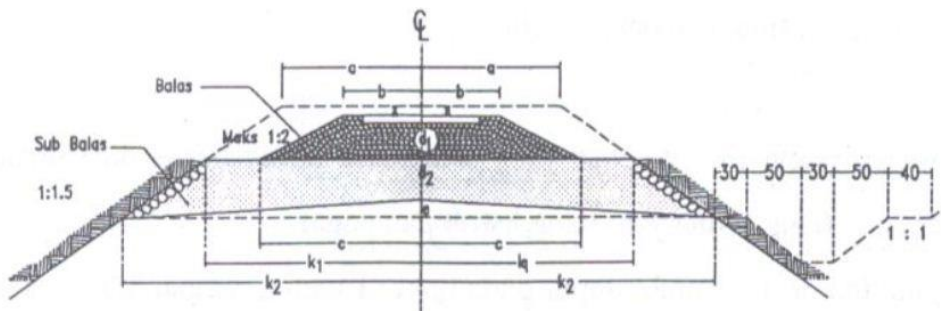


BAB III

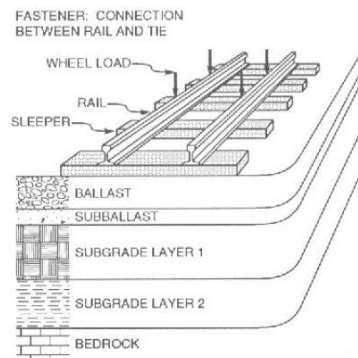
LANDASAN TEORI

A. Struktur Jalan Rel

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



Gambar 3.1 Konstruksi jalan rel
(Sumber : Rosyidi, 2015)



Gambar 3.2 Komponen penyusunnya
(Sumber : Rosyidi, 2015)

Rosyidi (2015), menjelaskan bahwa struktur jalan rel mempunyai beberapa kriteria sebagai berikut :

1. Struktur Jalan Rel

Struktur jalan rel yang kaku difungsikan untuk mempertahankan struktur dari terjadinya deformasi vertikal yang permanen. Deformasi vertikal diakibatkan oleh distribusi beban lalu lintas kereta api yang dapat digunakan untuk menilai umur, kekuatan dan kualitas jalan rel. Deformasi yang berlebihan akan menyebabkan geometrik jalan tidak pada kedudukannya dan memungkinkan terjadinya keausan yang besar antara komponen – komponen struktur jalan rel.

2. Elastisitas (*Elastic*)

Kriteria elastisitas diperlukan untuk menciptakan kenyamanan dalam perjalanan kereta api, menjaga terjadinya patah atau kerusakan berat pada as roda disebabkan oleh pergerakan beban kereta yang cukup besar di atas struktur jalan rel, meredam adanya kejutan akibat pengereman dan pengurangan kecepatan, benturan atau *impact* yang terjadi antara roda dan rel serta getaran vertikal yang bersifat menerus. Jika struktur jalan rel kurang kaku maka dapat ditambah keelastisannya dengan menambahkan pelat karet (*rubber pads*) di bawah kaki rel.

3. Ketahanan Terhadap Deformasi Tetap

Deformasi vertikal yang berlebihan akan cenderung menjadi deformasi tetap sehingga geometrik jalan rel (ketidakrataan vertikal, horisontal dan puntir) menjadi tidak baik, yang pada akhirnya kenyamanan dan keamanan terganggu. Karakteristik sarana yang khusus dalam angkutan kereta api menimbulkan keterbatasan yang perlu diperhatikan. Perubahan geometrik akibat deformasi tetap yang terjadi dapat menimbulkan kecelakaan kereta api dan meningkatkan risiko kecelakaan.

4. Stabilitas

Jalan rel yang stabil dapat mempertahankan struktur jalan pada posisi yang tetap/semula (vertikal dan horisontal) setelah pembebanan terjadi.

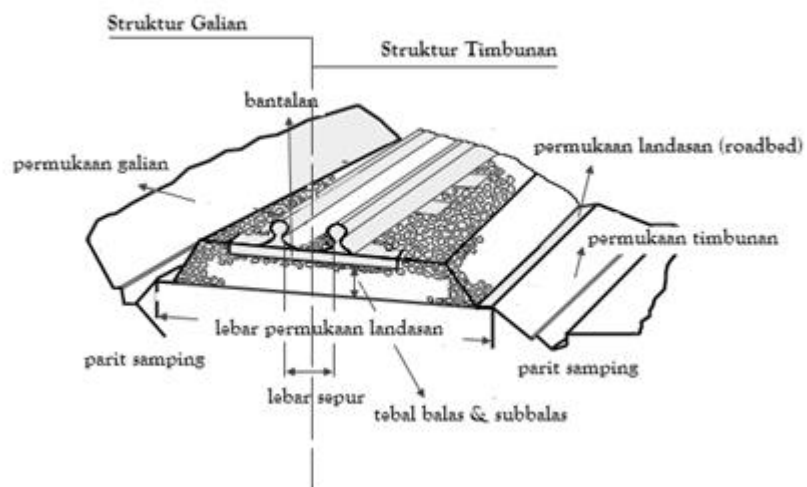
Untuk itu diperlukan balas dengan mutu dan kepadatan yang baik, bantalan dengan penambat yang selalu terikat dan drainasi yang baik.

5. Kemudahan untuk pengaturan dan pemeliharaan (*Adjustability*)

Jalan rel harus memiliki sifat dan kemudahan dalam pengawasan, peraturan dan pemeliharaan sehingga dapat dikembalikan ke posisi geometrik dan struktur jalan rel yang benar jika terjadi perubahan geometrik akibat beban yang berjalan.

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

1. Jalan rel dalam konstruksi timbunan, biasanya terdapat pada daerah cenderung datar seperti pada daerah persawahan.
2. Jalan rel dalam konstruksi galian, biasanya terdapat pada daerah dengan medan pegunungan.



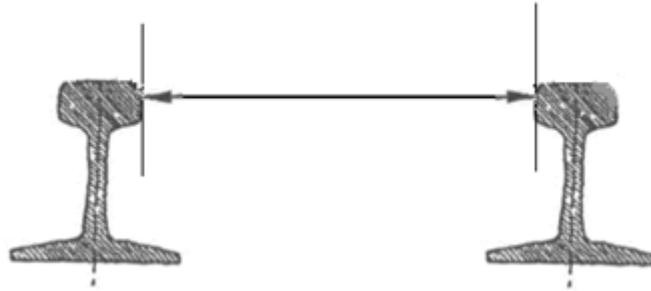
Gambar 3.3 Contoh potongan jalan rel pada struktur galian dan timbunan

(Sumber : Rosyidi, 2015)

Jalan rel dapat dikelompokkan menurut kebutuhan dan sudut pandangnya diantaranya sebagai berikut:

1. Klasifikasi Jalan Rel Menurut Lebar Sepur

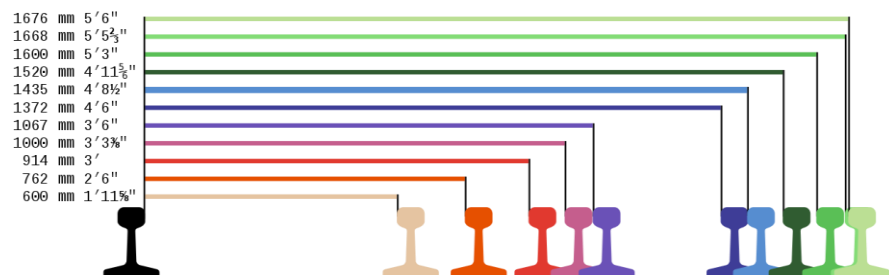
Lebar sepur merupakan jarak terkecil di antara kedua sisi kepala rel (bagian dalam), diukur pada daerah 0 – 14 mm di bawah permukaan teratas kepala rel. ukuran lebar sepur dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Ukuran lebar sepur pada struktur jalan rel.
(Sumber : Rosyidi, 2015)

Rosyidi (2015), menjelaskan ada tiga jenis ukuran lebar sepur yaitu sebagai berikut:

- Sepur Standar (*standard gauge*).** Sepur standar juga disebut *Stephenson gauge* merupakan ukuran internasional untuk lebar sepur normal (*normal gauge*) yang banyak digunakan sebagai ukuran sepur di dunia. Lebar sepur standar adalah 1435 mm.
- Sepur Lebar (*broad gauge*),** lebar sepur > 1435 mm.
- Sepur Sempit (*narrow gauge*),** lebar sepur < 1435 mm.



Gambar 3.5 Beberapa ukuran lebar sepur
(Sumber : Rosyidi, 2015)

2. Klasifikasi Jalan Rel Menurut Daya Lintas Kereta Api

Kecepatan maksimum kereta api yang diijinkan di Indonesia antara 80 – 120 Km/jam dan dikelompokkan kedalam kelas jalan sebagai berikut:

- a. Kelas Jalan I : 120 Km/jam
- b. Kelas Jalan II : 110 Km/jam
- c. Kelas Jalan III : 100 Km/jam
- d. Kelas Jalan IV : 90 Km/jam
- e. Kelas Jalan II : 80 Km/jam

3. Klasifikasi Jalan Rel Menurut Daya lintas kereta Api

Daya lintas kereta api dapat dibagi dalam dua kelompok kelas jalan yaitu lebar sepur 1067 mm dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan lebar sepur 1435 mm dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1: Daya angkut lintas yang diijinkan untuk lebar sepur 1067 mm

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (dalam $10^6 \times \text{Ton/Tahun}$)
I	> 20
II	10 – 20
III	5 – 10
IV	2,5 – 5
V	< 2,5

(Sumber : Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)

Tabel 3.2: Daya angkut lintas yang diijinkan untuk lebar sepur 1435 mm

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (dalam $10^6 \times \text{Ton/Tahun}$)
I	> 20
II	10 – 20
III	5 – 10
IV	< 5

(Sumber : Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)

4. Klasifikasi Jalan Rel Menurut Kelandaian Jalan

Kelandaian jalan dipengaruhi oleh kondisi topografi medan merupakan parameter penting dalam perencanaan geometri jalan. Pengelompokan lintas jalan rel berdasarkan kelandaian jalan yaitu sebagai berikut:

Tabel 3.3 Lintas Jalan Rel Menurut Kelandaian

Kelompok Lintas Jalan Rel	Kelandaian (%)
Lintas datar	0-10%
Lintas pegunungan	10-40%
Lintas dengan rel gigi	40-80%
Kelandaian di emplasmen	0-1,5%

(Sumber : Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)

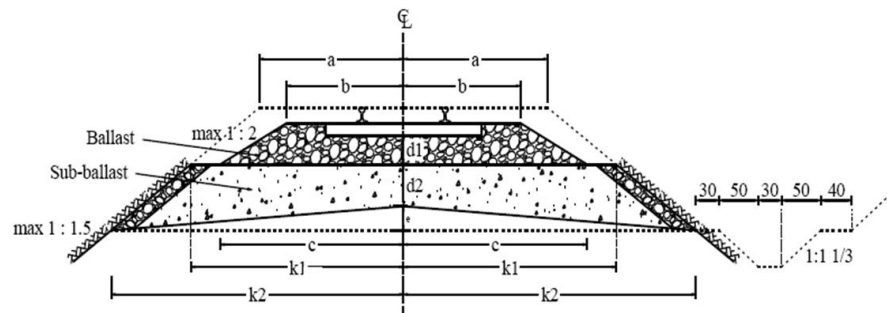
5. Klasifikasi Jalan Rel Menurut Beban Gandar

Beban gandar merupakan beban yang diterima oleh jalan rel dari satu gandar. Klasifikasi jalan rel menurut beban gandar maksimum dibedakan berdasarkan lebar sepurnya, sebagai berikut:

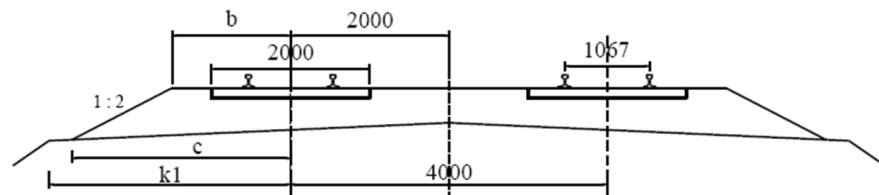
- a. Beban gandar untuk lebar jalan rel 1067 mm pada semua kelas jalur maksimum sebesar 18 ton.
- b. Beban gandar untuk lebar jalan rel 1435 mm pada semua kelas jalur maksimum sebesar 22,5 ton.

6. Klasifikasi Jalan rel Menurut Jumlah Jalur

- a. Jalur Tunggal : Jumlah jalur di lintas bebas hanya satu, dan diperuntukkan untuk melayani arus lalu lintas angkutan jalan rel dari dua arah.
- b. Jalur Ganda : Jumlah jalur di lintas bebas dua jalur, dimana masing-masing jalur hanya diperuntukkan untuk melayani arus lalu lintas angkutan jalan rel satu arah.



Gambar 3.6 Jalur tunggal trase jalan rel pada jalur lurus
(Sumber : Rosyidi, 2015)



Gambar 3.7 Jalur ganda trase jalan rel pada jalur lurus
(Sumber : Rosyidi, 2015)

1) Rel

Rel pada jalan rel adalah sebagai tempat pijakan menggelindingnya roda kereta api yang ditumpu oleh bantalan-bantalan, sehingga rel merupakan batang yang ditumpu oleh penumpu. Prinsip dasar dalam desain rel adalah menentukan dimensi rel yang sesuai yang mempunyai berat yang optimum. Rel dalam aplikasinya di lapangan memiliki fungsi utama sebagai berikut :

- 1) Penuntun/mengarahkan pergerakan roda kereta api.
- 2) Untuk menerima secara langsung dan menyalurkan beban kereta api kepada bantalan tanpa menimbulkan defleksi.
- 3) Struktur pengikat dalam pembentukan struktur jalan *replying* kokoh.

a. Persyaratan Umum Rel

- 1) Berat optimum, rel dirancang dengan berat tertentu yang terdiri dari bagian-bagian rel yang terintegrasi dan dibentuk dari distribusi bahan.

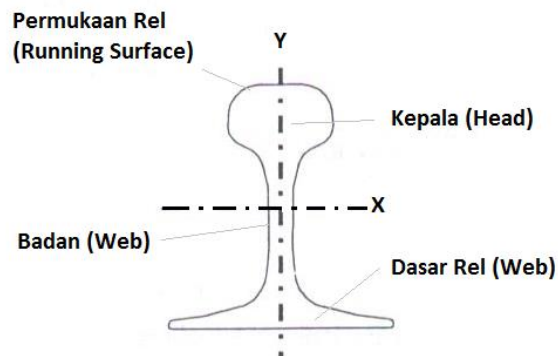
Masing-masing bagian rel didesain untuk dapat menjalankan fungsinya dengan baik dan optimal.

- 2) Kekakuan, dapat diukur melalui momen inersia desain rel yang ekonomis dan efektif mensyaratkan nilai momen inersia maksimum per berat unit rel yang konsisten dengan kekakuan rel dalam berbagai arah sehingga mampu menahan pergeseran lateral akibat pergerakan kereta api dan secara vertikal mampu untuk menerima beban dan menyalurkannya kebantalan.
- 3) Kekuatan rel dapat ditentukan dari modulus potongan rel. *Modulus section* pada rel maupun lempeng baja (*fishplate*) ditentukan sedemikian sehingga mampu menahan tegangan yang terjadi akibat beban kendaraan kereta api.
- 4) Durabilitas, adalah faktor yang dapat mempengaruhi umur manfaat rel terhadap keausan, kerusakan ujung rel dan kerusakan *hogged-rail*.

b. Bagian-Bagian Rel

Suatu komponen rel terdiri atas bagian-bagian utama, yaitu:

- 1) Permukaan rel (*running surface*), yaitu bagian dari rel yang berfungsi sebagai tempat untuk pergerakan kereta api.
- 2) Kepala rel (*head*), harus direncanakan sedemikian sehingga memiliki daya tahan terhadap keausan selama waktu pelayanan yang direncanakan.
- 3) Badan rel (*web*), ditentukan dengan tebal yang memadai untuk dapat menahan beban dan momen akibat pergerakan kereta api dan mempunyai daya tahan terhadap korosi.
- 4) Kaki rel (*foot*), harus dirancang selebar mungkin sehingga kedudukan rel menjadi stabil terhadap dorongan maupun puntiran akibat pergerakan kereta api, dan mampu mendistribusikan beban yang diterima kepada bantalan dengan baik.



Gambar 3.8 Bagian-bagian rel
(Sumber: Rosyidi, 2015)

c. Jenis-Jenis Rel

1) Berdasarkan Bentuknya

Menurut bentuknya saat ini digunakan tiga jenis macam profil rel, yaitu sebagai berikut:

a) Rel Alur

Ciri utama rel alur yaitu mempunyai kaki yang sangat lebar. Hal ini untuk memperkecil aus di lengkungan, maka alur harus diperlebar dan pinggir alur dibuat lebih tebal.

b) Rel Vignola

Merupakan bentuk rel yang umum digunakan pada jalan rel, termasuk di Indonesia. Rel ini mempunyai keunggulan diantaranya: momen perlawanan cukup besar, rel mudah ditambatkan pada bantalan, dan kepala rel sesuai dengan bentuk kasut roda.

c) Rel Berkepala Dua

Tipe ini dirancang karena memiliki keunggulan, yaitu apabila kepala rel mengalami keausan maka bisa dibalik dengan sisi lain yang ada di bawahnya. Namun pada kenyataannya, bagian bawah rel juga mengalami keausan baik akibat beban maupun lingkungan, dengan demikian bagian bawah rel ternyata tidak dapat memberikan permukaan yang baik untuk media pergerakan roda kereta api.

2) Berdasarkan Beratnya

Menurut beratnya, secara umum rel dapat dibagi menjadi:

- a) R-42, adalah rel dengan berat sekitar 42 kg/meter.
- b) R-50, adalah rel dengan berat sekitar 50 kg/meter.
- c) R-54, adalah rel dengan berat sekitar 54 kg/meter.
- d) R-60, adalah rel dengan berat sekitar 60 kg/meter.

3) Berdasarkan Panjang Rel

Berdasarkan PD No. 10 tahun 1986 tentang Perencanaan Konstruksi Jalan Rel dijelaskan bahwa menurut panjangnya rel dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu :

- a) Rel standar adalah rel yang panjangnya 25 meter.
- b) Rel pendek adalah rel yang panjangnya maksimal 100 meter.
- c) Rel panjang adalah rel yang panjangnya tercantum panjang minimumnya pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Panjang Minimum Rel

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

(Sumber : Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986)

4) Hubungan Rel dengan Kelas Jalan

Tipe rel untuk masing-masing kelas jalan tercantum pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Kelas Jalan dan Tipenya

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

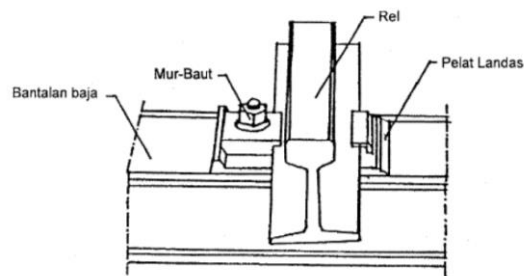
(Sumber : Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986)

2) Penambat (*Fastening*)

Penambat rel merupakan suatu komponen yang menambatkan rel pada bantalan sedemikian sehingga kedudukan rel menjadi kokoh dan kuat. Kedudukan rel dapat bergeser diakibatkan oleh pergerakan dinamis roda kereta yang bergerak di atas rel. Pergerakan dinamis roda dapat mengakibatkan gaya lateral yang besar terhadap rel. Oleh karena itu, kekuatan penambat sangat diperlukan untuk mengurangi secara signifikan gaya lateral (Rosyidi, 2015).

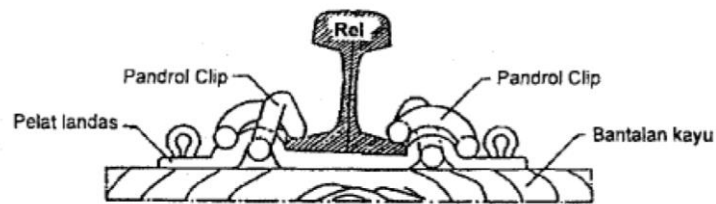
Dalam penggunaan penambat saat ini dibedakan menurut sistem perkuatan penambatan yang diberikan pada rel terhadap bantalan, ada dua jenis penambat, yaitu :

- a. Penambat Kaku, yang terdiri dari mur dan baut namun dapat juga ditambahkan pelat landas, biasanya dipasang pada bantalan kayu dan besi. Sistem perkuatannya terdapat pada *klem plat* yang kaku.



Gambar 3.9 Penambat kaku menggunakan plat landas dan mur- baut
(Sumber: Utomo, 2009)

- b. Penambat Elastik, penggunaannya dibagi dalam dua jenis, yaitu penambat elastik tunggal yang terdiri dari pelat landas, pelat atau batang jepit elastik, tarpon, mur dan baut, dimana kekuatan jepitnya terletak pada batang jepit elastik. Penambat elastik tunggal ini biasanya digunakan pada bantalan besi atau kayu. Jenis kedua adalah penambat elastik ganda yang terdiri dari pelat landas, pelat atau batang jepit, alas rel, tirpon, mur dan baut. Penambat jenis ini biasanya digunakan pada bantalan beton. Pada bantalan beton tidak menggunakan pelat landas melainkan menggunakan las karet (*rubber pads*) dengan ketebalan disesuaikan.



Gambar 3.10 Penambat elastik menggunakan plat landas dan pandrol *clip*.
(Sumber: Utomo, 2009)

Dalam Peraturan Dinas No. 10 Tahun 1986, penggunaan penambat elastik dibagi menurut kelas jalan (kecepatan maksimum), disajikan dalam Tabel 3.6 sebagai berikut.

Tabel 3.6 Penggunaan Alat Penambat Elastik sesuai Kelas Jalan

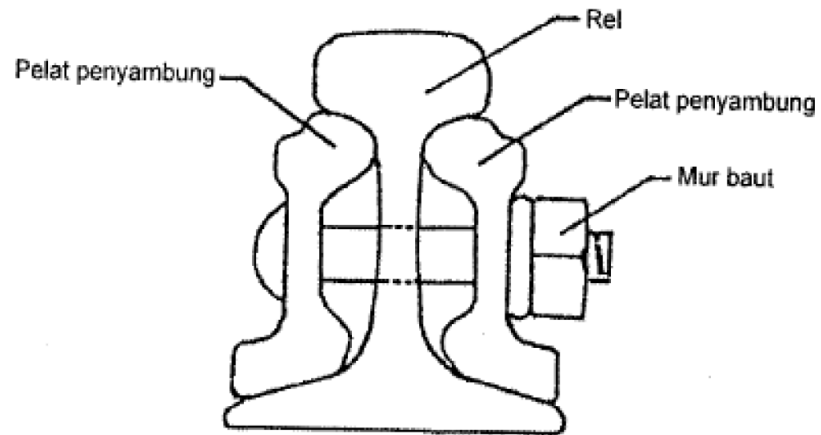
Kelas Jalan	Jenis Penambat
I	Elastik Ganda
II	Elastik Ganda
III	Elastik Ganda
IV	Elastik Tunggal
V	Elastik Tunggal

(Sumber: Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986)

3. Pelat Sambung, Mur dan Baut

Dalam Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api dijelaskan bahwa penyambungan rel dengan pelat sambung harus digunakan apabila tidak diperkenankan melakukan pengelasan terhadap sambungan rel terdiri dari :

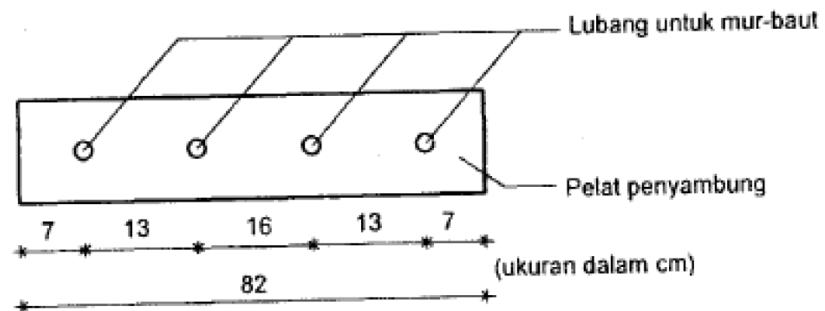
- a. Dua pelat sambung kiri dan kanan.
- b. Enam baut dengan mur, digunakan sepasang pelat penyambung yang mempunyai panjang dan ukuran yang sama (Utomo, 2009).



Gambar 3.11 Pemasangan pelat penyambung.
(Sumber: Utomo, 2009)

Di Indonesia digunakan dua ukuran standar pelat penyambung, yaitu:

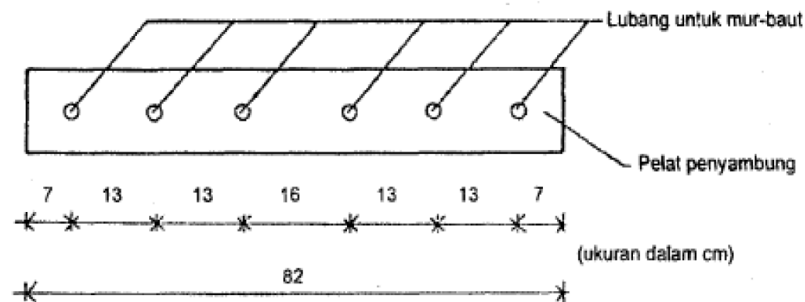
- a. Ukuran standar pelat penyambung untuk tipe – tipe rel R.42, R.50 dan R.54.



Gambar 3.12 Pelat penyambung untuk R.42, R.50 dan R.54.
(Sumber: Utomo, 2009)

- b. Ukuran standar pelat penyambung untuk tipe rel R.60

Pada sambungan ini digunakan tebal pelat penyambung 20 mm, diameter lubang mur – baut 25 mm. Tinggi pelat disesuaikan dengan dimensi masing – masing rel.



Gambar 3.13 Pelat sambung untuk R.60.
(Sumber: Utomo, 2009)

4. Bantalan (*Sleeper*)

Bantalan merupakan salah satu komponen dari sistem struktur jalan rel yang mempunyai fungsi utama untuk mengikat rel sedemikian sehingga kedudukan rel menjadi kokoh dan kuat.

Bantalan mempunyai fungsi yang sangat penting dalam membentuk kestabilan *super-structure* (struktur bagian atas) dalam struktur jalan rel.

Bantalan rel merupakan salah satu bagian struktur jalan rel yang mempunyai fungsi sebagai berikut:

- a. Mengikat rel dengan alat penambat, pelat landas dan baut, sehingga kedudukan rel yang terkait dengan lebar sepur tetap dapat terjaga.
- b. Menerima beban vertikal dan lateral yang disebabkan oleh beban statis rel dan beban dinamis akibat pergerakan kereta.
- c. Mendistribusikan beban yang diterima bantalan kepada struktur fondasi yang ada dibawahnya dengan tekanan arah vertikal yang lebih kecil dan merata.
- d. Menstabilkan struktur jalan rel terhadap gaya lateral yang memaksa rel untuk bergeser ke arah luar (penyimpangan arah lateral).
- e. Menghindari kontak langsung antara rel dengan air tanah.
- f. Sebagai bahan isolasi listrik diantara dua rel.
- g. Memberikan ketahanan jalan rel terhadap pengaruh mekanis maupun cuaca.

5. Lapisan Pondasi Atas (*Ballast*)

Lapisan balas adalah lapisan di atas tanah dasar yang berfungsi untuk menahan konstruksi bantalan sekaligus mampu meneruskan beban dari bantalan menuju ke tanah dasar dengan pola distribusi beban lebih merata. Letak balas berada di daerah yang mengalami konsentrasi tegangan yang terbesar akibat lalu lintas kereta api pada jalan rel, dengan demikian material penyusun lapisan balas harus terpilih dan dilakukan desain dengan baik sehingga baik material dan ketebalan balas dapat mempengaruhi kondisi jalan rel secara umum (Rosyidi, 2015).

Lapisan balas terdiri dari batu pecah yang keras dan bersudut tajam yang memenuhi syarat – syarat lain yang tercantum dalam Peraturan Bahan Jalan Rel Indonesia. Lapisan balas juga disyaratkan mampu meneruskan air dengan baik.

Beberapa fungsi lapisan balas yang lebih detail adalah sebagai berikut:

- a. Menyediakan suatu landasan bagi perletakan bantalan dengan permukaan yang mempunyai daya dukung seragam.
- b. Mendukung konstruksi bantalan dan rel yang bersifat kenyal, sehingga memberikan kenyamanan ketika kendaraan kereta api melintas.
- c. Mempertahankan konstruksi rel secara kokoh dan menjaga stabilitas kedudukan bantalan – rel dengan menahan bergesernya bantalan baik arah membujur/longitudinal maupun arah melintang/lateral.
- d. Menyebarkan beban yang diterima dari bantalan dengan memperkecil tekanan vertikal hingga tingkat tertentu yang mampu diterima oleh tanah dasar sehingga tidak terjadi deformasi permanen pada lapisan tanah dasar yang dapat mengakibatkan penurunan dan perubahan geometrik jalur kereta api.
- e. Material balas disusun sebagai bahan *porous* yang dimungkinkan untuk meloloskan air dan mengalirkan air dari zona pembebanan tanah.

- f. Menyediakan media untuk pelaksanaan pemeliharaan jalur seperti perbaikan permukaan jalur dan alinemen geometriknya.
- g. Lapisan balas dimungkinkan juga dapat ditumbuhi tanaman, khususnya pada lereng – lereng yang curam.

Menurut Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, material balas harus memenuhi syarat – syarat sebagai berikut :

- a. Balas harus terdiri dari batu pecah (25-60) mm dan memiliki kapasitas ketahanan yang baik, ketahanan gesek tinggi, dan mudah dipadatkan.
- b. Material balas harus bersudut banyak dan tajam, material balas merupakan batu pecah yang berasal dari pengolahan pemecah batu.
- c. Porositas maksimum 3%.
- d. Kuat tekan rata – rata maksimum adalah 1000 kg/cm².
- e. *Specific gravity* minimum 2,6.
- f. Kandungan tanah, lumpur dan organik maksimum 0,5 %.
- g. Kandungan minyak maksimum 0,2 %.
- h. Keausan balas sesuai dengan test Los Angeles tidak boleh lebih dari 25%.
- i. Kemiringan lereng lapisan balas atas tidak boleh lebih curam dari 1 : 2.
- j. Bahan balas atas dihampar hingga mencapai sama dengan elevasi bantalan.

Dimensi balas di Indonesia telah disyaratkan berdasarkan Peraturan Dinas No. 10 Tahun 1986 tentang Perencanaan Konstruksi Jalan Rel dan Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, di sajikan dalam Tabel 3.7 dan Tabel 3.8.

Tabel 3.7 Spesifikasi Tebal Ballas Untuk Sepur Sempit

Kelas Jalan	Vmaks(km/jam)	Tebal Balas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
I	120	30	50
II	110	30	50
III	100	30	40
IV	90	25	40
V	80	25	35

(Sumber: Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986)

Tabel 3.8 Spesifikasi Tebal Ballas Untuk Sepur Sempit (1067 mm)

Kelas Jalan	Vmaks(km/jam)	Tebal Balas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
I	120	30	50
II	110	30	50
III	100	30	40
IV	90	25	40

(Sumber: Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)

6. Lapisan Pondasi Bawah (*subballast*)

Pada dasarnya material lapisan pondasi bawah tidak memerlukan kualitas yang sangat baik seperti halnya lapisan pondasi atas. Lapisan *subballast* terdiri dari kerikil halus, kerikil sedang atau pasir kasar. Lapisan pondasi bawah ini berfungsi juga sebagai lapisan pengisi antara tanah dasar dan lapisan pondasi atas, dan disyaratkan mampu mengalirkan air dengan baik (Utomo, 2009).

Menurut Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012 dalam Rosyidi (2015), persyaratan material lapisan pondasi bawah adalah sebagai berikut:

- a. Material sub – balas dapat berupa campuran kerikil (*gravel*) atau kumpulan agregat pecah dan pasir.
- b. Material sub – balas tidak boleh memiliki kandungan material organik lebih dari 5%.

- c. Untuk material subbalas yang merupakan kumpulan agregat pecah dan pasir, maka harus mengandung sekurang – kurangnya 30% agregat pecah.
- d. Lapisan subbalas harus dipadatkan sampai mencapai 100% berat kering menurut percobaan ASTM D698.
- e. Persyaratan gradasi sub-balas mengikuti Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Persyaratan Gradasi untuk Material Subbalas menurut PM No.60 Tahun 2012.

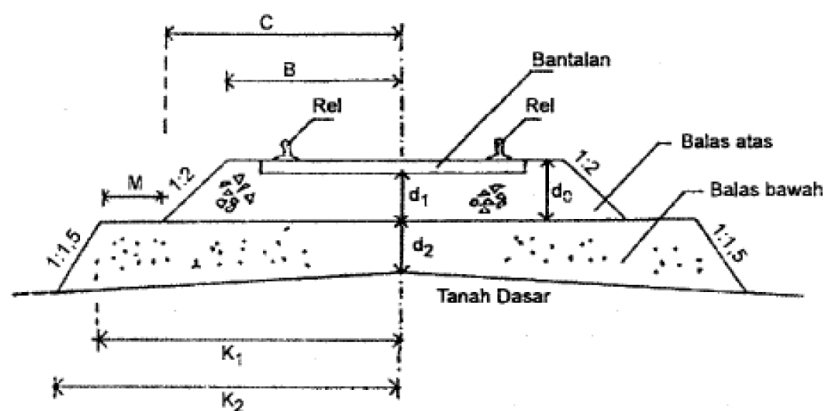
Standar Saringan ASTM	Prosentase Lolos Saringan (%)
2 1/2"	100
3/4"	55-100
No.4	25-95
No. 40	5-35
No.200	0-10

(Sumber: Rosyidi, 2015)

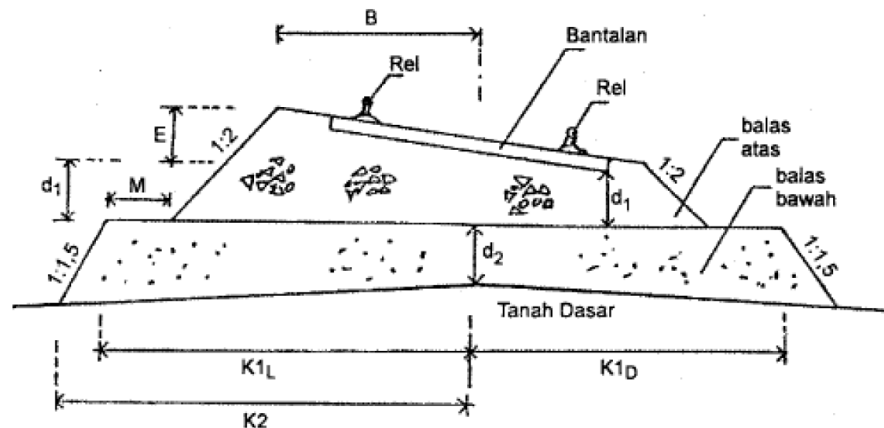
Pada umumnya terdapat dua bentuk potongan melintang lapisan pondasi atas dan pondasi bawah, yaitu:

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

Kedua bentuk dan dimensi disajikan dalam Gambar 3.15 dan Gambar 3.16.



Gambar 3.14 Potongan melintang pada jalan lurus
(Sumber: Utomo, 2009)



Gambar 3.15 Potongan melintang pada tikungan
(Sumber: Utomo, 2009)

Dengan mengetahui bentuk potongan melintang jalan rel serta menggunakan persyaratan balas, ketebalan lapisan balas yang diperlukan sesuai dengan kelas jalan rel tersaji dalam Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Ukuran-Ukuran Pada Lapisan Balas

	Kelas Jalan Rel				
	I	II	III	IV	V
d_1 (cm)	30	30	30	25	25
B (cm)	150	150	140	140	135
C (cm)	235	235	225	215	210
K_1 (cm)	265-315	265-315	240-270	240-250	240-250
d_2 (cm)	15-50	15-50	15-35	15-35	15-35
E (cm)	25	25	22	20	20
K_2 (cm)	375	375	325	300	300

(Sumber: Utomo, 2009)

7. Lapisan Tanah Dasar (*Subgrade*)

Lapisan tanah dasar memiliki peran sebagai penerima beban akhir dari kereta api, sehingga lapisan ini perlu didesain untuk mampu menerima beban secara optimal tanpa terjadi deformasi tetap. Adapun fungsi dari tanah dasar jalan rel adalah sebagai berikut, Utomo (2009) :

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

Menurut Utomo (2009), sesuai dengan fungsi tanah dasar dan melihat letak serta distribusi beban oleh lapisan di atasnya (balas), maka tanah dasar harus mempunyai daya dukung yang cukup. Menurut ketentuan PT. Kereta Api (persero), kuat dukung tanah dasar (nilai CBR) minimum adalah sebesar 8%, dengan ketebalan tanah dasar minimal 30 cm.

Peraturan Daerah No. 10 Tahun 1986 tentang Perencanaan Konstruksi Jalan Rel memberikan syarat – syarat untuk timbunan tanah dasar adalah sebagai berikut:

- a. Jenis tanah timbunan tidak boleh termasuk dalam klasifikasi tanah yang tidak stabil.
- b. Subgrade disyaratkan memiliki kemiringan kearah luar sebesar 5%.
- c. Faktor keamanan lereng dari bahaya kelongsoran minimal 1,5.
- d. Pemadatan dilakukan pada timbunan secara ketat untuk meningkatkan kekuatan tanah, memperkecil kompresibilitas dan daya resap air, dan memperkecil pengaruh air terhadap tanah.
- e. Jika kondisi tanah timbunan sebagai tanah dasar memilikim daya dukung tanah yang kurang baik, dapat dilakukan perbaikan tanah dengan metode tertentu.

8. Drainasi pada Jalan Rel

Drainasi jalan rel secara umum didefinisikan sebagai sistem pengaliran/pembuangan air di suatu daerah jalan rel, baik secara gravitasi maupun dengan menggunakan pompa, agar tidak sampai terjadi genangan air.

Adapun dibuatnya drainasi pada jalan rel dimaksudkan sebagai berikut :

1. Tidak terjadi genangan air pada jalan rel, sehingga tidak terjadi pengembangan tanah dan menghindari terjadinya pemompaan butir-butir halus (*pumping effect*).
2. Mencegah atau mengurangi pengaruh air terhadap konsistensi tanah, sehingga badan jalan rel tetap kokoh.
3. Lalu lintas kereta api tidak terganggu.

Secara umum terdapat beberapa jenis drainasi pada jalan rel, yaitu :

a. Drainasi Permukaan (*Surface Drainage*)

Drainasi permukaan dibuat dengan maksud untuk mengalirkan /membuang air yang ada di permukaan tanah daerah jalan rel. Meskipun demikian, pembuangan akhir air dari sistem drainasi permukaan ini tidak boleh mengganggu pihak lain. Perencanaan dan perancangan drainasi permukaan dipengaruhi oleh keadaan topografi.

1. Jenis Drainasi Permukaan

Penentuan jenis drainasi permukaan ini berdasarkan pada letak drainasi terhadap jalur jalan rel. Terdapat dua jenis drainasi permukaan, yaitu :

- a. Drainasi memanjang (*side-ditch*), yaitu drainasi permukaan yang letaknya di samping dan memanjang arah jalur jalan rel.
- b. Drainasi melintang (*cross-drainage*), yaitu drainasi permukaan yang letak dan arahnya melintang arah jalur jalan rel.

2. Bentuk Drainasi Permukaan

Drainasi memanjang, dapat berupa saluran terbuka atau saluran tertutup. Adapun bentuk potongan melintangnya dapat berbentuk sebagai berikut :

- a. Trapesium
- b. Kotak atau persegi
- c. Segitiga
- d. Busur lingkaran

Drainasi melintang (dapat dalam jumlah tunggal atau multi/banyak) dapat berupa :

- a. Gorong-gorong
- b. Jembatan pelat

3. Bahan Drainasi Permukaan

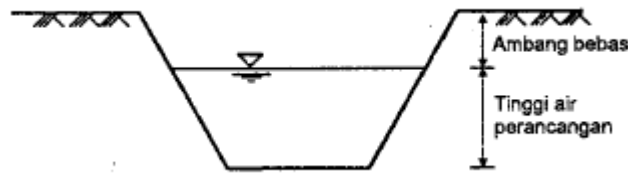
Agar drainasi dapat berfungsi dengan baik selama waktu yang diharapkan, maka terdapat beberapa syarat terhadap bahan pembentuk drainasi, yaitu:

- a. Pemilihan bahan untuk saluran memanjang bergantung pada kemiringan topografi dan jenis tanah setempat. Bila diperlukan penguat saluran, dapat menggunakan kayu/susunan batu kosong/susunan batu bata diplester/acuan beton, yang disesuaikan dengan keadaan.
- b. Saluran melintang dibuat dengan pasangan batu plester bertutupkan pelat beton bertulang, pipa beton bertulang atau pipa baja gelombang.
- c. Kekuatan saluran harus dijamin tahan terhadap pengaruh setempat yang dapat merusak, maupun terhadap semua gaya yang akan bekerja padanya.

4. Perancangan Saluran Terbuka

Pada perancangan saluran terbuka drainasi permukaan, harus dipenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut:

- a. Dimensi penampang/potongan melintang harus cukup besar untuk membuang air yang ada dipermukaan yang akan dibuang /dialirkannya.
- b. Apabila dari perhitungan yang dilakukan telah diperoleh tinggi air perancangan, maka tinggi saluran masih harus ditambah dengan ambang bebas (*free board*) yang penentuannya berdasarkan pada loncatan air hidraulik ditambah dengan ambang tambahan minimum sebesar 15 cm.



Gambar 3.16 Tinggi air dan ambang bebas pada drainasi permukaan

(Sumber : Utomo, 2009)

- c. Koefisien kekasaran saluran ditentukan berdasarkan atas jenis permukaan saluran.

5. Perancangan Saluran Drainasi Melintang

Secara spesifik untuk perancangan saluran melintang dan gorong-gorong pada jalan rel perlu memperhatikan persyaratan sebagai berikut :

- a. Apabila saluran melintang bertemu dengan saluran memanjang, pada pertemuan tersebut harus dipasang bak penampung tanah (*sand trap*).
- b. Tanah di sekeliling bidang saluran melintang harus dipadatkan dengan baik dan benar, sesuai dengan pemadatan yang diperlukan untuk badan jalan rel.
- c. Untuk keperluan kemudahan dalam pemeliharaan, minimum ukuran diameter atau alas saluran ialah 60 cm, dan
- d. Tidak boleh terjadi kebocoran atau rembesan air, baik karena bahan atau sambungan karena akan membahayakan jalan rel.

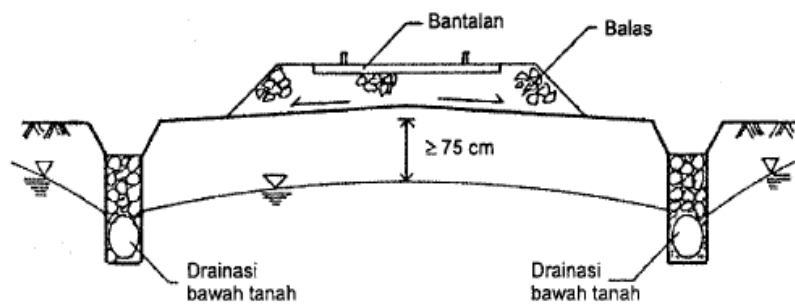
b. Drainase Bawah Permukaan (*Sub-Surface Drainage*)

Drainasi bawah permukaan jalan rel dimaksudkan untuk menjaga elevasi muka air tanah tidak mendekati permukaan tanah tempat badan jalan rel berada. Dengan demikian maka konsistensi dan kepadatan badan jalan dapat dipertahankan dalam keadaan baik.

1. Perancangan Drainasi Bawah Permukaan

Pada badan jalan rel berupa permukaan asli dan galian, ketebalan bagian badan jalan rel setebal minimum 75 cm dari dasar balas harus selalu dalam keadaan kering.

Konstruksi drainasi bawah permukaan biasanya berupa pipa berlubang yang dipasang di bawah permukaan di pinggir kanan atau kiri badan jalan rel. Pipa berlubang ini diletakkan di atas lapisan pasir ≥ 10 cm, kemudian secara berurutan di atasnya dihamparkan (dan dipadatkan) kerikil dengan ketebalan lebih dari 15 cm, di atas lapisan kerikil tersebut dihamparkan bahan kedap air. Selain itu, saluran pipa berlubang harus dilindungi oleh bahan filter yang bahannya dapat dipilih dan disesuaikan dengan keadaan setempat.



Gambar 3. 17 Drainasi bawah permukaan
(Sumber : Utomo, 2009)

c. Drainasi Lereng (*Slope Drainage*)

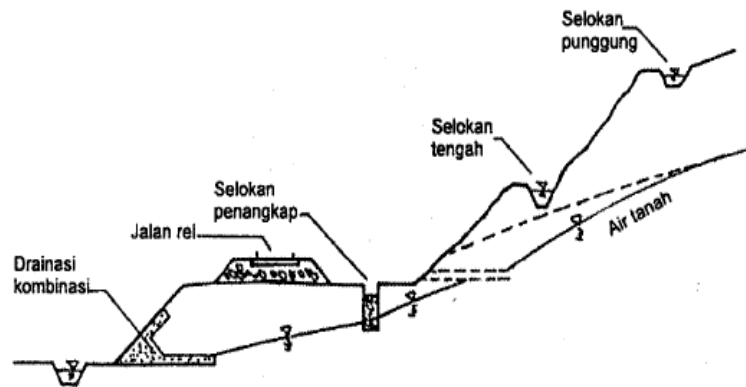
Drainasi lereng jalan rel dibuat dengan maksud dan tujuan di bawah ini :

- Sebagai upaya untuk mencegah agar air permukaan yang berasal dari punggung lereng tidak mengalir secara deras, karena aliran yang deras dapat mengakibatkan gerusan pada permukaan dan kaki lereng.
- Mencegah terjadinya rembesan air dari permukaan lereng ke dalam badan jalan rel, karena rembesan yang terjadi dapat menyebabkan lereng longsor secara mendadak dan atau memperlemah badan jalan rel.

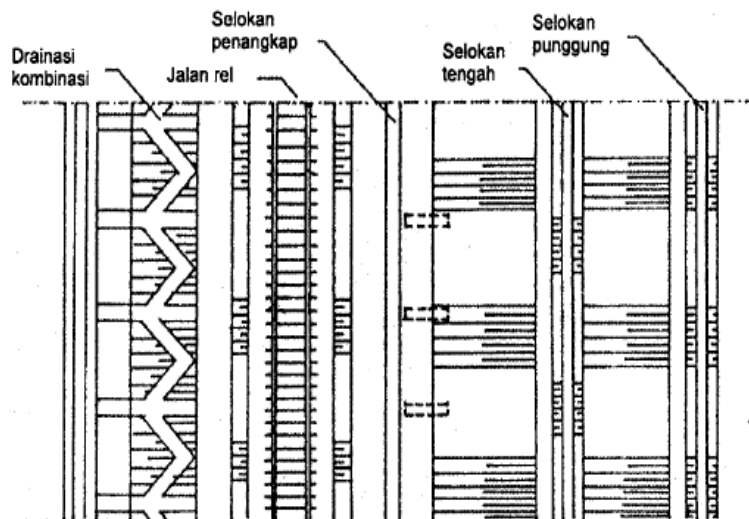
1. Jenis Drainasi Lereng

Terdapat empat jenis drainasi lereng yaitu:

- Drainasi punggung, berupa saluran terbuka yang memanjang di punggung lereng.
- Drainasi tengah, berupa saluran terbuka yang memanjang di kaki lereng.
- Drainasi penangkap, berupa saluran terbuka yang memanjang di kaki lereng.
- Drainasi kombinasi, yaitu kombinasi antara drainasi tegak lurus dan drainasi miring.



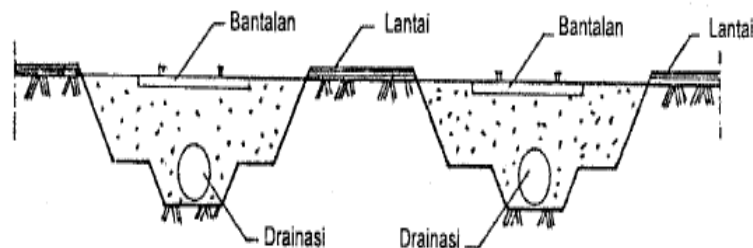
Gambar 3.18 Potongan melintang drainasi lereng
(Sumber : Utomo, 2009)



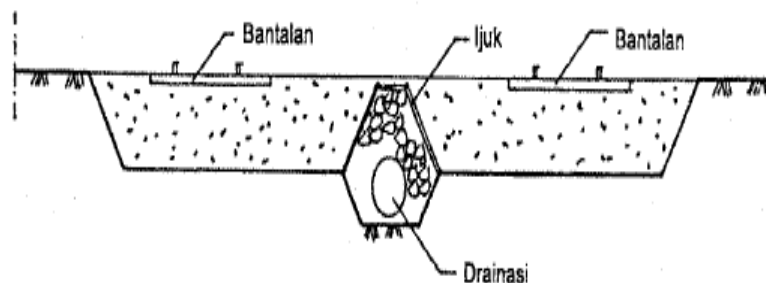
Gambar 3.19 Tampak atas drainasi lereng
(Sumber : Utomo, 2009)

d. Drainasi di Emplasemen

Kondisi spesifik terjadi di emplasemen, yaitu terdapat banyak jalur (*track*) yang berdampingan. Untuk mendapatkan pembuangan air yang baik dapat dibuat saluran yang terbuat dari pipa dengan dinding berlubang-lubang atau saluran yang terbuat dari batu kosong. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.21 dapat dilihat bahwa pada tiap-tiap jalur di bawahnya dipasang saluran drainasi. Sedangkan pada Gambar 3.22 diperlihatkan bahwa penggunaan satu saluran drainasi untuk fasilitas drainasi dua buah jalur yang berdampingan.



Gambar 3.20 Drainasi pada emplasemen dengan drainasi terpisah
(Sumber : Utomo, 2009)



Gambar 3.21 Drainasi pada emplasemen dengan drainasi menyatu
(Sumber : Utomo, 2009)

B. Perencanaan Geometrik Jalan Rel

1. Ketentuan Umum Perencanaan Geometrik jalan Rel

a. Standar Jalan Rel

Standar Ketentuan yang berkaitan dengan jenis dan komponen jalan rel di dalam desain geometrik jalan rel disajikan dalam Tabel 3.11.

Tabel 3.11 Klasifikasi Jalan Rel dengan Lebar Sepur 1067 mm.

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)	V_{maks} (km/jam)	P_{maks} Gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan Jarak antar sumbu bantalan (cm)	Jenis Penambat	Tebal Balas Atas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
I	$>20.10^6$	120	18	R.60/R54	Beton	Elastis Ganda	30	60
					60			
II	$10.10^6-20.10^6$	110	18	R.54/R.50	Beton/Kayu	Elastis Ganda	30	50
					60			
III	$5.10^6-10.10^6$	100	18	R.54/R.50 /R.42	Beton/Kayu/Baja	Elastis Ganda	30	40
					60			
IV	$2,5.10^6-5.10^6$	90	18	R.54/R.50 /R.42	Beton/Kayu/Baja	Elastis Ganda/Tunggal	25	40
					60			
V	$<2,5.10^6$	80	18	R.54	Kayu/Baja	Elastis Ganda/Tunggal	25	35
					60			

(Sumber: Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)

b. Kecepatan dan Beban Gandar

Dalam Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan teknis Jalur Konstruksi Jalan Kereta Api, beberapa tipe kecepatan dan beban gandar adalah :

1) Kecepatan Rencana

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

a) Untuk perencanaan struktur jalan rel

$$V_{rencana} = 1,25 \times V_{maksimum} \dots\dots\dots (3.1)$$

b) Untuk perencanaan jari-jari lengkung lingkaran peralihan

$$V_{\text{rencana}} = V_{\text{maksimum}} \dots \dots \dots (3.2)$$

c) Untuk perencanaan peninggian rel

$$V_{\text{rencana}} = c \times \frac{\sum NiVi}{\sum Ni} \dots \dots \dots (3.3)$$

Dimana,

$$c = 1.25$$

N_i = Jumlah kereta api yang lewat.

V_i = Kecepatan operasi.

2) Kecepatan Maksimum

Kecepatan maksimum adalah kecepatan tertinggi yang diijinkan untuk operasi suatu rangkaian kereta api pada lintas tertentu.

3) Kecepatan Operasi

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

4) Kecepatan komersial

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

5) Beban Gandar

Beban gandar maksimum yang dapat diterima oleh struktur jalan rel di Indonesia untuk semua kelas jalan adalah 22,5 ton untuk lebar 1435 mm dan 18 ton untuk lebar sepur 1067 mm.

2. Alinemen Horisontal

Alinemen horisontal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang horisontal, alinemen ini terdiri dari garis lurus dan lengkungan.

Alur perhitungan lengkung horisontal adalah sebagai berikut :

a. Menghitung Panjang lengkung

$$\theta_s = \frac{90 \times L_s}{\pi \times R} \dots \dots \dots (3.4)$$

$$\theta_c = \Delta s - 2\theta_s \dots \dots \dots (3.5)$$

$$L_s = 0,01 \times h \times V \dots \dots \dots (3.6)$$

$$Lc = \frac{\theta_c}{360^\circ} \times 2\pi R \dots\dots\dots (3.7)$$

$$L = 2 Ls + Lc \dots\dots\dots (3.8)$$

b. Menghitung Xc , Yc dan p

$$Xc = Ls - \frac{Ls^3}{40 \times R^2} \dots\dots\dots (3.9)$$

$$Yc = \frac{Ls^2}{6 \times R} \dots\dots\dots (3.10)$$

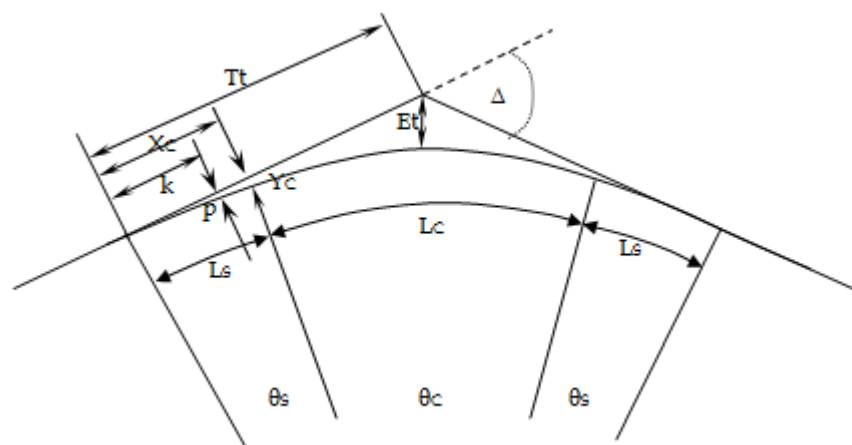
$$P = Yc - R(1 - \cos \theta_s) \dots\dots\dots (3.11)$$

$$k = Xc - R \sin \theta_s \dots\dots\dots (3.12)$$

c. Menghitung Tt dan Et .

$$Tt = (R + P) \operatorname{tg} \frac{\Delta s}{2} - K \dots\dots\dots (3.13)$$

$$Et = (R + P) \operatorname{sec} \frac{\Delta s}{2} - R$$



Gambar 3.22 Proyeksi lengkung horisontal.
(Sumber: Rosyidi, 2015)

Pada saat kereta api melewati lengkung di alinemen horisontal, maka kereta api tersebut akan mengalami gaya sentrifugal ke arah keluar yang menyebabkan kereta api tersebut seakan – akan terlempar keluar menjauhi titik pusat lengkung akibat gaya sentrifugal berdasarkan rumus berikut :

$$K = m \times \mathcal{E} = m \times \frac{v^2}{R} = \frac{G}{g} \times \frac{v^2}{R} \dots\dots\dots(3.14)$$

Dimana :

m = Massa kendaraan (kereta api)

\mathcal{E} = 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 dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu :

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

Beberapa hal yang dapat ditimbulkan akibat adanya gaya sentrifugal adalah :

- a. Rel luar cepat aus akibat gesekan flens roda di sisi luar.
- b. Sangat riskan terhadap bahaya keluar rel (anjlog).
- c. Sangat riskan terhadap bahaya guling akibat adanya perubahan arah laju kendaraan.

Oleh karena itu, untuk mengurangi bahaya yang dapat disebabkan oleh gaya sentrifugal tersebut maka perlu diambil tindakan dengan membuat lengkung lingkaran, lengkung peralihan, dan melakukan pelebaran sepur serta peninggian rel.

a. Lengkung Lingkaran

Untuk berbagai kecepatan rencana, besar jari – jari minimum yang ditinjau dari beberapa kondisi, yaitu :

- 1) Gaya sentrifugal diimbangi sepenuhnya oleh gaya berat. Persamaan dasar:

Gaya Berat = Gaya Sentrifugal

$$G \sin \alpha = \frac{mv^2}{R} \cos \alpha \dots\dots\dots(3.15)$$

$$G \sin \alpha = \frac{GV^2}{gR} \cos \alpha \dots\dots\dots(3.16)$$

$$\tan \alpha = \frac{V^2}{gR} \dots\dots\dots(3.17)$$

$$\text{jika : } \tan \alpha = \frac{h}{w} \dots\dots\dots(3.18)$$

$$\frac{mV^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha \dots\dots\dots(3.19)$$

$$h = \frac{wV^2}{gR} \dots\dots\dots(3.20)$$

dengan memasukkan satuan praktis :

w = Jarak diantara kedua titik kontak roda dan rel untuk lebar sepur
1067 mm = 1120 mm.

R = Jari – jari lengkung horisontal (m).

V = Kecepatan rencana (km/jam).

H = Peninggian rel pada lengkung horisontal (mm).

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/det²)

maka ;

$$R = \frac{8,8 V^2}{h} \dots\dots\dots(3.21)$$

Dengan peninggian rel maksimum 110 mm, maka :

$$R_{min} = 0,076 V^2 \dots\dots\dots(3.22)$$

- 2) Gaya sentrifugal diimbangi oleh gaya berat dan daya dukung komponen jalan rel.

Persamaan dasar :

Gaya Berat + Komponen Rel = Gaya Sentrifugal

$$G \sin \alpha + H \cos \alpha = \frac{mV^2}{R} \cos \alpha \dots\dots\dots(3.23)$$

$$G \sin \alpha = \left[\frac{GV^2}{gR} - H \right] \cos \alpha \dots\dots\dots(3.24)$$

$$G \tan \alpha = \left[\frac{GV^2}{gR} - H \right] \dots\dots\dots(3.25)$$

$$\text{Jika : } \tan \alpha = \frac{h}{w} \dots\dots\dots(3.26)$$

$$\text{Dan, } H = m \cdot a = \frac{G}{g} a \dots \dots \dots (3.27)$$

Maka :

$$a = \frac{v^2}{R} - g \frac{h}{w} \dots \dots \dots (3.28)$$

dimana a = percepatan sentrifugal (m/detik²)

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

Dengan peninggian maksimum, $h_{mask} = 110$ mm, maka :

$$R_{min} = 0,054 V^2 \dots \dots \dots (3.29)$$

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

$$R_{min} = 0,164 V^2 \dots \dots \dots (3.30)$$

b. 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 kecil, seperti terlihat pada Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Jari-Jari Minimum Yang Diijinkan.

Kecepatan Rencana (km/jam)	Jari –jari Minimum Lengkung Tanpa Lengkung Peralihan (m)	Jari – jari Minimum Lengkung Lingkaran 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 No.60 Tahun 2012)

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

$$\text{Perubahan gaya sentrifugal} = \frac{g a v a}{\text{waktu}} = \frac{m \cdot a}{t} \dots\dots\dots(3.31)$$

$$\frac{m \cdot a}{t} = \frac{m \frac{v^2}{R}}{\frac{L}{v}} \dots\dots\dots(3.32)$$

$$L = \frac{v^3 \cdot t}{a \cdot R} \dots\dots\dots(3.33)$$

$$\text{Jika } a_{\text{maksimum}} = 0,0478 \text{ g} \dots\dots\dots(3.34)$$

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

$$h = 5,95 \frac{v^2}{R} \dots\dots\dots(3.35)$$

dan dikonversi pada satuan paraktis maka :

$$Lh = 0.01 \times h \times V \dots\dots\dots(3.36)$$

Dimana,

Lh = panjang minimum lengkung peralihan (m).

H = peninggian pada rel luar di lengkung (mm).

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

R = jari – jari lengkung (m).

c. Peninggian Rel

Peninggian rel digunakan untuk mengimbangi timbulnya gaya sentrifugal pada kereta saat memasuki suatu lengkung horisontal. Gaya sentrifugal tersebut mengakibatkan kereta cenderung terlempar ke luar dari lengkung. Salah satu cara untuk membantu mereduksi gaya sentrifugal yang membebani kereta api adalah meninggalkan rel luar secara relatif terhadap rel bagian dalam di lengkung horisontal.

1) Peninggian rel minimum

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

Persamaan dasar :

Gaya Sentrifugal = Gaya Berat + Komponen Rel

$$\frac{m v^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha + H \cos \alpha \dots\dots\dots(3.37)$$

$$G \sin \alpha = \left[\frac{g v^2}{g R} - H \right] \cos \alpha \dots\dots\dots(3.38)$$

$$G \tan \alpha = \left[\frac{g v^2}{g R} - H \right] \dots\dots\dots(3.39)$$

$$\text{Jika : } \tan \alpha = \frac{h}{w} \dots\dots\dots(3.40)$$

$$\text{Dan, } H = m \cdot a = \frac{G}{g} a \dots\dots\dots(3.41)$$

Maka :

$$a = \frac{v^2}{g R} - g \frac{h}{w} \dots\dots\dots(3.42)$$

dimana a = percepatan sentrifugal (m/detik²)

$$h = \frac{w v^2}{g R} - \frac{w \cdot a}{g} \dots\dots\dots(3.43)$$

jika : W = 1120 mm. g = 9.81 m/detik², dan a = 0,0478 g (m/detik²),
maka:

$$h_{min} = \frac{8,8 v^2}{R} - 53,5 \text{ (dalam satuan mm)} \dots\dots\dots(3.44)$$

2) Peninggian Rel Normal

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

Persamaan dasar:

Gaya Sentrifugal = Gaya Berat

$$G \sin \alpha = \frac{m v^2}{R} \cos \alpha \dots\dots\dots(3.45)$$

$$G \sin \alpha = \frac{G v^2}{g R} \cos \alpha \dots\dots\dots(3.46)$$

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{g R} \dots\dots\dots(3.47)$$

$$\text{jika : } \tan \alpha = \frac{h}{w} \dots\dots\dots(3.48)$$

$$\frac{mv^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha \dots\dots\dots(3.49)$$

$$h = \frac{wv^2}{gR} \dots\dots\dots(3.50)$$

Dengan memasukkan satuan praktis :

W = jarak di antara kedua titik kontak roda dan rel = 1120 mm.

R = jari – jari lengkung horisontal (m).

V = kecepatan rencana (km/jam).

h = peninggian rel pada lengkung horisontal (mm).

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

maka :

$$h = \frac{8,8 v^2}{R} \text{(dalam mm)} \dots\dots\dots(3.51)$$

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

$$V = 4,3 \sqrt{R} \dots\dots\dots(3.52)$$

Jika :

$$H = k \frac{v^2}{R} \dots\dots\dots(3.53)$$

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

$$110 = k \frac{[4,3 \sqrt{R}]^2}{R} \dots\dots\dots(3.54)$$

$$K = 9,95$$

Jadi peninggian rel normal ditentukan adalah :

$$H_{\text{normal}} = 5,59 \frac{v^2}{R} \text{(dalam satuan mm)} \dots\dots\dots(3.55)$$

3) Peninggian Rel Maksimum

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

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

$$SF \times G \sin \alpha \times y = G \cos \alpha \times \frac{W}{2} \dots\dots\dots (3.56)$$

$$\tan \alpha = \frac{W}{SF \times 2 \times y} \text{ dan } \tan \alpha = \frac{h}{gR} \dots\dots\dots (3.57)$$

$$\text{maka : } \frac{h}{W} = \frac{W}{SF \times 2 \times y} \dots\dots\dots (3.58)$$

$$SF = \frac{W}{h_{maks} \times 2 \times y} \dots\dots\dots (3.59)$$

Jika :

$y = 1700$ mm (jarak titik berat gerbong/kereta terhadap titik 0). $W = 1120$ mm (= 1067 mm + e).

$SF = 3,325$.

Maka :

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

dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa peninggian rel rencana/desain harus memenuhi syarat :

$$h_{minimum} < h_{normal} < h_{maksimum}$$

nilai rencana dibulatkan menjadi bilangan kelipatan 5 mm di atasnya.

Tabel 3.13 Peninggian Jalan Rel dengan Lebar Sepur 1067

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 : Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)

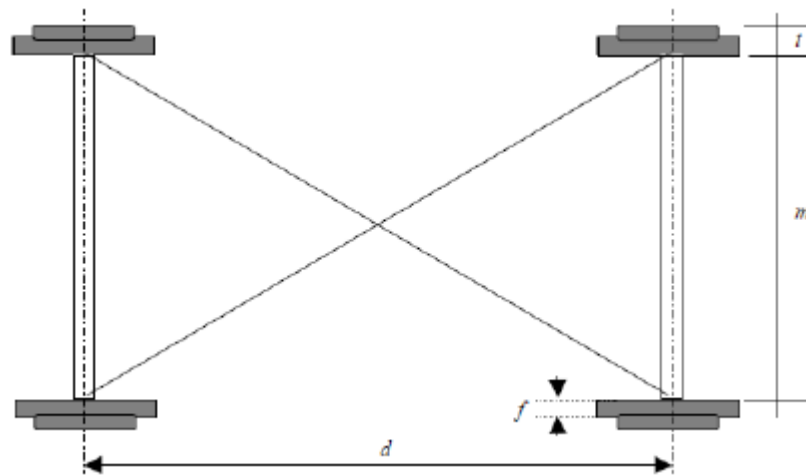
d. Pelebaran Sepur

Pada saat gerbong dengan dua gandar kokoh melalui suatu tikungan, maka roda di muka bagian sisi terluar (pada rel luar) dapat 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 mengurangi gaya tekan akibat

terjepitnya kereta, dengan demikian perlu dilakukan pelebaran rel agar roda tidak cepat aus.

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

- 1) Jari – jari lengkung (R).
- 2) Ukuran atau jarak gandar muka – belakang yang kokoh / *rigid wheel base* (d), sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 3.23.
- 3) Kondisi keausan roda dan rel.



Gambar 3.23 Skematik gandar muka – belakang kokoh.

(Sumber : Rosyidi, 2015)

Keterangan Gambar 3.23 :

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

JNR : d = 4,60m

m = 1000 mm

m = 988 mm

f = 30 mm

f = 22 mm

t = 130 mm

Jika R semakin kecil dan d semakin besar, kemungkinan terjadi adalah terjepitnya kereta dalam rel. supaya kedudukan roda dan rel tidak terjepit maka diperlukan pelebaran sepur (w) dengan pendekatan matematis.

$$w = \frac{4500}{R} - 8 \text{ (mm)} \dots\dots\dots(3.60)$$

untuk $d = 3,00 \text{ m}$ dan $e = 4 \text{ mm}$ ($S = 1067$).

$$w = \frac{8000}{R} - 8 \text{ (mm)} \dots\dots\dots(3.61)$$

untuk $d = 4,00 \text{ m}$ dan $e = 4 \text{ mm}$ ($S = 1067$).

Secara praktis pelebaran sepur dapat merujuk pada Tabel 3.14 yang merupakan penggolongan pelebaran seput berdasar jari – jari lengkung untuk lebar sepur 1067 mm.

Tabel 3.14 Pelebaran Sepur 1067 mm.

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

(Sumber : Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)

e. Lengkung S

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

3. Alinemen Vertikal

Alinemen avertikal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang vertikal yang melalui sumbu jalan rel tersebut. Dipergunakan bila terdapat perbedaan kelandaian sehingga dengan adanya lengkung vertikal peralihan dapat terjadi secara berangsur – angsur dari suatu kelandaian ke kelandaian berikutnya. Besar jari – jari minimum lengkung bergantung pada kecepatan rencana yang disajikan dalam Tabel 3.15 dan skematik alinemen vertikal tersaji pada Gambar 3.24.

Tabel 3.15 Jari-Jari Minimum Lengkung Vertikal

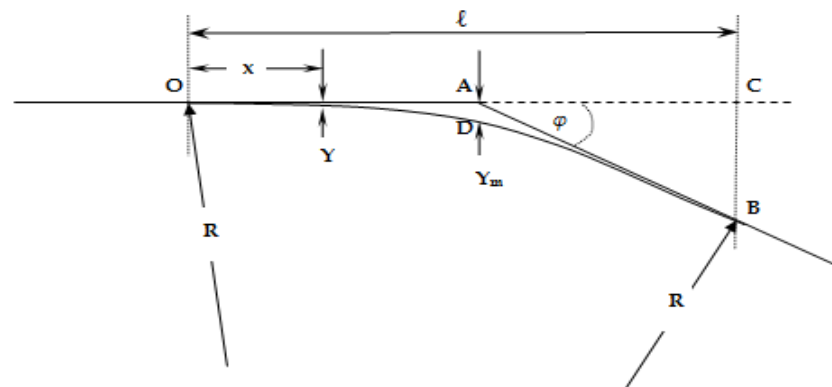
Kecepatan Rencana , $V_{rencana}$ (Km/Jam)	Jari – Jari Minimum Lengkung Vertikal, R_{min} (Meter)
Lebih besar dari 100	8000
Sampai 100	6000

(Sumber : Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986)

Adapun kriteria dalam membentuk alinemen vertikal adalah :

- 1) Beberapa kelandaian yang berlainan dalam jarak pendek disederhanakan menjadi satu kelandaian.
- 2) Jika penurunan beralih ke pendakian atau sebaliknya, disediakan bagian mendatar dengan panjang minimum 200 m.
- 3) Tinggi puncak rel sedapat mungkin tidak diturunkan, kecuali tidak memenuhi syarat – syarat yang disebutkan sebelumnya.

Rumus dasar lengkung : $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{R}$ (3.62)



Gambar 3.24 Skematik lengkung vertikal.

(Sumber : Rosyidi, 2015)

Dimana :

R = jari – jari lengkung peralihan.

l = panjang lengkung peralihan.

A = titik tekuk lengkung peralihan.

ϕ = perbedaan landai.

Letak titik A (pada Gambar 3.24), diperoleh:

Diberikan $x = l$

$$1) \frac{dy}{dx} = \frac{l}{R},$$

dan $l = \varphi R$ (3.63)

$$Xm = OA = \frac{1}{2} l$$
(3.64)

$$Xm = \frac{R}{2} \varphi$$
(3.65)

$$2) Y = \frac{x^2}{2R}, \text{ dan } l = \varphi R \quad (3.66)$$

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

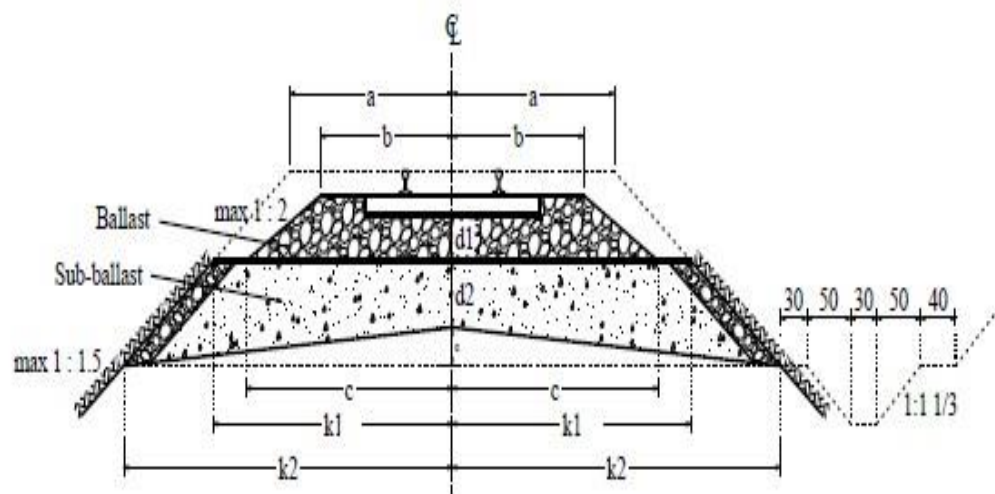
$$Ym = \frac{\frac{1}{4} \varphi^2}{2R} = \frac{\varphi^2 R^2}{8R}$$
(3.67)

$$Ym = \frac{R}{8} \varphi^2$$
(3.68)

Menggunakan persamaan 3.67 dan 3.68, selanjutnya dengan R yang ditentukan untuk berbagai harga kecepatan dan kelandaian, maka dapat dihitung dimensi lengkung peralihan Xm dan Ym .

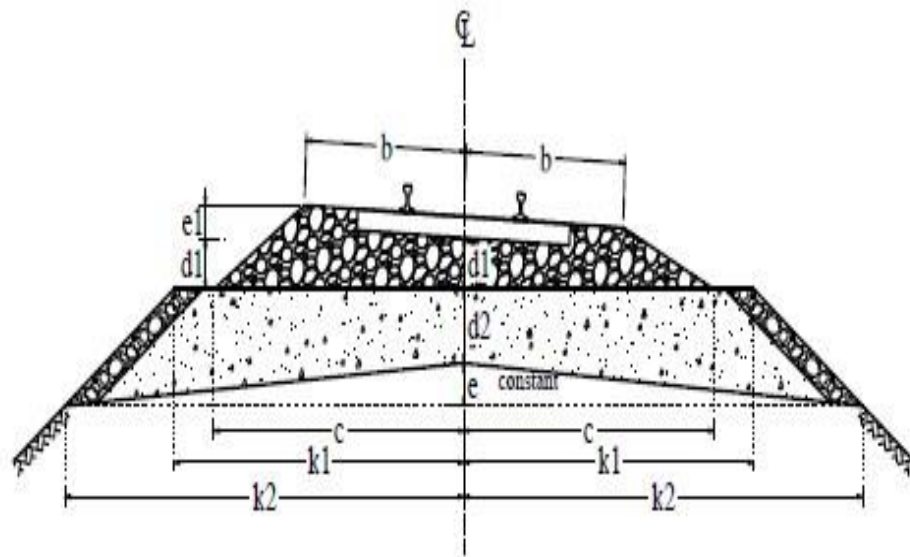
4. Potongan Melintang

Penampang melintang jalan rel adalah potongan pada jalan rel, dengan arah tegak lurus sumbu jalan rel, dimana terlihat bagian – bagian dan ukuran – ukuran jalan rel dalam arah melintang (Gambar 3.25).



Gambar 3.25 Penampang melintang jalan rel pada bagian lurus

(Sumber : Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)



Gambar 3.26 Penampang melintang jalan rel pada bagian tikungan
(Sumber : Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)

Ukuran – ukuran penampang melintang jalan rel disajikan dalam Tabel 3.16.

Tabel 3.16 Dimensi Penampang Melintang Jalan Rel

Kelas Jalan Rel	Vmaks (km/Jam)	d ₁ (cm)	b (cm)	c (cm)	k ₁ (cm)	d ₂ (cm)	e (cm)	k ₂ (cm)	a (cm)
1 st	12 0	30	150	235	265-315	15-50	25	375	185-237
2 nd	11 0	30	150	254	265-315	15-50	25	375	185-237
3 rd	10 0	30	140	244	240-270	15-50	22	325	170-200
4 th	90	25	140	234	240-250	15-35	20	300	170-190
4 th _s	80	25	135	211	240-250	15-35	20	300	170-190

(Sumber : Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012)