

BAB III LANDASAN TEORI

3.1 TINJAUAN UMUM

Bab ini menjelaskan tentang teori yang mendukung penulisan tugas akhir dalam perencanaan Geometrik jalur ganda jalan rel yang meliputi beberapa teori tentang perencanaan konstruksi jalan rel.

3.2 PERENCANAAN KONTRUKSI JALAN REL

Jalan rel adalah satu kesatuan konstruksi yang terbuat dari baja, beton atau konstruksi lain yang terletak di permukaan, di bawah dan di atas tanah atau bergantung beserta perangkatnya yang mengarahkan jalannya kereta api. (*Peraturan Menteri Perhubungan, 2000*)

Jalur kereta api adalah daerah yang meliputi daerah manfaat jalan kereta api, daerah milik jalan kereta api, dan daerah pengawasan jalan kereta api termasuk bagian bawahnya serta ruang bebas di atasnya, yang diperuntukkan bagi lalu lintas kereta api. (*Peraturan Menteri Perhubungan, 2000*)

Lintas kereta api direncanakan untuk melewatkan berbagai jumlah angkutan barang dan atau penumpang dalam suatu jangka waktu tertentu. Perencanaan konstruksi jalan rel harus direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat dipertanggungjawabkan secara teknis dan ekonomis. Secara teknis diartikan konstruksi jalan rel tersebut harus dapat dilalui oleh kendaraan rel dengan aman dengan tingkat kenyamanan tertentu selama umur konstruksinya. Secara ekonomis diharapkan agar pembangunan dan pemeliharaan konstruksi tersebut dapat diselenggarakan dengan biaya yang sekecil mungkin dimana masih memungkinkan terjaminnya keamanan dan tingkat kenyamanan. Perencanaan konstruksi jalan rel dipengaruhi oleh jumlah beban, kecepatan maksimum, beban gandar dan pola operasi. Atas dasar ini diadakan klasifikasi jalan rel, sehingga perencanaan dapat dibuat secara tepat guna

3.3 ESTIMASI PERTUMBUHAN PENUMPANG DAN BARANG

Perkembangan dan pertumbuhan pergerakan massa dari suatu tempat ke tempat lain dipicu oleh banyak faktor. Peningkatan arus lalu lintas serta kebutuhan akan transportasi telah menghasilkan tundaan, kecelakaan dan permasalahan yang lain, sehingga perlu adanya faktor-faktor untuk menghitung pertumbuhan penumpang dan barang.

A. Pertumbuhan penumpang dihitung menggunakan persamaan :

$$Y = a + b.X \quad (3.1)$$

$$a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (3.2)$$

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (3.3)$$

$$y' = a + b.u \quad (3.4)$$

$$i = \left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (3.5)$$

Keterangan :

Y = Besarnya volume pertumbuhan penumpang yang diramal

X = Variabel bebas yang mempengaruhi peningkatan volume penumpang

a,b = Konstanta

y' = Besarnya volume pertumbuhan penumpang yang diramal

i = Besarnya persen pertumbuhan penumpang

P_n = Volume pertumbuhan penumpang di tahun pertama ramalan

P_n = Volume pertumbuhan penumpang di tahun akhir ramalan

A. Pertumbuhan penumpang dihitung menggunakan persamaan :

$$Y = a + b.X \quad (3.6)$$

$$a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (3.7)$$

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (3.8)$$

$$y' = a + bu \quad (3.9)$$

$$i = \left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (3.10)$$

Keterangan :

- Y = Besarnya volume pertumbuhan barang yang diramal
- X = Variabel bebas yang mempengaruhi peningkatan volume barang
- a,b = Konstanta
- y' = Besarnya volume pertumbuhan barang yang diramal
- i = Besarnya persen pertumbuhan barang
- P_n = Volume pertumbuhan barang di tahun pertama ramalan
- P_n = Volume pertumbuhan barang di tahun akhir ramalan

3.4 KLASIFIKASI JALAN REL

Jalan rel diklasifikasikan berdasarkan daya angkut lalu lintas, kecepatan maksimum, beban gandar dan ketentuan ketentuan lainnya untuk setiap kelas jalan dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Klasifikasi Jalan Rel

Klasifikasi Jalan KA	Pasing Ton Tahunan (Juta Ton)	Perencanaan Kecepatan KA Maksimum Vmax (km/jam)	Tekanan Gandar P max (ton)	Tipe 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	<u>Beton</u> 600	EG	30	50
2	10 – 20	110	18	R54 / R50	<u>Beton/Kayu</u> 600	EG	30	50
3	5 – 10	100	18	R54/ R50/ R42	<u>Beton/Kayu/Baja</u> 600	EG	30	40
4	2,5 – 5	90	18	R54/ R50/ R42	<u>Beton/Kayu/Baja</u> 600	EG/ET	25	40
4	< 2,5	80	18	R42	<u>Kayu/Baja</u> 600	ET	25	35

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

Daya angkut lintas adalah jumlah angkutan anggapan yang melewati suatu lintas dalam jangka waktu satu tahun. Daya angkut lintas mencerminkan jenis serta jumlah beban total dan kecepatan kereta api yang lewat di lintas yang bersangkutan. Daya angkut disebut daya angkut T dengan satuan ton/ tahun.

$$T = 360 \times S \times TE \quad (3.11)$$

Keterangan :

TE = Tonase Ekuivalen (ton/hari)

TE = $T_p + (K_b \times T_b) + (K_l \times T_l)$

- T_p = Tonase Penumpang dan Kereta Harian
 T_b = Tonase Barang dan gerbong harian
 T_l = Tonase Lokomotif harian
 S = 1,1 untuk lintas kereta api penumpang dengan kecepatan maksimum 120 km/jam
 S = 1,0 untuk lintas tanpa kereta penumpang
 K_I = koefisien yang besarnya 1,4
 K_b = koefisien yang besarnya bergantung pada beban gandar
 K_b = 1,5 untuk beban gandar < 18 ton
 K_b = 1,3 untuk beban gandar > 18 ton

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

- a. Untuk perencanaan struktur jalan rel.

$$V \text{ rencana} = 1,25 \times V \text{ maks.} \quad (3.12)$$

- b. Untuk perencanaan peninggian (3.13)

$$V \text{ rencana} = c \times \frac{\sum N_i \cdot V_i}{\sum N_i}$$

Keterangan :

$$c = 1,25$$

N_i = Jumlah Kereta api yang lewat.

V_i = Kecepatan Operasi

- c. Untuk perencanaan jari-jari lengkung lingkaran dan lengkung peralihan

$$V_{\text{rencana}} = V_{\text{maks}} \quad (3.14)$$

3.5 RUANG BEBAS DAN RUANG BANGUN

Jalan rel harus senantiasa bebas dari rintangan dan setiap saat dapat dilewati oleh kereta api dengan aman. Untuk memenuhi tuntutan tersebut maka diperlukan adanya ruang diatas sepur yang senantiasa bebas dari segala benda yang dapat tersentuh oleh kereta api. Sebaliknya, tidak boleh ada bagian dari kendaraan jalan rel (lokomotif, kereta, gerbong) yang keluar dari ruang dimaksud.

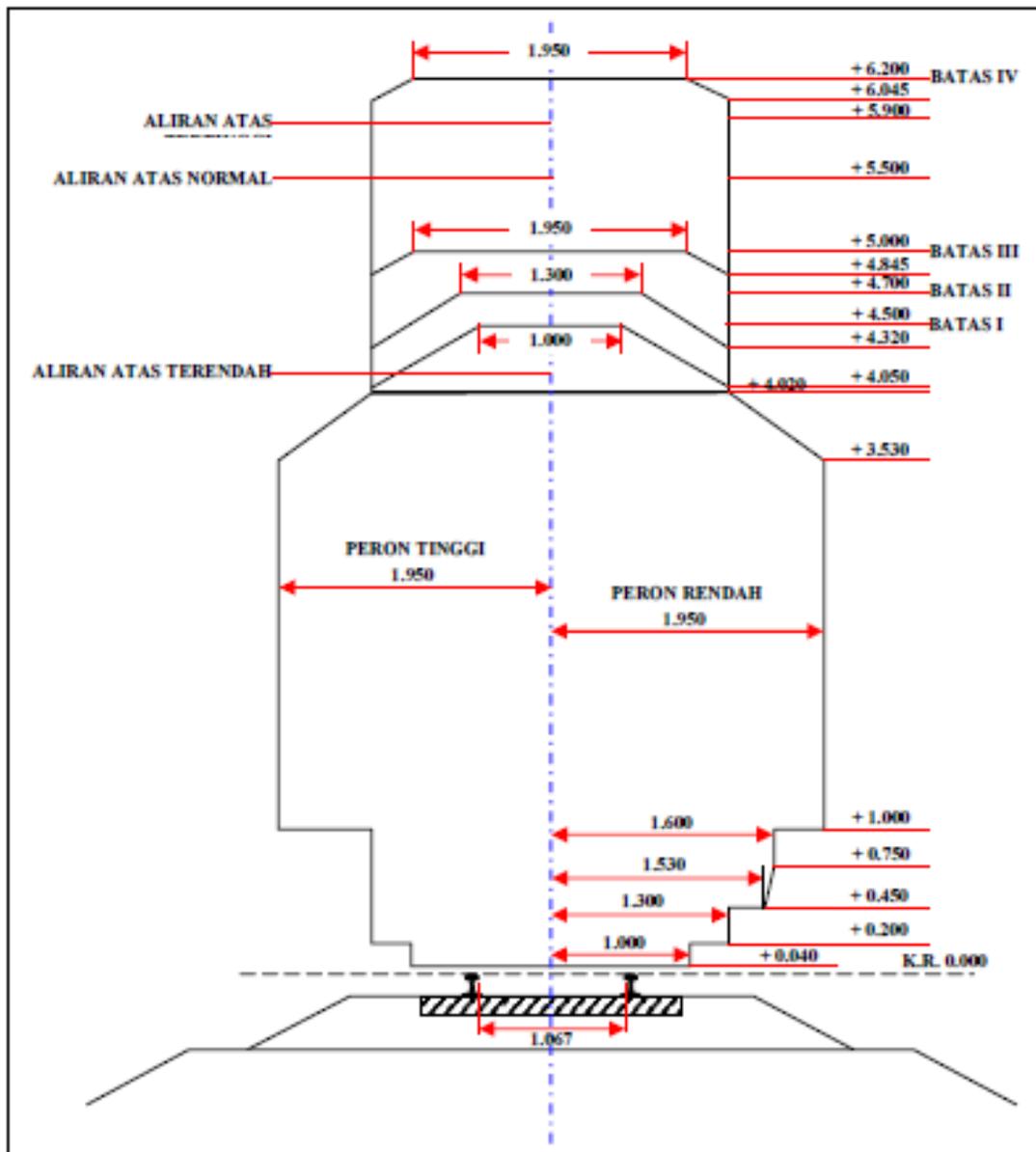
Selanjutnya, dalam hal ruang diatas sepur yang harus selalu bebas ini dikenal adanya Ruang Bebas dan Ruang Bangun.

3.5.1 Ruang Bebas

Ruang bebas adalah ruang diatas sepur yang senantiasa harus bebas dari segala rintangan dan benda penghalang, ruang ini disediakan untuk lalu lintas rangkaian kereta api. Untuk jalur ganda, jarak antar sumbu untuk jalur lurus dan lengkung sebesar 4,00 m.

Ukuran Ruang Bebas untuk jalur tunggal dan jalur ganda, untuk bagian lintas yang lurus maupun tikungan, lintas dengan elektrifikasi maupun non elektrifikasi dapat dilihat pada Gambar 3.1, Gambar 3.2, Gambar 3.3, dan Gambar 3.4. Ukuran – ukuran Ruang Bebas tersebut sudah memperhitungkan hal-hal berikut :

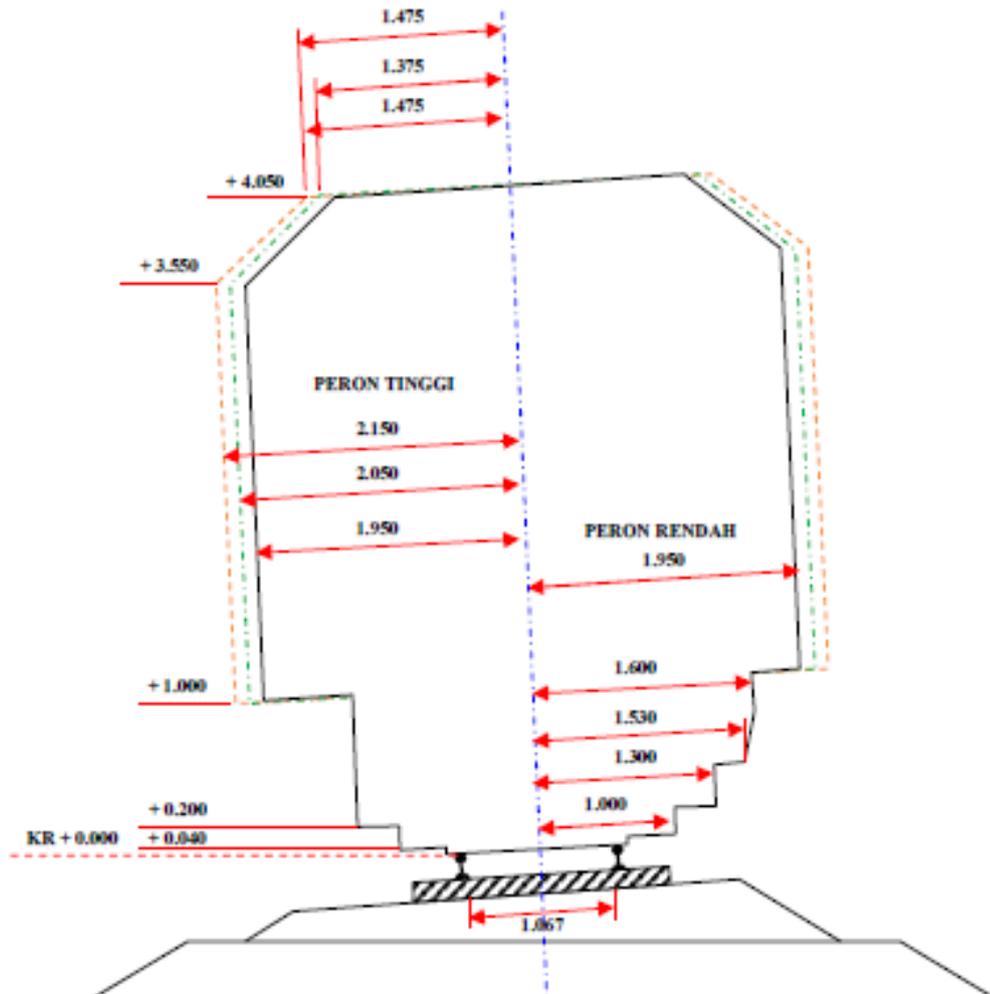
1. Bergeraknya kendaraan jalan rel (lokomotif, kereta, gerbong) ke kanan dan ke kiri dalam perjalanan (akibat adanya kelonggaran antara *flens* roda dan kepala rel, maupun cacat-cacat atau *track irregularities*).
2. Pelebaran ruang yang diperlukan sewaktu kereta api melewati tikungan/lengkung.
3. Ukuran gerbong peti kemas standar ISO (*ISO Container size*) tipe *standard height*.
4. Penyediaan ruang bebas untuk memasang saluran-saluran kawat listrik beserta tiang-tiang pendukungnya, dan pantograf listrik pada kereta elektrifikasi
5. Tinggi peron, baik untuk barang maupun untuk penumpang (peron tinggi dan peron rendah)



Gambar 3.1 Ruang Bebas Pada Bagian Lurus 1067 mm
(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 , 2012)

Keterangan :

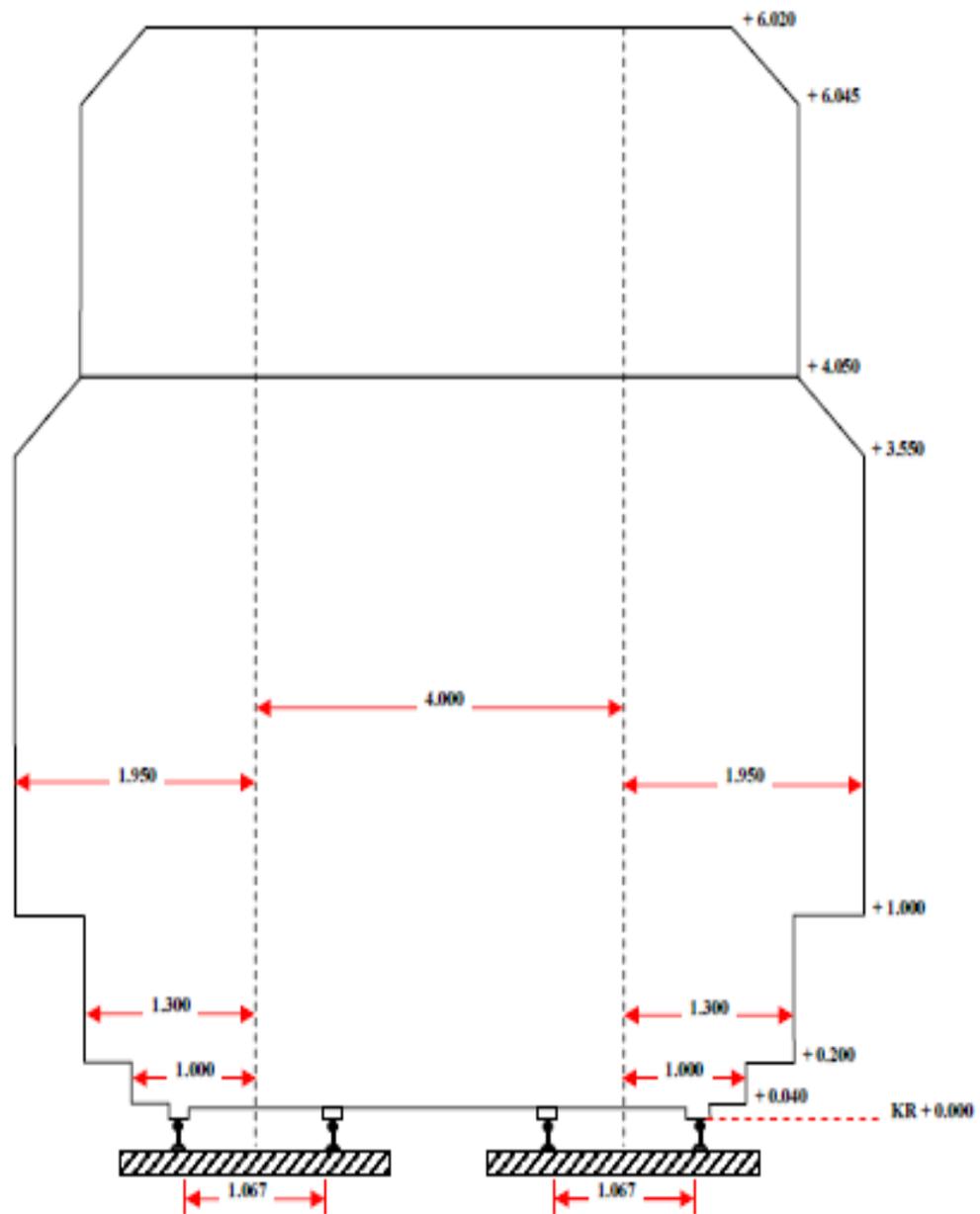
- Batas I = Untuk jembatan dengan kecepatan sampai 60 km/jam
- Batas II = Untuk *viaduct* dan terowongan dengan kecepatan sampai 60 km/jam dan untuk jembatan tanpa pembatasan kecepatan.
- Batas III = Untuk *viaduct* baru dan bangunan lama kecuali terowongan dan jembatan
- Batas IV = Untuk lintas kereta listrik



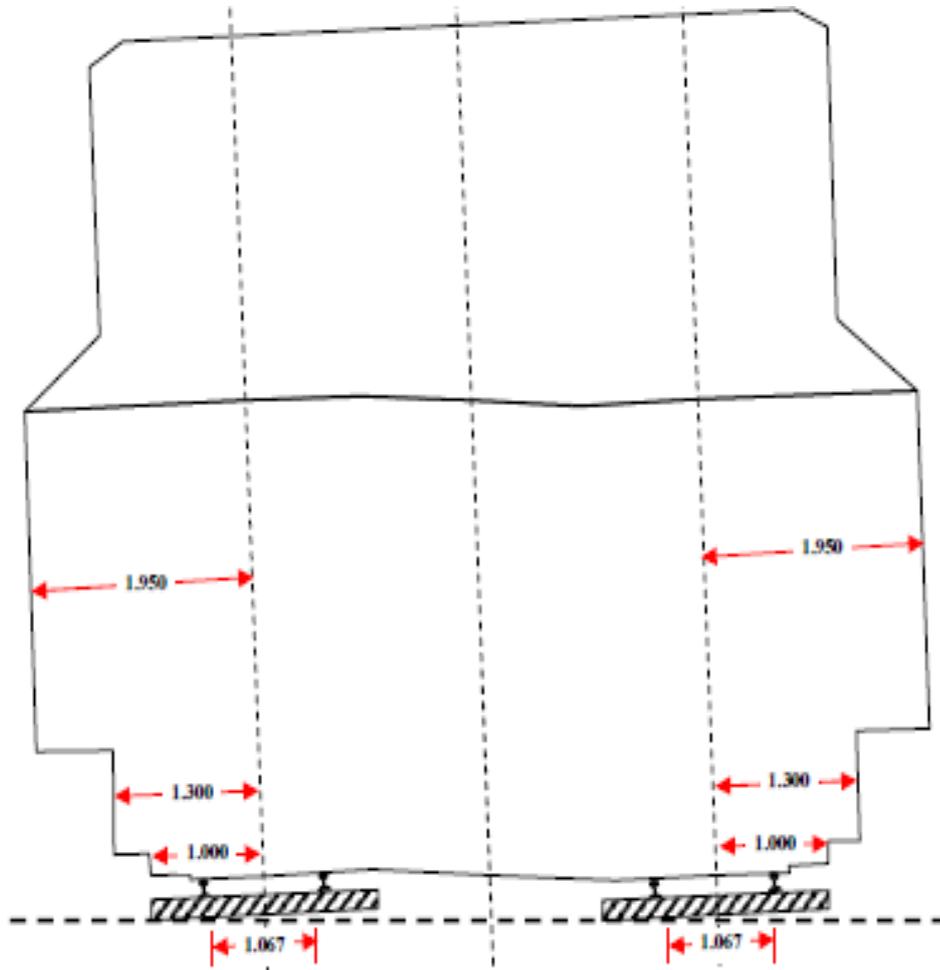
Gambar 3.2 Ruang Bebas Pada Daerah Tikungan
(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 , 2012)

Keterangan :

- : Batas ruang bebas pada lalu lintas lurus dan pada lengkung/
tikungan dengan jari-jari > 3000 meter.
- - - - - : Batas ruang bebas pada lengkungan dengan jari-jari 300 sampai
dengan 3000 m.
- - - - - : Batas ruang bebas pada lengkungan dengan jari-jari < 300 m.



Gambar 3.3 Ruang Bebas Pada Jalur Lurus Untuk Jalan Ganda
(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 , 2012)



Gambar 3.4 Ruang Bebas Jalur Lengkung Untuk Jalan Ganda
(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60, 2012)

Keterangan :

- : Batas ruang bebas pada lalu lintas lurus dan pada lengkung/
tikungan dengan jari-jari > 3000 meter.
- - - - - : Batas ruang bebas pada lengkungan dengan jari-jari 300 sampai
dengan 3000 m.
- - - - - : Batas ruang bebas pada lengkungan dengan jari-jari < 300 m.

3.5.2 Ruang Bangun

Ruang bangun adalah ruang disisi sepur yang senantiasa harus bebas dari segala bangunan tetap seperti antara lain tiang semboyan, tiang listrik dan pagar. Batas ruang bangun diukur dari sumbu sepur pada tinggi 1 meter sampai 3,55 meter. Jarak ruang bangun ditetapkan sebagai berikut :

1. Pada lintas bebas ialah 2,35 m sampai 2,53 m di kiri dan kanan sumbu sepur.
2. Pada emplasemen ialah 1,95 m sampai 2,35 m di kiri dan kanan sumbu sepur.
3. Pada jembatan ialah 2,15 di kiri dan kanan sumbu sepur.

3.6 GEOMETRIK

Perencanaan geomtrik jalan rel berdasarkan pada kecepatan rencana serta ukuran-ukuran kereta yang akan melewatinya sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Peraturan Menteri Perhubungan No.60 tahun 2012 dalam hal ini kecepatan rencana yang akan direncanakan 100km/jam sehingga mendapatkan radius pada lengkungan untuk mendapatkan keamanan, kenyamanan, ekonomis dan keserasian dengan lingkungan sekitarnya.

3.6.1 Alinyemen Horisontal

Alinyemen horisontal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang horisontal. Secara umum alinyemen horisontal harus mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut :

1. Lengkung Lingkaran

Dua bagian lurus yang perpanjangannya saling membentuk sudut harus dihubungkan dengan lengkung berbentuk lingkaran, dengan atau tanpa lengkung-lengkung peralihan. Untuk berbagai kecepatan rencana, besar jari-jari minimum yang diizinkan adalah seperti tercantum pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Persyaratan Perencanaan Lengkungan

Kecepatan rencana (km/jam)	Jari-jari minimum lengkung lingkaran tanpa lengkung peralihan (m)	Jari-jari minimum lengkung lingkaran yang diizinkan dengan lengkung peralihan (m)
120	2370	780
110	1990	660
100	1650	550
90	1330	440
80	1050	350
70	810	270
60	600	200

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

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

$$R_{min} = 0,054.V^2 \quad (3.15)$$

Jika tidak ada peninggian yang harus dicapai ($h=0$)

$$R = 0,164.V^2 \quad (3.16)$$

Keterangan

R = Jari-jari lengkung horisontal (m)

V = Kecepatan rencana (km/jam)

2. Lengkung Peralihan

Lengkung peralihan adalah suatu lengkung dengan jari-jari yang berubah beraturan. Lengkung peralihan dipakai sebagai peralihan antara bagian yang lurus dan bagian lingkaran dan sebagai peralihan antara dua jari-jari lingkaran yang berbeda. Lengkung peralihan dipergunakan pada jari-jari lengkung yang relatif.

Panjang minimum dari lengkung peralihan ditetapkan dengan rumus berikut :

L_h = panjang minimal lengkung peralihan.

h = pertinggian relatif antara dua bagian yang dihubungkan (mm).

v = kecepatan rencana untuk lengkungan peralihan (km/jam).

3. Peninggian Rel

Pada lengkungan, elevasi rel luar dibuat lebih tinggi dari pada rel dalam untuk mengimbangi gaya sentrifugal yang dialami oleh rangkaian kereta. Peninggian rel dicapai dengan menepatkan rel dalam pada tinggi semestinya dan rel luar lebih tinggi. Terdapat tiga peninggian rel, yaitu :

- a. Peninggian Normal
- b. Peninggian Minimum
- c. Peninggian Maksimum

Dan akan diuraikan sebagai berikut :

- a. Peninggian Normal

Peninggian normal berdasarkan pada kondisi komponen jalan rel tidak ikut

menahan gaya sentrifugal. Pada kondisi ini gaya sentrifugal sepenuhnya diimbangi oleh gaya berat saja.

$$h_{\text{normal}} = 5,95 \times \frac{V^2}{R} \quad (3.17)$$

b. Peninggian Minimum

Peninggian minimum berdasarkan pada kondisi gaya maksimum yang dapat ditahan oleh komponen jalan rel dan kenyamanan penumpang kereta api.

$$h_{\text{minimum}} = 8,8 \times \frac{V^2}{R} - 53,5 \quad (3.18)$$

c. Peninggian Maksimum

Peninggian maksimum ditentukan berdasarkan pada stabilitas kereta api pada saat berhenti di bagian lengkung horisontal dengan pembatasan kemiringan maksimum sebesar 10%. Apabila kemiringan melebihi 10% maka benda-benda yang terletak pada lantai kereta api dapat bergeser ke arah sisi dalam. Dengan digunakan kemiringan maksimum 10% peninggian rel maksimum yang di gunakan adalah 110mm.

Besar peninggian untuk berbagai kecepatan rencana tercantum pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.3 Peninggian Pada Rel Di Lengkung Horisontal Berdasarkan Peninggian Normal

Jari-jari (m)	Peninggian (mm) pada saat kecepatan perancangan (km/jam)						
	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

Lanjutan Tabel 3.4 Peninggian Pada Rel Di Lengkung Horisontal Berdasarkan Peninggian Normal

Jari-jari (m)	Peninggian (mm) pada saat kecepatan perancangan (km/jam)						
	120	110	100	90	80	70	60
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	50	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 : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

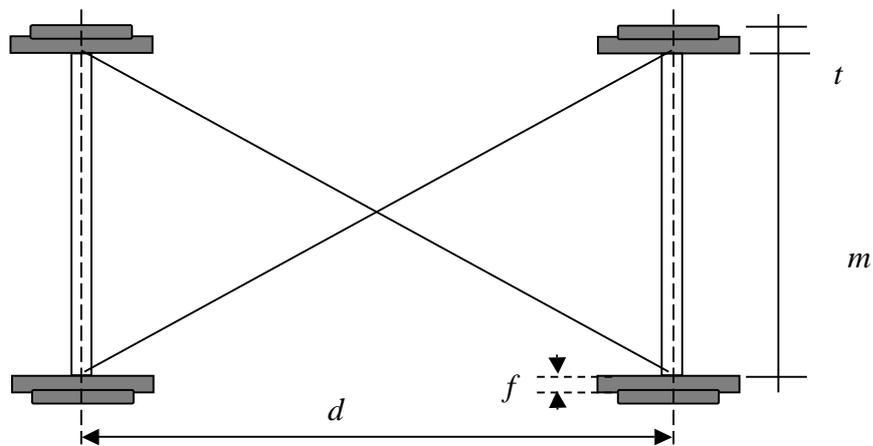
4. Pelebaran Sepur *double*

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, 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.

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

- Jari-jari lengkung (R).
- Ukuran atau jarak gandar muka – belakang yang kokoh (d), sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 3.5

- Kondisi keausan roda dan rel.



Gambar 3.5 Ukuran Gandar Teguh Yang Digunakan Di Indonesia
(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60, 2012)

Keterangan :

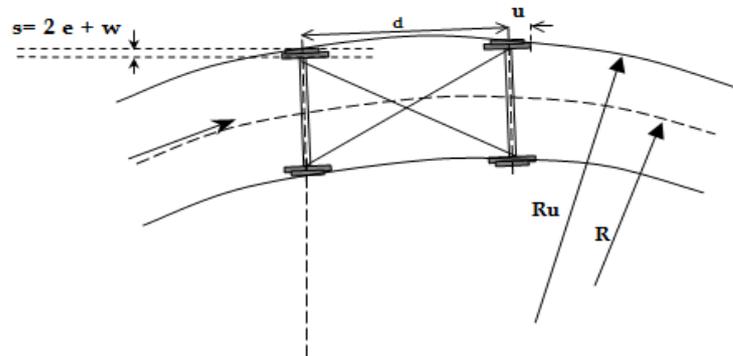
$d = 3\text{m dan } 4\text{m}$

$m = 1000\text{ mm}$

$f = 30\text{ mm}$

$t = 130\text{mm}$

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. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan Indonesia (PM Perhubungan No.60, 2012).



Gambar 3.6 Gandar Teguh dan Rel

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

Keterangan :

U = Jarak antara titik sentuh flens roda dengan tengah-tengah gandar.

d = Jarak gandar.

c = Kelonggaran flens terhadap tepi rel pada sepur lurus.

R = Jari-jari lengkung.

p = Pelebaran sepur.

Ru = Jari-jari lengkung luar

Perlebaran sepur dibuat dengan cara menggeser rel-dalam ke arah dalam (ke arah pusat lengkung). Seperti halnya peninggian rel, perlebaran sepur dicapai dan dihilangkan tidak secara mendadak tetapi secara berangsur-angsur. Menurut Honing (1975) pada jalan rel yang tidak menggunakan lengkung transisi, perlebaran sepur dan peninggian rel dilakukan dengan rata melewati suatu jarak (panjang transisi) antara 400 sampai 1000 x peninggian rel.

Pada lengkung horisontal, untuk mengurangi gaya tekan roda kereta/gerong/lokomotif pada rel luar dan untuk menjaga terhadap bahaya keluarnya roda dari rel (*deraillement*), pada rel-dalam dipasang rel penahan (*anti derraillement*). Subarkah (1981) menyatakan bahwa lebar celah antara rel-dalam dan rel penahan adalah sebagai berikut :

- 1). 65 mm untuk jari-jari lengkung horisontal sebesar 150 meter.
- 2). 60 mm untuk jari-jari lengkung horisontal sebesar 200 meter.

Agar pada saat roda melewati lengkung horisontal masih terdapat tapak roda yang cukup lebar menapak di atas kepala rel, maka PT.Kereta Api menggunakan batasan pelebaran sepur maksimum (P_{maks}) adalah 20 mm, sehingga pelebaran sepur sesuai dengan jari-jari lengkung horisontal yang digunakan seperti pada Tabel 3.4

Tabel 3.5 Pelebaran Sepur Yang Digunakan PT.KAI

Jari-jari lengkung horisontal (meter)	Pelebaran sepur (mm)	Lebar sepur menjadi (mm)
$R > 850$	0	1067
$550 < R < 850$	5	1072
$400 < R < 550$	10	1077
$350 < R < 400$	15	1082
$100 < R < 350$	20	1087

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

5. Kelandaian

Dalam geometrik jalan rel dikenal dua jenis landai, yaitu :

a. Landai Penentu

Salah satu masalah teknis yang penting dalam perencanaan dan perancangan geometri jalan rel adalah tanjakan. Pada tanjakan yang terjal, dengan menggunakan suatu lokomotif, berat rangkaian kereta api yang dapat dioperasikan lebih kecil dibandingkan dengan pada tanjakan landai. Sehingga untuk menentukan geometrik yang ekonomis perlu ditetapkan adanya landai penentu.

Landai Penentu (S_p) didefinisikan sebagai kelandaian (tanjakan) terbesar yang ada pada suatu lintas lurus. Besar landai penentu berpengaruh pada daya lokomotif yang digunakan dan berat rangkaian kereta api yang dioperasikan. Besarnya landai penentu tergantung pada kelas jalan relnya seperti yang tertulis pada Tabel 3.5

Tabel 3.6 Landai Penentu Maksimum Jalan Rel

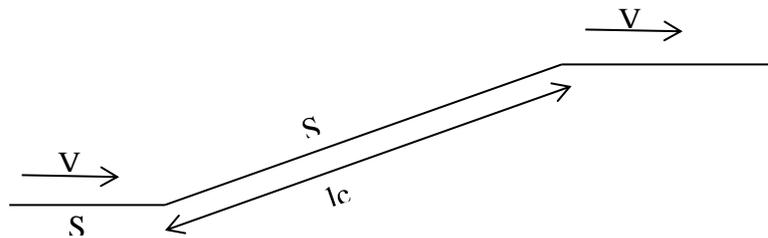
Kelas jalan rel	Landai penentu maksimum (‰)
1	10
2	10
3	20
4	25
5	25

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

b. Landai Curam

Dalam keadaan tertentu, misalnya pada lintas yang melalui pegunungan, kelandaian (tanjakan) pada suatu lintas lurus kadang terpaksa melebihi landai penentu. Kelandaian yang melebihi landai penentu tersebut disebut dengan landai curam (S_c).

Panjang maksimum landai curam dibatasi dengan persamaan berikut ini dapat dilihat pada gambar 3.7



Gambar 3.7 Landai Curam

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

$$L_c = \frac{V_k^2 - V_p^2}{2 \cdot g \cdot (S_p - S_c)} \quad (3.19)$$

keterangan :

l_c = Panjang maksimum landai curam yang diizinkan (meter).

V_k = kecepatan minimum yang diizinkan dikaki landai curam (m/detik).

V_p = Kecepatan minimum yang dapat diterima dipuncak landai curam (m/detik). Dengan ketentuan $V_p \geq 0$, V_k .

g = Percepatan gravitasi (m/detik²).

S_p = Landai Penentu (o/oo).

Sc = Landai Curam (o/oo).

6. Alur Perhitungan Lengkung Horisontal

a. Menghitung panjang lengkung

$$L_h = L_s = 0,01 \cdot v \cdot h \quad (3.20)$$

$$\theta_s = \frac{90 \times L_s}{\pi \times R} \quad (3.21)$$

$$\theta_c = \Delta_s - 2\theta_s \quad (3.22)$$

$$L_c = \frac{\theta_c}{360} \times 2 \cdot \pi \cdot R \quad (3.23)$$

$$L = 2 \cdot L_s + L_c \quad (3.24)$$

b. Menghitung Xc, Yc, k dan p

$$X_c = L_s - \frac{L_s^3}{40 \times R^2} \quad (3.25)$$

$$Y_c = \frac{L_s^2}{6 \times R} \quad (3.26)$$

$$p = Y_c - R(1 - \cos\theta_s) \quad (3.27)$$

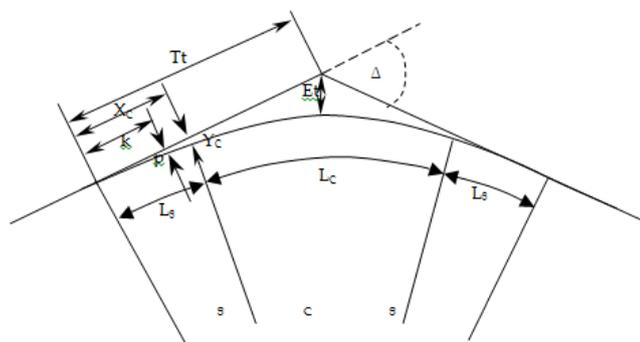
$$k = X_c - R \cdot \sin\theta_s \quad (3.28)$$

c. Menghitung Tt dan Et

$$T_t = (R + p) \operatorname{tg} \frac{\Delta_s}{2} + k \quad (3.29)$$

$$E_t = (R + p) \sec \frac{\Delta_s}{2} - R \quad (3.30)$$

d. Menggambar Proyeksi Lengkung Horisontal



Gambar 3.8 Proyeksi Lengkung Horisontal
Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

3.6.2 Alinyemen Vertikal

Alinyemen Vertikal yang merupakan proyeksi sumbu jalan rel pada bidang vertikal yang melalui sumbu jalan rel dimaksud, terdiri atas garis lurus dengan atau tanpa kelandaian dan juga lengkung vertikal.

Lengkung vertikal dimaksudkan sebagai lengkung transisi dari suatu kelandaian ke kelandaian berikutnya, sehingga perubahan kelandaianya akan berangsur-angsur dan beraturan. selain itu lengkung vertikal juga dimaksudkan untuk memberikan pandangan yang cukup dan keamanan/keselamatan kereta api. terdapat dua kelompok lengkung vertikal, lengkung cembung dan lengkung cekung.

1. Pengelompokan lintas

Beberapa batas landai yang diizinkan 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:

- a. Medan dengan lintas dasar jika kelandaiannya 0 – 10‰
- b. Medan dengan lintas pegunungan jika kelandaiannya lebih dari 10‰

Tabel 3.7 Lintas Kelandaian

Lintas Datar	0 – 10‰
Lintas Pegunungan	10 – 40‰
Lintas dengan rel gigi	40 – 80‰
Landai pada emplasemen	0 – 1,5‰

Sumber : PM No.60 Tahun (2012)

2. Jari-jari minimum lengkung

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, Peraturan Menteri Perhubungan No.60 tahun 2012 mengelompokkan lintas berdasarkan kelandaian sebagaimana dijelaskan sebagai berikut :

Besar jari-jari minimum lengkung bergantung pada besar kecepatan rencana seperti dalam Tabel jari-jari lengkung vertikal Peraturan Menteri Perhubungan No.60 tahun 2012 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 horisontal.

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 dan perbedaan kelandaian.

a. Lengkung Cembung

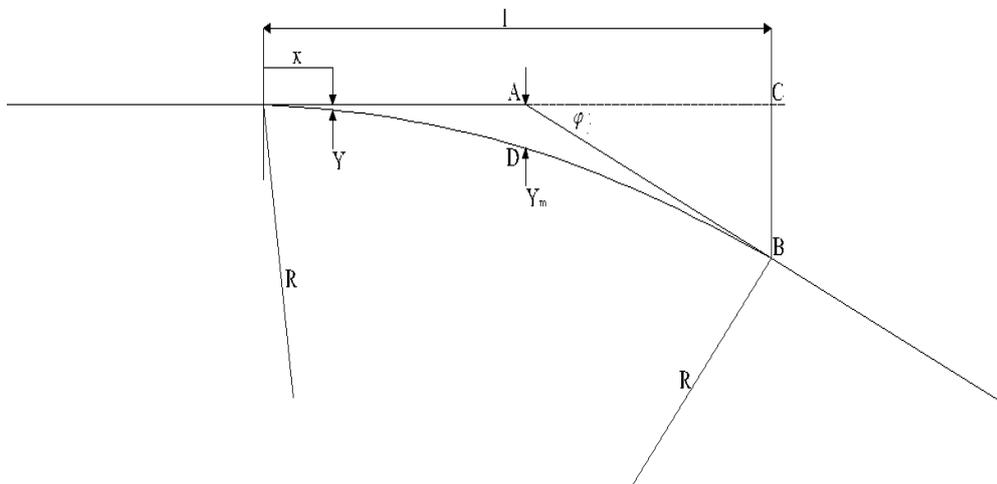
Lengkung cembung adalah lengkung vertikal yang kecembungannya ke atas. Secara umum lengkung cembung dibuat pada kondisi tanjakan bertemu dengan turunan, atau tanjakan bertemu dengan tanjakan yang lain dengan kelandaian yang lebih kecil atau tanjakan bertemu dengan jalan datar.

Pada perubahan dari jalan datar ke suatu turunan yang tidak terdapat lengkung transisi, roda kereta akan melayang melalui suatu bentuk lengkung. Apabila melayangnya roda kereta lebih besar dibandingkan tinggi flens roda kereta api, akan dapat mengakibatkan bahaya besar yaitu roda kereta api ke luar dari rel. Subarkah (1981) memberikan contoh, pada perubahan kelandaian dari jalan

datar ke jalan turunan dengan kelandaian 1:40, dengan kecepatan kereta api sebesar 100km/jam, melayangnya roda kereta api di atas rel adalah 3,125 cm, padahal tinggi flens roda kereta api hanya 2,7 cm, sehingga terdapat bahaya besar yaitu roda dapat ke luar terlepas dari rel. Untuk menghindari terjadinya bahaya roda ke luar dari rel, maka diperlukan adanya lengkung transisi.

Rumus dasar Lengkung :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{R} \quad (3.31)$$



Gambar 3.9 Skematik Lengkung Vertikal Cembung
(Sumber : PM No.60 tahun, 2012)

Keterangan :

R = Jari-jari lengkung peralihan

L = Panjang lengkung peralihan

A = Titik tekuk lengkung vertikal

φ = Perbedaan landai

Dari persamaan 3.24 , diperoleh

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{R} + C_1 \quad (3.32)$$

$$\text{Jika } x=0, \text{ maka } \frac{dy}{dx} = 0, \text{ dan } C_1=0 \quad (3.33)$$

$$Y = \frac{x^2}{2R} + C_2 \quad (3.34)$$

$$\text{Jika } x=0, \text{ maka } Y=0, \text{ dan } C_1=0 \quad (3.35)$$

Letak titik A (titik tekuk lengkung vertikal) adalah :

Keterangan $x=l$

$$\text{a. } \frac{dy}{dx} = \frac{l}{R}, \text{ dan } l = \varphi R \quad (3.36)$$

$$X_m = OA = 1/2 l \quad (3.37)$$

$$X_m = \frac{R}{2} \varphi \quad (3.38)$$

$$\text{b. } Y = \frac{x^2}{2R}, \text{ dan } l = \varphi R \quad (3.39)$$

Jika $Y=Y_m$ dan $X=X_m=OA = 1/2l$, maka :

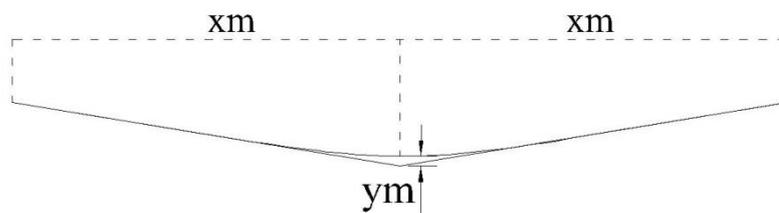
$$Y_m = \frac{\frac{1}{4} l^2}{2R} = \frac{\varphi^2 R^2}{8R} \quad (3.40)$$

$$Y_m = \frac{R}{8} \varphi^2 \quad (3.41)$$

b. Lengkung Cengkung

Lengkung cengkung adalah lengkung vertikal yang kecekungannya kebawah. Lengkung berbentuk cekung seperti di beberapa negara dikenal sebagai *valley curve* atau *sag curve*. Seperti halnya pada lengkung cembung, pada dasarnya lengkung cekung dibuat pada kondisi turunan bertemu dengan tanjakan atau turunan bertemu dengan turunan lain dengan kelandaian lebih kecil, atau turunan bertemu dengan jalan datar.

Selain berbentuk lengkung lingkaran, lengkung vertikal dapat juga dibuat dengan bentuk parabola. Panjang lengkung vertikal sebaiknya dalam kelipatan 100ft (Hay, 1982). Apabila lengkung vertikal menggunakan bentuk lengkung parabola, maka panjang lengkung vertikal dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :



Gambar 3.10 Skematik Lengkung Vertikal Cekung
(Sumber : PM No.60 tahun, 2012)

$$L = \frac{G1 - G2}{r} \quad (3.42)$$

Keterangan :

G1 dan G2 = Dua kemiringan yang bertemu, positif G1 (+), bila naik/tanjakan dan negatif G2 (-) bila turunan

L = Panjang lengkung (dalam kelipatan 100ft)

r = Tingkat perubahan kemiringan (dalam persen) tiap 100 ft.

3.7 REL

Rel merupakan struktur balok menerus yang diletakkan di atas tumpuan bantalan yang berfungsi sebagai penuntun/mengarahkan pergerakan roda kereta api. Rel juga disediakan untuk menerima secara langsung dan menyalurkan beban kereta api kepada bantalan tanpa menimbulkan defeksi yang berarti pada bagian balok rel diantara tumpuan bantalan. Oleh itu, harus memiliki nilai kekakuan balok tertentu sehingga perpindahan beban titik roda dapat menyebar secara baik pada tumpuan di bantalan.

Rel juga berfungsi sebagai struktur pengikat dalam pembentukan struktur jalan relying kokoh. Oleh sebab itu, bentuk dan geometrik rel dirancang sedemikian sehingga dapat berfungsi sebagai penahan gaya akibat pergerakan dan beban kereta api. Pertimbangan yang diperluakan dalam membuat geometrik rel adalah :

1. Permukaan rel harus dirancang memiliki permukaan yang cukup lebar untuk membuat tegangan kontak diantara rel dan roda sekecil mungkin.

2. Kepala rel harus cukup tebal untuk memberikan umur manfaat yang panjang.
3. Badan rel harus cukup tebal untuk menjaga dari pengaruh korosi dan mampu menahan tegangan lentur serta tegangan horisontal.
4. Dasar rel harus cukup lebar untuk dapat mengecilkan distribusi tegangan ke bantalan baik melalui pelat andas maupun tidak.
5. Dasar rel juga harus tebal untuk tetap kaku dan menjaga bagian yang hilang akibat korosi.
6. Momen inersia harus cukup tinggi, sehingga tinggi rel diusahakan tinggi dan mencukupi tanpa bahaya tekuk.
7. Tegangan horisontal diusahakan dapat direduksi oleh kepala dan dasar rel dengan perencanaan geometriknya yang cukup lebar.
8. Stabilitas horisontal dipengaruhi oleh perbandingan lebar dan tinggi rel yang mencukupi.
9. Titik Pusat sebaiknya di tengah rel.
10. Geometrik badan rel harus sesuai dengan pelat sambung.
11. Jari-jari kepala rel harus cukup besar untuk mereduksi teggangan kontak.

Pertimbangan lainnya adalah perencanaan rel dengan berat yang sama tetapi memiliki geometrik yang berbeda sesuai dengan tujuan yang diinginkan.

3.7.1 Bentuk Dan Dimensi Rel

Suatu komponen rel terdiri dari 4 bagian utama. Ukuran/dimensi bagian-bagian profil rel dijelaskan dalam Tabel 3.7 untuk dimensi rel yang digunakan di Indonesia sesuai PD 10 tahun 1986. 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.

Tabel 3.8 Klasifikasi Tipe Rel di Indonesia

Tipe	Berat (kg/m)	Tinggi (mm)	Lebar Kaki (mm)	Lebar Kepala (mm)	Tebal Badan (mm)	Panjang Standar/normal (m)
R2/ R25	25,74	110	90	53	10	6,80-10,20
R3/ R33	33,40	134	105	58	11	11,90-13,60
R14/ R41	41,52	138	110	68	13,5	11,90-13,60-17,00
R14A/ R42	42,18	138	110	68,5	13,5	13,60-17,00
R50	50,40	153	127	63,8	15	17,00
UIC 54/ R54	54,40	159	140	70	16	18,00/24,00
R60	60,34	172	150	74,3	16,5	

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

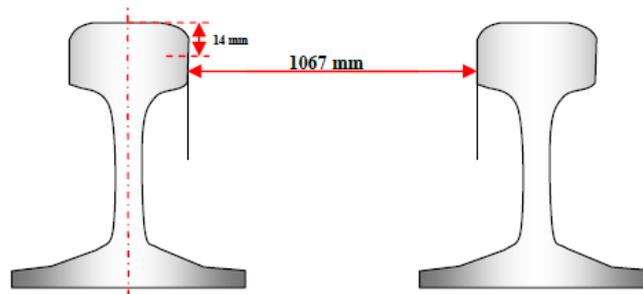
3.7.2 Penentuan Dimensi Rel

Penentuan dimensi rel didasarkan kepada tegangan lentur yang terjadi pada dasar rel akibat beban dinamis roda kendaraan (S_{base}). Tegangan ini tidak boleh melebihi tegangan izin lentur baja (S_i). Jika suatu dimensi rel dengan beban roda tertentu menghasilkan $S_{base} < S_i$, maka dimensi ini dianggap cukup.

Tabel 3.9 Dimensi Profil R42, R50, R54, dan R60

Besaran geometrik Rel	satuan	Tipe rel			
		R 42	R54	R 50	R 60
H	mm	138	159	153	172
B	mm	110	140	127	150
C	mm	68,5	70	65	74,3
D	mm	13,5	16	15	16,5
E	mm	40,5	49,4	49	51
F	mm	23,5	30,2	30	31,5
G	mm	72	74,79	76	80,95
R	mm	320	508	500	120
A	cm ²	54,26	69,34	64,2	76,86
W	kg/m	42,59	54,43	50,4	60,43
I _x	cm ⁴	1369	2346	1960	3055
Y _b	mm	68,5	76,2	71,6	80,95

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)



Gambar 3.11 Lebar Jalan Rel 1067 mm
(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60, 2012)

1. Tegangan Izin

Tegangan izin tergantung pada mutu rel yang digunakan. Untuk perencanaan dimensi rel yang akan digunakan, Perumka (Indonesia) menggunakan dasar kelas jalan untuk menentukan tegangan izinnya. Tabel 3.9 menjelaskan tegangan izin setiap kelas jalan dan tegangan dasar rel untuk perhitungan dimensi rel.

Tabel 3.10 Tegangan Izin Profil Rel Berdasarkan Kelas Jalan di Indonesia

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (juta ton/thn)	Kecepatan rencana (kpj)	Beban gandar (ton)	Beban roda dinamis (kg)	Jenis Rel	Tegangan dasar rel (kg/cm ²)	Tegangan ijin (kg/cm ²)
I	> 20	150	18	19940	R-60	1042,3	1325
					R-54	1176,8	
II	10-20	140	18	16241	R-54	1128,2	1325
					R-50	1231,8	
III	5-10	125	18	15542	R-54	1097,7	1663
					R-50	1178,8	
					R-42	1476,3	
IV	2.5-5	115	18	14843	R-54	1031	1843
					R-50	1125,8	
					R-42	1410	
V	>2,5	100	18	14144	R-42	1343,5	2000

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

2. Perhitungan Dimensi Rel

Dalam perhitungan perencanaan dimensi rel digunakan konsep "*beam on elastic foundation*". Pada dasarnya, pembebanan untuk roda tunggal dengan jarak roda yang jauh saat ini hampir tidak ada. Sebagian besar roda digabung dalam satu *bogie* yang memiliki 2 atau 3 roda. Oleh karena itu,

akan terjadi reduksi momen maksimum yang terjadi pada titik di bawah beban roda akibat superposisi dan konfigurasi roda.

Untuk reduksi perhitungan momen akibat konfigurasi roda 4 (BB) dan 6 (CC) digunakan persamaan sebagai berikut :

a. Konfigurasi roda 4 (BB)

Lokomotif ini berarti beban bertumpu oleh dua *bogie* yang masing-masing *bogie* terdiri dari dua gandar. Satu gandar disini terdiri dari dua roda yang saling tersambung.

$$Ma = \sum_{i=1}^4 \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda o - \sin \lambda i) \quad (3.43)$$

$$Ma = 0,75 \frac{P}{4\lambda} \quad (3.44)$$

b. Konfigurasi roda 6 (CC)

Lokomotif ini memiliki dua *bofie* yang terdiri dari masing-masing tiga gandar. Setiap gandar terdiri dari dua roda..

$$Ma = \sum_{i=1}^6 \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda o - \sin \lambda i) \quad (3.45)$$

$$Ma = 0,82 \frac{P}{4\lambda} \quad (3.46)$$

Jika konfigurasi tidak diperhitungkan maka digunakan persamaan reduksi momen sebagai berikut :

$$Ma = 0,85 \frac{P}{4\lambda} \quad (3.47)$$

Keterangan :

Ma = Momen aktif

P = Tegangan yang terjadi di dasar rel

λ = Faktor reduksi/ *Dumping factor*

3. Penentuan Panjang Minimum Rel

Menurut Peraturan Menteri Perhubungan No.60 tahun 2012 rel dapat diklasifikasikan sesuai dengan panjangnya, meliputi :

- Rel Standar, dengan panjang 25 meter (sebelumnya 6 – 10 meter)
- Rel Pendek, dengan panjang maksimum 100 meter atau 4 x 25 meter
- Rel Panjang, adalah rel yang mempunyai panjang statis, yaitu daerah yang tidak terpengaruh pergerakan sambungan rel, biasanya dengan panjang minimal 200 meter.

Permasalahan yang ditimbulkan dalam rel panjang adalah penentuan panjang minimal rel panjang yang diakibatkan oleh dilatasi pemuaiian sebagaimana dituliskan dalam persamaan berikut :

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.48)$$

Keterangan:

ΔL = Pertambahan panjang (m)

L = Panjang rel (m)

α = Koefisien muai panjang ($^{\circ} \text{C}^{-1}$)

ΔT = Kenaikan temperature ($^{\circ} \text{C}$)

Menurut hukum *Hooke*, gaya yang terjadi pada rel dapat diturunkan menjadi persamaan sebagai berikut :

$$F = \frac{\Delta L \cdot E \cdot A}{L} \quad (3.49)$$

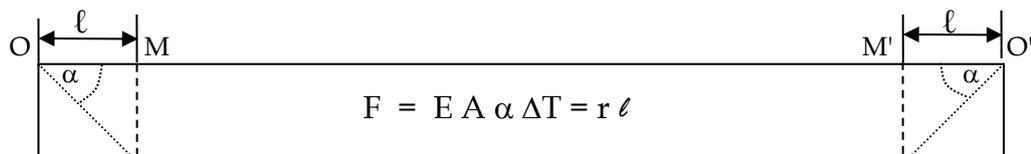
Keterangan :

E = modulus elastisitas *Young* (kg/cm^2)

A = luas penampang (cm^2)

Jika disubstitusi persamaan (3.26) pada (3.27), maka akan menjadi :

$$F = E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.50)$$



Gambar 3.12 Diagram Gaya Lawan Bantalan
(Sumber : PM No. 60 Tahun, 2012)

Panjang ℓ dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$l = OM = \frac{E \times A \times \alpha \times \Delta T}{r} \quad (3.51)$$

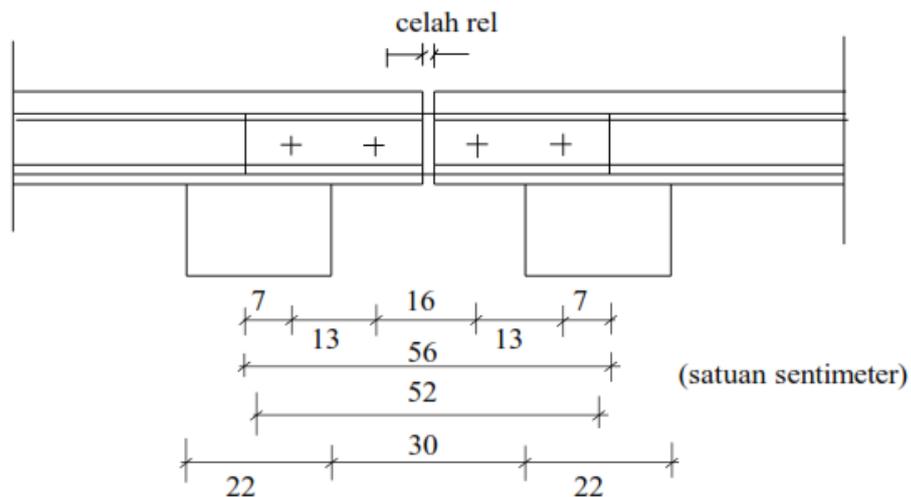
$r = Tg\alpha =$ Gaya lawan bantalan per satuan panjang

Persamaan panjang minimum rel digunakan persamaan :

$$L \geq 2\ell \quad (3.52)$$

4. Celah Sambungan

Di tempat sambungan rel, antara dua ujung rel harus ada celah untuk memberi tempat bagi timbulnya perubahan panjang rel akibat perubahan suhu. Besarnya celah pada rel standard an rel pendek tergantung pada suhu pemasang dan panjang rel, sedangkan celah pada rel panjang tergantung pada suhu pemasangan, tipe rel, dan bantalan yang digunakan.



Gambar 3.13 Celah Sambungan Pada Rel

(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60, 2012)

a. Celah Sambungan pada Rel Standard an Rel Pendek

Besarnya celah sambungan pada rel standard an rel pendek dapat dihitung dengan menggunakan cara yang digunakan oleh PT.Kereta Api yaitu:

$$G = L \times \lambda \times (40-t) + 2 \quad (3.53)$$

Dengan :

G : Besarnya celah Sambungan rel (mm)

L : Panjang rel (mm)

λ : Koefesien muai panjang rel

t : Suhu pemasangan rel ($^{\circ}\text{C}$)

dengan batasan batasan maksimum besarnya celah sambungan rel ialah 16mm. Berdasarkan cara tersebut dengan koefesien muai rel (λ) sebesar $1,2 \times 10^{-5}$, maka besarnya celah pada sambungan rel standar dan rel pendek dapat dilihat pada Tabel 3.11

Tabel 3.11 Besarnya Celah Sambungan Rel Untuk Rel Standar dan Rel Pendek Pada Semua Tipe Rel

Suhu Pemasangan ($^{\circ}\text{C}$)	Panjang Rel (m)			
	25	50	75	100
≤ 20	8	14	16	16
22	7	13	16	16
24	6	12	16	16
26	6	10	15	16
28	5	9	13	16
30	4	8	11	14
32	4	7	9	12
34	3	6	7	9
36	3	4	6	7
38	2	3	4	4
40	2	2	2	2
42	1	1	0	0
44	0	0	0	0
≥ 46	0	0	0	0

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

b. Celah Sambungan Rel pada rel panjang

Besarnya celah sambungan pada rel standard an rel pendek dapat dihitung dengan menggunakan cara yang digunakan oleh PT.Kereta Api yaitu :

$$G = \frac{E \times A \times \lambda \times (50 - t)^2}{2 \times r} + 2 \quad (3.54)$$

Dengan :

G = Besarnya celah sambungan rel (mm)

E = Modulus elastisitas rel

A = Luas penampang rel (mm²)

λ = Koefesien muai panjang rel

t = Suhu pemasangan (°C)

r = Gaya lawan bantalan tiap satuan panjang

Dengan batasan batasan maksimum besarnya celah sambungan rel ialah 16 mm. Berdasarkan cara tersebut dengan koefesien muai rel (λ) sebesar $1,2 \times 10^{-5}$, maka besarnya celah pada sambungan rel panjang untuk bantalan beton dan kayu dapat dilihat pada Tabel 3.11 dan Tabel 3.12

Tabel 3.12 Celah Sambungan Rel Untuk Rel Panjang Pada Bantalan Kayu

Suhu Pemasangan (°C)	Panjang Rel (m)			
	R.42	R.50	R.54	R.60
≤ 28	16	16	16	16
30	14	16	16	16
32	12	14	15	16
34	10	11	12	13
36	8	9	10	10
38	6	6	8	8
40	5	4	6	6
42	4	3	5	5
44	3	3	3	4
46	2	3	3	3
≥ 48	2	2	2	2

Sumber: Suryo Hapsoro Tri Utomo (2009)

Tabel 3.13 Celah Sambungan Rel Untuk Rel Panjang Pada Bantalan Beton

Suhu Pemasangan (C)	Panjang Rel (m)			
	R.42	R.50	R.54	R.60
≤ 22	16	16	16	16
24	14	16	16	16
26	13	14	15	16
28	13	12	13	14
30	10	11	11	12
32	8	9	10	10
34	7	8	8	9
36	6	6	7	7
38	5	5	5	6
40	4	4	4	5
42	3	3	3	4
44	3	3	3	3
≥ 46	2	2	2	2

Sumber: Suryo Hapsoro Tri Utomo (2009)

3.8 PENAMBAT

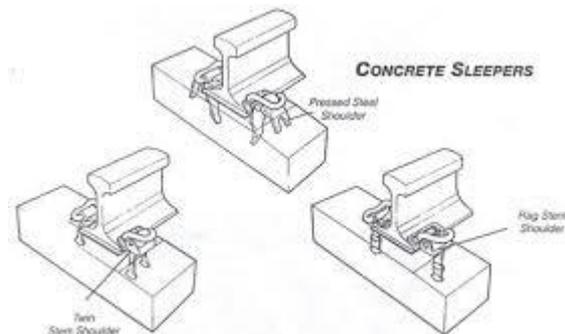
Penambat rel adalah suatu komponen yang menambatkan rel pada bantalan sedemikian rupa sehingga kedudukan rel adalah tetap, kokoh dan tidak bergeser. Jenis penambat yang dipergunakan adalah penambat elastik dan penambat kaku.

Penambat kaku terdiri atas paku rel, mur dan baut. Penambat elastik ganda terdiri dari pelat andas, pelat atau batang jepit elastik, alas rel, tarpon, mur dan baut.



Gambar 3. 14 Mur dan baut, tirpon dan paku rel

Pada bantalan beton, tidak diperlukan pelat landas, tetapi dalam hal ini tebal karet las rel harus disesuaikan dengan kecepatan maksimum.



Gambar 3. 15 Penambat pada bantalan beton

Penambat kaku tidak boleh dipakai untuk semua kelas jalan rel. Penambat elastik tunggal hanya boleh dipergunakan pada jalan kelas 4 dan kelas 5. Penambat elastik ganda dapat dipergunakan pada semua kelas jalan rel, tetapi tidak dianjurkan untuk jalan rel kelas 5.

3.9 BANTALAN

3.9.1 Fungsi Bantalan

Bantalan jalan rel mempunyai fungsi sebagai berikut :

- Mendukung rel dan meneruskan beban rel ke balas dengan bidang sebaran beban lebih luas sehingga memperkecil tekanan yang dipikul balas.
- mengikat rel (dengan penambat rel) sehingga gerakan rel arah horisontal tegak lurus sumbu sepur ataupun arah membujur searah sumbu sepur dapat ditahahn, sehingga jarak antara rel dan kemiringan kedudukan rel dapat dipertahankan
- memberikan stabilitas kedudukan sepur di dalam balas
- menghindarkan kontak langsung antara rel dengan air tanah

3.9.2 Bentuk Bantalan

Terdapat dua bentuk bantalan, yaitu bantalan arah membujur dan bantalan arah melintang. Apabila digunakan bantalan arah membujur, air hujan dapat terbendung, sehingga balas yang digunakan harus mampu menyalurkan dengan

baik air hujan yang terbenyung tersebut. untuk itu maka frekuensi pemeliharaan dan pembersihan balas menjadi tinggi, akibatnya biaya yang diperlukan menjadi besar. Selain itu, untuk menjaga agar jarak antar bantalan membujur dapat terjaga, diperlukan kontruksi penambat arah arah melintang. Geometri membujur bantalan arah membujur harus mengikuti geometri membujur jalan rel dan harus menerus, leh karena itu maka bahan yang paling cocok untuk bantalan arah membujur yaitu bantalan beton.

3.9.3 Jenis Bantalan

Bantalan dapat terbuat dari kayu, baja, atau beton, sehingga dikenal jenis-jenis bantalan sesuai dengan bahanya adalah sebagai berikut :

1. Bantalan Beton
2. Bantalan Baja
3. Bantalan Kayu

Pemilihan jenis bantalan yang digunakan adalah berdasarkan atas kelas jalan rel menurut peraturan kontruksi jalan rel yang berlaku (Standar Jalan rel Indonesia). Penggunaan bantalan yang akan di gunakan dalam tugas akhir ini yaitu bantalan beton

1. Bantalan Beton

PT. Kereta Api (Indonesia) saat ini, telah menggunakan bantalan beton di hampir seluruh jaringan jalan rel di Indonesia. Beberapa pertimbangan yang terkait dengan penggunaan bantalan beton dibandingkan bantalan kayu dan besi adalah faktor ketahanan, faktor *workability*, dan faktor ekonomi pemeliharaan. Penggunaan bantalan beton lebih diutamakan juga karena semakin sulitnya mendapatkan kayu yang memenuhi standar untuk bantalan dan berbagai kelemahan penggunaan bantalan besi. Selain itu, industri dalam negeri telah dapat membuat bantalan beton dengan baik.

- a. Keunggulan Bantalan Beton

Penggunaan bantalan beton memiliki keunggulan sebagai berikut :

- 1). Stabilitas baik karena berat sendiri satu balok bantalan mencapai 160–200kg, sehingga tahanan terhadap gaya vertikal, longitudinal dan

lateral menjadi lebih baik.

- 2). Kereta api dengan tonase berat dan kecepatan tinggi lebih sesuai menggunakan bantalan beton.
- 3). Umur konstruksi lebih panjang.
- 4). Biaya pemeliharaan yang rendah.
- 5). Pengendalian mutu bahan lebih mudah.
- 6). Bentuk dan proses pembuatannya bebas dan relatif mudah pembuatannya.
- 7). Komponen-komponennya sedikit dibandingkan dengan jenis lainnya.

b. Kelemahan Bantalan Beton

Meskipun demikian, terdapat beberapa kelemahan yang harus diperhatikan, diantaranya :

- 1). Kurang memiliki sifat elastik dibandingkan bantalan kayu dan besi.
- 2). Pemasangan secara manual sukar karena beratnya bantalan.
- 3). Kemungkinan terjadinya kerusakan pada saat mobilisasi ke lokasi dari pabrik.
- 4). Memiliki masalah kebisingan dan getaran karena sifatnya yang kurang mampu menahan getaran.
- 5). Nilai sisa konstruksi kemungkinan negatif.

c. Perencanaan Bantalan Beton Blok ganda (Bi-Blok)

Bantalan beton blok ganda terdiri dari dua buah blok beton bertulang yang satu dengan lainnya dihubungkan oleh batangan baja. Sebagai batang penghubung dapat digunakan juga potongan rel bekas (PD 10 tahun 1986). Bantalan blok ganda ini lebih baik dari bantalan kayu dikarenakan lebih berat dan stabil.

Momen (M) dihitung berdasarkan teori balok di atas tumpuan elastik sebagaimana telah dijelaskan pada perhitungan bantalan kayu. Gaya tarik dan tekan izin pada bantalan beton untuk mutu K-350 dan K-500 dapat dilihat dalam Tabel 3.13 berikut ini.

Tabel 3.14 Tegangan Izin Beton

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

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

d. Perhitungan untuk Dimensi Bantalan Beton Blok Ganda

Analisis tegangan pada bantalan didasarkan pada balok terbatas dengan perhitungan pada faktor kekakuan tertentu.

1). Penentuan dimensi bantalan Bi-Blok

Dimensi bantalan bi-blok telah di atur PM No.60 tahun 2012 yang di berikan pada Tabel berikut, beserta perbandingan bantalan bi-blok dari Negara lainnya.

Tabel 3.15 Dimensi Balok Sesuai Peraturan Menteri Perhubungan No.60 Tahun 2012

	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tinggi sisi luar (cm)	Tinggi sisi dalam (cm)
Pakistan	75,24	35,56	19,685	19,685
Perancis	79,05	31,75	22,86	20,32
Jerman	72,2	29	22,0	19,0
Indonesia	70	30	20,0 (tinggi rata-rata)	

Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012)

2). Mutu campuran beton

Mutu campuran beton mempunyai kuat tekan karakteristik tidak kurang dari K-385 (385 kg/cm²) yang dihasilkan dari asumsi dan perhitungan dari penjelasan PM no 60 tahun 2012

Jika bantalan beton bi-blok dengan ukuran sesuai Tabel , dengan factor beban static 1,7 dan q(beban merata asumsi)= 7,3 kg/cm². Maka penampang kritis bantalan di bawah rel dapat dihitung tegangan normalnya sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{1}{2}ql^2b}{\frac{1}{6}bh^2} \quad (3.55)$$

Kontrol tegangan normal

$$\sigma = 0,33 \cdot \sigma_{bk} \quad (3.56)$$

Kontrol tegangan geser

$$\tau_{pons} = \frac{Q}{2(bh)} = \frac{Ps \times FB}{2(bh)} \quad (3.57)$$

$$\tau_{pons} \leq 0,65 \sqrt{\sigma_{bk}} \quad (3.58)$$

3). Perencanaan Dimensi Bantalan Beton

Dimensi bantalan telah diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan No.60 tahun 2012 yang diberikan dalam Tabel 3.15 berikut ini, beserta perbandingan bantalan bi-blok dari negara lainnya.

4). Posisi Bantalan Terhadap Balas

Posisi Bantalan pada balas harus sedemikian sehingga kedudukan bantalan stabil. Dengan posisi bantalan yang tertanam pada balas, maka bantalan lebih stabil terhadap kemungkinan bergeser baik kearah samping maupun kearah longitudinal.

5). Jarak Bantalan

Secara ideal jarak bantalan atau jumlah bantalan dalam satu satuan panjang rel tergantung pada hal hal berikut :

- a). Tipe, potongan melintang, dan kekuatan rel
- b). Jenis dan kekuatan bantalan
- c). Balas tempat bantalan diletakan
- d). Beban gandar, volume dan kecepatan kereta api

Secara praktis di Indonesia digunakan jarak bantalan sebagai berikut :

- a). Jarak bantalan pada lintas lurus ialah 60 cm, sehingga jumlah bantalan yang dipasang adalah 1667 buah untuk tiap km panjang
- b). Pada tikungan/lengkung, jarak bantalan ialah sebesar 60 cm (diukur pada rel luar)

Jarak ini seragam sepanjang jalur, kecuali pada bantalan tempat sambungan rel berada.

3.10 BALAS

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.

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 disekitar bantalan rel.

Untuk menghemat biaya pembuatan jalan rel maka lapisan balas dibagi menjadi dua, yaitu lapisan balas atas dengan material pembentuk yang sangat baik dan lapisan alas bawah dengan material pembentuk yang tidak sebaik material pembentuk lapisan balas atas.

1. Lapisan Balas Atas

Lapisan balas atas terdiri dari batu pecah yang keras, dengan bersudut tajam (*angular*) dengan salah satu ukurannya antara 2-6 cm serta memenuhi syarat-syarat lain yang tercantum dalam peraturan bahan Jalan Rel Indonesia (PBJRI). Lapisan ini harus dapat meneruskan air dengan baik. Gradasi bahan yang diizinkan untuk digunakan sebagai bahan lapisan balas atas seperti yang tercantum dalam Tabel 3.16

Tabel 3.16 Gradasi Lapisan Atas

Ukuran nominal (inch)	Persen Lolos Saringan (%)							
	Ukuran saringan (inch)							
	3	2,5	2	1,5	1	0,75	0,5	3/8
2,5-0,75	100	90-100	25-60	25-60		0-10	0-5	
2-1		100	95-100	35-70	0-15		0-5	
1,5-0,75			100	90-100	20-15	0-15		0-5

Sumber: Utomo (2009)

Keterangan :

- a. Untuk jalan rel kelas I dan II digunakan ukuran minimal 2,5"-0,75"

b. Untuk jalan rel kelas III digunakan ukuran minimal 2"-1"

2. Lapisan Balas Bawah

Lapisan balas bawah terdiri dari kerikil halus, kerikil sedang atau pasir kasar yang memenuhi syarat-syarat yang tercantum dalam Peraturan Bahan Jalan Rel Indonesia (PBJRI) lapisan ini berfungsi sebagai lapisan penyaring (filter) antara tanah dasar dan lapisan balas atas dan harus dapat mengalirkan air dengan baik. Tebal minimum lapisan balas bawah adalah 15 cm. Persyaratan gradasi bahan balas bawah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.17

Tabel 3.17 Gradasi Lapisan Bawah

Ukuran Saringan	2"	1"	3/8"	No.10	No.40	No.200
Persen Lolos (optimum)	100	95	67	38	21	7
Daerah yang diperbolehkan (% lolos)	100	90-100	50-84	26-50	12-30	0-10

Sumber: Utomo (2009)

3. Bentuk dan Dimensi Lapisan Balas

Terdapat dua bentuk dan dimensi potongan melintang lapisan balas (balas atas dan balas bawah), yaitu :

- a. Potongan melintang pada jalan lurus
- b. Potongan melintang pada lengkung/tikungan

Kedua bentuk dan dimensi dimaksud dapat dilihat pada gambar 3.11 dan gambar 3.12. Dengan menggunakan persyaratan bahan balas seperti diuraikan di atas, ketebalan lapisan balas yang diperlukan adalah sesuai dengan kelas jalan rel seperti yang tercantum pada Tabel 3.18

Tabel 3.18 Ukuran-Ukuran Pada Lapisan Balas

	Kelas Jalan Rel				
	I	II	III	IV	V
d1 (cm)	30	30	30	25	25
b (cm)	150	150	140	140	135
c (cm)	235	235	225	215	210
k1 (cm)	265-315	265-315	240-270	240-250	240-250
d2 (cm)	15-50	15-50	15-50	15-35	15-35
e (cm)	25	25	22	20	20
k2 (cm)	375	375	325	300	300
a (cm)	185-237	185-237	170-200	170-190	170-190

Sumber: PM No.60 tahun (2012)

Bentuk dan ukuran lapisan sub-balas yang digunakan di Indonesia, yaitu mengacu pada persyaratan yang telah ditetapkan yaitu :

1) Ukuran terkecil dari tebal lapisan sub-balas adalah d_2 yang dihitung menggunakan persamaan :

$$d_2 = d - d_1 > 15 \text{ cm} \quad (3.59)$$

d dihitung dengan persamaan

$$d = 1,35 \sqrt{\frac{58 \cdot \sigma_1}{\sigma_t} - 10} \quad (3.60)$$

Sesuai dengan salah satu fungsinya, lapisan sub-balas merupakan lapisan penahan sekaligus penerus beban yang diterima dari lapisan balas kepada lapisan tanah dasar. Akibat penyebaran tekanan, lapisan dibawahnya akan mendukung tekanan yang lebih kecil daripada yang dipikul oleh lapisan balas. Analisis tekanan pada balas, σ_1 dapat dihitung menggunakan konsep *beam on elastic foundation* menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_1 = \frac{P_d \cdot \lambda}{2b} \frac{1}{(\sin \lambda L + \sin \lambda L)} \begin{bmatrix} 2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cos \lambda L) - \\ 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda L) + \\ \sin 2\lambda a (\sin 2\lambda c - \sinh \lambda L) - \\ \sin 2\lambda a (\sin 2\lambda c - \sinh \lambda L) \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$P_d = \left[1 + 0,01 \times \left(\frac{V}{1,609} - 5 \right) \right] P_s \quad (3.62)$$

Keterangan :

P_d = beban roda akibat perilaku dinamis (kg),

P_s = beban roda statik (kg),

V = kecepatan kereta api (km/jam),

% beban = prosentase beban yang masuk ke dalam bantalan.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} \quad (3.63)$$

$$k = b \times ke \quad (3.64)$$

Keterangan :

- B = lebar bawah bantalan (cm)
 Ke = modulus reaksi balas (kg/cm^3)
 EI = kekakuan lentur bantalan (kg/cm^2)
 L = Panjang bantalan (cm)
 a = jarak dari sumbu vertikal rel keujung bantalan (cm)
 c = setengah jarak antara sumbu vertikal rel (cm).

2) Jarak dari sumbu rel ke tepi lapisan sub-balas dihitung menggunakan persamaan :

a) Pada sepur yang lurus

$$K_1 > B + 2d_1 + M \quad (3.61)$$

b) Pada sepur ditikungan

$$K_1 d = K_1 \quad (3.62)$$

$$K_1 l = B + 2d_1 + M + 2 E \quad (3.63)$$

$$E = (B + \frac{1}{2}) \times h/L + t \quad (3.64)$$

Keterangan

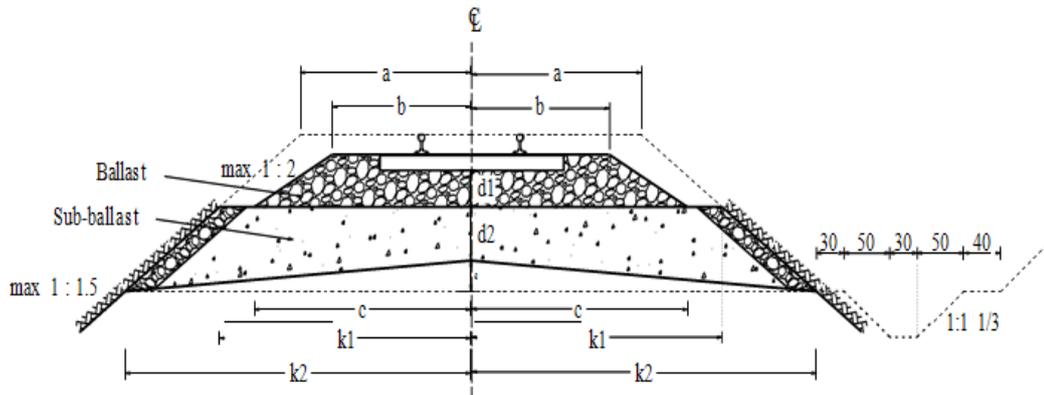
L = Jarak antar kedua sumbu vertikal rel (cm)

t = Tebal bantalan (cm)

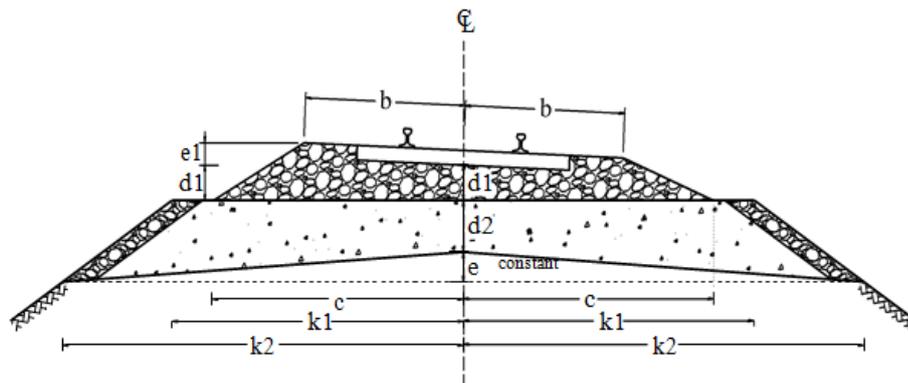
h = peninggian rel (cm)

M = harga berkisar 40 hingga 90 cm, harga 40 cm agar lereng balas lebih terjamin kestabilanya dan 90 cm disediakan juga ruang untuk pejalan kaki.

Berikut merupakan gambar potongan melintang pada jalan lurus dan tikungan :



Gambar 3.16 Potongan Melintang Pada Jalan Lurus
(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60, 2012)



Gambar 3.17 Potongan Melintang Pada Tikungan
(Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan No.60, 2012)

