

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Studi Terdahulu

Beberapa studi terdahulu yang pernah dilakukan sebelumnya tentang perencanaan jalan kereta api dan *Double Track* yang relevan, yaitu :

1. “Analisa Kelayakan Konstruksi Bagian Atas Jalan Rel Dalam Kegiatan Revitalisasi Jalur Kereta Api Lubuk Alung – Kayu Tanam (KM 39,669 – KM 60,038)” oleh Wilton Wahab dan Sicilia Afriyani (2017) pada jurnal Teknik Sipil ITP. Pada Jalur Kereta Api Lubuk Alung – Kayu Taman ini telah lama tidak digunakan dan adanya peningkatan konstruksi jalan rel kereta api pada rute tersebut dari kelas II menjadi kelas I. Metode yang digunakan adalah standar perencanaan jalan rel di Indonesia dengan Peraturan Dinas nomor 10 tahun 1986 sebagai acuan perencanaan dan wilayah yang digunakan untuk kegiatan revitalisasi jalur kereta api Lubuk Alung sampai Kayu Tanam layak dilakukan peningkatan konstruksi sepanjang 20,339 km. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rel eksisting (tipe R33) tidak layak digunakan tetapi Rel (tipe R54) dapat digunakan untuk konstruksi jalan rel kelas I dengan beban gandar 18 ton sehingga bantalan beton prategang (mutu K-500) dapat digunakan karena kemampuan beton prategang untuk menahan beban rel lebih besar dari beban rel yang terdistribusi ( $Q_b > Q_r$ ).

2. “Kajian Pola Operasi Jalur Ganda Kereta Api Muara Enim – Lahat” oleh Dian Setiawan (2016) pada jurnal Ilmiah Semesta Teknika. Metode yang digunakan adalah Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM.33 Tahun 2011 tentang jenis, kelas, dan kegiatan di Stasiun Kereta Api sebagai acuan dan wilayah yang digunakan untuk kajian pola operasi jalur ganda dari Stasiun Muara Enim – Lahat Sumatera Selatan sepanjang  $\pm$  40 km. Hasil penelitian menunjukkan bahwa angkutan kereta api antara Stasiun Muara Enim – Stasiun Lahat oleh lokomotif tipe CC205 dan CC202, direncanakan akan menarik 70 gerbong di jalur ganda panjang rangkaian sekitar 950 meter begitu juga pada 4 perjalanan kereta api dan angkutan penumpang dengan panjang rangkaian hampir 200 meter.
3. “Perencanaan Jalur Ganda Kereta Api Surabaya – Krian” oleh Aria Dwipa Sukmana dan Budi Rahardjo (2014) pada jurnal Teknik POMITS. Perencanaan penambahan kapasitas jalan kereta api di jalur Surabaya – Krian dapat melayani lebih banyak jumlah perjalanan yang berdampak pada penambahan jumlah kapasitas penumpang. Metode yang digunakan adalah PM. 83 Tahun 2011 tentang standar biaya Kementerian Perhubungan Tahun Anggaran 2012 dan Peraturan Dinas nomor 10 tentang perencanaan konstruksi jalan rel sebagai acuan perencanaan konstruksi penambahan jalur kereta api baru untuk jalur Surabaya – Krian. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini dengan digunakan tipe rel R54 dan beban gardar 18 ton dengan lebar rel 1067 mm. Tipe penambat yang digunakan yaitu Pandrol (Elastik ganda) dengan biaya yang dibutuhkan dalam pembangunan sebesar Rp. 615,558,150,.

4. “Perencanaan Geometrik Jalan Rel Antara Banyuwangi – Situbondo – Probolinggo” oleh Rifchi Sulistia Rosadi dan Anak Agung Gde Kartika (2013) pada jurnal Teknik POMITS. Perencanaan trase jalan rel sebagai alternatif angkutan umum yang menghubungkan kabupaten Banyuwangi, Situbondo dan Probolinggo dapat memberi jalur transportasi baru yang dapat mengurangi kapasitas jalan di daerah pantura yang berada di Situbondo. Metode yang digunakan adalah Peraturan Dinas nomor 10 tentang penjelasan perencanaan konstruksi jalan rel dan Undang – Undang nomor 23 Tahun 2007 tentang perkeretaapian sebagai acuan alternatif baru berupa perencanaan geometri jalan rel dari Banyuwangi menuju ke Probolinggo yang melewati Kabupaten Situbondo sepanjang 214 km. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini dengan digunakan tipe rel R54 dan beban gandar 18 ton dengan lebar rel kereta api 1067 mm. Tipe penambat yang digunakan yaitu Pandrol (Elastik ganda) dengan sambungan las ditempat.
5. “Evaluasi Geometrik Jalan Pada Tikungan Laowomaru” oleh Marwan Lubis, Nuril Mahda dan Moelky Ardan (2019) pada jurnal SEMNASTEK UISU. , kondisi jalan tersebut merupakan jalan lurus dan terdapat beberapa tikungan tajam sehingga sangat tidak nyaman bila dilalui pengguna jalan yang melintasinya. Untuk itu perlu di evaluasi dengan merencanakan alinyemen Horizontal menggunakan standar Bina Marga. Dari hasil perhitungan alinemen horisontal data lapangan *existing* pada tikungan I dan tikungan II tidak memenuhi standar Bina Marga dalam perencanaan geometrik jalan raya pada tikungan. Dengan hasil perencanaan alinemen horisontal pada

tikungan I dan tikungan II dengan kecepatan rencana  $V_r = 70$  km/jam dan jari-jari yang direncanakan sebesar  $R_c = 318$  m didapat nilai  $L < 2 T_s$ , dan landai relatif sebesar 0,43 %, maka perencanaan alinyemen horizontal pada tikungan I dan II telah memenuhi standar Bina Marga serta layak untuk digunakan sehingga dapat tercapai keamanan, kenyamanan, dan kelancaran dalam berlalu-lintas.

6. “Perencanaan Jalur Ganda (Double Track) Jalan Rel Ruas Semarang - Gubug” oleh Christiano Pancara, Erha Intan, dkk (2019) pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro. perencanaan didapat penempatan trase jalur ganda di sisi kanan trase eksisting dari arah Semarang ke Gubug dimana ketersediaan lahan terbuka lebih banyak dengan elevasi track baru setinggi elevasi track eksisting. Konstruksi jalan rel sesuai kelas jalan rel I dengan tipe rel R54, penambat elastis ganda Pandrol tipe e-clip dengan rubber pad, bantalan beton pratekan tipe N-67 produksi PT.WIKA Beton, ketebalan balas atas 30 cm, balas bawah setebal 15 cm. Tubuh jalan rel double track lebih banyak terletak pada posisi timbunan dengan tinggi antara 30 cm hingga 165 cm menggunakan perkuatan penahan tanah. Pematasan permukaan berupa saluran samping dengan penampang persegi panjang dari beton bertulang.
7. “Perencanaan Jalan Rel Dan Geometri Trase Dari Ponorogo - Slahung Untuk Reaktivasi” oleh Cut Munawwarah dan Wahyu Herijanto (2020) pada Jurnal Teknik ITS. Tujuan pengaktifan kembali jalur rel kereta api Ponorogo-Slahung diharapkan dapat terjadi penurunan volume kepadatan kendaraan dengan mengalihkan pengangkutan barang dari menggunakan

truck menjadi menggunakan kereta api. Dari hasil analisis perhitungan, didapatkan trase yang digunakan yaitu trase eksisting dengan menggunakan kereta LRT sebagai alternatif. Berdasarkan perhitungan geometrik rel dengan desain kecepatan 40 km/jam dan lengkung horizontal direncanakan berupa S-C-S dengan jumlah 9 tikungan. Untuk perhitungan konstruksi jalan rel menggunakan jenis rel 115 RE berdasarkan TCRP report 155, bantalan beton menggunakan produk dari PT. WIKA BETON yaitu tipe S-35 dengan panjang bantalan untuk lebar sepur 1435 mm yaitu 2440 mm.

8. “Perencanaan Geometri Jalur Monorel Kota Bandung Pada Rute Alternatif Koridor Timut-Barat” oleh Fariezal Rakhman (2019) pada Thesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Metode yang digunakan adalah analisis multikriteria untuk menentukan alternatif trase sebagai dasar perencanaan geometrik. Perencanaan geometrik yang dilakukan adalah perhitungan alinemen horizontal dan alinemen vertikal sesuai dengan spesifikasi monorel yang digunakan yaitu *Hitachi type Small*. Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini adalah alternatif trase jalur monorel untuk koridor timur-barat sepanjang 12,62 kilometer dengan sistem elevated double track serta melewati berbagai pusat kegiatan di Kota Bandung. Trase tersebut dilayani oleh 2 stasiun ujung dan 15 stasiun pemberhentian.
9. “Perencanaan Jalur Ganda (*Double Track*) Lintasan Kereta Api pada Emplasemen Stasiun Wonokromo - Stasiun Sidoarjo (KM 7+881 - KM 25+510) oleh Jimmy Jeremy dan Nugroho Utomo pada Jurnal Ilmiah Teknik Sipil (KERN). Stasiun Wonokromo - Stasiun Sidoarjo masih menggunakan jalur tunggal yang menyebabkan layanan kereta api terkadang

mengalami keterlambatan keberangkatan, berdasarkan urgensi tersebut maka perlu dilakukan perencanaan jalur ganda agar dapat memenuhi peningkatan perpindahan masyarakat seperti prediksi RIPNAS. Hasil analisis dan perencanaan diperoleh penempatan trase jalur ganda dilakukan di sebelah timur trase eksisting.

10. “Pembangunan Transportasi Kereta Api Di Kota Solo Akhir Abad XIX dan Awal Abad XX” oleh Auditya Martin pada Universitas Sebelas Maret (2010). Setelah kesuksesan trem kuda Solosche Tramweg Maatschappij (STM) yang ada di Kota Solo, muncul trem uap yang mencerminkan modernisasi dalam bidang transportasi kereta. Pergantian dari tenaga kuda ke tenaga uap membuat jalur trem bisa ditambah lebih jauh. Kebutuhan masyarakat Kota Solo terhadap transportasi kereta api difasilitasi dengan pembangunan beberapa stasiun dan halte, yang fungsinya untuk menaik dan menurunkan penumpang.

## **2.2 Tinjauan Umum Moda Transportasi Kereta Api**

Moda transportasi kereta api dalam menjalankan fungsinya sebagai salah satu transportasi untuk orang dan barang mempunyai karakteristik yang berkaitan dengan keunggulan dan kelemahan.

Menurut Suryo H.T.U (2009), perkembangan transportasi kereta api menggunakan jalan rel bermula dari dikembangkannya usaha untuk meningkatkan pelayanan transportasi yang meliputi kuantitas pengangkutan, kecepatan perjalanan dan ketahanan sarana-prasarananya. Adapun perbedaan antara jalan raya dan jalan rel disebabkan karena penggunaan flens yang ada pada roda kereta

api, sehingga perbandingan karakteristik antara jalan raya dan jalan rel dapat ditunjukkan pada tabel 2.1 berikut:

**Tabel 2.1 Perbandingan antara Jalan Raya dan Jalan Rel**

Item	Jalan Raya	Jalan Kereta Api
Bahan Jalur	Perkerasan <i>flexible</i> , perkerasan kaku, perkerasan <i>composite</i>	Berupa batang di atas pondasi elastis
Lalu Lintas	Penggunanya berbagai jenis lalu lintas, dari pejalan kaki sampai kendaraan berat.	Jalur jalan rel disediakan untuk pergerakan kereta api yang terjadwal.
Tegangan	Tegangan diteruskan ke tanah dasar melalui formasi lapisan perkerasan.	Beban berat dari lokomotif dan gerbong diterima oleh struktur jalan rel. Sehingga struktur jalan rel harus kuat.
Kecepatan	Digunakan oleh berbagai macam jenis kendaraan, maka kecepatan kendaraan harus dibatasi.	Tidak ada hambatan pada jalurnya, maka kecepatan yang relatif lebih tinggi lebih dapat dicapai.
Gesekan	Kendaraan berjalan karena adanya gesekan antar roda(karet) dengan permukaan jalan, sehingga gesekan yang dihasilkan tinggi.	Kereta api berjalan karena adanya gesekan antara kepala rel(baja) dengan roda baja. Gesekannya relatif rendah, yaitu kira-kira 20% dari gesekan jalan raya.
Perpindahan Jalur	Perpindahan jalur jalan raya melalui pertemuan atau persilangan jalan.	Perpindahan jalur melalui peralatan khusus, yang dikenal sebagai wesel.

Sumber : Utomo ,2009

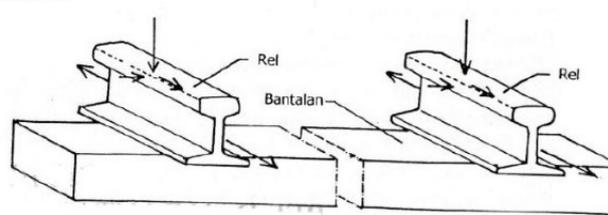
### 2.3 Rel Kereta Api

Menurut Utomo (2009), 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.

Menurut Utomo (2009), rel pada jalur kereta api utama dipengaruhi oleh beban dari roda diteruskan ke bantalan, sehingga rel merupakan batang yang disangga oleh bantalan. Pada sistem sanggahan yang sedemikian, tekanan tegak lurus dari roda menyebabkan momen lentur pada rel di antara bantalan-bantalan.

Menurut Rosyidi (2015), gaya horizontal yang disebabkan oleh gaya angin, gesekan arah lateral dari kereta api, dan gaya sentrifugal menyebabkan terjadinya momen lentur arah horizontal yang ditunjukkan pada gambar 2.1 berikut :

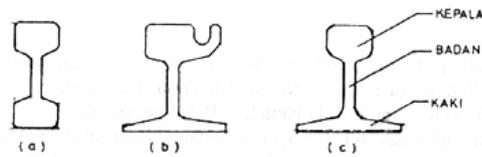


Gambar 2.1 Gaya- gaya yang bekerja pada rel

Supaya rel dapat menahan momen-momen tersebut, maka rel dibuat sebagai batang dengan bentuk dasar profil I. Pengembangan dari bentuk dasar profil I tersebut terdapat tiga macam bentuk rel :

- a) Rel berkepala dua
- b) Rel alur (*Grooved Rail*)
- c) Rel Vignola

Tiga macam bentuk rel tersebut dapat ditunjukkan pada gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2 Macam-macam bentuk rel

### 2.3.1 Tipe dan karakteristik rel

Tipe rel yang digunakan untuk jalur lintas kereta api dengan lebar jalan 1067 mm pada dasarnya adalah sesuai dengan kelas jalan relnya, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.2 berikut :

**Tabel 2.2. Tipe rel yang digunakan pada jalan rel dengan lebar 1067 mm**

Kelas Jalan Rel	Kapasitas Angkut Lintas (x10 <sup>6</sup> ton/tahun)	Kecepatan Maksimum (km/jam)	Beban Gandar	Tipe Rel	Jenis Bantalan/ Jarak (mm)	Jenis Penambat Rel
I	>20	120	18	R.60/R.54	Beton 600	EG
II	10-20	110	18	R.54/R.50	Beton/Kayu 600	EG
III	5-10	100	18	R.54/R.50 /R.42	Beton/Kayu/Baja 600	EG
IV	2,5-5	90	18	R.54/R.50 /R.42	Beton/Kayu/Baja 600	EG/ET
V	<2,5	80	18	R.42	Kayu/Baja 600	ET

Keterangan, EG : Elastis Ganda      ET : Elastis Tunggal

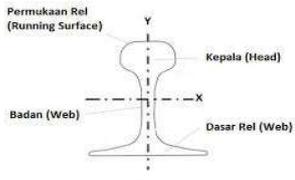
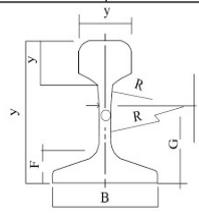
Sumber : Peraturan Menteri Perhubungan Nomer: PM 60.Tahun 2012

Karakteristik rel yang sesuai dengan tipe relnya masing-masing ditunjukkan pada tabel 2.3 berikut :

**Tabel 2.3. Karakteristik Rel**

Karakteristik Rel		Tipe Rel			
Karakteristik	Notasi dan Satuan	R.42	R.50	R.54	R.60
Tinggi rel	H (mm)	138	153	159	172
Lebar kaki	B (mm)	110	127	140	150
Lebar kepala	C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
Tebal badan	D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
Tinggi kepala	E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
Tinggi kaki	F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
Jarak tepi bawah kaki rel ke garis horizontal dari pusat kelengkungan badan rel	G (mm)	72,00	76,00	74,97	80,95
Jari-jari kelengkungan badan rel	R (mm)	320	500	508	120
Luas penampang	A (cm <sup>2</sup> )	54,26	64,20	69,34	76,86
Berat rel	W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
Momen inersia terhadap sumbu X	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	1369	1960	2346	3055

**Tabel 2.3. Karakteristik Rel (Lanjutan)**

Karakteristik Rel		Tipe Rel			
Karakteristik	Notasi dan Satuan	R.42	R.50	R.54	R.60
Jarak tepi bawah kaki rel ke garis netral	Yb (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
Penampang melintang	H (mm)				

Sumber : Utomo,2009

### 2.3.2 Jenis Rel

Jenis rel yang dimaksud adalah jenis rel menurut panjangnya. Terdapat tiga jenis rel menurut panjangnya, yaitu (Utomo, 2009) :

1. Rel standar, PT Kereta Api Indonesia (Persero) menggunakan panjang 25 meter sebagai pengganti panjang rel standar yang sebelumnya memiliki panjang 17 meter ini memiliki beberapa keuntungan sebagai berikut:
  - a. Jumlah sambungan rel yang sebelumnya sebanyak 59 sambungan setiap kilometer sekarang menjadi 40 sambungan tiap kilometer. Dengan adanya penambahan panjang pada rel tersebut maka terdapat penghematan sambungan rel sebesar 32%.
  - b. Berkurangnya sambungan pada rel tersebut dapat meningkatkan kenyamanan perjalanan, karena getaran pada kereta tersebut akan meningkat pada saat roda melewati sambungan rel.

2. Rel pendek, dibuat dari beberapa rel standar yang disambung dengan cara pekerjaan pengelasan yang dilakukan dengan proses *flash welding*. Batasan rel pendek yang disambung dengan cara pengelasan di tempat pengerjaan guna untuk memudahkan pengangkutan ke lapangan.
3. Rel Panjang, panjang minimum rel panjang tergantung pada jenis bantalan yang digunakan dan tipe rel, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.4 berikut:

**Tabel 2.4. Panjang minimum rel panjang**

Jenis Bantalan	Tipe Rel			
	R.42	R.50	R.54	R.60
Bantalan Beton	200 m	225 m	250 m	275 m

*Sumber : Utomo (2009)*

### 2.3.3 Pemuaian panjang minimum rel panjang

Perhitungan panjang minimum pada rel panjang ini adalah berdasarkan pada pemuaian rel, gaya normal pada rel dan gaya lawan yang terjadi pada bantalan rel.

Untuk menghitung pertambahan panjang pada rel digunakan rumus :

$$\Delta L = L \times \alpha \times \Delta T \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan :

L : Panjang rel (m)

$\alpha$  : koefisien pemuaian rel ( $1,2 \times 10^{-5}$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta T$  : Perubahan suhu udara ( $^{\circ}\text{C}$ )

Pada perhitungan gaya yang terjadi pada batang rel rumus yang digunakan :

$$F = \frac{\Delta L \times E \times A}{L} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan :

F : gaya yang terjadi pada batang rel

E : modulus elastisitas rel ( $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ )

A : Luas Penampang ( $\text{cm}^2$ )

Dengan mensubstitusikan (2.1) dan (2.2) maka digunakan rumus :

$$F = E \times A \times \alpha \times \Delta T \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan :

$\alpha$  : koefisien pemuaian rel ( $1,2 \times 10^{-5}$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )

Maka dapat ditentukan tipe rel yang digunakan dengan anggapan bahwa rel merupakan suatu balok yang tidak berhingga panjangnya. Dengan pembebanan terpusat dan ditumpu oleh struktur yang mempunyai modulus elastisitas jalan rel.

#### 2.3.4 Besar momen maksimum

Perhitungan besar momen maksimum pada rel dipengaruhi oleh data tipe rel sehingga didapatkan kelas jalan rel serta jarak antar bantalan, sehingga dapat diselesaikan dengan langkah perhitungan sebagai berikut :

##### 1. *Dumping factor* ( $\lambda$ )

Perhitungan faktor reduksi pada beban kereta api dipengaruhi oleh kekakuan jalan rel dan momen inersia terhadap sumbu x maka digunakan rumus :

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI_x}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan :

$E$  = Modulus Elastisitas (Kg/cm<sup>2</sup>)

$I_x$  = Momen Inersia terhadap sumbu X (cm<sup>4</sup>)

$k$  = Modulus kekakuan jalan rel (Kg/cm<sup>2</sup>)

## 2. Beban dinamis pada rel kereta api ( $P_d$ )

Perhitungan beban dinamis mempengaruhi faktor kenyamanan penumpang dan kecepatan, sehingga dapat mempengaruhi beban yang dihasilkan pada rel kereta api yang digunakan rumus :

$$P_d = P_s \times I_p \dots\dots\dots (2.5)$$

$$P_d = \left( \frac{P_g}{2} \right) \times \left( 1 + \left( 0,01 \left( \frac{V_{maks}}{1,609} - 5 \right) \right) \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan :

$P_s$  = Beban roda (kg)

$I_p$  = Faktor dinamis

$P_g$  = Beban Gandar (kg)

$V_{max}$  = Kecepatan maksimum (km/jam)

## 3. Momen maksimum pada rel kereta api ( $M_{max}$ )

Perhitungan momen maksimum dipengaruhi oleh beban dinamis dan faktor reduksi, maka digunakan rumus :

$$M_{max} = \frac{P_d}{4 \lambda} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan :

$P_d$  = Beban dinamis (ton)

$\lambda$  = *Dumping factor*

#### 4. Tegangan yang terjadi pada rel kereta api ( $\delta$ )

Perhitungan tegangan yang terjadi pada rel dipengaruhi oleh momen maksimum dan momen inersia pada sumbu x, maka digunakan rumus :

$$\delta = \frac{M_1 \times Y_b}{I_x} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan :

$M_1$  = 0,85 x  $M_{\max}$

$I_x$  = momen inersia pada sumbu x ( $\text{cm}^4$ )

$Y_b$  = Jarak tepi bawah rel ke garis netral (cm)

Sesuai dengan standar jalan rel Indonesia, termasuk beban gandar maksimum untuk semua kelas jalan rel sebesar 18 ton. Maka dapat dihitung besarnya tegangan yang terjadi sesuai dengan kelas dan tipe rel seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5 berikut :

**Tabel 2.5. Tegangan Izin Jalan Rel**

Kelas	Tipe Rel	Tegangan ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Tegangan Izin ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) Menurut JNR
I	R 60	1042	1325
	R 54	1195	
II	R 54	1146	1325
	R 50	1236	

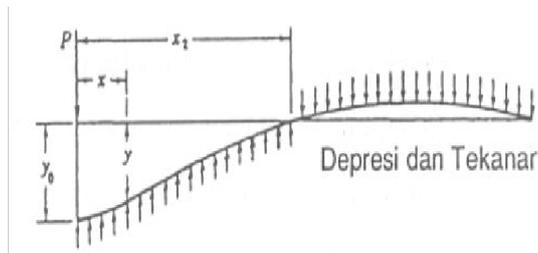
**Tabel 2.5. Tegangan Izin Jalan Rel (Lanjutan)**

Kelas	Tipe Rel	Tegangan (kg/cm <sup>2</sup> )	Tegangan Izin (kg/cm <sup>2</sup> ) Menurut JNR
III	R 54	1097	1663
	R 50	1183	
	R 42	1474	
IV	R 54	1048	1843
	R 50	1130	
	R 42	1409	
V	R 42	1343	1843

Sumber : Peraturan Dinas No.10 tahun 1986

**2.3.5 Besar defleksi pada rel kereta api**

Besar defleksi pada setiap titik di sepanjang rel akibat gaya terpusat beban dinamis yang selanjutnya menjadi beban merata dasar rel yang membebani struktur bantalan yang didapatkan dari beban kendaraan kereta api. Sehingga didapatkan nilai y pada setiap jarak x sepanjang rel ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Defleksi yang terjadi pada rel

Perhitungan besar defleksi yang terjadi pada rel ditinjau dari jarak  $x$  ke titik depan roda, sehingga konsep pembebanan merata pada tepi bawah rel yang digunakan rumus:

$$y(x) = \frac{Pd \cdot \lambda}{2K} \cdot e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan :

$y$  = Defleksi yang terjadi pada rel

$Pd$  = Beban dinamis

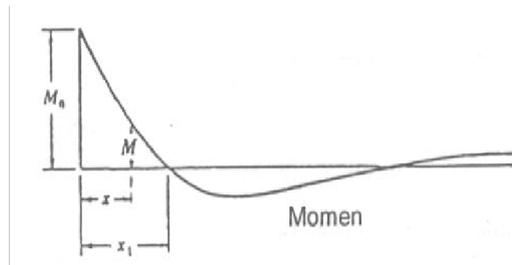
$\lambda$  = *Dumping factor*

$x$  = Besar jarak yang ditinjau (cm)

$k$  = Modulus kekakuan jalan rel ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )

### 2.3.6 Besar momen pada rel kereta api

Kemiringan (*slope*), gaya momen (*bending moment*), dan gaya geser (*shear force*) pada setiap titik di sepanjang rel akibat beban titik terpusat dari beban dinamis. Nilai maksimum momen pada setiap titik di sepanjang rel didapatkan dari jarak  $x$  yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Momen yang terjadi pada rel

Perhitungan besar bending momen yang terjadi pada rel ditinjau pada jarak  $x$  dari titik beban roda, sehingga distribusi momen pada balok menerus yang digunakan rumus:

$$M(x) = \frac{Pd}{4\lambda} \cdot e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \dots\dots\dots (2.10)$$

Dengan:

$M$  = Momen yang terjadi pada rel

$P_d$  = Beban dinamis

$\lambda$  = *Dumping factor*

$x$  = Besar jarak yang ditinjau (cm)

## 2.4 Sambungan Rel

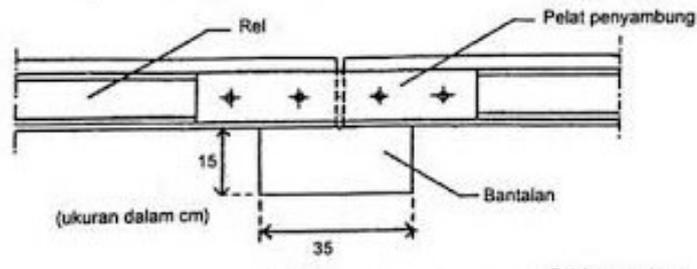
Menurut Utomo (2009), sambungan rel adalah suatu konstruksi yang mengikat dua ujung rel, sehingga kereta api dapat berjalan di atasnya dengan aman dan nyaman. Sambungan rel merupakan titik yang tidak menguntungkan, dari segi beban yang harus diterimanya. Sambungan rel harus kuat menahan momen yang timbul, gaya yang bekerja, maupun sentuhan yang ditimbulkan oleh roda kereta api. Selain itu, konstruksi sambungan rel harus mampu mengakomodasi pemuaian rel. Hal inilah yang menjadikan sambungan rel merupakan titik yang tidak menguntungkan dan merupakan tempat yang lemah.

### 2.4.1 Macam – macam sambungan

Berdasarkan atas kedudukan sambungan rel terhadap bantalan terdapat dua macam sambungan rel, yaitu :

#### 1. Sambungan Menumpu (*Supported Joint*)

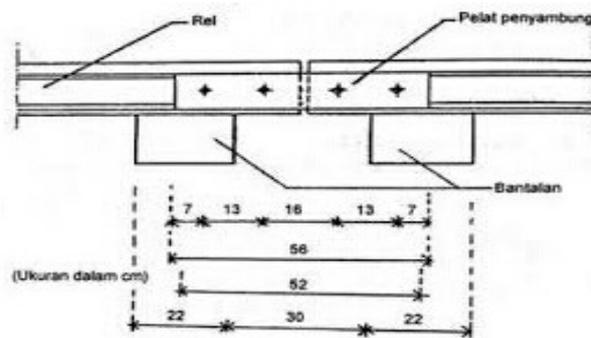
Pada sambungan rel menumpu ini ujung kedua rel diletakkan langsung di atas bantalan yang sama. Dengan peletakan ujung rel yang seperti itu benturan antara roda dan ujung rel menjadi lebih baik, tetapi perjalanan kereta api yang melewati sambungan ini akan terasa keras. Contoh penyambungan dan penempatan rel dengan tipe *supported joint* ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Penempatan rel dengan sambungan menumpu (*Supported Joint*)

## 2. Sambungan Menggantung (*Suspended Joint*)

Pada macam sambungan menggantung ini ujung kedua rel disambung di antara dua bantalan, dengan demikian tekanan yang terjadi akan didistribusikan kepada dua bantalan penumpunya. Contoh penyambungan dan penempatan rel dengan tipe *suspended joint* ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Penempatan rel dengan sambungan menggantung (*Suspended Joint*)

### 2.4.2 Celah sambungan

Menurut Utomo (2009), 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 standar dan rel pendek tergantung pada suhu pemasangan dan panjang rel. Sedangkan celah pada rel panjang tergantung pada suhu pemasangan, tipe rel, dan bantalan yang digunakan.

**1. Celah Sambungan Standar pada Rel Pendek**

Besarnya celah sambungan pada standar rel pendek memiliki batasan maksimum dengan nilai 16 mm sehingga dapat digunakan rumus :

$$G = L \times \alpha \times [(40-t) + 2] \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan :

G = Besarnya celah sambungan rel (mm)

L = Panjang rel (mm)

$\alpha$  = Koefisien pemuaian rel ( $1,2 \times 10^{-5}$ ) ( $^{\circ}C$ )

t = Suhu pemasangan ( $^{\circ}C$ )

Besarnya celah pada sambungan rel standar dan rel pendek untuk semua tipe rel yang digunakan adalah seperti yang tercantum pada tabel 2.6 berikut :

**Tabel 2.6 Besarnya Celah Sambungan Rel untuk Rel Standar Dan Rel Pendek Pada Semua Tipe Rel**

Suhu Pemasangan ( $^{\circ}C$ )	Panjang Rel (m)			
	25	50	75	100
	Celah (mm)			
$\leq 20$	8	14	16	16
22	7	13	16	16
24	7	12	16	16
26	6	10	15	16
28	6	9	13	16
30	5	8	11	14
32	4	7	9	12
34	4	6	7	9

**Tabel 2.6 Besarnya Celah Sambungan Rel untuk Rel Standar Dan Rel Pendek Pada Semua Tipe Rel (Lanjutan)**

Suhu Pemasangan (°C)	Panjang Rel (m)			
	25	50	75	100
	Celah (mm)			
36	3	4	6	7
38	3	3	4	4
40	2	2	2	2
42	2	1	0	0
44	1	0	0	0
≥ 46	0	0	0	0

Sumber : Utomo (2009).

## 2. Celah Sambungan Rel Standar Pada Rel Panjang

Besar celah sambungan rel standar pada rel panjang dipengaruhi oleh suhu pemasangan, tipe rel dan jenis bantalan yang digunakan. Untuk perhitungan besarnya celah sambungan pada rel panjang menggunakan rumus berikut :

$$G = \frac{E A \alpha (50-t)^2}{2 r} + 2 \dots \dots \dots (2.12)$$

Dengan :

G = Besarnya celah sambungan rel (mm)

E = Modulus elastisitas rel

A = Luas penampang rel (mm<sup>2</sup>)

α = Koefisien pemuaian rel (1,2 x 10<sup>-5</sup>) (°C)

t = Suhu pemasangan (°C)

r = Gaya lawan bantalan tiap satuan panjang

Berdasarkan pada rumus celah sambungan rel pada rel panjang PT. Kereta Api Indonesia (Persero), besarnya celah sambungan rel panjang yang digunakan ditunjukkan pada tabel 2.7 berikut.

**Tabel 2.7 Celah Sambungan Rel Untuk Rel Panjang Pada Bantalan Beton**

Suhu Pemasangan (°C)	Tipe Rel			
	R.42	R.50	R.54	R.60
	Celah (mm)			
≤ 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 : Utomo (2009).*

### 2.4.3 Suhu pemasangan sambungan

Suhu pemasangan adalah besarnya suhu pada saat rel dipasang di lapangan pada kedudukan permanennya. Batas suhu minimum dan maksimum yang ditetapkan sesuai dengan kondisi cuaca dan iklim di Indonesia. Secara umum, batas suhu maksimum ialah suhu tinggi yang menghasilkan celah sebesar 2 mm, sedangkan batas suhu minimum adalah suhu tertinggi yang menghasilkan celah sebesar 6 mm. Khusus rel standar pada rel pendek yang panjangnya 50 m batas

suhu minimum adalah 20°C. Batas suhu maksimum dan minimum ditunjukkan pada tabel 2.8.

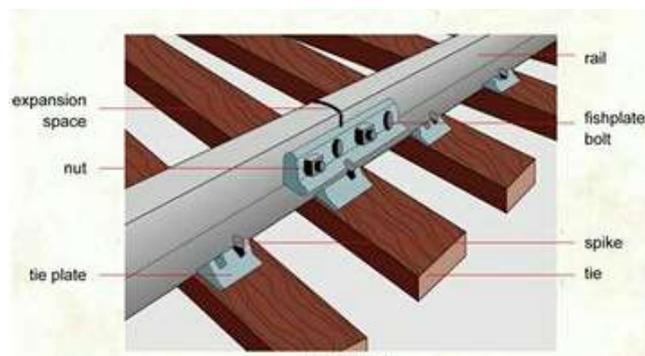
**Tabel 2.8 Batas Suhu Pemasangan Rel Panjang Pada Bantalan Beton**

Tipe Rel	Suhu (° C)	
	Minimum	Maksimum
R.42	22	46
R.50	24	46
R.54	24	46
R.60	26	46

*Sumber : Utomo (2009).*

#### 2.4.4 Pelat sambungan

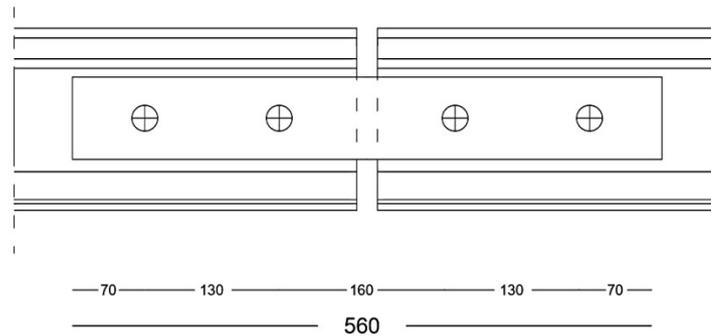
Pada sambungan rel, digunakan sepasang pelat penyambung yang mempunyai panjang dan ukuran yang sama. Pemasangan pelat penyambung sambungan rel ditunjukkan pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Pemasangan Pelat Penyambung Rel

##### a. Pelat Penyambung Untuk Rel Tipe R.42, R.50, R.54

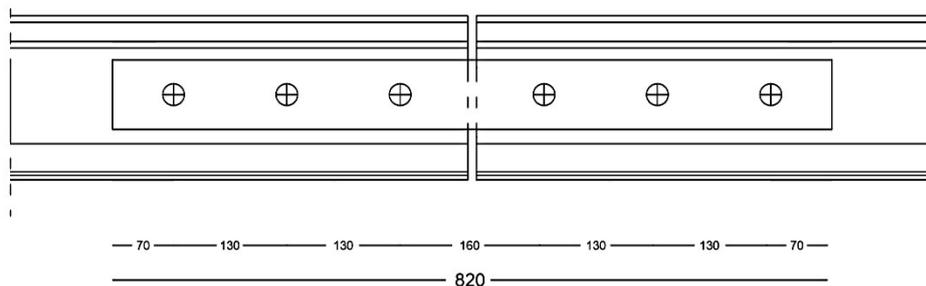
Tebal pelat yang digunakan 20 mm, diameter lubang mur-baut 24 mm, dan tinggi pelat disesuaikan dengan dimensi masing-masing yang ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pelat Penyambung Untuk Rel Tipe R.42, R.50, R.54

**b. Pelat Penyambung Untuk Rel Tipe R.60**

Jarak lubang mur-baut pada pelat penyambung untuk R.60 dengan tebal pelat penyambung 20 mm, diameter lubang untuk mur-baut 25 mm yang ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pelat Penyambung Untuk Rel Tipe R.60

**3. Beban roda sebagai beban statis (N)**

Perhitungan beban roda sebagai beban statis pada pelat sambungan rel yang digunakan rumus:

$$N = E \times A \times \alpha \times \Delta t \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan :

E = Modulus elastisitas rel

$\alpha$  = Koefisien pemuaian rel ( $1,2 \times 10^{-5}$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )

$A$  = Luas penampang pelat ( $\text{cm}^2$ ),

$\Delta t$  = Perubahan suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )

Setelah menghitung rumus beban roda sebagai beban statis ( $N$ ) dapat ditarik kesimpulan bahwa nilai beban roda sebagai beban statis harus lebih kecil dari nilai  $N$ , sehingga  $N$  digunakan rumus :

$$\bar{N} = 0,75 \times \sigma \times A_n \dots\dots\dots (2.14)$$

Dengan :

$\sigma$  = Tegangan Izin

$A_n$  = Luas bersih pelat sambungan

$N$  = Beban roda sebagai beban statis ( $\text{kg}$ )

#### 4. Tegangan geser

Tegangan geser yang terjadi untuk 1 baut berpengaruh dari nilai besarnya gaya statis pada roda, sehingga digunakan rumus :

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{KV}{\frac{1}{4} \times \pi \times D^2} \\ &= \frac{\frac{P_s}{2}}{\frac{1}{4} \times \pi \times D^2} \dots\dots\dots (2.15) \end{aligned}$$

Dengan :

$\tau$  = Tegangan geser ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$K$  = Modulus kekakuan jalan rel ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )

V = Kecepatan rata-rata (km/jam)

D = Diameter baut (mm)

Ps = Gaya statis pada roda (ton)

Setelah menghitung rumus tegangan geser yang terjadi untuk 1 baut dapat disimpulkan bahwa  $\tau \leq 0,6 \times \sigma$  agar memenuhi perhitungan tegangan geser pada baut.

## 5. Tegangan tarik

Tegangan tarik yang terjadi berpengaruh pada nilai perhitungan momen yang terjadi pada gaya statis, sehingga digunakan rumus :

$$\sigma t = \frac{Km}{2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times D^2} \dots\dots\dots (2.16)$$

Setelah menghitung rumus tegangan tarik yang terjadi maka dapat disimpulkan bahwa  $\sigma t \leq 0,7 \times \sigma$  agar memenuhi perhitungan tersebut.

## 2.5 Penambat Rel

Menurut Utomo (2009), penambat rel merupakan salah satu komponen yang mengikat rel pada bantalan sehingga kedudukan rel menjadi tetap, kokoh dan tidak bergeser terhadap bantalannya. Dengan penambat rel tersebut jarak antar kedua rel yaitu lebar jarak antar rel akan tetap. Semakin berat beban dan semakin tinggi kecepatan kereta api yang melewatinya harus semakin kokoh penambat relnya.

### 2.5.1 Jenis Penambat

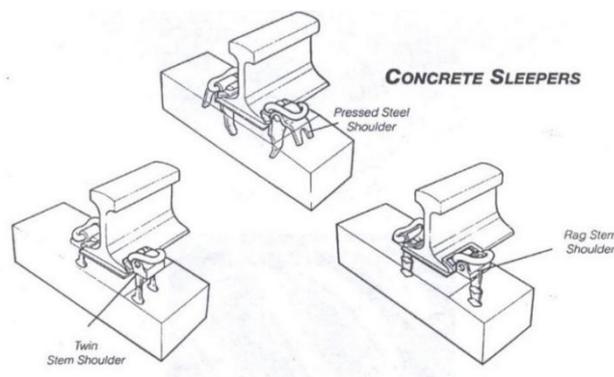
1. Penambat elastik memiliki kemampuan untuk meredam gataran, selain itu juga mampu menghasilkan gaya jepit “*clamping force*” yang tinggi dan memberikan perlawanan rangkai “*creep resistance*”.
2. Penambat kaku, yang terdiri dari paku rel namun dapat juga ditambahkan pelat andas, biasanya dipasang pada bantalan besi dan kayu. Sistem perkuatannya terdapat pada klem plat yang kaku.

### 2.5.2 Ketentuan Penggunaan Penambat

1. Penambat kaku tidak boleh digunakan untuk semua kelas jalan rel.
2. Penambat elastik tunggal hanya boleh digunakan pada jalan kelas IV dan kelas V.
3. Penambat elastik ganda dapat digunakan pada semua kelas jalan rel, tetapi tidak dianjurkan untuk jalan rel kelas V.

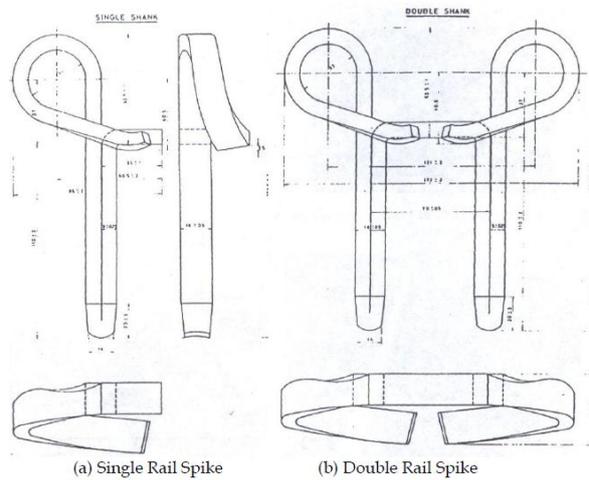
### 2.5.3 Jenis - jenis penambat rel

1. Tipe *Pandrol Elastic* pada bantalan beton, batangan besi dengan diameter 19 mm yang berbentuk ulir atau spiral, yang ditunjukkan pada gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Penambat tipe *pandrol elastic* pada bantalan beton

2. Tipe *Doorken* atau *Rail Spike*, yang dibedakan menjadi dua yaitu Jenis Tunggal (*Single Rail Spike*) dan Jenis Ganda (*Double Rail Spike*), dengan nilai *clamping force* masing-masing sebesar 475 kgf (tunggal) dan 850 kgf (ganda) yang ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut.



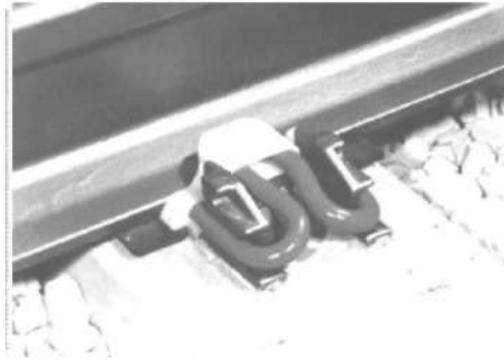
Gambar 2.11 Alat penambat tipe Doorcken atau Rail Spike

3. Tipe *DE Spring Clips* yang dipasang pada bantalan beton, penambat dapat memiliki sifat *double elastic* karena menggunakan alas karet (*rubber pad*) dalam sistemnya yang ditunjukkan pada gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12 Alat penambat DE clips

4. *Tipe Pandrol Fast Clips*, yang ditunjukkan pada gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 *Tipe Pandrol Fastclips*

## **2.6 Bantalan Rel (*Rail Sleepers*)**

Menurut Surakim (2014), bantalan rel adalah landasan tempat rel bertumpu dan diikat dengan penambat rel. Oleh karena itu, harus cukup kuat untuk menahan beban kereta api yang berjalan di atas rel. Bantalan dipasang melintang rel pada jarak antara bantalan yang satu dengan lainnya sepanjang 0,6 meter. Bantalan memiliki beberapa fungsi yang penting, diantaranya menerima beban dari rel dan mendistribusikannya kepada lapisan *ballast* dengan tingkat tekanan (tegangan) menjadi lebih kecil, mempertahankan sistem penambat untuk menghubungkan rel pada kedudukannya dan menahan pergerakan rel arah longitudinal, lateral dan vertikal. Jenis bantalan terbagi menurut bahan konstruksinya, seperti bantalan besi, bantalan kayu, maupun bantalan beton.

### **2.6.1 Bantalan Beton**

Bantalan beton yang lebih diutamakan dalam penggunaannya dikarenakan kemudahan dalam pekerjaan, semakin sulitnya mendapatkan kayu yang memenuhi standar untuk bantalan dan berbagai kelemahan penggunaan bantalan besi. Selain itu, industri dalam negeri di Indonesia telah membuat bantalan beton

dengan beberapa keunggulan. Penggunaan bantalan beton memiliki beberapa keuntungan sebagai berikut :

- a. Stabilitas baik karena berat satu balok bantalan mencapai 160 – 300 kg, sehingga tahanan terhadap gaya vertikal, longitudinal dan lateral menjadi lebih baik. Khusus untuk jalan rel *Continuous Welded Rails (CWR)*, bantalan beton menyediakan stabilitas struktur.
- b. Kereta api dengan tonase berat dan kecepatan tinggi lebih sesuai menggunakan bantalan beton.
- c. Umur konstruksi lebih panjang
- d. Biaya pemeliharaan yang rendah
- e. Pengendalian mutu bahan lebih mudah
- f. Bentuk dan proses pembuatannya bebas dan relatif mudah

### **2.6.2 Kekuatan Bantalan Beton**

Rel diasumsikan sebagai suatu balok tak terhingga panjangnya dan menumpu pada banyak bantalan, maka diasumsikan rel sebagai gelagar pada banyak perletakan. Oleh karena itu, masing-masing perletakan beralaskan tumpuan batu-batu yang dapat bergeser. Maka konstruksi tersebut merupakan gelagar panjang, sehingga di atasnya terdapat tumpuan elastis. Maka pembebanan pada bantalan diperhitungkan menggunakan model balok di atas tumpuan elastis. Langkah-langkah menghitung kekuatan bantalan rel kereta api menurut Peraturan Dinas Nomor 10 Tahun 1986 :

## 1. Distribusi beban pada bantalan rel kereta api

Perhitungan distribusi beban rel ke bantalan dipengaruhi oleh beban dinamis, jarak bantalan dan jarak momen yang digunakan rumus sebagai berikut :

$$(Q_1) = \frac{0,786 \times Pd \times S}{X_1} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan :

$Pd$  = Beban dinamis (kg)

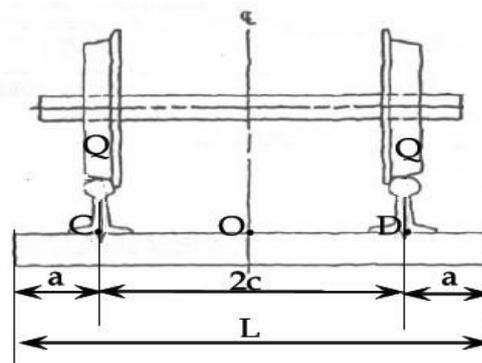
$S$  = Jarak Bantalan (cm)

$X_1$  = jarak lengan momen (cm)

$\lambda$  = *Dumping Factor*

## 2. Momen pada bantalan rel kereta api

Perhitungan momen pada bantalan rel kereta api dengan konsep yang ditunjukkan pada gambar 2.14 sebagai berikut :



Gambar 2.14 Konsep perhitungan momen pada bantalan rel

Perhitungan momen inersia bantalan pada potongan a – a yang diketahui dari ujung bantalan dengan bentuk trapesium siku-siku, maka digunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
M_c/d = \frac{Q}{4\lambda} \cdot \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} & [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda L) - \\
& 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda L) - \\
& \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda L) - \\
& \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c + \sin \lambda L)] \dots\dots\dots (2.18)
\end{aligned}$$

Perhitungan momen inersia bantalan pada potongan b – b yang diketahui di tangan bantalan dengan bentuk trapesium sama kaki, maka digunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
M_o = \frac{Q}{2\lambda} \cdot \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} & [\sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda (L-c)) + \\
& \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda (L-c)) + \\
& \cosh \lambda c \cdot \cos \lambda (L-c) - \cos \lambda c \cdot \cosh \lambda (L-c)] \dots\dots\dots (2.19)
\end{aligned}$$

### 3. Pembebanan pada bantalan rel kereta api

Perhitungan pembebanan pada bantalan rel kereta api dipengaruhi oleh perhitungan momen yang mampu ditahan bantalan dengan momen inersia pada potongan b – b, maka digunakan rumus sebagai berikut :

$$Q_b = \frac{M(\text{bantalan})}{M_c/d} \dots\dots\dots (2.20)$$

Sehingga analisa pembebanan pada bantalan harus memenuhi syarat bahwa beban yang mampu ditahan oleh bantalan harus lebih besar dari beban yang terjadi ( $Q_b > Q_1$ ).

### 2.7 Wesel

Menurut Philip (2015) wesel merupakan bagian konstruksi rel kereta api yang bercabang (bersimpangan). Wesel terdiri dari sepasang rel yang ujungnya

diruncingkan sehingga dapat mempermudah perpindahan kereta api dari jalur yang satu ke jalur yang lain dengan menggeser bagian rel yang runcing.

### 2.7.1 Jarum Wesel

Panjang jarum wesel tergantung pada lebar kepala rel, lebar kaki rel. besarnya celah antara jarum, rel dan sudut simpang. Supaya *flens* roda dapat lewat maka rel di depan ujung jarum wesel harus terputus. Kemungkinan turunnya roda ke arah bawah pada saat roda berada diatas terputusnya rel dicegah oleh sayap. Sehingga perhitungan panjang jarum pada wesel yang digunakan.

$$P = \frac{(B+C)}{2 \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2}\right)} \dots\dots\dots (2.21)$$

Kemungkinan tertabraknya ujung jarum oleh flens roda kereta api dapat diatasi dengan :

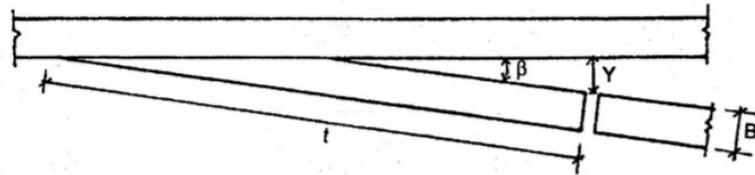
- a. Ujung jarum dibuat lebih rendah dibandingkan permukaan rel
- b. Menetapkan jarak antara rel paksa dengan jarum.

### 2.7.2 Lidah Wesel

Lidah wesel dalam posisinya diikat oleh kopel pengikat lidah agar jarak antara lidah dapat terus terjaga baik pada saat diam ataupun saat berbalik. Lidah wesel dapat digerakan secara horisontal hingga bilah lidah menempel dengan baik pada rel lantak, melalui bilah lidah berfungsi untuk menangkap roda kereta api agar mengikuti arah lidah terpasang.

Perhitungan panjang lidah wesel untuk jenis lidah berputar yang digunakan rumus berikut dan ditunjukkan pada gambar 2.15,

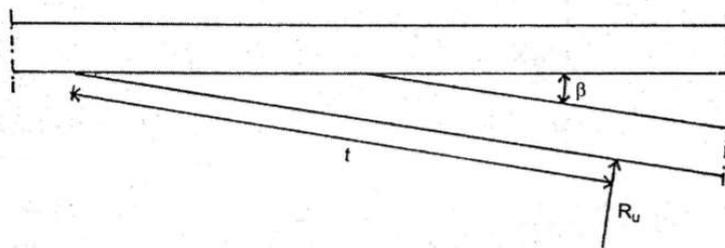
$$t > \frac{(B+Y)}{\sin \beta} \dots\dots\dots (2.22)$$



Gambar 2.15 Panjang Lidah Berputar

Perhitungan panjang lidah wesel untuk jenis lidah pegas yang digunakan rumus berikut dan ditunjukkan pada gambar 2.16,

$$t > B \cotg \beta \dots\dots\dots (2.23)$$



Gambar 2.16 Panjang Lidah Pegas

Pada ujung lidah dapat digeser untuk menempel dan menekan pada rel lantak sehingga dapat mengarahkan jalannya kereta api, yaitu :

- a. Dari rel lurus ke rel lurus
- b. Dari rel lurus ke rel bengkok
- c. Dari rel bengkok ke rel lurus.

### 2.7.3 Jari-jari Wesel

Terdapat dua jari-jari pada lengkung wesel, R legkung dalam dan R lengkung luar. Ila ini dipegaruhi oleh lebar sepur, sudut tumpuh, sudut simpang arah, panjang lidah dan panjang jarum. Sehingga dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus berikut.

$$R_1 = \frac{(S - t \sin \beta + P \sin \alpha)}{\cos \beta - \cos \alpha} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dengan batasan bahwa R lengkung luar tidak boleh melebihi batas, maka digunakan perhitungan sebagai berikut.

$$R_1 = \frac{V^2}{7,8} \dots\dots\dots (2.25)$$

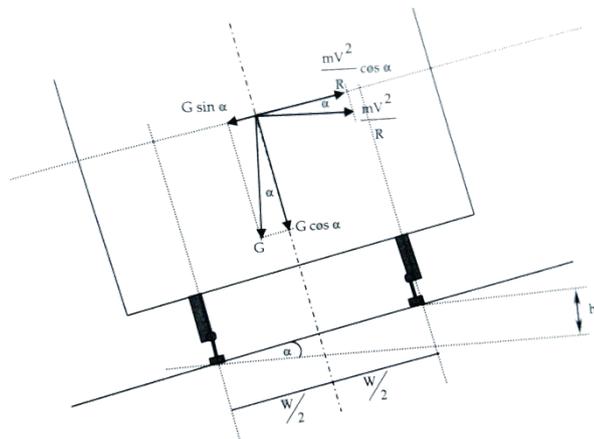
R lengkung dalam ( $R_d$ ) ditentukan berdasarkan  $R_1$  (lengkung luar) dengan memperhitungkan perlunya lebar sepur.

### 2.8 Alinemen Horisontal

Secara umum alinemen horisontal harus mempertimbangkan jari-jari lengkung horisontal. Untuk menghitung jari-jari minimum dengan berbagai kecepatan rencana, terdiri dari dua kondisi yaitu:

#### 1. Gaya sentrifugal diimbangi sepenuhnya oleh gaya berat

Apabila suatu kendaraan bergerak dengan kecepatan tetap pada bidang datar atau miring dengan lintasan berbentuk suatu lengkung seperti lingkaran, maka pada kendaraan tersebut bekerja gaya kecepatan dan gaya sentrifugal yang ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Gaya Sentrifugal Diimbangi Gaya Berat

Untuk menghitung peninggian rel pada lengkung horizontal maka digunakan rumus dari gaya sentrifugal diimbangi oleh gaya berat:

$$h = \frac{w \times V^2}{(g \times R)} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dengan :

R = jari-jari lengkung horisontal (m).

V = kecepatan rencana (km/jam).

h = peninggian rel pada lengkung horisontal.

w = jarak antara dua titik kontak roda dan rel

g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt<sup>2</sup>)

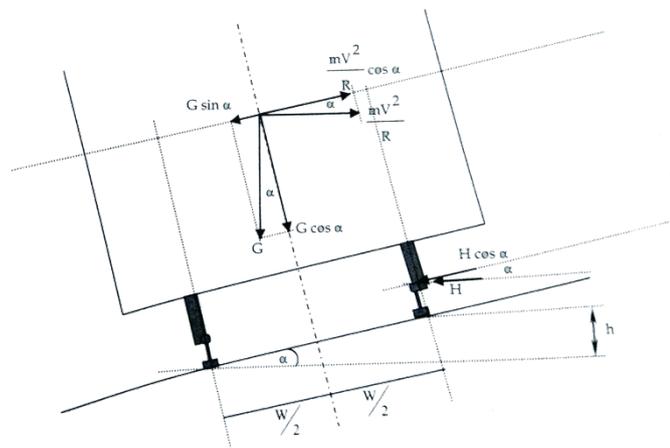
Dengan peninggian maksimum pada rel  $h_{max} = 110$  mm, maka digunakan rumus:

$$R = \frac{8,8 \times V^2}{110} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$R_{min} = 0,08 \times V^2 \dots\dots\dots (2.28)$$

**2. Gaya sentrifugal diimbangi oleh gaya berat dan daya dukung rel**

Gaya yang mengimbangi gaya sentrifugal tersebut diantaranya gaya gesek melintang antara roda kereta api dengan rel begitu juga komponen berat kereta api akibat kemiringan permukaan jalan rel. Sehingga untuk mempertahankan kereta api pada jalurnya perlu adanya gaya yang dapat mengimbangi gaya tersebut sehingga terjadi suatu keseimbangan yang ditunjukkan pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Gaya Sentrifugal Diimbangi Gaya Berat dan Daya Dukung rel

Untuk menghitung percepatan gaya sentrifugal diimbangi gaya berat dan daya dukung rel yang digunakan rumus :

$$a = \left( \frac{V^2}{13R} \right) - \frac{g}{w} \dots\dots\dots (2.29)$$

$a$  = percepatan sentrifugal (m/dt<sup>2</sup>)

Percepatan sentrifugal maksimum = 0,0476 g, karena pada harga ini penumpang masih merasa nyaman. Dengan peninggian maksimum, peninggian maksimum = 110 mm, maka rumus yang digunakan :

$$R_{\min} = 0,054 \times V^2 \dots\dots\dots (2.30)$$

Dengan :

$R_{\min}$  = jari-jari lengkung (m)

$V$  = kecepatan rencana (km/jam)

**3. Jari-jari minimum pada lengkung yang tidak memerlukan lengkung peralihan.**

Kondisi dimana lengkung peralihan ( $L_h$ ) tidak diperlukan. Jika tidak ada peninggian yang harus dicapai ( $h = 0$ ) maka digunakan rumus sebagai berikut :

$$R = 0,164 \times V^2 \dots\dots\dots (2.31)$$

Dengan :

$R$  = jari-jari lengkung (m)

$V$  = kecepatan rencana (km/jam)

Lengkung peralihan adalah suatu lengkung dengan jari-jari berubah beraturan. Lengkung peralihan dipakai sebagai peralihan antara bagian yang lurus dengan bagian lingkaran dan sebagai peralihan antara dua jari-jari lingkaran yang berbeda, dibuat untuk mengeliminasi perubahan gaya sentrifugal sedemikian rupa sehingga penumpang di dalam kereta api tetap terjamin kenyamanannya. Dalam perhitungan lengkung peralihan yang mengacu pada PD No. 10 Bab II pasal 3a maka digunakan rumus :

$$L_h = 0,01 \times h \times V \dots\dots\dots (2.32)$$

Dengan :

$L$  = Panjang minimum lengkung peralihan (m)

$h$  = Peninggian rel (mm)

$V$  = Kecepatan rencana untuk lengkung peralihan (Km/jam)

Dalam perencanaan lengkung horisontal dapat dipakai dua cara perencanaan, yaitu:

- Lengkung horisontal tanpa lengkung peralihan.
- Lengkung horisontal dengan lengkung peralihan.

Untuk berbagai kecepatan rencana besar  $R_{\text{minimum}}$  untuk lengkung peralihan dan tanpa lengkung peralihan yang diijinkan ditunjukkan pada tabel 2.9 berikut.

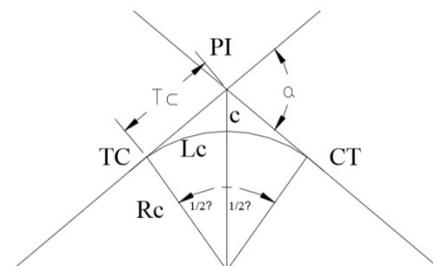
**Tabel 2.9 Kecepatan Rencana dan R minimum**

Kecepatan Rencana (km/jam)	R min (m) Tanpa lengkung peralihan	R min (m) Dengan lengkung peralihan
120	2370	780
110	1990	660
100	1650	550
90	1330	440
80	1050	250
70	810	270
60	600	200

Sumber : Peraturan Dinas No.10 bab 2 halaman 2

### c. Lengkung horisontal tanpa lengkung peralihan

Lengkung Horisontal tanpa lengkung peralihan adalah dua bagian lurus, yang perpanjangannya saling membentuk sudut yang harus dihubungkan dengan lengkung yang berbentuk lingkaran yang ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Lengkung horisontal tanpa lengkung peralihan

Untuk merencanakan lengkung horisontal tanpa peralihan, maka digunakan rumus:

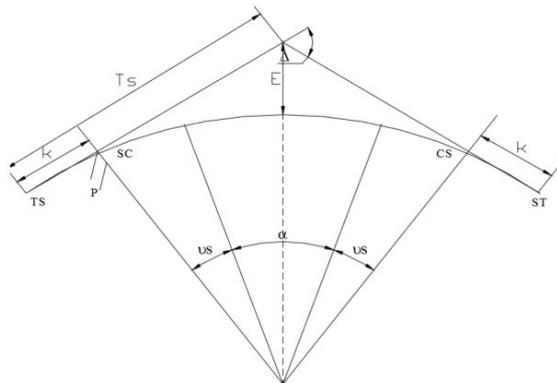
$$T_c = R_c \cdot \tan (\Delta C/2) \dots\dots\dots (2.33)$$

$$L_c = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \Delta C / 360^\circ \dots\dots\dots (2.34)$$

$$E_c = T_c \cdot \tan (\Delta C/4) \dots\dots\dots (2.35)$$

**d. Lengkung horisontal dengan lengkung peralihan**

Lengkung peralihan adalah suatu lengkung tambahan yang diletakkan antara bagian lurus dengan tikungan sebenarnya. Adanya lengkung peralihan digunakan untuk membelokkan roda kereta api ke sudut tikungan perlu waktu dan jarak tertentu, lengkung peralihan digunakan pada jari-jari lengkung yang relatif kecil seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Lengkung Horisontal dengan Lengkung Peralihan

Untuk merencanakan lengkung horisontal dengan lengkung peralihan digunakan rumus :

$$L_s = 0,01 \cdot v \cdot h \dots\dots\dots (2.36)$$

$$\theta_s = 28,648 L_s / R_c \text{ (derajat) ; } \theta = L_s / (2 \cdot R_c) \text{ rad } \dots\dots\dots (2.37)$$

$$Y_c = L_s \cdot \theta_s / 3 \dots\dots\dots (2.38)$$

$$X_c = L_s - (L_s \cdot \theta_s^2) / 10 \dots\dots\dots(2.39)$$

$$k = X_c - R_c \sin\theta \dots\dots\dots (2.40)$$

$$p = Y_c - R_c (1 - \cos\theta) \dots\dots\dots (2.41)$$

$$T_s = (R_c + p) \tan \Delta/2 + k \dots\dots\dots(2.42)$$

$$E_s = (R_c + p) \sec\Delta/2 - R_c \dots\dots\dots(2.43)$$

$$\Delta C = \Delta C / 360^\circ \cdot (2\pi R_c) \dots\dots\dots (2.44)$$

Dengan:

$L_s$  = Panjang lengkung vertikal

$T_s$  = Jarak dari  $T_s$  ke PI

$E_s$  = jarak luar

$L_c$  = panjang lengkung lingkaran

Sta TS = titik awal lengkung

#### 4. Peninggian Rel

Pada saat kereta api memasuki bagian lengkung, maka kereta api tersebut akan timbul gaya sentrifugal yang mempunyai kecenderungan melemparkan kereta api ke arah luar lengkung. Hal ini sangat membahayakan dan tidak nyaman bagi penumpang, untuk mengatasinya digunakan peninggian pada rel luar. Dengan adanya peninggian ini gaya sentrifugal yang timbul akan diimbangi oleh komponen gaya berat kereta api dan kekuatan rel, penambat, bantalan dan lapisan *ballast*. Ada 3 macam peninggian rel, yaitu:

a. Peninggian Rel 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 maka digunakan rumus :

$$h_{min} = 8,8 (V^2 / R) - 53,5 \dots\dots\dots (2.45)$$

Dengan :

$h_{min}$  = peninggian minimum (mm).

V = kecepatan rencana (km/jam).

R = jari - jari lengkung (m).

c. Peninggian Normal

Kondisi rel tidak ikut memikul gaya sentrifugal pada keadaan ini komponen gaya sentrifugal sepenuhnya diimbangi oleh komponen gaya berat, maka digunakan rumus:

$$h_{normal} = 5,95 (V^2/R) \dots\dots\dots (2.46)$$

Dengan :

$h_{normal}$  = peninggian normal (mm)

V = kecepatan rencana (km/jam)

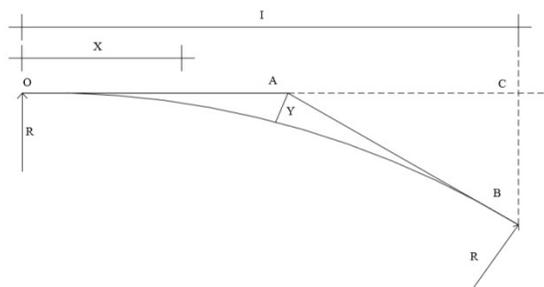
R = jari – jari lengkung (m)

## 2.9 Alinemen Vertikal

Alinemen vertikal adalah proyeksi sumbu jalan rel pada bidang vertikal yang melalui sumbu jalan rel tersebut. Alinemen vertikal terdiri dari garis lurus dengan atau tanpa kelandaian dan lengkung vertikal yang berupa busur lingkaran.

### 2.9.1 Lengkung Vertikal

Pada setiap pergantian landai harus dibuat lengkung vertikal yang memenuhi keamanan dan kenyamanan. Berdasarkan Peraturan Dinas No.10 Bab II pasal 6 tentang besarnya jari – jari minimum dari lengkung vertikal tergantung dari besarnya kecepatan rencana. Panjang lengkung vertikal berupa busur lingkaran yang menghubungkan dua kelandaian lintas berbeda, ditentukan berdasarkan besarnya jari-jari lengkung vertikal dan perbedaan kelandaian yang ditunjukkan pada gambar 2.21 berikut.



Gambar 2.21 Proyeksi Lengkung Vertikal

Dengan :

$Y_m$  = penyimpangan dari titik potong kedua tangen ke lengkung vertikal

$R$  = jari –jari lengkung peralihan.

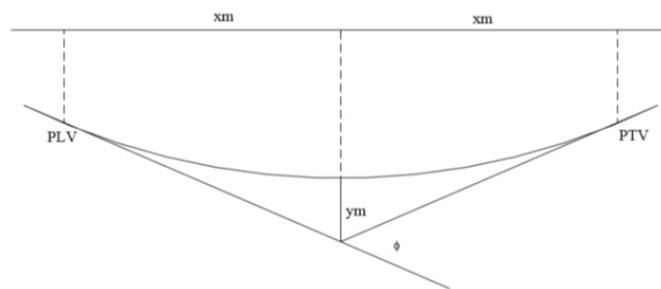
$I$  = panjang lengkung peralihan.

A = titik tekuk

$\Phi$  = perbedaan landau

**a. Lengkung vertikal cekung**

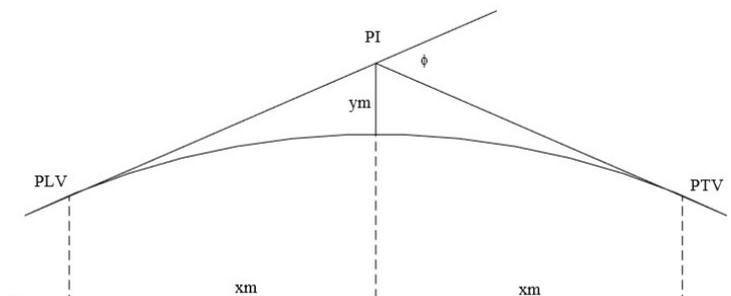
Lengkung vertikal cekung adalah lengkung di mana titik perpotongan antara kedua tangen berada di bawah permukaan jalan rel. Proyeksi lengkung vertikal cekung ditunjukkan pada gambar 2.22 berikut.



Gambar 2.22 Lengkung Vertikal Cekung

**b. Lengkung vertikal cembung**

Lengkung vertikal cembung adalah lengkung di mana titik perpotongan antara kedua tangen berada di atas permukaan jalan. Proyeksi lengkung vertikal cembung ditunjukkan pada gambar 2.23 berikut.



Gambar 2.23 Lengkung vertikal Cembung

### 2.9.2 Landai

Menurut Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986, pada kelandaian dari sumbu jalan rel dapat dibedakan atas 4 (Empat) kelompok :

- a. Lintas datar 0 – 10 ‰
- b. Lintas pegunungan 10 ‰- 40 ‰
- c. Lintas dengan rel gigi 40‰- 80 ‰
- d. Untuk emplasemen 0 – 1,5 ‰

### 2.9.3 Landai Penentu

Menurut Utomo (2009), landai penentu adalah suatu kelandaian yang terbesar yang ada pada suatu lintasan lurus. Besar landai penentu terutama berpengaruh pada kombinasi daya tarik lokomotif dan rangkaian yang dioperasikan. Untuk masing-masing kelas jalan rel, besar landai penentu ditunjukkan pada tabel 2.10.

**Tabel 2.10 Landai Penentu Maksimum**

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

*Sumber : Peraturan Dinas No.10*

### 2.10 Lapisan *Ballast*

Lapisan *ballast* adalah lapisan di atas tanah dasar yang berfungsi menahan beban bantalan sekaligus mampu meneruskan beban menuju bantalan ke struktur bawah *ballast* atau tanah dasar dengan pola distribusi beban yang merata.

*Ballast* memiliki fungsi utama yaitu untuk meneruskan dan menyebarkan beban bantalan ke tanah dasar, mengokohkan kedudukan bantalan dan meloloskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air disekitar bantalan dan rel.

### 2.10.1. Persyaratan Material

Dalam penyusunan lapisan *ballast* harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. *Ballast* harus terdiri dari batu pecah (25-60) mm dan memiliki kapasitas ketahan yang baik, ketahanan gesek yang tinggi dan mudah dipadatkan.
2. Porositas maksimum 3%
3. Kuat tekan rata-rata maksimum 1000 kg/cm<sup>2</sup>
4. *Specific gravity* minimum 2,6
5. Kandungan minyak maksimum 0,2%
6. Kehalusan *ballast* sesuai dengan test *Los Angeles* tidak boleh lebih dari 25%

### 2.10.2. Perencanaan Lapisan *Ballast*

Menurut Peraturan Menteri Perhubungan No.PM 60 Tahun 2012, lapisan *ballast* berfungsi sebagai menyalurkan beban dinamis kereta api terhadap bantalan.

Dalam perhitungan analisa tekanan kontak pada lapisan *ballast* menggunakan metode distribusi beban yang dapat dihitung menggunakan rumus :

$$P_a = \frac{W_{kereta} + W_{rel} + W_{bantalan}}{A_{bantalan}} \dots\dots\dots (2.47)$$

Dengan:

$W_{kereta}$  = Berat kereta (KN)

$W_{rel}$  = Berat rel (KN)

$W_{bantala}$  = Berat bantalan (KN)

$A_{bantalan}$  = Luas penampang bantalan (cm)

Setelah itu dilakukan perhitungan analisa tekanan di bawah bantalan menggunakan metode AREA dan Talbot dengan menggunakan rumus:

$$\sigma_1 = \frac{3 \times P}{b \times l} \dots\dots\dots (2.48)$$

Dengan:

P = beban dinamis (kg)

b = lebar bantalan (cm)

l = panjang bantalan (cm)

Pada spesifikasi material lapisan balas atas dan lapisan *ballast* bawah memiliki perbedaan, sehingga dapat dihitung ketinggian masing-masing lapisan *ballast* dengan menggunakan persamaan odemark (1949) :

$$H_e = 0.9 \cdot ( H_{balas\ atas} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{balas\ atas}}{E_{beton}}} + H_{balas\ bawah} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{balas\ bawah}}{E_{beton}}} ) \dots\dots\dots (2.49)$$

Dengan:

$H_{ballast\ atas}$  = Ketebalan aktual *ballast* atas (cm)

$H_{ballast\ bawah}$  = Ketebalan aktual *ballast* bawah (cm)

$E_{beton}$  = Modulus elastisitas beton (kg/cm<sup>2</sup>)

$E_{balas\ atas}$  = Modulus elastisitas balas atas (kg/cm<sup>2</sup>)

$E_{balas\ bawah}$  = Modulus elastisitas balas bawah (kg/cm<sup>2</sup>)

### 2.11. Drainase Jalan Rel

Menurut Utomo (2009), drainase jalan rel secara umum didefinisikan sebagai sistem pengairan atau pembuangan air di suatu daerah jalan rel, baik secara gravitasi maupun dengan menggunakan pompa, agar tidak sampai terjadi genangan air. Secara umum ada 3 macam drainase pada jalan kereta api, antara lain :

## **1. Drainase Permukaan**

Drainase ini untuk mengalirkan air yang ada di permukaan tanah daerah jalan rel. Sistem drainase jenis ini perancangannya dipengaruhi oleh daerah topografi. Pada jenis drainase ini dibedakan menjadi 2 macam yaitu :

- a. Drainase memanjang yaitu drainase permukaan yang letaknya di samping dan memanjang ke arah sepanjang jalur rel. Bentuk potongan melintang dari drainase ini berbentuk persegi, segitiga, atau setengah lingkaran.
- b. Drainase melintang yaitu drainase permukaan yang letak dan arahnya melintang dari arah jalur rel.

## **2. Drainase Bawah permukaan**

Drainase bawah tanah lebih dimaksudkan untuk menjaga agar elevasi muka air tanah tidak mendekati permukaan tanah, karena badan jalan kereta api yang harus terlindung dari genangan air. Drainase bawah permukaan menjadikan lapisan *ballast* pada jalan kereta api tetap baik.

## **3. Drainase Lereng**

Drainase lereng untuk mencegah agar air permukaan yang berasal dari punggung lereng tidak mengalir secara deras dan mencegah terjadinya aliran rembesan di dalam tubuh lereng tanah yang dapat menyebabkan longsor atau memperlemah tubuh jalan kereta api.

### **2.11.1 Perencanaan Drainase Jalan Rel**

Sesuai dengan Peraturan Dinas No.10 tentang drainase jalan rel diketahui ukuran penampang saluran harus cukup besar sehingga mampu membuang debit air hujan, maka digunakan rumus sebagai berikut :

**1. Kecepatan aliran rencana**

Dalam memperhitungkan kecepatan aliran rencana saluran dapat digunakan

rumus :

$$V = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times i^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.50)$$

Dimana,  $R = P^2 \dots\dots\dots (2.51)$

Dengan :

V = kecepatan aliran rencana saluran (m/dt)

R = jari-jari hidrolis saluran rencana (m)

P = keliling basah saluran (m)

i = kemiringan muka aliran air dalam saluran rencana

n = koefisien kekerasan *manning* (n = 0,014)

**2. Debit air rencana**

Dalam memperhitungkan debit air rencana saluran dapat digunakan rumus :

$$Q_2 = V \times A \dots\dots\dots (2.52)$$

Dengan :

Q<sub>2</sub> = debit air rencana saluran (m<sup>3</sup>/dt)

A = luas penampang basah saluran (m)

**3. Debit air yang dibuang**

Dalam memperhitungkan debit air yang dibuang pada saluran drainase dapat digunakan rumus :

$$Q_1 = \frac{1}{3.6} \times C \times I \times A \dots\dots\dots (2.53)$$

Dengan :

Q<sub>1</sub> = debit air yang dibuang (m<sup>3</sup>/dt)

I = intensitas curah hujan (mm/jam)

C = koefisien pengaliran (C = 0,6)

Sehingga dari perhitungan debit air yang dibuang dan debit air rencana dapat ditentukan rumus sebagai berikut :

$$Q_2 > 1,20 Q_1 \dots\dots\dots (2.54)$$