

BAB III

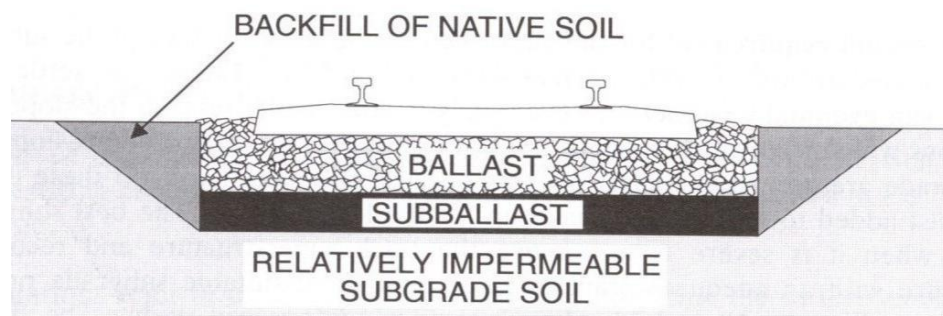
LANDASAN TEORI

A. STRUKTUR JALAN REL

Struktur jalan rel merupakan suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana atau infrastruktur perjalanan kereta api. Gambar 3.1 menjelaskan gambar konstruksi jalan rel yang tampak secara visual dan secara skematik digambarkan dalam potongan melintang.



(a)



(b)

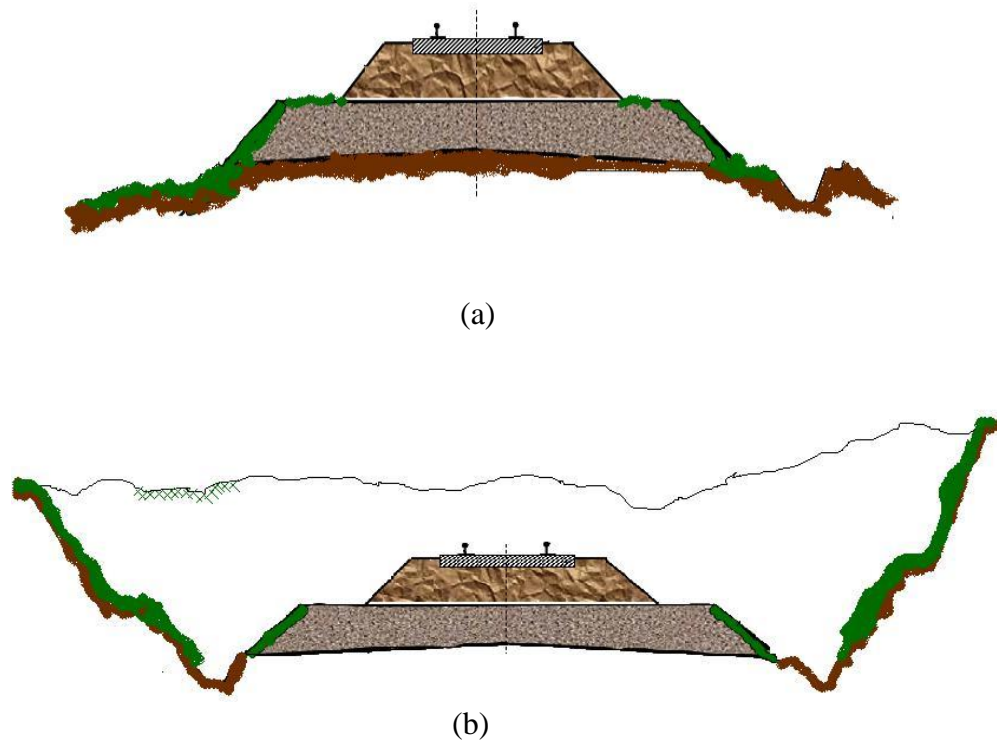
Gambar 3.1 Konstruksi jalan rel (a) dan skematik potongan melintangnya (b)

Sumber: Rosyidi, (2015)

Secara konstruksi, jalan rel dibagi dalam dua bentuk konstruksi, yaitu :

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

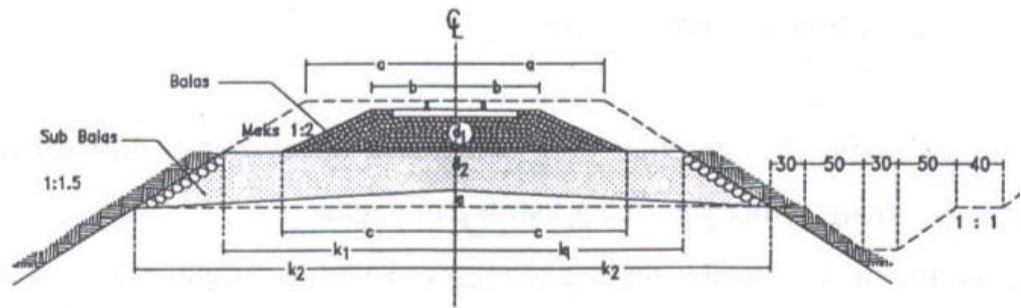
Jalan rel dalam konstruksi timbunan biasanya terdapat pada daerah persawahan atau daerah rawa, sedangkan jalan rel pada konstruksi galian umumnya terdapat pada medan pergunungan. Gambar 3.2 menunjukkan contoh potongan konstruksi jalan rel pada daerah timbunan dan galian.



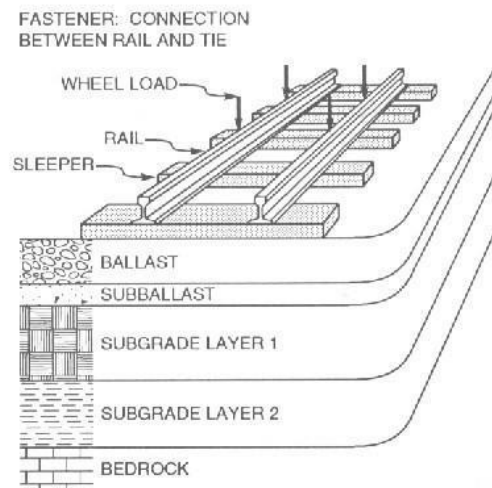
Gambar 3.2 potongan jalan rel pada timbunan (a) dan galian (b)

Sumber: Rosyidi, (2015)

Konstruksi jalan rel merupakan suatu sistem struktur yang menghimpun komponen-komponennya seperti rel, bantalan, penambat dan lapisan fondasi serta tanah dasar secara terpadu dan disusun dalam sistem konstruksi dan analisis tertentu untuk dapat dilalui kereta api secara aman dan nyaman. Gambar 3.3 menjelaskan bagian-bagian struktur atas dan bawah konstruksi jalan rel dan secara skematik menjelaskan keterpaduan komponen-komponennya dalam suatu sistem struktur.



(a)



(b)

Gambar 3.3 Struktur Jalan Rel Beserta Sistem Komponen Penyusunnya.

Sumber: Rosyidi, (2015)

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

1. Rel (*Rail*)

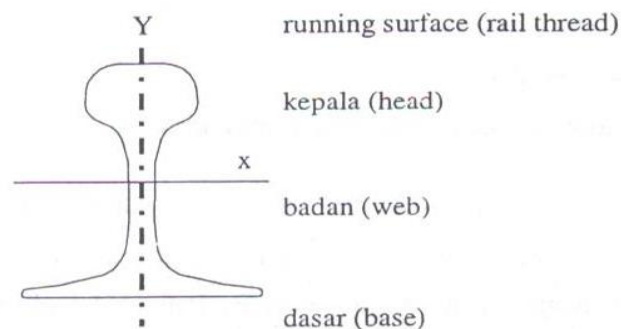
Rel merupakan batangan baja longitudinal yang berhubungan secara langsung, dan memberikan tuntunan dan tumpuan terhadap pergerakan

roda kereta api secara berterusan. Oleh karena itu, rel juga harus memiliki nilai kekakuan tertentu untuk menerima dan mendistribusikan beban roda kereta api dengan baik.

1.1. Bentuk dan dimensi rel di Indonesia

Suatu komponen rel terdiri dari 4 bagian utama (Gambar 3.4), yaitu :

- Permukaan Rel untuk pergerakan kereta api atau disebut sebagai running surface (rail thread),
- Kepala Rel (head),
- Badan Rel (web),
- Dasar Rel (base).



Gambar 3.4 Bagian pada komponen rel

Sumber: Rosyidi, (2015)

Ukuran/dimensi bagian-bagian profil rel di atas dijelaskan dalam Table 3.1 untuk dimensi rel yang digunakan di Indonesia sesuai PM 60 tahun 2012. Penamaan tipe rel untuk tujuan klasifikasi rel di Indonesia disesuaikan dengan berat (dalam kilogram, kg) untuk setiap 1 meter panjangnya, misalnya : tipe R 54 berarti rel memiliki berat sekitar 54 kg untuk setiap 1 meter panjangnya.

2. Penambat (*Fastening System*)

Untuk menghubungkan diantara bantalan dengan rel digunakan suatu sistem penambat yang jenis dan bentuknya bervariasi sesuai dengan jenis bantalan yang digunakan serta klasifikasi jalan rel yang harus dilayani.

Berdasarkan peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 tahun 2012 bahwasannya penambat yang harus digunakan ialah jenis elastis yang terdiri dari sistem elastis tunggal dan elastis ganda.

Alat penambat harus pula memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a. alat penambat harus mampu menjaga kedudukan kedua rel agar tetap dan kokoh berada diatas bantalan.
- b. clip harus mempunyai gaya jepit 900 – 1100 kgf.
- c. pelat landas harus mampu memikul beban yang ada dengan ukuran sesuai jenis rel yang digunakan dan terbuat dari baja dengan komposisi kimia:

Carbon	: 0.15 – 0.30%
Silicon	: 0.35% max
Manganese	: 0.40 – 0.80%
Phospor	: 0.050% max
Sulphur	: 0.05%

- d. Alas rel dapat terbuat dari bahan *High Density Poly Ethylrne* (HDPE) dan karet atau *Poly Urethane* (PU).
- e. Seluruh komponen alat penambat harus memiliki identitas produk tercetak permanen sebagai berikut:
 1. Merek
 2. Identitas pabrik pembuat
 3. Nomor komponen
 4. Dua angka terakhir tahun Produksi

3. Pelat 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 pelan 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 dipilih atau dipakai.



Gambar 3.5 *Continuous Welded Rails*

Sumber: Hery Lazuardi, Jakarta. *Indonesia's Preferred Container Terminal: photo of the day. Photograph by Hery Lazuardi. Sabtu, 26 Maret 2016.* <
[http://translogtoday.com/2016/03/26/teknologi-sambungan-rel-kereta-api->](http://translogtoday.com/2016/03/26/teknologi-sambungan-rel-kereta-api-)



Gambar 3.6 *Conventional Jointed Rails*

Sumber: Hery Lazuardi, Jakarta. Indonesia's Preferred Container Terminal: photo of the day. Photograph by Hery Lazuardi. Sabtu, 26 Maret 2016. < <http://translogtoday.com/2016/03/26/teknologi-sambungan-rel-kereta-api->>

4. Bantalan (Sleeper)

Bantalan memiliki beberapa fungsi yang penting, diantaranya menerima beban dari rel dan mendistribusikannya kepada lapisan balas dengan tingkat tekanan yang kecil, mempertahankan sistem penambat untuk mengikat rel pada kedudukannya, dan menahan pergerakan rel arah longitudinal, lateral dan vertikal. Bantalan terbagi menurut bahan konstruksinya, seperti bantalan besi, kayu maupun beton. Bantalan harus memenuhi persyaratan berikut:

a. Bantalan Beton

1. Untuk lebar jalan rel 1067 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 500 kg/cm², dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar 16.876 kg/cm² (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.

2. 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 16.876 kg/cm^2 (1.655 MPa). Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sesuai dengan desain beban gandar dan kecepatan.

Tabel. 3.1 Untuk lebar jalan re 1067 mm:

Panjang	: 2.000 mm
Lebar maksimum	: 260 mm
Tinggi maksimum	: 220 mm

Sumber:PM. No.60 Tahun 2012

Tabel 3.2 Untuk lebar jalan rel 1435 mm:

- Panjang	- 2.440 mm untuk beban gandar sampai dengan 22,5 ton; - 2.740 mm untuk beban gandar di atas 22,5 ton
- Lebar maksimum	330 mm
- Tinggi di bawah dudukan rel	220

Sumber:PM. No.60 Tahun 2012

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

Konstruksi lapisan balas terdiri dari material granular/butiran dan diletakkan sebagai lapisan permukaan dari konstruksi substruktur. Material balas yang baik berasal dari batuan yang bersudut, pecah, keras, bergradasi yang sama, bebas dari debu dan kotoran dan tidak pipih. Meskipun demikian, pada kenyataannya, klasifikasi butiran di

atas sukar untuk diperoleh/dipertahankan, oleh yang demikian, permasalahan pemilihan material balas yang ekonomis dan memungkinkan secara teknis masih menjadi perhatian dalam kajian dan penelitian.

Berdasarkan acuan perencanaan yaitu PM.60 th.2012 lapisan balas ialah:

- a. 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 pembentuknya harus sangat terpilih.
- b. Fungsi utama balas adalah untuk meneruskan dan menyebarkan beban bantalan ke tanah dasar, mengokohkan kedudukan bantalan dan meluluskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air di sekitar bantalan dan rel.
- c. Kemiringan lereng lapisan balas atas tidak boleh lebih curam dari 1:2
- d. Bahan balas atas dihampar hingga mencapai sama dengan elevasi bantalan.
- e. Balas harus terdiri dari batu pecah (25 - 60) mm dan memiliki kapasitas ketahanan yang baik, ketahanan gesek yang tinggi dan mudah dipadatkan;
 1. Material balas harus bersudut banyak dan tajam;
 2. Porositas maksimum 3%;
 3. Kuat tekan rata-rata maksimum 1000 kg/cm²;
 4. *Specific gravity* minimum 2,6;
 5. Kandungan tanah, lumpur dan organik maksimum 0,5%;
 6. Kandungan minyak maksimum 0,2%;
 7. Keausan balas sesuai dengan *test Los Angeles* tidak boleh lebih dari 25%.

6. Lapisan Fondasi Bawah atau Lapisan Subbalas (*Subbalast*)

Lapisan diantara lapisan balas dan lapisan tanah dasar adalah lapisan subbalas.

- a. Lapisan sub-balas berfungsi sebagai lapisan penyaring (*filter*) antara tanah dasar dan lapisan balas dan harus dapat mengalirkan air dengan baik. Tebal minimum lapisan balas bawah adalah 15 cm.
- b. Lapisan sub-balas terdiri dari kerikil halus, kerikil sedang atau pasir kasar yang memenuhi syarat sebagai berikut:

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

- c. Subbalas 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 (*Subrade*)

Lapisan tanah dasar merupakan lapisan dasar pada struktur jalan rel yang harus dibangun terlebih dahulu. Fungsi utama dari lapisan tanah dasar adalah menyediakan landasan yang stabil untuk lapisan balas dan subbalas. Perilaku tanah dasar adalah komponen substruktur yang sangat penting yang mana memiliki peranan yang signifikan berkaitan pada sifat teknis dan perawatan jalan rel.

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.
4. Celah antara lidah wesel dan rel lantak pada posisi terbuka tidak boleh kurang dari 125 mm.
5. Celah (gap) antara rel lantak dan rel paksa pada ujung jarum 34mm.
6. Jarak antara jarum dan rel paksa (*check rail*) untuk lebar jalan rel 1067 mm:

- a) Untuk Wesel rel R 54 paling kecil 1031 mm dan paling besar 1043 mm.
 - b) Untuk Wesel jenis rel yang lain, disesuaikan dengan kondisi wesel.
7. Pelebaran jalan rel di bagian lengkung dalam wesel harus memenuhi peraturan radius lengkung.
 8. Desain wesel harus disesuaikan dengan sistem penguncian wesel.
 9. Harus disesuaikan dengan sistem penguncian wesel.

B. PERENCANAAN GEOMETRIK JALAN REL

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 Tipe Rel Di Indonesia

Klasifikasi Jalan KA	Pasing Ton Tahunan (Juta Ton)	Perencanaan Kecepatan KA Maksimum Vmax (km/jam)	Tekanan Gandar P max (ton)	Tip Rel	Tipe dari Bantalan Jarak Bantalan (mm)	Tipe Alat Penambat	Tebal balas dibawah Bantalan (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
1	> 20	120	18	R60 / R54	Beton 600	EG	30	50
2	10 – 20	110	18	R54 / R50	Beton/Kayu 600	EG	30	50
3	5 – 10	100	18	R54/ R50/ R42	Beton/Kayu /Baja 600	EG	30	40
4	2,5 – 5	90	18	R54/ R50/ R42	Beton/Kayu /Baja 600	EG/ET	25	40
4	< 2,5	80	18	R42	Kayu/Baja 600	ET	25	35

Sumber: PM. No.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:

- Berat kendaraan;
- Kecepatan kendaraan;
- Berbanding terbalik dengan besarnya radius.

Beberapa hal yang dapat ditimbulkan oleh adanya gaya sentrifugal yaitu:

- Rel luar lebih cepat aus akibat gesekan flens roda sisi luar;
- Sangat riskan terhadap bahaya keluar rel (*derailment*/anjlokkan);
- Sangat riskan terhadap bahaya guling akibat adanya momen puntir;
- 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:

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

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

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

Keterangan:

L = Panjang lengkung peralihan (mm)

Vr = Kecepatan rencana KA (km/jam)

h = Peninggian yang dipakai (mm)

b. Gaya Sentrifugal

a) 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 :

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

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

Gaya berat + Komponen Rel = Gaya Sentrifugal

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Maka :

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

a = percepatan sentrifugal (m/dtk²)

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

jika : W = 1120 mm, g = 9,81 m/dtk², dan a
= 0,0478 g (m/dtk²),

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 peniggian digunakan kecepatan kereta api terbesar (Vmaksimum) 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)

c) Menghitung Panjang Lengkung

$$\theta_s = \frac{90 + L_s}{\pi \times R}$$

$$\theta_c = \Delta_s \cdot 2\theta_s$$

$$L_s = 0.01 \times h \times v$$

$$L_c = \frac{\theta_c}{360^\circ} \times 2\pi R$$

$$L = 2 L_s + L_c$$

d) Menghitung Xc, Yc, k, dan p

$$X_c = L_s - \frac{L_s^3}{40 \times R^2}$$

$$Y_c = \frac{L_s^2}{6 \times R}$$

$$P = Y_c - R(1 - \cos \theta_s)$$

$$K = X_c - R \sin \theta_s$$

e) Menghitung Tt dan Et

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

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

f) 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 :

- a) Jari-jari lengkung (R).
- b) Ukuran atau jarak gandar muka – belakang yang kokoh/*rigid wheel base*, sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 3.6.
- c) Kondisi keausan roda dan rel.

Keterangan :

Indonesia : d = 3,00 m, 4,00 m

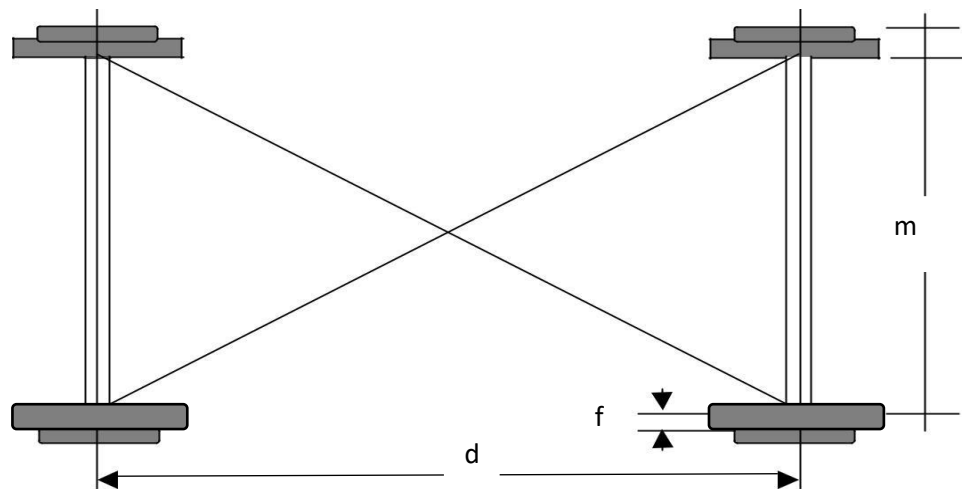
JNR : d = 4,60 m

m = 1000 mm

m = 988 mm

f = 30 mm

f = 22 mm



Gambar 3.7 Skematik Gandar Muka – Belakang Kokoh

Sumber: Rosyidi (2015)

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)

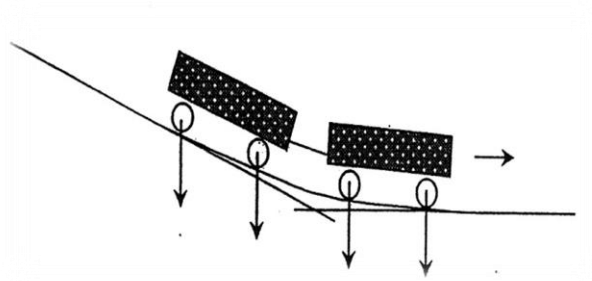
$$w = \frac{8000}{R} - 8 \quad (\text{mm}) \quad (3.40)$$

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

3. Alinemen Vertikal

Di dalam pengukuran tinggi-rendahnya suatu jalan kereta api umumnya terdapat dataran maupun landai. Perubahan dari datar ke landai maupun dari landai ke landai yang berurutan akan terjadi titik patah atau perpotongan sehingga membentuk sudut. Titik perpotongan tersebut pada jalan kereta api akan berpengaruh terhadap beberapa hal berikut:

a. Dalam hal titik patah berupa sudut cekung



Gambar 3.8 Perubahan dari Landai ke Datar pada Sudut cekung

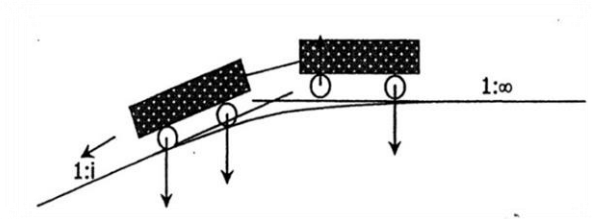
Sumber: Setiawan (2015)

Akan menimbulkan kemungkinan akan terjadinya penambahan berat akibat beban dinamik secara berlebihan, sehingga menyebabkan:

- 1) Pemakaian titik normal dan kerusakan material atau kerusakan *rolling stock* maupun jalan kereta api.
- 2) Peningkatan kerusakan material pada *rolling stock* maupun jalan kereta api.

Apabila kereta/gerbong dalam keadaan kosong, akibat kecepatan tinggi atau terjadi perubahan kecepatan secara mendadak akan menyebabkan roda dapat ke luar rel (*derailment*/anjlok).

b. Dalam hal titik patah berupa sudut cembung



Gambar 3.9 Perubahan dari Landai ke Datar pada Sudut cembung

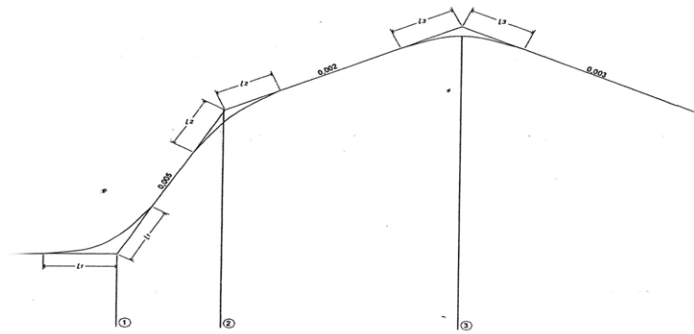
Sumber: Setiawan (2015)

Hal di atas dapat menyebabkan roda kereta/gerbong belakang ke luar rel (*derailment*/anjlok) saat terjadi pengangkatan gandar roda tersebut dalam lengkung, ataupun pada saat yang sama terjadi gerakan keras pada kereta/gerbong. Kejadian tersebut dapat menimbulkan ketidaknyamanan bagi para penumpang di dalam kereta. Maka, untuk itu perlu dibuat lengkung peralihan vertikal diantara dua landai.

Lengkung peralihan vertikal pada jalan rel harus dibuat sedemikian rupa secara halus agar jalannya roda kereta api dapat dihantar secara mulus ketika menjalani perpindahan arah antara dua landai. Biasanya lengkung peralihan vertikal merupakan lintasan garis yang berbentuk suatu grafik parabola, dan telah dikenal secara umum sesuai ketentuan yang berlaku di PT. Kereta Api Indonesia, yaitu menurut rumus:

$$y = \frac{x^2}{2R} \quad (3.41)$$

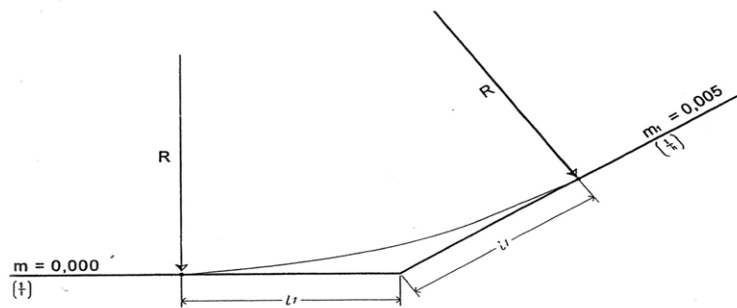
Sebagai gambaran secara umum dari lengkung peralihan vertikal dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 3.10 Lengkung Peralihan Vertikal

Sumber: Setiawan (2015)

1) Peralihan dari datar ($\frac{1}{i} = 0,000$) ke landai ($\frac{1}{i} = m$)



Gambar 3.11 Peralihan dari Datar ke Landai

Sumber: Setiawan (2015)

Keterangan:

l = Panjang tangent dalam (m)

R = Radius lengkung peralihan vertikal atau parabola dalam (m)

$\frac{1}{i}$ = Lereng terbesar dalam ($^{\circ}/_{00}$)

$\frac{1}{i_1}$ = Lereng terkecil dalam ($^{\circ}/_{00}$) = $\text{tg } \beta$

Panjang tangent adalah menurut rumus:

$$l = \frac{R}{2} \cdot \frac{1}{i} \quad (3.42)$$

Contoh perhitungan:

Peralihan datar ke landai $\frac{1}{i} = 0,005$ dan besarnya radius

$R = 10.000$ m, maka panjang tangent adalah:

$$l = \frac{10.000}{2} \cdot 0,005 = 25 \text{ m.} \quad (3.43)$$

2) Peralihan dari landai ($\frac{1}{i} = m$) ke landai ($\frac{1}{i_1} = m$)

l = Panjang tangent dalam (m)

R = Radius lengkung dalam (m)

$\frac{1}{i}$ = Lereng terbesar dalam ($^0/00$) = $\text{tg } \alpha$

$\frac{1}{i_1}$ = Lereng terkecil dalam ($^0/00$) = $\text{tg } \beta$

Panjang tangent adalah menurut rumus:

$$l = R \cdot \text{tg} \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) \quad (3.44)$$

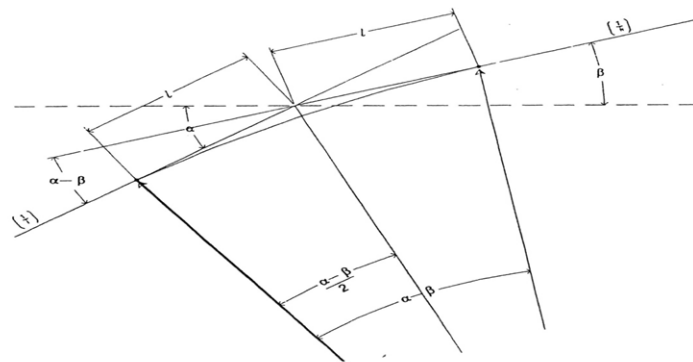
Secara pendekatan:

$$\begin{aligned} l &= R \cdot \text{tg} \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) = \frac{R}{2} \cdot \text{tg} (\alpha - \beta) \\ &= \frac{R}{2} \cdot \frac{\text{tg } \alpha - \text{tg } \beta}{1 + \text{tg } \alpha \cdot \text{tg } \beta} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Disini diketahui bahwa harga $\text{tg } \alpha \cdot \text{tg } \beta$ adalah sangat kecil, maka dapat diabaikan sehingga:

$$l = \frac{R}{2} \cdot \text{tg} (\alpha - \beta) \quad (3.46)$$

$$l = \frac{R}{2} \cdot \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{i_1} \right) \quad (3.47)$$



Gambar 3.12 Peralihan dari Landai ke Landai

Sumber: Setiawan (2015)

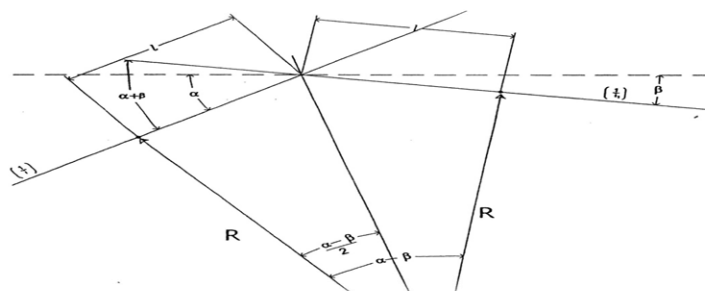
Contoh perhitungan:

Misalkan $\frac{1}{i} = 0,005$ dan $\frac{1}{i_1} = 0,002$ dan besarnya radius $R = 10.000$ m, maka panjang tangent adalah:

$$l = \frac{10.000}{2} \cdot (0,005 - 0,002)$$

$$l = 5000 \times 0,003 = 15 \text{ m.}$$

- 3) Peralihan dari landai ($\frac{1}{i} = m$) ke landai ($\frac{1}{i} = m$) yang berbalik arah



Gambar 3.13 Peralihan dari Landai ke Landai yang Berbalik Arah

Sumber: Setiawan (2015)

l = Panjang tangent dalam (m)

R = Radius lengkung dalam (m)

$\frac{1}{i}$ = Lereng terbesar dalam ($^{\circ}/_{00}$) = $\text{tg } \alpha$

$\frac{1}{i_1}$ = Lereng terkecil dalam ($^{\circ}/_{00}$) = $\text{tg } \beta$

Panjang tangent adalah menurut rumus:

$$l = R \cdot \text{tg} \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \quad (3.48)$$

Secara pendekatan:

$$\begin{aligned} l &= R \cdot \text{tg} \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) = \frac{R}{2} \cdot \text{tg} (\alpha + \beta) \\ &= \frac{R}{2} \cdot \frac{\text{tg } \alpha + \text{tg } \beta}{1 - \text{tg } \alpha \cdot \text{tg } \beta} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Disini diketahui bahwa harga $\text{tg } \alpha \cdot \text{tg } \beta$ adalah sangat kecil, maka dapat diabaikan sehingga:

$$l = \frac{R}{2} \cdot \text{tg} (\alpha + \beta) \quad (3.50)$$

$$l = \frac{R}{2} \cdot \left(\frac{1}{i} + \frac{1}{i_1} \right) \quad (3.51)$$

Contoh perhitungan:

Misalkan $\frac{1}{i} = 0,003$ dan $\frac{1}{i_1} = 0,002$ dan besarnya radius $R = 10.000$ m, maka panjang tangent adalah:

$$l = \frac{10.000}{2} \cdot (0,003 + 0,002)$$

$$l = 5000 \times 0,005 = 25 \text{ m.}$$

Perlu diperhatikan bahwa pada jalan kereta api kelas 1 sedapat mungkin kejadian seperti pada kasus 3 dihindarkan. Apabila kondisi setempat harus ada peralihan landai ke landai sebagaimana kasus 3, maka diantara kedua landai tersebut harus dibuat datar paling sedikit sama dengan rangkaian KA terpanjang.

Berdasarkan peraturan yang berlaku di PM No.60 tahun 2012, ditentukan besarnya radius lengkung vertikal sebagai berikut:

Tabel 3.6 Jari-jari Minimum Lengkung Vertikal

Kecepatan (Km/Jam)	Rencana	Jari-Jari Lengkung Vertikal (m)	Minimum
Lebih Besar Dari 100		8000	
Sampai 100		6000	

Sumber: PM No.60 Tahun 2012