

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kelas Jalan Rel

Kelas jalan rel merupakan suatu klasifikasi yang mempengaruhi ketentuan-ketentuan yang akan digunakan pada jalan rel, misalnya kecepatan maksimum, beban gandar, tipe rel dan lain-lain. Kelas jalan rel diatur dalam Permen No 60 tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api.

Tabel 2.1 Kelas Jalan Rel untuk Sepur 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

Tabel 2.2 Kelas Jalan Rel untuk Sepur 1435 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	$> 20.10^6$	160	22,5	R.60	Beton 60	Elastis Ganda	30	60
II	$10.10^6 - 20.10^6$	140	22,5	R.60	Beton 60	Elastis Ganda	30	50
III	$5.10^6 - 10.10^6$	120	22,5	R.60/R.54	Beton 60	Elastis Ganda	30	40
IV	$< 5.10^6$	100	22,5	R.60/R.54	Beton 60	Elastis Ganda	30	40

2.2 Membuat Rencana Trase Jalan Rel

Dalam perencanaan jalan rel, perencanaan peta topografi dan peta situasi tidak boleh dilupakan. Adanya peta topografi akan membantu tercapainya kondisi dan keadaan gambaran medan secara keseluruhan dalam bentuk mikro.

Keadaan tinggi rendahnya medan atau tanah dapat diketahui dengan membuat “trase jalan rel” sehingga perencanaan jalan rel mendapatkan trase jalan rel yang ideal sesuai dengan permintaan masyarakat dan tuntutan lalu lintas. Besar volume galian dan timbunan akan didapat, biasanya di usahakan terhadap keseimbangan antara beratnya volume timbunan dan volume galian. Adanya keseimbangan tersebut, akan lebih mempermudah dalam pengerjaan, efisiensi waktu dan biaya. Jika di dalam perencanaan di dapati bahwa jalan rel terdapat medan menanjak atau lereng, maka dalam hal ini diperlukan adanya lereng tambahan (climbing line) jalur penggunaan.

Ketika merencanakan jalan rel, diusahakan medan yang di atur dari medan berbukit atau gunung karena lebih hemat dari segi biaya dan mempermudah dalam pelaksanaan.

2.3 Geometrik Jalan Rel

Geometri jalan rel mencakup bentuk jalan rel guna memberi pemenuhan kebutuhan yang aman dan nyaman selama jangka waktu rencana. Dalam perancangan geometrik jalan rel mencakup Alinyemen horizontal (bagian lurus dan lengkung), Alinyemen vertikal (bagian lurus dan lengkung), dan bagian khusus (lebar sepur).

2.3.1 Kecepatan

Kecepatan merupakan jarak yang mampu ditempuh dalam suatu kurun waktu tertentu. Beberapa terminologi terkait kecepatan dalam perencanaan konstruksi jalan rel adalah sebagai berikut.

1. Kecepatan Maksimum

Kecepatan maksimum adalah kecepatan tertinggi yang diijinkan untuk operasi suatu rangkaian kereta pada lintas tertentu. Besarnya kecepatan maksimum ditentukan oleh kelas jalan rel, lebar sepur, dan daya angkut lintasnya sebagaimana telah dijelaskan di tabel klasifikasi jalan rel diatas.

2. Kecepatan Rencana

Secara defintif, kecepatan rencana adalah kecepatan yang digunakan untuk merencanakan konstruksi jalan rel. Kecepatan rencana suatu jalan rel berdasarkan kegunaannya terdiri atas tiga:

a. Untuk perencanaan struktur jalan rel

Besarnya adalah 125% kecepatan maksimum

b. Untuk perencanaan peninggian

$$V_{rencana} = c \times \frac{\sum N_i \times V_i}{\sum N_i}$$

dengan :

$$c = 1,25$$

Ni = Jumlah Kereta api yang lewat

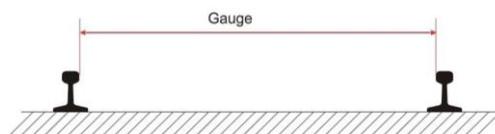
Vi = Kecepatan Operasi

- c. Untuk perencanaan jari-jari lengkung lingkaran dan lengkung peralihan besarnya sama dengan kecepatan maksimum

2.3.2 Lebar Sepur

Lebar sepur (*gauge*) dinyatakan sebagai jarak terkecil antara kedua sisi kepala rel, diukur pada daerah 0-14 mm di bawah permukaan teratas kepala rel. Besaran ini berbandung lurus terhadap kestabilan dan kecepatan kereta api. Penggunaan lebar sepur bervariasi di seluruh dunia. Beberapa di antaranya adalah :

1. Lebar 700 mm yang digunakan sebagai jalur lori tebu pabrik gula di Jawa
2. Lebar 1000 mm (*meter gauge*) yang digunakan di Malaysia
3. Lebar 1067 mm (*narrow gauge*) berukuran 3 kaki 6 inci yang digunakan di Indonesia dan cocok untuk kontur gunung
4. Lebar 1435 mm (*standard gauge*) berukuran 4 kaki 8,5 inci yang umum digunakan di banyak negara



Gambar 2.1 Ilustrasi Lebar Sepur

Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 sendiri memberikan persyaratan teknis untuk jalan rel dalam dua lebar sepur yakni 1067 mm dan 1435 mm.

2.3.3 Alinyemen Horizontal

Alinyemen horizontal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang horizontal. Alinyemen horizontal terdiri dari garis lurus dan lengkungan. Pada saat perancangan tahap ini dibutuhkan data berupa data pengukuran tanah yang mencakup koordinat tikungan, jarak lintasan, dan sudut tikungan.

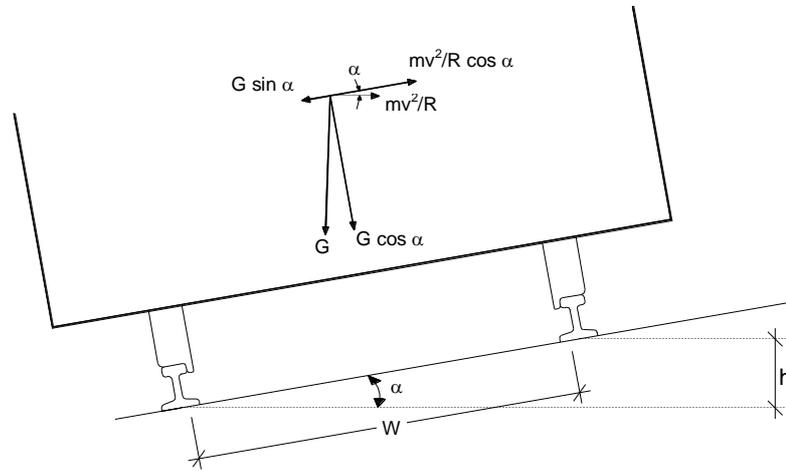
2.3.3.1 Lengkung Lingkaran

Lengkung lingkaran dibutuhkan jika terdapat dua bagian lurus yang perpanjangannya saling membentuk sudut. Lengkung ini adalah salah satu cara menyeimbangi gaya sentrifugal ketika kereta melakukan manuver belok agar tidak terlempar. Perencanaan lengkung lingkaran dapat dikombinasikan dengan lengkung peralihan atau tidak sama sekali. Kecepatan rencana menjadi salah satu pertimbangan dimensi lengkung seperti tertera di tabel berikut.

Tabel 2.3 Jari-jari Minimum Lengkung Lingkaran

Kecepatan Rencana (Km/ jam)	Jari – jari minimum lengkung lingkaran tanpa lengkung peralihan (m)	Jari – jari minimum lengkung lingkaran yang diijinkan 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

1. Gaya Sentrifugal Diimbangi Sepenuhnya Oleh Gaya Berat



Gambar 2.2 Peninggian Rel Normal

$$G \sin \alpha = \frac{m.v^2}{R} \cos \alpha$$

$$G \sin \alpha = \frac{G.v^2}{g.R} \cos \alpha$$

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{g.R} \quad ; \quad \tan \alpha = \frac{h}{w}$$

$$h = \frac{wv^2}{gR}$$

Dengan memasukkan nilai w dan g , maka :

$$h = \frac{8,8 \times v^2}{R}$$

$$h = \frac{8,8 \times v^2}{R}$$

Dimana :

R = jari-jari lengkung horizontal (m)

V = kecepatan rencana (km/j)

h = peninggian rel pada lengkung horizontal (mm)

w = jarak antara kedua titik kontak roda dan rel (1120 mm)

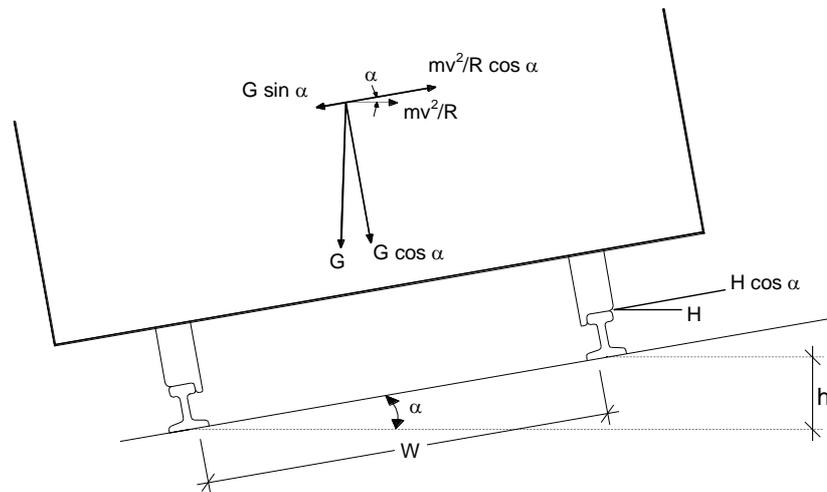
g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)

Dengan peninggian maksimum $h = 110$ mm maka :

$$R = \frac{8,8 \cdot v^2}{110}$$

$$R_{\min} = 0,08 v^2$$

2. Gaya Sentrifugal diimbangi oleh Gaya Berat dan Gaya Dukung Komponen Jalan Rel



Gambar 2.3 Peninggian Rel Minimum

$$m \cdot \frac{v^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha + H \cdot \cos \alpha$$

$$G \sin \alpha = \left(\frac{m \cdot v^2}{R} - H \right) \cdot \cos \alpha$$

$$G \tan \alpha = \frac{Gv^2}{gR} - H$$

$$H = m \cdot a = \frac{G}{g} \cdot a$$

$$\tan \alpha = \frac{h}{W}$$

$$G \frac{h}{W} = \frac{Gv^2}{gR} - \frac{G}{g} a$$

$$a = \frac{v^2}{R} - g \frac{h}{W}$$

Dimana:

a = percepatan sentrifugal (m/detik²)

Percepatan sentrifugal ini maksimum 0,0478 g, karena harga ini penumpang masih merasa nyaman.

$$\text{Jadi } a_{\text{maks}} = 0,0478 \text{ g}$$

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

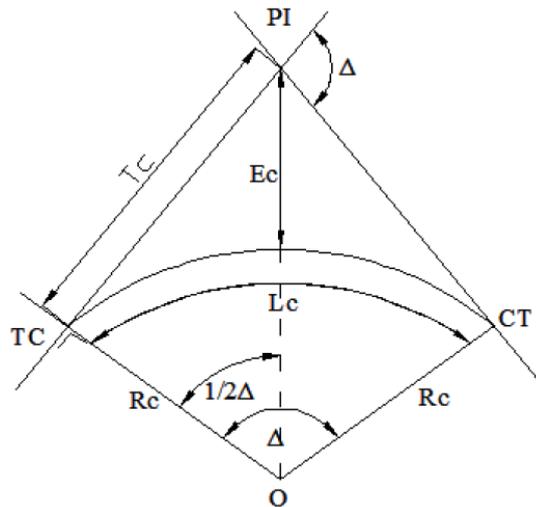
$$R_{\text{min}} = 0,054 \cdot v^2$$

Jari-jari minimum pada lengkung yang tidak memerlukan peninggian. Kondisi dimana lengkung peralihan (l_h) tidak diperlukan, jika tidak ada peninggian yang harus dicapai ($h=0$), berdasarkan rumus peninggian minimum

$$h = 8,8 \frac{v^2}{R} - 53,54$$

jika $h = 0$ maka : $R = 0,164.v^2$

2.3.3.2 Lengkung Horizontal tanpa Lengkung Peralihan (FC)



Rumus:

$$T_c = R_c \cdot \tan \left(\frac{\Delta}{2} \right)$$

$$L_c = 2 \cdot \pi \cdot R_c \cdot \frac{\Delta}{360^\circ}$$

$$E_c = T_c \cdot \tan \left(\frac{\Delta}{4} \right)$$

Sta. TC = titik awal lengkung

$$\text{Sta. CT} = \text{TC} + L_c$$

Dimana:

Δ = sudut luar di PI = sudut pusat lingkaran di O

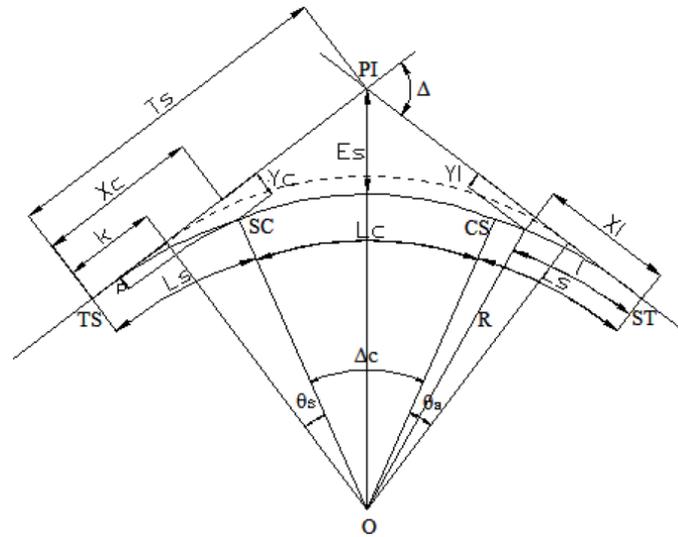
T_c = panjang tangen = jarak dari T_c ke PI

L_c = panjang busur lingkaran

E_c = jarak luar

R_c = jari-jari lingkaran

2.3.3.3 Lengkung Horizontal dengan Lengkung Peralihan (SCS)



Rumus:

$$L_h = L_s = 0,01 \cdot v \cdot h \quad (\text{m})$$

$$\theta_s = 28,648 L_s / R_c \quad (\text{derajat})$$

$$\theta_s = L_s / (2 \cdot R_c) \quad (\text{rad})$$

$$Y_c = L_s \cdot \theta_s / 3 \quad (\text{m})$$

$$X_c = L_s - (L_s \cdot \theta_s^2) / 10 \quad (\text{m})$$

$$k = X_c - R_c \sin \theta_s \quad (\text{m})$$

$$p = Y_c - R_c (1 - \cos \theta_s) \quad (\text{m})$$

$$T_s = (R_c + p) \tan \Delta / 2 + k \quad (\text{m})$$

$$E_s = (R_c + p) \sec \Delta / 2 - R_c \quad (\text{m})$$

$$\Delta_c = \Delta - 2 \theta_s \quad (\text{derajat})$$

$$L_c = \Delta_c / 360^\circ \cdot (2\pi R_c) \quad (\text{m})$$

$$X_i = l \left(1 - \frac{l^4}{40 R_c^2 L_s^2} + \frac{l^8}{3456 R_c^4 L_s^4} - \frac{l^{12}}{599040 R_c^6 L_s^6} + \dots \right)$$

$$Y_i = \frac{l^3}{6RcLs} \left(1 - \frac{l^4}{56Rc^2Ls^2} + \frac{l^8}{7040Rc^4Ls^4} - \frac{l^{12}}{1612800Rc^6Ls^6} + \dots \right)$$

dimana:

PI = titik perpotongan garis tangen utama

TS = titik perubahan dari tangen ke spiral

SC = titik perubahan dari spiral ke circle

CS = titik perubahan dari circle ke spiral

Rc = jari-jari lengkung lingkaran

l = panjang busur spiral dari TS ke suatu titik sembarang

Lh = Ls = panjang lengkung peralihan

Ts = jarak dari TS ke PI

Es = panjang eksternal total dari PI ke tengah busur lingkaran

Lc = panjang lengkung lingkaran

k = jarak dari TS ke titik proyeksi pusat lingkaran pada tangen

p = jarak dari busur lingkaran tergeser terhadap garis tangen

Δ = sudut pertemuan antara tangen utama

θ_s = sudut spiral

Xc, Yc = koordinat SC atau CS terhadap TS – PI atau PI – TS

Xi, Yi = koordinat setiap titik pada spiral terhadap TS – PI atau PI – TS

Sta TS = titik awal lengkung

Sta SC = TS + Ls

Sta CS = TS + Ls + Lc

Sta ST = TS + Ls + Lc + Ls

Cara Membuat Lengkung Horisontal :

- a) Tentukan posisi PI beserta sudut pertemuan antara tangen utamanya (Δ).
- b) Tarik garis dari PI sepanjang T_s sehingga didapat titik TS.
- c) Dari TS, tarik garis sepanjang k dan $\frac{1}{2} p$ sehingga didapat tengah-tengah lengkung spiral antara TS – SC.
- d) Titik SC dibuat dari penarikan garis sepanjang X_c, Y_c dari titik TS.
- e) Gunakan X_i dan Y_i untuk mendapatkan titik-titik sembarang sepanjang lengkung spiral.

2.3.3.4 Pelebaran Sepur

Perlebaran sepur dilakukan agar roda kendaraan rel dapat melewati lengkung tanpa mengalami hambatan. Hal ini dicapai dengan menggeser rel dalam kearah dalam. Besar perlebaran sepur dipengaruhi oleh jari-jari tikungan yang dirancang dan lebar sepur yang digunakan berikut :

Tabel 2.4 Pelebaran Jalan Rel Lebar Sepur 1067 mm

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

Tabel 2.5 Pelebaran Jalan Rel Lebar Sepur 1435 mm

Jari – Jari Tikungan (m)	Pelebaran (mm)
$R > 400$	0
$350 < R \leq 400$	5
$300 < R \leq 350$	10
$250 < R \leq 300$	15
$R \leq 250$	20

Cara lain yang dapat ditempuh untuk mengurangi dampak gaya sentrifugal pada saat kereta menikung di belokan adalah dengan melakukan peninggian rel. Besar peninggian rel bergantung pada lebar sepur, jari-jari, dan kecepatan rencana tikungan.

2.3.3.5 Peninggian Rel

Ada 3 macam peninggian, yaitu:

a. Peninggian maksimum

Berdasarkan stabilitas kereta api pada saat berhenti di bagian lengkung kemiringan maksimum, dibatasi sampai 1 % atau $h_{maks} = 110$ mm.

b. Peninggian minimum

Berdasarkan gaya maksimum yang mampu dipikul rel dan kenyamanan bagi penumpang di dalam kereta.

Rumus:

$$h_{min} = 8,8 (V^2 / R) - 53,5$$

c. Peninggian normal

Kondisi rel tidak ikut memikul gaya sentrifugal sepenuhnya diimbangi oleh komponen gaya berat.

Rumus:

$$h_{normal} = 5,95 (V^2 / R)$$

keterangan:

h_{min} = peninggian minimum (mm)

h_{normal} = peninggian normal (mm)

V = kecepatan rencana (km/jam)

R = jari-jari lengkung (m)

Tabel 2.6 Peninggian Jalan Rel Lebar Sepur 1067 m

$$h_{normal} = 5,95 \times \frac{(V_{rencana})^2}{jari - jari}$$

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

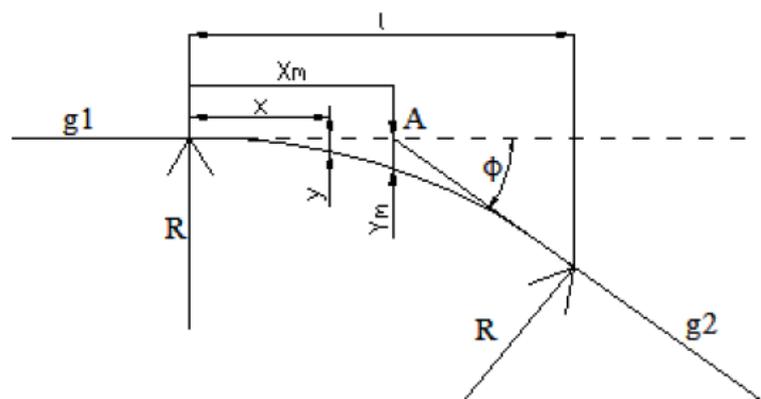
Tabel 2.7 Peninggian Jalan Rel Lebar Sepur 1435 mm

$$h_{\text{normal}} = 8,1 \times \frac{(V_{\text{rencana}})^2}{\text{jari} - \text{jari}}$$

Jari-Jari (m)	Peninggian (mm) Pada Setiap Kecepatan Rencana (km/jam)										
	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60
100											
150											
200											150
250											120
300										135	100
350									150	115	85
400									130	100	75
450								150	120	90	65
500								135	105	80	60
550							150	120	95	75	55
600							135	110	90	70	50
650							125	105	80	85	45
700						145	120	95	75	60	45
750						135	110	90	70	55	40
800					150	125	105	85	65	50	40
850					140	120	100	80	65	50	35
900					130	110	90	75	60	45	35
950				145	125	105	90	70	55	45	35
1000				140	120	100	85	70	55	40	30
1100			145	125	110	90	75	60	50	40	30
1200			135	115	100	85	70	55	45	35	25
1300		145	125	110	90	80	65	55	40	35	25
1400	150	135	115	100	85	75	60	50	40	30	25
1500	140	125	110	95	80	70	55	45	35	30	20
1600	130	115	100	90	75	65	55	45	35	25	20
1700	125	110	95	85	70	60	50	40	35	25	20
1800	120	105	90	80	65	55	45	40	30	25	20
1900	110	100	85	75	65	55	45	35	30	25	20
2000	105	95	80	70	60	50	45	35	30	20	15
2500	85	75	65	55	50	40	35	30	25	20	15
3000	70	65	55	50	40	35	30	25	20	15	10
3500	60	55	50	40	35	30	25	20	15	15	10
4000	55	50	40	35	30	25	25	20	15	10	10

2.3.4 Alinyemen Vertikal

Alinyemen vertikal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang vertikal. Lebih spesifik lagi, Alinyemen vertikal terdiri dari garis lurus, dengan atau tanpa kelandaian, dan lengkung vertikal yang berupa busur lingkaran. Pada saat perancangan tahap ini dibutuhkan data berupa data pengukuran tanah yang mencakup elevasi trase.



Gambar 2.4 Lengkung Vertikal

Rumus:

$$\phi = |g_1 - g_2|$$

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{R} + C1; \quad x = 0, \quad \frac{dy}{dx} = 0, \quad \text{maka } C1 = 0$$

$$Y = \frac{x^2}{2R} + C2; \quad x = 0, \quad y = 0, \quad \text{maka } C2 = 0$$

$$\text{Jadi: } \frac{dy}{dx} = \frac{x}{R} \quad \text{dan} \quad \boxed{Y = \frac{x^2}{2R}}$$

Letak titik A (X_m, Y_m)

a. $x = \ell$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\ell}{R}; \quad \ell = \varphi R$$

$$X_m = OA = \frac{1}{2} \ell$$

$$X_m = \frac{R}{2} \varphi$$

b. $Y = \frac{x^2}{R}; \quad \ell = \varphi R$

$$Y = Y_m; \quad X = X_m = \frac{1}{2} \ell$$

$$Y = \frac{\frac{1}{4} \ell^2}{2R} = \frac{\varphi^2 R^2}{8R}$$

$$Y_m = \frac{R}{8} \varphi^2$$

$$K_m \text{ PLV} = K_m \text{ PI} - X_m$$

$$\text{Elv PLV} = \text{Elv PI} - X_m * \varphi$$

$$K_m \text{ PV} = K_m \text{ PI}$$

$$\text{Elv PV} = \text{Elv PV} - Y_m$$

$$K_m \text{ PTV} = K_m \text{ PI} + X_m$$

$$\text{Elv PTV} = \text{Elv PI} + X_m * \varphi$$

keterangan:

X_m = jarak dari awal lengkung vertikal sampai titik tekuk A (m)

Y_m = jarak dari titik tekuk A ke elevasi rencana (m)

R = jari-jari lengkung vertikal (m)

L = panjang lengkung peralihan (m)

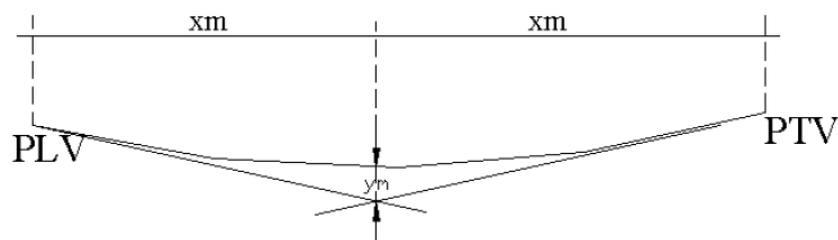
ϕ = perbedaan landai (%)

g_1, g_2 = kelandaian 1 dan 2 (%)

A = titik tekuk

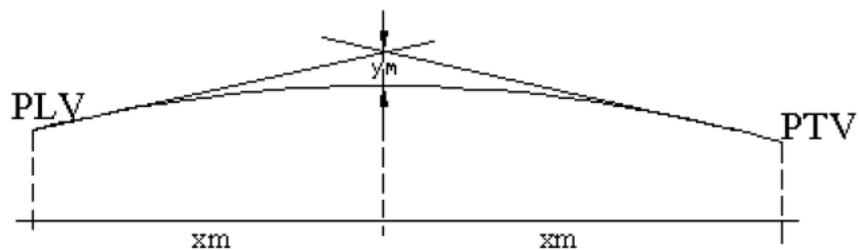
Ada 2 macam lengkung vertikal, yaitu :

1) Lengkung Vertikal Cekung



Gambar 2.5 Lengkung Vertikal Cekung

2) Lengkung Vertikal Cembung



Gambar 2.6 Lengkung Vertikal Cembung

2.3.4.1 Pengelompokan Lintas Berdasarkan Kelandaian

Tabel 2.8 Pengelompokan Lintas Berdasarkan Kelandaian

Kelompok	Kelandaian (‰)
Emplasemen	0 sampai 1,5
Lintas datar	0 sampai 10
Lintas pegunungan	10 sampai 40
Lintas dengan rel gigi	40 sampai 80

Untuk emplasemen kelandaianya adalah 0 sampai 1,5 ‰

2.3.4.2 Landai Penentu

Landai penentu adalah suatu kelandaian (pendakian) yang terbesar yang ada pada suatu lintas lurus. Besar landai penentu terutama berpengaruh pada kombinasi daya tarik lok dan rangkaian yang dioperasikan. Nilai maksimum landai penentu dipengaruhi oleh kelas jalan rel seperti tercantum di tabel berikut.

Tabel 2.9 Landai Penentu Maksimum

Kelas Jalan Rel	Landai Penentu Maksimum
1	10 ‰
2	10 ‰
3	20 ‰
4	25 ‰
5	25 ‰

Kelandaian maksimum yang diizinkan dalam sebuah emplasemen adalah 1,5‰. Lengkung vertikal menghubungkan dua garis lurus yang berguna agar kereta dapat melewati perubahan kelandaian secara bertahap dan tidak tersangkut di jalannya. Besar jari-jari minimum dari lengkung vertikal dipengaruhi besar kecepatan rencananya.

Tabel 2.10 Jari-jari Minimum Lengkung Vertikal

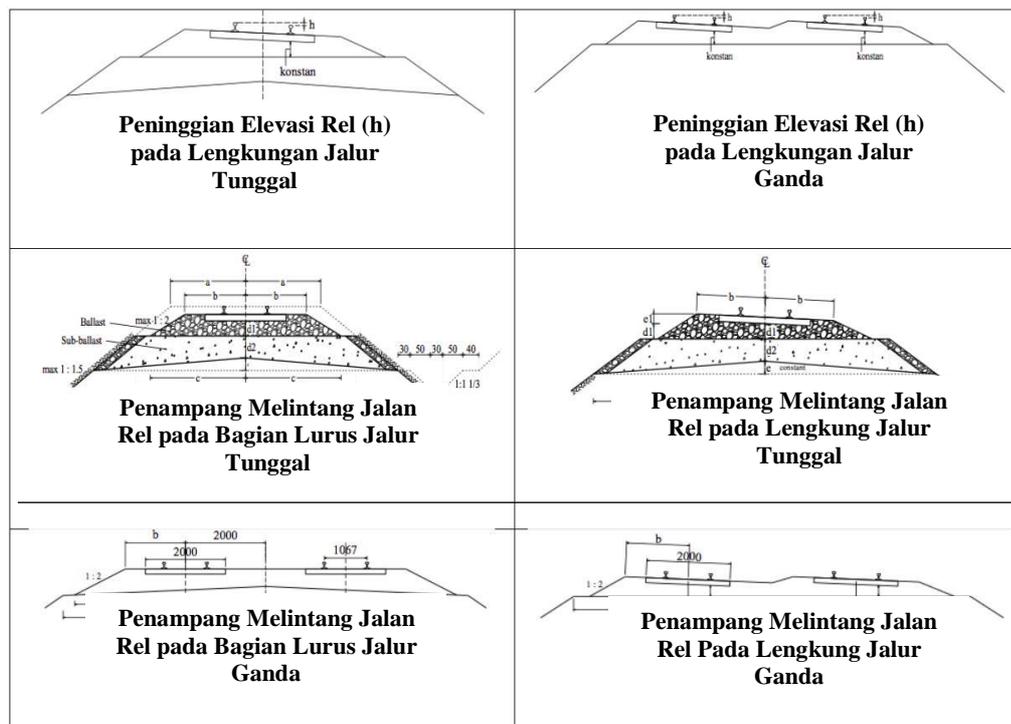
Kecepatan Rencana (km/jam)	Jari – Jari Minimum Lengkung Vertikal (m)
Lebih besar dari 100	8000
Sampai 100	6000

Jika terdapat dua lengkung vertikal berurutan, suatu segmen lurus dengan panjang paling sedikit 20 meter harus disisipkan di antara kedua lengkung.

Koordinasi Alinyemen mengisyaratkan agar lengkung vertikal tidak berimpit atau bertumpangan dengan lengkung horizontal.

2.3.5 Potongan Melintang

Penampang melintang jalan rel didefinisikan sebagai potongan pada jalan rel, dengan arah tegak lurus sumbu jalan rel, di mana terlihat bagian-bagian dan ukuran-ukuran jalan rel dalam arah melintang. Potongan melintang jalur tunggal dan jalur ganda secara umum dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.7 Penampang Melintang Jalan Rel untuk Berbagai Kondisi Besaran dimensi komponen potongan melintang yang diberikan pada gambar di atas bervariasi terhadap kelas jalan rel yang dibuat. Poin tersebut dirangkum dalam sebuah tabel di bawah ini.

Tabel 2.11 Spesifikasi Dimensi Potongan Melintang

KELAS JALAN	V Maks (km/jam)	d1 (cm)	b (cm)	c (cm)	k1 (cm)	d2 (cm)	e (cm)	k2 (cm)
I	120	30	150	235	265	15 – 50	25	375
II	110	30	150	235	265	15 – 50	25	375
III	100	30	140	225	240	15 – 50	22	325
IV	90	25	140	215	240	15 – 35	20	300
V	80	25	135	210	240	15 – 35	20	300

Lebar formasi badan jalan (tidak termasuk pam tepi) adalah jarak dari sumbu jalan rel ke tepi terluar formasi badan jalan.

1. Lebar badan jalan untuk pekerjaan tanah

Jarak ini harus diambil lebih besar dari yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2.12 Lebar Badan Jalan

Kecepatan Maksimum Desain	L	
	Rel 1067 mm (cm)	Rel 1435 mm (cm)
120 km/jam dan 110 km/jam jalur	315 (300)	426 (396)
100 km/jam jalur	295 (285)	396 (366)
90 km/jam jalur	285 (275)	366 (336)
80 km/jam jalur	250 (240)	335 (305)

Tanda dalam kurung berarti jarak yang akan digunakan dalam kasus-kasus seperti kondisi topografi yang tidak dapat dielakkan. Besar L hanya meliputi setengah lebar badan jalan rel

2. Tambahan Lebar karena Peninggian Rel

Besaran L yang telah dijelaskan di atas harus ditambah dengan nilai yang lebih besar dari y , sebagaimana dihitung dengan rumus berikut :

$$y = 3,35 C$$

dengan :

y = Besarnya pelebaran (mm), satuan pelebaran adalah 50 mm

C = Peninggian rel yang tersedia (mm)

Namun apabila dilakukan proteksi balas, maka tambahan lebar karena peninggian rel dapat diabaikan.

3. Lebar badan jalan untuk jalan rel di atas permukaan tanah (jalan rel layang) harus $\geq 2,75$ m dari as jalan rel untuk jalan lurus dan pada jalan lengkung ditambah dengan pelebaran ruang bebas sesuai besarnya jari-jari lengkung.
4. Lebar badan jalan rel untuk jalur belok (*siding track*) harus lebih besar dari yang ditunjukkan pada tabel di atas, untuk kecepatan kurang dari 70 km/jam.

Untuk kepentingan perencanaan, suatu jalur kereta api harus memiliki pengaturan ruang yang terdiri dari ruang manfaat jalur kereta api; ruang milik jalur kereta api; dan ruang pengawasan jalur kereta api. Ketentuan mengenai

ruang manfaat jalur kereta api, ruang milik jalur kereta api dan ruang pengawasan jalur kereta api sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Untuk kepentingan operasi suatu jalur kereta api harus memiliki pengaturan ruang yang terdiri dari:

1. Ruang bebas

Yakni ruang di atas jalan rel yang senantiasa harus bebas dari segala rintangan dan benda penghalang; ruang ini disediakan untuk lalu lintas rangkaian kereta api. Ukuran ruang bebas untuk jalur tunggal dan jalur ganda, baik pada bagian lintas yang lurus maupun yang melengkung, untuk lintas elektrifikasi dan non elektrifikasi.

2. Ruang bangun

Yakni ruang di sisi jalan rel yang senantiasa harus bebas dari segala bangunan tetap. Batas ruang bangun diukur dari sumbu jalan rel pada tinggi 1 meter sampai 3,55 meter. Jarak ruang bangun tersebut ditetapkan sebagai berikut :

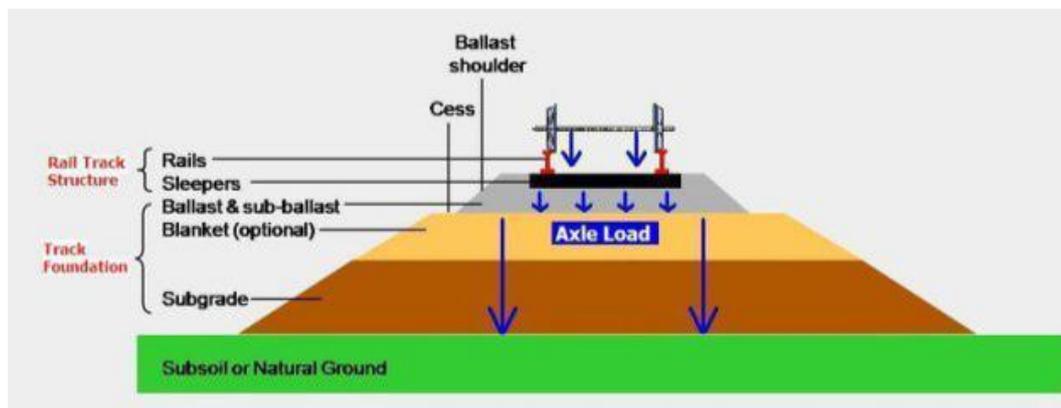
Tabel 2.13 Ruang Bangun Jalan Rel

Segmen Jalur	Lebar Jalan Rel 1067 mm dan 1435 mm	
	Jalur Lurus	Jalur Lengkung R < 800
Lintas Bebas	minimal 2,35 m di kiri kanan as jalan rel	R ≤ 300, minimal 2,55 m R > 300, minimal 2,45 m di kiri kanan as jalan rel
Emplasemen	minimal 1,95 m di kiri kanan as jalan rel	minimal 2,35 m di kiri kanan as jalan rel
Jembatan, Terowongan	2,15 m di kiri kanan as jalan rel	2,15 m di kiri kanan as jalan rel

2.4 Komponen Jalan Rel

Struktur jalan rel dewasa ini terdiri dari beberapa jenis. Untuk struktur rel tradisional umumnya masih menggunakan *ballast track* namun sekarang sudah ada jenis lainnya misalnya *ballastless track*. Dalam pengerjaan tugas besar ini akan digunakan *ballastless track* atau *ballast track*.

Untuk suatu struktur rel dengan ballast (*ballast track*) memiliki beberapa komponen yang menunjang struktur tersebut dalam masa layannya. Berikut merupakan ilustrasi dari komponen-komponen jalan rel.



Gambar 2.8 Komponen Jalan Rel

Komponen – komponen jalan rel terdiri dari :

1. Rel
2. Wesel
3. Alat Penambat
4. Bantalan
5. Balas

6. Subbalas

2.4.1 Rel

Rel berfungsi untuk menerima langsung beban-beban dari kendaraan rel sebelum didistribusikan ke komponen-komponen lainnya, mengarahkan jalannya kendaraan re, ujsur pengikat dalam membentuk struktur jalan rel. Berdasarkan Permen No 60 tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api dan PD No. 10 mengenai Perencanaan Konstruksi Jalan Rel. terdapat beberapa ketentuan sebagai berikut:

1. Rel harus memenuhi persyaratan :
 - a. Minimum perpanjangan (*elongation*) 10%
 - b. Kekuatan tarik (*tensile strength*) minimum 1175 N/mm²
 - c. Kekerasan kepala rel tidak boleh kurang dari 320 BH
2. Tipe rel untuk masing-masing kelas jalan yaitu sebagai berikut.

Tabel 2.14 Tipe Rel per Kelas Jalan

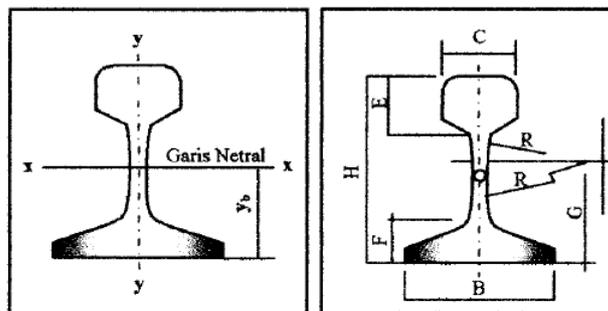
KELAS JALAN	TIPE REL
I	R 60 / R 54
II	R 54 / R 50
III	R 54 / R 50 / R 42
IV	R 54 / R 50 / R 42
V	R 42

3. Penampang rel harus memenuhi ketentuan dimensi rel sesuai dengan tabel dan gambar berikut ini.

Tabel 2.15 Dimensi Penampang Rel

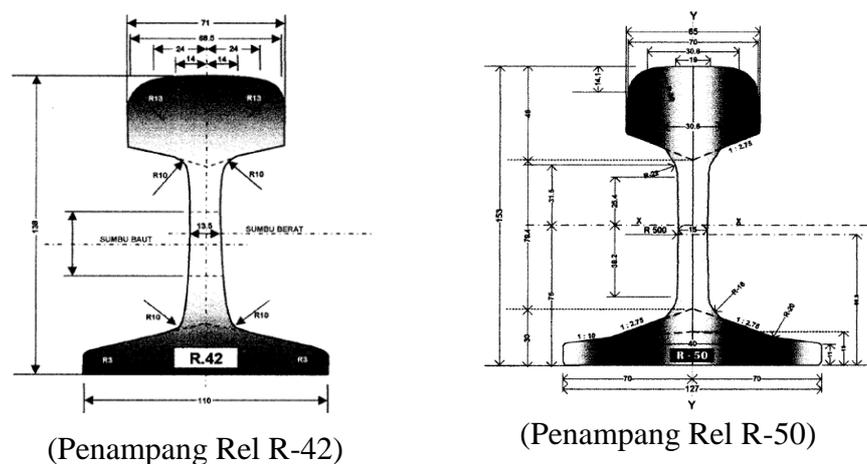
Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R 42	R 50	R 54	R 60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
G (mm)	72,00	76,00	74,79	80,95
R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
A (cm ²)	54,26	64,20	69,34	76,86
W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95

A = luas penampang
W = berat rel per meter
I_x = momen inersia terhadap sumbu x
Y_b = jarak tepi bawah rel ke garis netral



Gambar 2.9 Bentuk Penampang Rel

4. Ukuran penampang rel untuk berbagai tipe yaitu sebagai berikut :



Gambar 2.10 Jenis-jenis Penampang Rel

Rel itu sendiri terbagi dalam 3 jenis menurut panjangnya yaitu

1. Rel standar merupakan rel dengan panjang 25 m
2. Rel pendek merupakan rel dengan panjang maksimum 100 m
3. Rel panjang merupakan rel dengan panjang minimum sesuai dengan tabel dibawah ini.

Tabel 2.16 Panjang Minimum Rel Panjang

Jenis bantalan	Tipe Rel			
	R 42	R. 50	R.54	R. 60
Bantalan kayu	325 m	375 m	400 m	450 m
Bantalan beton	200 m	225 m	250 m	275 m

Persamaan diambil dalam Winkler (1867):

$$M_0 = \frac{Pd}{4\lambda}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{k}{4E \cdot I_x}}$$

Dimana,

Pd : beban dinamis roda (ton)

k : modulus elastisitas jalan rel = 180 kg/cm²

λ : dumping factor = $k/(4EI)$

I_x : momen inersia rel pada sumbu x-x.

E : modulus elastisitas rel = 2,1 x 10⁶ kg/cm²

$M = 0$ jika $\cos \lambda x_1 - \sin \lambda x_1 = 0$

2.4.1.1 Sambungan Rel

Sambungan rel adalah konstruksi yang mengikat dua ujung rel sedemikian rupa sehingga operasi kereta api tetap aman dan nyaman. Yang dimaksud dengan sambungan rel dalam pasal, ini adalah sambungan yang menggunakan pelat penyambung dan baut-mur

Dari kedudukan terhadap bantalan dibedakan dua macam sambungan rel, yaitu

1. Sambungan melayang
2. Sambungan menumpu

Penempatan sambungan di sepur ada dua macam yaitu :

1. Penempatan secara siku dimana kedua sambungan berada pada satu garis yang tegak lurus terhadap sumbu sepur.
2. Penempatan secara berselang-seling dimana kedua sambungan rel tidak berada pada satu garis yang tegak lurus terhadap sumbu sepur

2.4.1.2 Celah

Di sambungan rel harus ada celah untuk menampung timbulnya perubahan panjang rel akibat perubahan suhu. Besarnya celah untuk pemasangan terbagi dalam 3 jenis yaitu rel standar-pendek, rel panjang dengan bantalan kayu, serta rel panjang dengan bantalan beton.

2.4.1.3 Suhu Pemasangan

Suhu pemasangan adalah suhu rel waktu pemasangan. Suhu pemasangan juga terbagi dalam 3 jenis berdasarkan panjang relnya. Yaitu suhu pemasangan rel standar-pendek suhu pemasangan rel panjang dengan bantalan kayu dan suhu pemasangan dengan bantalan beton.

2.4.1.4 Pelat Penyambung

Sepasang pelat penyambung harus sama panjang dan mempunyai ukuran yang sama. Bidang singgung antara pelat penyambung dengan sisi bawahkepala rel dan sisi atas kaki rel harus sesuai kemiringannya, agar didapat bidang geser yang cukup. Ukuran standar pelat penyambung terbagi menjadi dua yaitu :

1. Ukuran standar penyambung untuk R42, R50, 54
2. Ukuran standar penyambung untuk R602.3.2 Wesel

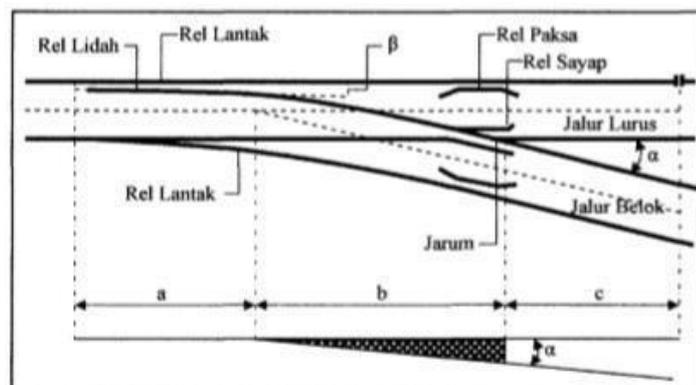
Wesel merupakan konstruksi jalan rel yang paling rumit dengan beberapa persyaratan dan ketentuan pokok yang harus dipenuhi. Wesel berfungsi untuk memindahkan kereta dari satu sepur ke sepur lainnya (untuk ukuran sepur yang sama). Wesel terbagi dalam 3 jenis yaitu :

1. Wesel Biasa
2. Wesel lengkung
3. Wesel Inggris

Berdasarkan Permen No 60 tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api Untuk pembuatan komponen-komponen wesel yang penting adalah

mengenai komposisi kimia penyusunnya. Wesel terdiri atas komponen-komponen sebagai berikut :

1. Lidah
2. Jarum beserta sayap-sayapnya
3. Rel lantak
4. Rel paksa
5. Sistem penggerak



Gambar 2.11 Komponen Wesel

Wesel harus memenuhi persyaratan berikut:

1. Kandungan mangan (Mn) pada jarum monoblok harus berada dalam rentang (11-14%).
2. Kekerasan pada lidah dan bagian lainnya sekurang-kurangnya sama dengan kekerasan rel.
3. Celah antara lidah dan rela lantak harus kurang dari 3 mm.
4. Celah antara lidah wesel dan rel lantak harus kurang dari 3 mm.

5. Celah (gap) antara rel lantak dan rel paksa pada ujung jarum adalah 34 mm.
6. Jarak antara jarum dan rel paksa (*check rail*) untuk lebar jalan 1435 mm 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.

Berdasarkan Peraturan Dinas No. 10, penentuan nomor dan kecepatan ijin wesel bergantung dari tabel berikut.

Tabel 2.17 Nomor Wesel dan Kecepatan Ijin

tg	1: 8	1: 10	1: 12	1: 14	1: 16	1: 20
No. wesel	W 8	W 10	W 12	W 14	W 16	W 2
Kecepatan ijin (km/j)	25	35	45	50	60	70

2.4.2 Alat Penambat

Alat penambat yang digunakan adalah alat penambat jenis elastis yang terdiri dari sistem elastis tunggal dan sistem elastis ganda. Pada bantalan beton terdiri dari *shoulder/insert*, *clip*, *insulator* dan *rail pad*. Pada bantalan kayu dan baja terdiri dari pelat landas (*base plate*), *clip*, tirpon (*screw spike*)/baut dan cincin per (*lock washer*). Alat penambat harus memenuhi persyaratan berikut :

1. Alat penambat harus mampu menjaga kedudukan kedua rel agar tetap dan kokoh berada di atas bantalan.
2. *Clip* harus mempunyai gaya jepit 900 – 1100 kgf.

3. Pelat landas harus mampu memikul beban yang ada dengan ukuran sesuai jenis rel yang digunakan. Pelat landas terbuat dari baja dengan komposisi kimia sebagai berikut:

- a. Carbon : 0,15 – 0,30%
- b. Silicon : 0,35% max
- c. Manganese : 0,40 – 0,80%
- d. Phospor : 0,050% max
- e. Sulphur : 0,05%

4. Alas rel (*rail pad*) dapat terbuat dari bahan *High Density Poly Ethylene* (HDPE) dan karet (*Rubber*) atau *Poly Urethane* (PU).

5. Seluruh komponen alat penambat harus memiliki identitas produk tercetak permanen sebagai berikut:

- a. Merek dagang
- b. Identitas pabrik pembuat
- c. Nomor komponen (part number)
- d. Dua angka terakhir tahun produksi

2.4.3 Bantalan

Bantalan berfungsi untuk meneruskan beban kereta api dan berat konstruksi jalan rel ke balas, mempertahankan lebar jalan rel dan stabilitas ke arah luar jalan rel. Bantalan dapat terbuat dari kayu, baja/besi, dan beton.

Pemilihan jenis bantalan didasarkan pada kelas dan kondisi lapangan serta ketersediaan. Bantalan harus memenuhi persyaratan berikut:

1. Bantalan beton merupakan struktur prategang :
 - a. Untuk lebar jalan rel 1435 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 600 kg/cm², dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar 16876 kg/cm² (1655 MPa). Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sesuai dengan desain beban gandar dan kecepatan.
 - b. Dimensi bantalan beton untuk lebar jalan rel 1435 mm adalah
 - c. Panjang 2440 mm untuk beban gandar sampai dengan 18 ton dan 2740 mm untuk beban gandar di atas 18 ton.
 - d. Lebar maksimum : 330 mm
 - e. Tinggi di bawah dudukan rel : 220 mm
2. Bantalan kayu, harus memenuhi persyaratan kayu mutu A kelas 1 dengan modulus elastisitas (E) minimum 125000 kg/cm². Harus mampu menahan momen maksimum sebesar 800 kg-m, lentur absolut tidak boleh kurang dari 46 kg/cm². Berat jenis kayu minimum = 0,9, kadar air maksimum 15%, tanpa mata kayu, retak tidak boleh sepanjang 230 mm dari ujung kayu.
3. Bantalan besi harus memiliki kandungan *Carbon Manganese Steel Grade 900 A*, pada bagian tengah bantalan maupun pada

bagian bawah rel, mampu menahan momen maksimum sebesar 650 kg-m, tegangan tarik 88 – 103 kg-m. *Elongation AI* > 10%.

2.4.4 Subbalas

Lapisan balas dan sub-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. Material yang dipilih sebagai bahan konstruksi balas dan sub-balas adalah material terpilih karena kekuatannya. Fungsi utama balas dan sub-balas adalah :

1. Meneruskan dan menyebarkan beban bantalan ke tanah dasar.
2. Mengokohkan kedudukan bantalan.
3. Meluruskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air di sekitar bantalan rel.

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

Tabel 2.18 Susunan Lapisan Sub-balas

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

Lapisan sub-balas harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Material sub-balas dapat berupa campuran kerikil (*gravel*) atau kumpulan agregat pecah dan pasir.
2. Material sub-balas tidak diperbolehkan 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% γ_d menurut percobaan ASTM D 698

2.4.5 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 meneruskan dan menyebarkan beban bantalan ke tanah dasar, mengokohkan kedudukan bantalan dan meluluskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air di sekitar bantalan dan rel. Kemiringan lereng lapisan balas atas tidak boleh lebih curam dari 1:2. Bahan balas atas dihampar hingga mencapai sama dengan elevasi bantalan. Material pembentuk balas harus memenuhi persyaratan berikut :

1. Balas harus terdiri dari batu pecah (25 – 60 mm) dan memiliki kapasitas ketahanan yang baik, ketahanan gesek yang tinggi dan mudah dipadatkan
2. Material balas harus bersudut banyak dan tajam
3. Porositas maksimum 3%
4. Kuat tekan rata-rata maksimum 1000 kg/cm²
5. *Specific gravity* minimum 2,6
6. Kandungan tanah, lumpur dan organik maksimum 0,5%
7. Kandungan minyak maksimum 0,2%
8. Keausan balas sesuai dengan *Lost Angeles test* tidak boleh lebih dari 25%