang dapat mendistribusikan beban rangkaian kereta api dan sekaligus menyediakan pergerakan yang stabil dan nyaman. Dengan demikian, konsep akhir dari distribusi beban ini adalah menyalurkan tegangan dari beban kereta api kepada tanah dasar tanpa menimbulkan perubahan bentuk permanen pada tanah (Rosyidi, 2015).

Untuk menjaga agar rel tetap pada kedudukannya, rel tersebut ditambatkan pada bantalan dengan menggunakan penambat rel. dengan susunan dan tambatan yang demikian maka susunan dan struktur rel-bantalan-penambat rel menjadi suatu rangka yang kokoh. Rangka yang kokoh tersebut bersambungan secara memanjang membentuk jalur yang disebut dengan sepur (*track*). Sepur diletakkan di suatu alas yang disebut balas (*ballast*), yang selanjutnya di bawah balas terdapat lapisan subbalas (*subballast*) dan tanah dasar (*subgrade*), untuk lebih jelasnya lihat Gambar 3.1.



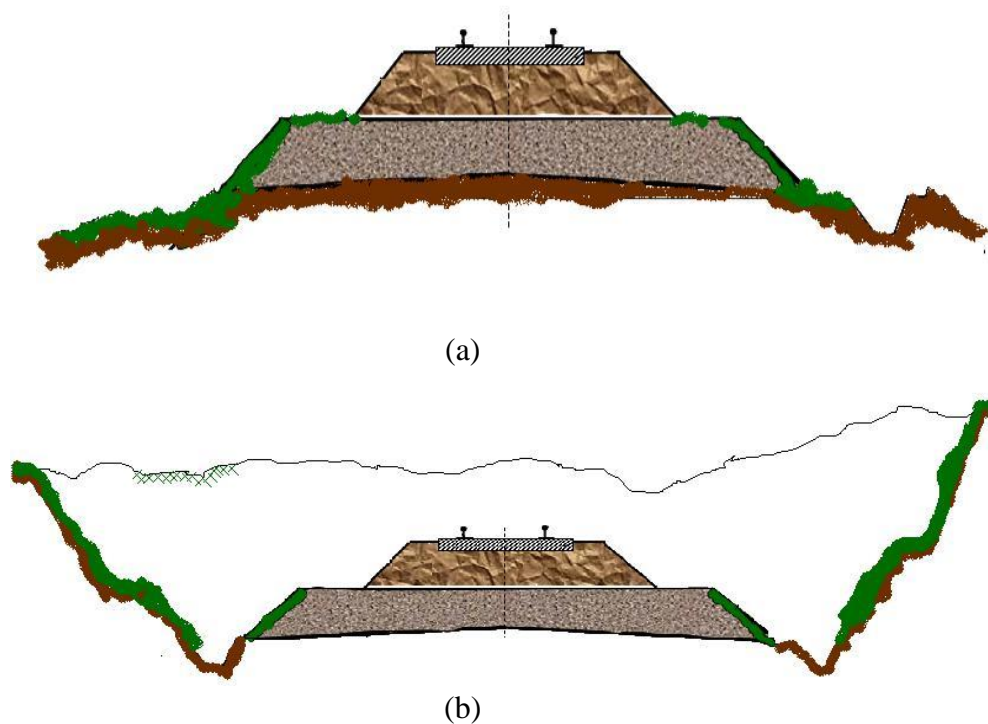
Gambar 3.1. Konstruksi Jalan Rel

Sumber : Rosyidi, (2015)

Sesuai dengan tipe konstruksinya, jalan rel dapat dibagi dalam dua bentuk konstruksi, yaitu :

- a. Jalan rel dalam konstruksi timbunan,
- b. Jalan rel dalam konstruksi galian.

Jalan rel dalam konstruksi timbunan biasanya terdapat pada daerah (medan) yang cenderung datar, sedangkan jalan rel pada kondisi galian umumnya terdapat pada medan pegunungan.



Gambar 3.2 Contoh Potongan Jalan Rel Timbunan (a) dan Galian (b)

Sumber: Rosyidi, (2015)

Secara umum komponen-komponen penyusun jalan rel dijelaskan sebagai berikut :

1. Rel

Rel pada jalan rel mempunyai fungsi sebagai pijakan menggelindingnya roda kereta api dan untuk meneruskan beban dari roda kereta api ke bantalan. Rel ditumpu oleh bantalan-bantalan, sehingga rel merupakan batang yang ditumpu oleh penumpu-

penumpu. Pada sistem tumpuan yang sedemikian, tekanan tegak lurus dari roda menyebabkan momen lentur pada rel diantara bantalan-bantalan. Selain itu, gaya horizontal yang disebabkan oleh gaya angin, goyangan kereta api, dan gaya sentrifugal (pada rel sebelah luar) menyebabkan terjadinya momen lentur pada arah horizontal.

Macam-macam rel yang digunakan banyak sekali dan yang terpenting dan sering digunakan diantaranya adalah R42, R50, R54 dan R60. Menurut panjangnya rel dibedakan menjadi tiga jenis yaitu:

- a. Rel standar adalah rel yang panjangnya 25 meter.
- b. Rel pendek adalah rel yang panjangnya maksimal 100 meter.
- c. Rel panjang adalah rel yang panjang minimumnya tercantum pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.1. Panjang minimum rel panjang

| Jenis bantalan | Tipe rel | | | |
|----------------|----------|-------|-------|-------|
| | R42 | R50 | R54 | R60 |
| Bantalan kayu | 325 m | 375 m | 400 m | 450 m |
| Bantalan beton | 200 m | 225 m | 250 m | 275 m |

Sumber : PD No.10 tahun 1986

2. Penambat (*Fastening System*)

Penambat rel ialah suatu komponen yang menambatkan rel pada bantalan sedemikian sehingga kedudukan rel menjadi kokoh dan tidak bergeser terhadap bantalannya. Dengan penambat rel ini jarak antara kedua rel, yaitu lebar sepur akan tetap. Sesuai dengan kemampuan elastisitas yang dapat diberikan oleh penambat rel, terdapat dua jenis penambat rel, yaitu :

a. Penambat Kaku

Penambat kaku terdiri atas paku rel, tirpon (*tirefond*) atau mur dan baut, dengan atau tanpa pelat landas, biasanya dipasang pada bantalan besi dan kayu. System perkuatannya terdapat pada *klem plat* yang kaku.

b. Penambat Elastis

Terjadinya getaran oleh kereta api yang bergerak di atas rel dengan frekuensi tinggi pada rel mengakibatkan kerusakan pada bantalan. Untuk mengurangi pengaruh getaran pada rel terhadap bantalan digunakan penambat yang memiliki kemampuan meredam getaran, yaitu penambat elastis. Selain dapat meredam getaran, penambat elastis juga mampu memberikan kuat jepit (*clamping force*) yang tinggi dan mampu memberikan perlawanan rangkak (*creep resistance*). Pada jalur ganda (*double track*) yang sepurnya hanya dilalui satu arah asja dan pada jalan rel yang menanjak, apabila penambat relnya tidak baik dapat terjadi gerakan rangkak, oleh karena itu penambat rel yang dapat memberikan perlawanan rangkak akan sangat bermanfaat.

Dalam penggunaannya penambat elastis dibagi menjadi dua jenis, yaitu :

- 1). Penambat elastis tunggal yang terdiri dari pelat andas, pelat atau batang jepit elastis, tirpon, mur dan baut, dimana kekuatan jepitnya terletak pada batang jepit elastis. Penambat elastis tunggal ini biasanya digunakan pada bantalan besi atau kayu.
- 2). Penambat elastis ganda yang terdiri dari pelat landas, pelat atau batang jepit, alas rel, tirpon, mur, dan baut.

Kekuatan jepit penambat elastis terletak pada batang elastis dan biasanya digunakan pada bantalan beton, tidak menggunakan pelat landas melainkan lar karet (*rubber pad*) yang tebalnya disesuaikan dengan kecepatan kereta api.

3. Plat Sambung, Mur dan Baut

Plat sambung berfungsi untuk menyambung antara 2 (dua) potongan panjang rel. plat sambung berupa plat besi yang memiliki panjang 50 – 60 cm, dan terdapat 4 sampai 6 lubang baut yang berfungsi sebagai tempat baut agar bisa menahan atau mengunci posisi plat dan 2 potongan panjang rel. Hal ini dikarenakan batangan rel biasanya hanya berukuran panjang 20 – 25 m setiap potongan panjang, oleh karenanya untuk mendapatkan panjang yang diinginkan maka harus dilakukan penyambungan antara kedua batangan rel tersebut.

Dalam proses penyambungan dapat menggunakan 2 metode yaitu metode *Continuous Welded Rails* (CWR) atau lebih dikenal dengan Las Termit dan metode

Conventional Jointed Rails (CJR) atau lebih dikenal dengan Sambungan Tradisional namun di Indonesia metode CJR lebih lebih sering digunakan.

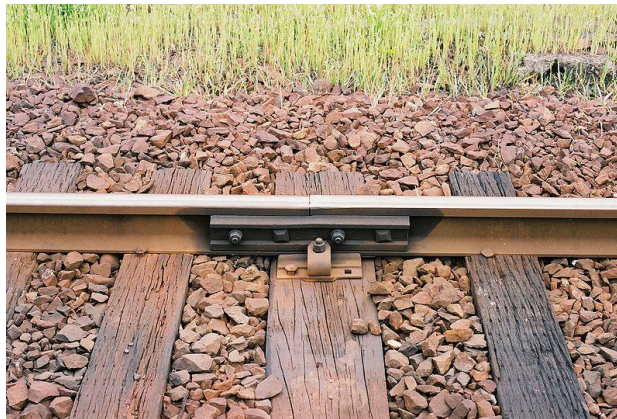


Gambar 3.3 *Continuous Welded Rails*

Sumber : Wibowo Djatmiko, Probolinggo. Rel

photo of the day. Photograph by Wibowo Djatmiko, 4 Agustus 2013.

<https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Leces_sta_130804-2388_prb.JPG>



Gambar 3.4 *Conventional Jointed Rails*

Sumber : Noneotuh, North Kinki tango. Rel

photo of the day. Photograph by Noneotuh, 4 Mei 2008.

<https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Fish-plate_with_adjustment_for_wear.jpg>

4. Bantalan (*Sleeper*)

Bantalan merupakan salah satu komponen dari sistem struktur jalan rel yang mempunyai fungsi utama untuk mengikat rel sedemikian sehingga kedudukan rel menjadi kokoh dan kuat. Bantalan juga bagian dari sistem pembebanan struktur jalan rel yang berfungsi untuk menahan beban dari kereta api melalui rel dan selanjutnya

dapat mendistribusikan secara merata dengan tekanan yang lebih kecil kepada struktur fondasi di bawahnya. Bantalan terdiri dari bantalan beton, kayu, dan bantalan besi. Pemilihan jenis bantalan didasarkan pada kelas jalan rel dan kondisi lapangan serta ketersediaan. Persyaratan bantalan beton sebagai berikut :

- a. Untuk lebar jalan rel 1067 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 500 kg/cm^2 , dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar 16876 kg/cm^2 (1.655 MPa). Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sebesar +1500 kg m pada bagian dudukan rel dan -930 kg m pada bagian tengah bantalan.
- b. Untuk lebar jalan rel 1435 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 600 kg/cm^2 , dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar 16876 kg/cm^2 (1.655 MPa). Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sesuai dengan desain beban gandar dan kecepatan.

Tabel 3.2 Dimensi Bantalan Beton

| Lebar Jalan Rel | Ukuran | | |
|-----------------|--|----------------|-----------------|
| | Panjang | Lebar Maksimum | Tinggi Maksimum |
| 1067 mm | 2.000 mm | 260 mm | 220 mm |
| 1435 mm | <ul style="list-style-type: none"> • 2.440 mm untuk beban gandar sampai dengan 22,5 ton • 2.740 mm untuk beban gandar di atas 22,5 ton | 330 mm | 220 mm |

Sumber : PM No.60 tahun 2012

5. Lapisan Fondasi Atas atau Lapisan Balas (*Ballast*)

Lapisan balas pada dasarnya adalah terusan dari lapisan tanah dasar, dan terletak di daerah yang mengalami konsentrasi tegangan yang terbesar akibat lalu lintas kereta pada jalan rel, oleh karena itu material pembentukanya harus sangat terpilih.

Fungsi utama balas adalah untuk:

- a. Meneruskan dan menyebarkan beban bantalan ke tanah dasar
- b. Mengokohkan kedudukan bantalan
- c. Meluruskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air di sekitar bantalan rel.

Balas harus terdiri dari batu pecah (25 - 60) mm dan memiliki kapasitas ketahanan yang baik, ketahanan gesek yang tinggi dan mudah dipadatkan, berikut spesifikasi balas :

- a. Material balas harus bersudut banyak dan tajam
- b. Porositas maksimum 3%
- c. Kuat tekan rata – rata maksimum 1000 kg/cm^2
- d. *Specify gravity* minimum 2,6;
- e. Kandungan tanah, lumpur dan organik maksimum 0,5%;
- f. Kandungan minyak maksimum 0,2%;
- g. Keausan balas sesuai dengan *test Los Angeles* tidak boleh lebih dari 25%.

6. Lapisan Fondasi Bawah atau Lapisan Sub-balas (*Subballast*)

Lapisan sub-balas berfungsi sebagai lapisan penyaring (*filter*) antara tanah dasar dan lapisan balas dan harus dapat mengalirkan air dengan baik. Lapisan Sub-balas terdiri dari kerikil halus, kerikil sedang atau pasir kasar yang memenuhi syarat pada Tabel 3.3

Tabel 3.3 Standart Saringan berdasarkan ASTM

| Standart Saringan ASTM | Persentase Lolos (%) |
|------------------------|----------------------|
| 2 ½ " | 100 |
| ¾ " | 55 – 100 |
| No.4 | 25 – 95 |
| No.40 | 5 – 35 |
| No.200 | 0 – 10 |

Sumber : PM. No.60 Tahun 2012

Sub-balas harus memenuhi persyaratan berikut:

- 1). Material sub-balas dapat berupa campuran kerikil (*gravel*) atau kumpulan agregat pecah dan pasir;
- 2). Material sub-balas tidak boleh memiliki kandungan material organik lebih dari 5%;
- 3). Untuk material sub-balas yang merupakan kumpulan agregat pecah dan pasir, maka harus mengandung sekurang-kurangnya 30% agregat pecah;
- 4). Lapisan sub-balas harus dipadatkan sampai mencapai 100% Y_d menurut percobaan ASTM D 698.

7. Lapisan Tanah Dasar

Lapisan tanah dasar merupakan lapisan dasar pada struktur jalan rel yang harus dibangun terlebih dahulu. Perilaku tanah dasar adalah komponen substruktur yang sangat penting yang mana memiliki peranan yang signifikan berkaitan pada sifat teknis dan perawatan jalan rel. Tanah dasar jalan raya mempunyai fungsi sebagai berikut :

- a. Mendukung beban yang diteruskan oleh balas kepada tanah dasar
- b. Meneruskan beban ke lapisan di bawahnya, yaitu badan jalan rel
- c. Memberikan landasan yang rata pada kedudukan/ketinggian/elevasi di tempat balas akan diletakan.

8. Wesel

Wesel merupakan konstruksi jalan rel yang paling rumit dengan beberapa persyaratan dan ketentuan pokok yang harus dipatuhi. Untuk pembuatan komponen-komponen wesel yang penting khususnya mengenai komposisi kimia dari bahannya.

- a. Wesel terdiri atas komponen - komponen sebagai berikut :
 - 1) Lidah
 - 2) Jarum beserta sayap – sayapnya
 - 3) Rel lantak
 - 4) Rel paksa
 - 5) Sistem penggerak

- b. Wesel harus memenuhi persyaratan berikut:
- 1) Kandungan mangan (Mn) pada jarum mono blok harus berada dalam rentang (11-14) %.
 - 2) Kekerasan pada lidah dan bagian lainnya sekurang-kurangnya sama dengan kekerasan rel.
 - 3) Celah antara lidah wesel dan rel lantak pada posisi terbuka tidak boleh kurang dari 125 mm.
 - 4) Celah (gap) antara rel lantak dan rel paksa pada ujung jarum 34mm.
 - 5) Jarak antara jarum dan rel paksa (*check rail*) untuk lebar jalan rel 1067 mm:
 - 6) Untuk Wesel rel R 54 paling kecil 1031 mm dan paling besar 1043 mm.
 - 7) Untuk Wesel jenis rel yang lain, disesuaikan dengan kondisi wesel.
 - 8) Pelebaran jalan rel di bagian lengkung dalam wesel harus memenuhi peraturan radius lengkung.
 - 9) Desain wesel harus disesuaikan dengan sistem penguncian wesel.
 - 10) Harus disesuaikan dengan sistem penguncian wesel.

B. PERENCANAAN GEOMETRI JALAN REL

Perencanaan geometri jalan rel akan dilakukan sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Peraturan Menteri Nomor 60 Tahun 2012, dalam hal ini kecepatan maksimum 120 km/jam, sehingga di beberapa lengkungan perlu diadakan penyesuaian terutama jari-jari (radius) sesuai dengan kecepatan rencana untuk mendapatkan keamanan dan kenyamanan.

1. Ketentuan Umum Perencanaan Geometrik Jalan Rel

1.1 Standar Jalan Rel

Segala ketentuan yang berkaitan dengan jenis komponen jalan rel di dalam perencanaan geometrik jalan rel tertuang dalam Tabel Klasifikasi Jalan Rel PM.60 Tahun 2012. Ketentuan tersebut diantaranya: kelas jalan, daya lintas/angkut, kecepatan maksimum, tipe rel, jenis bantalan dan jarak, jenis penambat rel dan struktur balasnya.

Tabel 3.4 Klasifikasi jalan rel 1067 mm

| Kelas Jalan | Daya Angkut Lintas (ton/tahun) | V maks (km/jam) | P maks gandar (ton) | Tipe Rel | Jenis Bantalan | Jenis Penambat | Tebal Balas Atas (cm) | Lebar Bahu Balas (cm) |
|-------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | | Jarak antar sumbu bantalan (cm) | | | |
| I | $> 20.10^6$ | 120 | 18 | R.60/R.54 | Beton 60 | Elastis Ganda | 30 | 60 |
| II | $10.10^6 - 20.10^6$ | 110 | 18 | R.54/R.50 | Beton/Kayu 60 | Elastis Ganda | 30 | 50 |
| III | $5.10^6 - 10.10^6$ | 100 | 18 | R.54/R.50/R.42 | Beton/Kayu/Baja 60 | Elastis Ganda | 30 | 40 |
| IV | $2,5.10^6 - 5.10^6$ | 90 | 18 | R.54/R.50/R.42 | Beton/Kayu/Baja 60 | Elastis Ganda/ Tunggal | 25 | 40 |
| V | $< 2.5.10^6$ | 80 | 18 | R.42 | Kayu/Baja 60 | Elastis Tunggal | 25 | 35 |

Sumber: Peraturan Menteri Nomor.60 Tahun.2012

1.2 Kecepatan

Dalam ketentuan PM.60 Tahun 2012, terdapat beberapa tipe kecepatan yang digunakan dalam perencanaan, yaitu :

a. Kecepatan Rencana

Kecepatan rencana adalah kecepatan yang digunakan untuk merencanakan konstruksi jalan rel.

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.

2. Alinemen Horisontal

Pada peralihan jalan dari satu arah ke arah yang berbeda dalam alinyemen horizontal harus ada belokan (lengkung) dengan jari-jar (radius) tertentu. Ketika melewati lengkung, KA seakan-akan terlempar ke luar menjauhi titik pusat lengkung akibat gaya sentrifugal menurut rumus berikut:

$$K = m \cdot \varepsilon = m \cdot \frac{v^2}{R} = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \quad (3.1)$$

Dimana:

m = Massa Kendaraan (Kereta Api)

ε = Percepatan Radial

G = Berat Kendaraan (Kereta Api), (ton)

g = Percepatan Gravitasi (9.8 m/det²)

V = Kecepatan Kendaraan (m/det)

R = Radius Lengkung (m)

Besarnya gaya sentrifugal tergantung pada:

- a. Berat kendaraan;
- b. Kecepatan kendaraan;
- c. Berbanding terbalik dengan besarnya radius.

Beberapa hal yang dapat ditimbulkan oleh adanya gaya sentrifugal yaitu:

- a. Rel luar lebih cepat aus akibat gesekan flens roda sisi luar;
- b. Sangat riskan terhadap bahaya keluar rel (derailment/anjlok);
- c. Sangat riskan terhadap bahaya guling akibat adanya momen puntir;
- d. Berjalannya kendaraan tidak nyaman (tenang) akibat perubahan arah laju kendaraan.

Tindakan yang perlu diambil untuk mengurangi bahaya yang disebabkan oleh gaya sentrifugal tersebut adalah dengan mengadakan peninggian rel luar, membuat lengkung peralihan dan melakukan pelebaran sepur.

a. Lengkung Peralihan

Agar tidak terjadi kejutan atau sentakan ke samping pada saat KA memasuki lengkung, maka diperlukan lengkung peralihan secara teratur mulai dari lurus dengan nilai radius = ∞ sampai dengan nilai radius tertentu = r.m.

Panjang lengkung peralihan diuraikan sebagai berikut:

$$\frac{\Delta K}{\Delta t} = \frac{\Delta m \cdot \frac{Vr^2}{R}}{\Delta t} = m \cdot Vr^2 \cdot \frac{\Delta \frac{1}{R}}{\Delta t} = m \cdot Vr^2 \cdot \frac{Vr}{L.R} = \frac{m \cdot Vr^3}{L.R} \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta K}{\Delta t} = \frac{\Delta m \cdot a}{\Delta t} = m \cdot \frac{\Delta a}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Berdasarkan pengalaman perkeretaapian di negara Eropa, besarnya $\frac{\Delta a}{\Delta t} = 0,03659 = 0,36 \text{ m/det}^3$.

Diketahui persamaan (3.2) = (3.3) atau :

$$\frac{m \cdot Vr^3}{L.R} = m \cdot \frac{\Delta a}{\Delta t}$$

Maka:

$$\begin{aligned} L &= \frac{Vr^3}{\frac{\Delta a}{\Delta t} \cdot R} = \frac{m \cdot Vr^3}{0,36 \cdot (3,6)^3 R} = 0,06 \frac{Vr^3}{R} \\ &= (0,01) \cdot 6 \cdot \frac{Vr^3}{R} \\ &= (0,01) \cdot Vr \cdot \left(6 \cdot \frac{Vr^2}{R}\right) \\ &= 0,01 \cdot Vr \cdot h_n \end{aligned} \quad (3.4)$$

Jadi rumus panjang lengkung peralihan tersebut sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam peraturan PM No.60 Tahun 2012.

$$L = 0,01 \cdot Vr \cdot h \text{ (mm)} \quad (3.5)$$

Keterangan:

L = Panjang lengkung peralihan (mm)

Vr = Kecepatan rencana KA (km/jam)

h = Peninggian yang dipakai (mm)

b. Gaya Sentrifugal

1) Gaya sentrifugal di imbangi sepenuhnya oleh gaya berat

Gaya berat = Gaya sentrifugal

$$G \sin \alpha = \frac{m V^2}{R} \cos \alpha \quad (3.6)$$

$$G \sin \alpha = \frac{G V^2}{gR} \cos \alpha \quad (3.7)$$

$$\tan \alpha = \frac{V^2}{R} \quad (3.8)$$

$$\text{jika :} \tan \alpha = \frac{h}{W} \quad (3.9)$$

$$\frac{m V^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha \quad (3.10)$$

$$h = \frac{W V^2}{gR} \quad (3.11)$$

Dengan memasukkan satuan praktis :

W = jarak antara kedua titik kontak roda dan rel,
untuk lebar sepur 1067 = 1120 m.

R = jari-jari lengkung horizontal (m)

V = kecepatan rencana (km/jam)

h = peninggian rel pada lengkung horizontal (mm)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/dtk²)

Maka :

$$R = \frac{8,8 V^2}{h} \quad (3.12)$$

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

$$R_{\text{min}} = 0,08 V^2 \quad (3.13)$$

2) Gaya Sentrifugal di imbangi oleh gaya berat dan daya dukung jalan rel

Gaya berat + Komponen Rel = Gaya Sentrifugal

$$G \sin \alpha + H \cos \alpha = \frac{m V^2}{R} \cos \alpha \quad (3.14)$$

$$G \sin \alpha = \left[\frac{G V^2}{gR} - H \right] \cos \alpha \quad (3.15)$$

$$G \tan \alpha = \left[\frac{G V^2}{gR} - H \right] \quad (3.16)$$

$$\text{Jika :} \quad \tan \alpha = \frac{H}{W} \quad (3.17)$$

$$\text{Dan, } H = m.a = \frac{G}{g} a \quad (3.18)$$

Maka :

$$a = \frac{v^2}{R} - g \frac{h}{W} \quad (3.19)$$

a = percepatan sentrifugal (m/dtk²)

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

$$R_{\text{min}} = 0,054 V^2 \quad (3.20)$$

c. Peninggian Jalan Rel

Gaya sentrifugal cenderung membuat kereta keluar dari belokan atau lengkung maka diperlukan peninggian rel untuk mengimbangi gaya sentrifugal pada kereta. Salah satu cara untuk mereduksi gaya sentrifugal yang membebani kereta api adalah meninggikan rel luar terhadap rel bagian dalam di lengkung horizontal.

a) Peninggian Rel Minimum

Persamaan dasar :

Gaya Sentrifugal = Gaya Berat + Komponen Rel

$$\frac{mV^2}{R} \cos\alpha = G.\sin\alpha + H.\cos\alpha \quad (3.21)$$

$$G \sin\alpha = \left[\frac{GV^2}{gR} - H \right] \cos\alpha \quad (3.22)$$

$$\text{Jika : } \tan\alpha = \frac{H}{W} \quad (3.23)$$

$$\text{Dan, } H = m.a = \frac{G}{g} a \quad (3.24)$$

Maka :

$$a = \frac{v^2}{R} - g \frac{h}{W} \quad (3.25)$$

a = percepatan sentrifugal (m/dtk²)

$$h = \frac{W.V^2}{g.R} - \frac{W.a}{g} \quad (3.26)$$

jika : $W = 1120 \text{ mm}$, $g = 9,81 \text{ m/dtk}^2$,

dan $a = 0,0478 \text{ g (m/dtk}^2)$,

maka :

$$h_{\min} = \frac{8,8V^2}{R} - 53,5 \text{ (mm)} \quad (3.27)$$

b) Peninggian Rel Normal

Persamaan dasar :

Gaya Sentrifugal = Gaya Berat

$$G \sin \alpha = \frac{m V^2}{R} \cos \alpha \quad (3.28)$$

$$G \sin \alpha = \frac{G V^2}{gR} \cos \alpha \quad (3.29)$$

$$\tan \alpha = \frac{V^2}{R} \quad (3.30)$$

$$\text{jika : } \tan \alpha = \frac{h}{W} \quad (3.31)$$

$$\frac{m V^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha \quad (3.32)$$

$$h = \frac{WV^2}{gR} \quad (3.33)$$

Maka :

$$h_{\text{normal}} = \frac{8,8 V^2}{h} \text{ (dalam mm)} \quad (3.34)$$

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

$$V = 4,3 \sqrt{R} \quad (3.35)$$

Jika :

$$h = k \frac{V^2}{R} \quad (3.36)$$

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

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

$$k = 5,95 \quad (3.37)$$

jadi, peninggian rel normal ditentukan sebagai :

$$h_{\text{normal}} = 5,95 \cdot \frac{V^2}{h} \quad (3.38)$$

(PM.No.60 tahun 2012, halaman 17)

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.

Tabel 3.5 Peninggian Jalan Rel 1067 mm

| Jari-jari (m) | Peninggian (mm) pas (km/hr) | | | | | | |
|------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 120 | 110 | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 |
| 100 | | | | | | | |
| 150 | | | | | | | |
| 200 | | | | | | | 110 |
| 250 | | | | | | | 90 |
| 300 | | | | | | 100 | 75 |
| 350 | | | | | 110 | 85 | 65 |
| 400 | | | | | 100 | 75 | 55 |
| 450 | | | | 110 | 85 | 65 | 50 |
| 500 | | | | 100 | 80 | 60 | 45 |
| 550 | | | 110 | 90 | 70 | 55 | 40 |
| 600 | | | 100 | 85 | 65 | 50 | 40 |
| 650 | | | 95 | 75 | 60 | 50 | 35 |
| 700 | | 105 | 85 | 70 | 55 | 45 | 35 |
| 750 | | 100 | 80 | 65 | 55 | 40 | 30 |
| 800 | 110 | 90 | 75 | 65 | 50 | 40 | 30 |
| 850 | 105 | 85 | 70 | 60 | 45 | 35 | 30 |
| 900 | 100 | 80 | 70 | 55 | 45 | 35 | 25 |
| 950 | 95 | 80 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 |
| 1000 | 90 | 75 | 60 | 50 | 40 | 30 | 25 |
| 1100 | 80 | 70 | 55 | 45 | 35 | 30 | 20 |
| 1200 | 75 | 60 | 55 | 45 | 35 | 25 | 20 |
| 1300 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 25 | 20 |
| 1400 | 65 | 55 | 45 | 35 | 30 | 25 | 20 |
| 1500 | 60 | 50 | 40 | 35 | 30 | 20 | 15 |
| 1600 | 55 | 45 | 40 | 35 | 25 | 20 | 15 |
| 1700 | 55 | 45 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 |
| 1800 | 50 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 |
| 1900 | 50 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 |
| 2000 | 45 | 40 | 30 | 25 | 20 | 15 | 15 |
| 2500 | 35 | 30 | 25 | 20 | 20 | 15 | 10 |
| 3000 | 30 | 25 | 20 | 20 | 15 | 10 | 10 |
| 3500 | 25 | 25 | 20 | 15 | 15 | 10 | 10 |
| 4000 | 25 | 20 | 15 | 15 | 10 | 10 | 10 |

Sumber : PM. No.60 Tahun 2012

d. Pelebaran Sepur

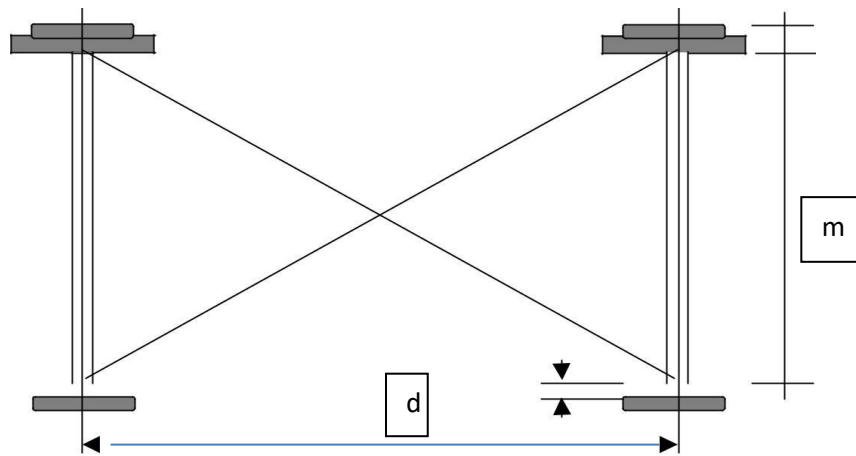
Pada saat gerbong dengan dua gandar kokoh melalui suatu tikungan, maka roda di muka bagian sisi terluar (pada rel luar) dapat akan menekan rel. Oleh karena gandar muka dan belakang gerbong merupakan satu kesatuan yang kaku (*rigid wheel base*), maka gandar belakang berada pada posisi yang sejajar dengan

gandar muka akan memungkinkan tertekannya rel dalam oleh roda belakang. Flens roda luar akan membentuk sudut dalam posisi di tikungan, namun sumbu 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.

Pelebaran sepur dilakukan agar roda kendaraan rel dapat melewati lengkung tanpa hambatan dan mengurangi gaya tekan akibat terjepitnya roda kereta ditikungan. Pelebaran sepur dicapai dengan menggeser rel dalam ke arah dalam.

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*
- Kondisi keausan roda dan rel.



Gambar 3.5 Skematik gandar muka – belakang kokoh

Sumber : DED Pembangunan Jalur KA Ganda Antara Stasiun Muara

Enim – Stasiun Lahat Sumatera Selatan

Keterangan :

| | | | | | |
|-----------|-----|------------------|-----|-----|----------|
| Indonesia | : d | = 3,00 m, 4,00 m | JNR | : d | = 4,60 m |
| | m | = 1000 mm | | m | = 988 mm |
| | f | = 30 m | | f | = 22 mm |
| | t | = 130 mm | | | |

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.

$$w = \frac{4500}{R} - 8 \quad (\text{mm}) \quad (3.39)$$

untuk $d = 3.00$ m dan $e = 4$ mm ($S = 1067$ mm)

$$w = \frac{8000}{R} - 8 \quad (\text{mm}) \quad (3.40)$$

untuk $d = 4.00$ m dan $e = 4$ mm ($S = 1067$ mm)

Secara praktisnya pelebaran sepur juga dapat merujuk pada Tabel 3.6 yang merupakan penggolongan pelebaran sepur berdasarkan jari – jari lengkung untuk lebar sepur 1067 mm.

Tabel 3. 6 Pelebaran Sepur 1067 mm

| Jari - Jari Tikungan (mm) | Pelebaran (mm) |
|---------------------------|----------------|
| $R > 600$ | 0 |
| $550 < R \leq 600$ | 5 |
| $400 > R \leq 550$ | 10 |
| $350 < R \leq 400$ | 15 |
| $100 < R \leq 350$ | 20 |

Sumber : PM.No.60 tahun 2012

e. Lengkung Peralihan

Lengkung peralihan adalah suatu lengkung dengan jari-jari berubah beraturan. Lengkung peralihan dipakai sebagai peralihan antara bagian yang lurus dengan daerah lengkungan dan atau sebaliknya, dan sebagai peralihan antara dua jari-jari lingkaran yang berbeda. Lengkung peralihan diperlukan agar gaya sentrifugal yang terjadi dapat beralih secara bertahap sedemikian rupa sehingga penumpang di dalam kereta api tetap terjamin kenyamanannya.

$$\text{Perubahan gaya sentrifugal} = \frac{\text{Gaya}}{\text{Waktu}} = \frac{m \cdot a}{t} \quad (3.41)$$

$$\frac{m \cdot a}{t} = \frac{m \frac{V^2}{R}}{\frac{L}{V}} \quad (3.42)$$

$$L = \frac{V^2 \cdot t}{a \cdot R} \quad (3.43)$$

Jika : $a_{maksimum} = 0,0478 \text{ g}$ (3.44)

(g = percepaan gravitasi = 9,81 m/detik²)

$$h = 5,98 \frac{V^2}{R} \quad (3.45)$$

dan dikonversi paa satuan praktis maka :

$$Lh = 0,01 \times h \times V \quad (3.46)$$

Dimana,

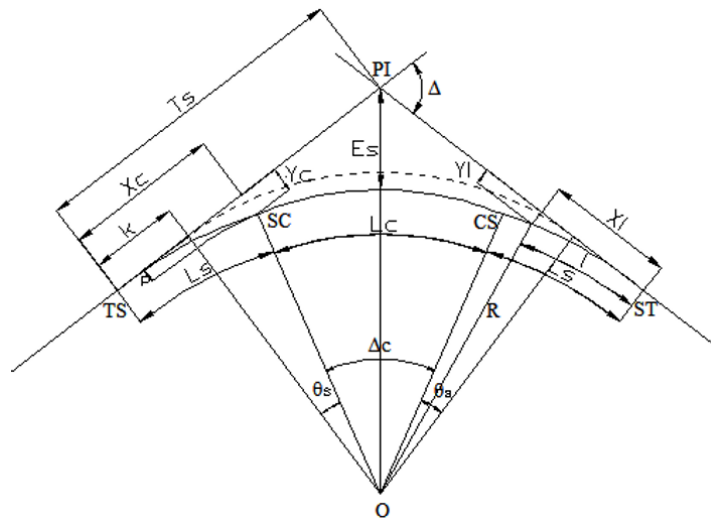
Lh = panjang minimum lengkung peralihan (m)

h = peninggian pada rel luar di lengkung (mm)

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

R = jari – jari lengkung

Lengkung peralihan dengan spiral



Gambar 3.6 Lengkung horisontal dengan lengkung peralihan dengan spiral

Perhitungan lengkung horizontal dengan lengkung peralihan dengan spiral sebagai berikut :

1) Menghitung Panjang Lengkung

$$\theta_s = \frac{90 + Ls}{\pi \times R} \quad (3.47)$$

$$\theta_c = \Delta_s \cdot 2\theta_s \quad (3.48)$$

$$Ls = 0.01 \times h \times v \quad (3.49)$$

$$Lc = \frac{\theta_c}{360^\circ} \times 2\pi R \quad (3.50)$$

$$L = 2 Ls + Lc \quad (3.51)$$

2) Menghitung Xc, Yc, k, dan p

$$Xc = Ls - \frac{Ls^3}{40 \times R^2} \quad (3.52)$$

$$Yc = \frac{Ls^2}{6 \times R} \quad (3.53)$$

$$P = Yc - R(1 - \cos \theta_s) \quad (3.54)$$

$$K = Xc - R \sin \theta_s \quad (3.55)$$

3) Menghitung Tt dan Et

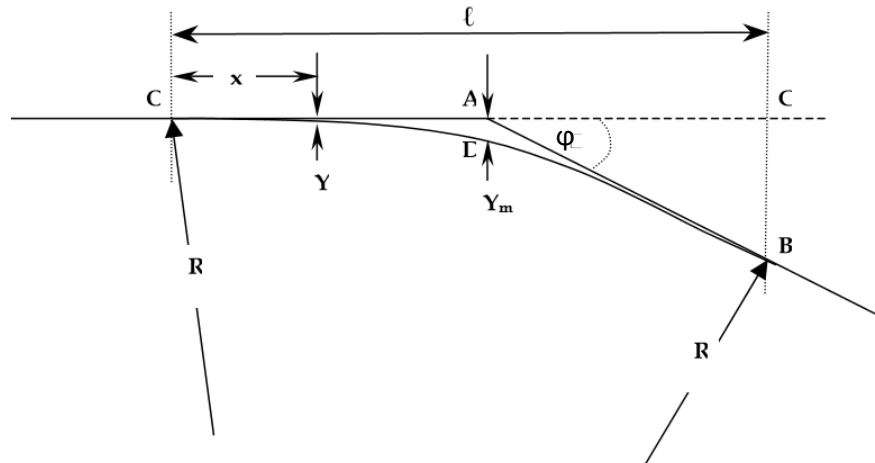
$$Tt = (R + P) \operatorname{tg} \frac{\Delta_s}{2} + K \quad (3.56)$$

$$Et = (R + P) \operatorname{sec} \frac{\Delta_s}{2} - R \quad (3.57)$$

3. Alinemen Vertikal

Alinemen vertikal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang vertikal yang melalui sumbu jalan rel tersebut. Dipergunakan bila terdapat perbedaan kelandaian sehingga dengan adanya lengkung vertikal peralihan dapat terjadi secara berangsur-angsur dari suatu landai ke kelandaian berikutnya. Alinemen vertikal terdiri dari garis lurus dengan atau tanpa kelandaian lengkung vertikal yang berupa busur lingkaran.

$$\text{Rumus dasar lengkung : } \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{R} \quad (3.58)$$



Gambar 3.7 Skematik Lengkung Vertikal

dimana :

R = jari – jari lengkung peralihan

l = panjang lengkung peralihan

A = titik tekuk lengkung vertikal

ϕ = perbedaan landai

Letak titik A (titik tekuk lengkung vertikal, lihat Gambar 3.7), diperoleh :

Diberikan $x = l$

$$\text{a. } \frac{dy}{dx} = \frac{l}{R}, \text{ dan } l = \phi R \quad (3.59)$$

$$X_m = OA = \frac{1}{2} l \quad (3.60)$$

$$X_m = \frac{R}{2} \phi \quad (3.61)$$

$$\text{b. } Y = \frac{x^2}{2R}, \text{ dan } l = \phi R \quad (3.62)$$

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

$$Y_m = \frac{\frac{1}{4} l^2}{2R} = \frac{\phi^2 R^2}{8R} \quad (3.63)$$

$$Y_m = \frac{R}{8} \phi^2 \quad (3.64)$$

Menggunakan persamaan 3.61 dan 3.64, selanjutnya dengan R yang ditentukan untuk berbagai harga kecepatan dan kelandaian, maka dapat dihitung dimensi lengkung peralihan X_m dan Y_m .