

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1. TINJAUAN UMUM

Studi pustaka dalam analisa desain Jembatan Rel Ganda Sungai Bogowonto dimaksudkan untuk mendapatkan dasar teori dari berbagai bidang ilmu pengetahuan yang terkait dengan perencanaan struktur jembatan dan badan rel di Sungai Bogowonto. Dalam studi pustaka ini dipaparkan secara ringkas mengenai analisa hidrologi, hidrolika, geometris, lalulintas, pembebanan jembatan dan aspek bangunan atas dan bawah.

2.2. DASAR PERTIMBANGAN PERENCANAAN

2.2.1. Lalulintas

Kurangnya investasi pada suatu sistem jaringan dalam kurun waktu yang cukup lama dapat menurunnya tingkat pelayanan kereta api. Dimana sistem sarana transportasi tersebut menjadi sangat rentan terhadap tundaan dan kecelakaan akibat volume arus lalulintas kereta api meningkat.

2.2.2. Tata Guna Lahan

Tata guna lahan di sekitar jalur Kereta Api merupakan bagian terpadu dari suatu program perencanaan yang menyeluruh dan harus terkoordinasi serta selaras dengan program kebijaksanaan daerah yang tetuang dalam RTRW setempat.

Dalam perencanaan harus diperhatikan kendala dan masalah-masalah yang dapat dirasakan langsung maupun tidak langsung oleh masyarakat akibat perubahan tata guna lahan yang ada, seperti halnya pembebasan tanah ataupun pengambilan hak penggunaan lahan PT. Kereta Api Indonesia (PT. KAI) guna lahan track baru yang selama ini dimanfaatkan masyarakat. Selain itu tingkat kebisingan yang

ditimbulkan akibat pelaksanaan konstruksi dan operasional kereta api harus dikaji terlebih dahulu.

2.3. GEOMETRI JALAN REL

Geometri jalan rel direncanakan berdasarkan kecepatan rencana serta ukuran-ukuran kereta yang melaluinya. Geometri jalan rel harus memperhitungkan faktor keamanan, kenyamanan, ekonomi dan keserasian dengan lingkungan.

2.3.1. Trase Jalan

Pertimbangan teknis untuk merencanakan trase jalan kereta api yang terpenting adalah tanjakan-tanjakan. Adanya tanjakan-tanjakan sangat mempengaruhi jumlah berat rangkaian kereta atau rangkaian gerbong yang dapat ditarik oleh suatu tipe lokomotif tertentu (*sumber: Ir. Subarkah, Jalan Kereta Api hal. 329*)

Untuk mendapatkan trase yang ekonomis harus ditentukan terlebih dahulu landai penentu (*rulling grade*). Landai penentu adalah landai terberat (maksimum) pada jalan lurus yang masih dapat diatasi oleh suatu tipe traksi tertentu dengan kecepatan tertentu.

Didalam lengkung kereta api mengalami juga gaya penahan lengkung dan pada jalan yang menanjak ada gaya penahan tanjakan. Penahan lengkung disebabkan oleh menekannya roda-roda pada rel luar sebagai akibat dari adanya gaya sentrifugal. Gaya penahan tanjakan ditentukan oleh beratnya kereta api. Kelandaian tidak boleh lebih dari 10‰.

Dalam merencanakan trase perlu diperhatikan pula tempat-tempat asal lalu lintas, daerah-daerah penting, tempat pergantian dan tujuan lalu lintas. Selain itu juga perlu diperhatikan kepentingan-kepentingan daerah, jenis angkutan dan volumenya, asal dan tujuan lalu lintas, dan kecepatannya. Selanjutnya diperhatikan juga keadaan tanah dan adanya material serta tenaga kerja.

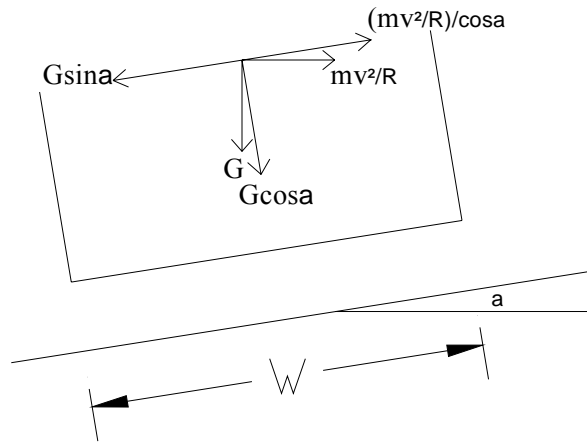
2.3.2. Alinyemen horisontal

Secara umum alinyemen horisontal harus mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut:

a. 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.



Gambar 2.1. Gaya sentrifugal diimbangi gaya berat

$$G \sin \alpha = (m.V^2 / R) \cos \alpha$$

$$G \sin \alpha = \frac{G \times V^2}{(g \times R) \cos \alpha}$$

$$\tan \alpha = \frac{V^2}{(g \times R)} \quad ; \quad \tan \alpha = \frac{h}{W}$$

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

keterangan:

R = jari-jari lengkung horisontal (m).

V = kecepatan rencana (km/jam).

h = peninggian tel pada lengkung horisontal.

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

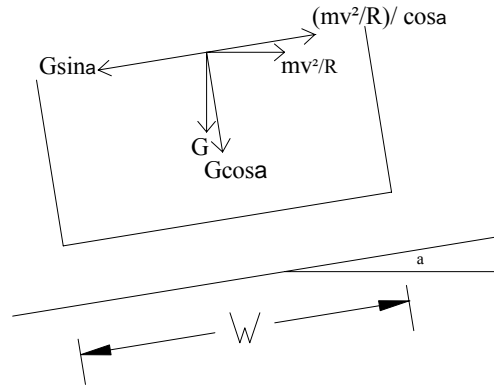
g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²).

dengan peninggian maksimum, $h_{\max} = 110 \text{ mm}$, maka:

$$R = \frac{8,8 \times V^2}{110}$$

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

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



Gambar 2.2. Gaya Sentrifugal Diimbangi Gaya Berat dan Daya Dukung Rel.

$$m \times \left(\frac{V}{R} \right) \times \cos \alpha = G \sin \alpha + H \cos \alpha$$

$$G \sin \alpha = \left[\left(\frac{m \times V^2}{R} \right) - H \right] \cos \alpha$$

$$G \tan \alpha = \left(\frac{G \times V^2}{g \times R} \right) - H$$

$$H = m \times a = \left(\frac{G}{g} \right) \times a$$

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

$$G \times \left(\frac{h}{w} \right) = \left[\frac{g \times V^2}{g \times R} - \frac{G}{g} \right] \times a$$

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

a = percepatan sentrifugal (m/dt^2)

Percepatan sentrifugal maksimum = 0,0476 g , karena pada harga ini penumpang masih merasa nyaman. Dengan peninggian maksimum, h maks = 110 mm, maka persamaan menjadi

$$R_{\min} = 0,054 \times V^2$$

Keterangan :

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

V = kecepatan rencana (km/jam)

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

Kondisi dimana lengkung peralihan (L_h) tidak diperlukan. Jika tidak ada peninggian yang harus dicapai, ($h = 0$) ; maka

$$R = 0,164 \times V^2$$

Keterangan :

R = jari-jari lengkung (m)

V = kecepatan rencana (km/jam)

b. Lengkung peralihan

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 perencanaan hendaknya hal tersebut mengacu pada PD No. 10 Bab II pasal 3a dengan menggunakan satuan praktis:

$$h = 5,95 \left(\frac{V^2}{R} \right)$$

maka : $L_h = 0,01 \times h \times V$

keterangan:

L = Panjang minimum lengkung peralihan

h = Peninggian rel

V = Kecepatan (Km/jam)

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

- Tanpa lengkung peralihan.
- Dengan lengkung peralihan.

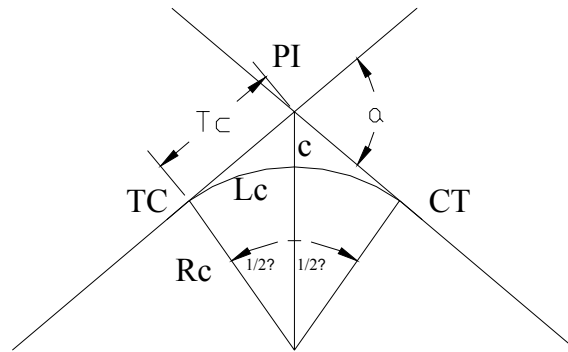
Untuk berbagai kecepatan rencana besar R min yang diijinkan seperti dalam tabel berikut

Tabel 2.1. 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 PD. 10 bab 2 halaman 2)

1) Tanpa lengkung peralihan



Gambar 2.3. Lengkung horisontal tanpa lengkung peralihan

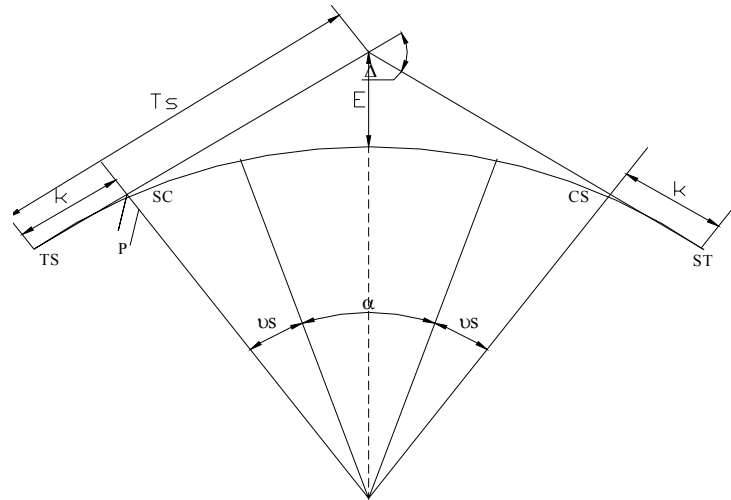
Rumus:

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

$$L_c = 2 \cdot \pi \cdot R_c \cdot \Delta C / 360^\circ$$

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

2) Dengan lengkung peralihan



Gambar 2.4. Lengkung Horizontal dengan Lengkung Peralihan

Rumus:

$$L_s = 0,01.v.h$$

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

$$Y_c = L_s \cdot \theta_s / 3$$

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

$$k = X_c - R_c \sin \theta$$

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

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

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

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

Di mana:

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

$Sta SC$ = $TS + L_s$

$Sta CS$ = $TS + L_s + L_c$

$Sta ST$ = $TS + L_s + L_c + L_s$

3) 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 balas.

Ada 3 macam peninggian, yaitu:

1) Peninggian Maksimum

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

2) Peninggian Minimum

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

Rumus:

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

Keterangan:

h_{min} = peninggian minimum (mm).

V = kecepatan rencana (km/jam).

R = jari - jari lengkung (m).

3) Peninggian Normal

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

Rumus:

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

Keterangan:

h_{normal} = peninggian normal (mm)

V = kecepatan rencana (km/jam)

$$R = \text{jari - jari lengkung (m)}$$

Berdasarkan ketentuan di atas peninggian lengkung ditentukan berdasarkan h normal. Harga di atas adalah harga teoritis, di lapangan harga – harga tersebut tidak dapat diterapkan begitu saja. Oleh karena itu harus dipertimbangkan segi pelaksanaannya. Harga – harga yang di peroleh dibulatkan ke 5 mm ke atas.

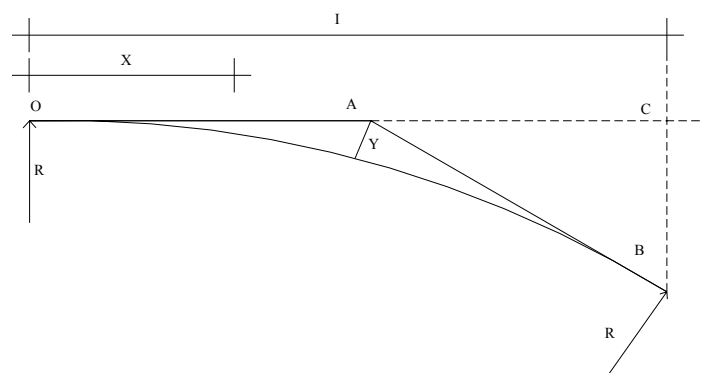
2.3.3. Alinyemen Vertikal

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

1) Lengkung Vertikal

Pada setiap pergantian landai harus dibuat lengkung vertikal yang memenuhi keamanan dan kenyamanan. Panjang lengkung vertikal berupa busur lingkaran yang menghubungkan dua kelandaian lintas berbeda, ditentukan berdasarkan besarnya jari-jari lengkung vertikal dan perbedaan kelandaian.

Besarnya jari – jari minimum dari lengkung vertikal tergantung dari besarnya kecepatan rencana (PD 10 Bab II pasal 6)



Gambar 2.5. Lengkung Vertikal

Keterangan:

Y_m = penyimpangan dari titik potong kedua tangen ke lengkung vertikal

- R = jari –jari lengkung peralihan.
- I = panjang lengkung peralihan.
- A = titik tekuk
- Φ = perbedaan landai

Rumus–rumus:

$$I / R = d^2y / dx^2$$

$$dy / dx = x / R + C1 ; x = 0$$

$$dy / dx = 0 , \text{ maka } C1 = 0$$

$$y = x / (2R) + C2 ; x = 0 ; y = 0 ; \text{ maka } C2 = 0$$

$$\text{jadi } dy / dx = x / R \text{ dan } Y = x^2 / (2R)$$

letak titik A (x_m , y_m)

$$x = 1$$

- $Dy / dx = I / R ; I = \Phi R$

$$x_m = OA = 1/2 I$$

$$x_m = (R/2) \Phi$$

- $y = x^2 / (2R) ; I = \Phi R$

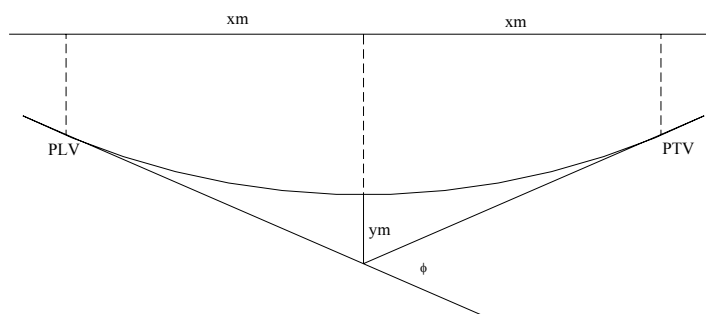
$$y = y_m ; x = x_m = 1/2 I$$

$$y = (1/4 \cdot I^2) / (2R) = (\Phi^2 \cdot R^2) / (8R)$$

$$y_m = (R/8) \Phi^2$$

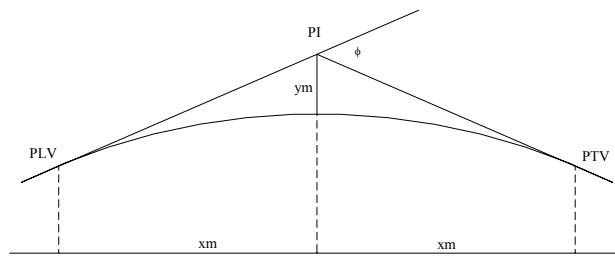
Ada dua macam lengkung vertikal yaitu:

a. *Lengkung vertikal cekung:*



Gambar 2.6. Lengkung Vertikal Cekung

b. *Lengkung vertikal cembung:*



Gambar 2.7. Lengkung vertikal Cembung

2) Landai

Menurut PD. 10 berdasarkan pada kelandaian dari sumbu jalan rel dibedakan atas 4 kelompok

- Lintas datar $0 - 10\text{‰}$
- Lintas pegunungan $10\text{‰} - 40\text{‰}$
- Lintas dengan rel gigi $40\text{‰} - 80\text{‰}$
- Untuk emplasmen $0 - 1,5\text{‰}$

3) Landai Penentu

Landai penentu adalah landai pendakian terbesar yang ada pada lintas lurus, yang berpengaruh terhadap gaya kombinasi daya tarik lokomotif terhadap rangkaian kereta yang dioperasikan.

2.4 KONSTRUKSI JALAN REL

Dalam merencanakan konstruksi jalan rel digunakan kecepatan rencana yang besarnya:

$$V_{rencana} = 1,25 \times V_{maks}$$

Di samping kecepatan rencana juga memperhitungkan beban gandar dari kereta api. Untuk semua kelas, beban gandar maksimum adalah 18 ton. Ketentuan ini akan dipakai guna evaluasi kelayakan pada perencanaan double track.

Tabel 2.2 Klasifikasi Standar Jalan Rel

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (Ton/tahun)	V maks (km/jam)	Pmaks Gambar (Ton)	Type Rel	Jenis bantalan/jarak	Jenis Penambat	Tebal balas Atas (cm)	Tebal Bahu Balas (cm)
I	$>20 \cdot 10^6$	120	18	R60/R54	Beton/600	EG	30	50
II	$10 \cdot 10^6 - 20 \cdot 10^6$	110	18	R54/R50	Beton/Kayu/600	EG	30	50
III	$5 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^6$	100	18	R54/ R50/ R42	Beton/Kayu/ Baja/600	EG	30	40
IV	$2,5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$	90	18	R54/ R50/ R42	Beton/Kayu/ Baja/600	EG/ET	25	40
V	$<2,5 \cdot 10^6$	80	18	R42	Kayu/Baja/600	ET	25	35

Sumber: PD 10 Bab I hal 1-3

ET = Elastik Tunggal; EG = Elastik Ganda

2.4.1. Rel

Rel yang dimaksud adalah rel berat untuk jalan rel yang sesuai dengan kelas jalannya. Perhitungan sambungan rel harus memperhatikan kekuatan dari pelat penyambung dan baut. Ukuran standar pelat penyambung diatur dalam PD 10 Bab 3 pasal 1 ayat 1.

Di sambungan rel harus ada celah untuk menampung timbulnya perubahan panjang rel akibat perubahan suhu. Besar celah pada rel di tentukan berdasarkan panjang rel, suhu pemasangan dan jenis bantalan yang di atur dalam PD 10 Bab 3 pasal 1 ayat f.

2.4.2. Penambat Rel

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

1) Jenis Penambat

Jenis penambat ada dua yaitu, penambat kaku dan penambat elastik. Penambat elastik memiliki kemampuan untuk meredam gataran, selain itu juga mampu menghasilkan gaya jepit (clamping force) yang tinggi dan memberikan perlawanan rangkak (creep resistance).

2) Penggunaan Penambat

Ketentuan penggunaan penambat:

- Penambat kaku tidak boleh di pakai untuk semua kelas jalan rel.

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

2.4.3. Bantalan

Bantalan berfungsi untuk meneruskan beban dari rel ke alas balas, menahan lebar sepur dan stabilitas ke arah luar jalan rel. Pemilihan bantalan berdasarkan pada kelas jalan yang sesuai dengan klasifikasi jalan rel Indonesia.

Macam – macam bantalan yang digunakan di Indonesia yaitu:

1. Bantalan Kayu

Bantalan kayu yang digunakan dalam jalan rel karena selain relatif lebih nyaman, bahan tersebut harganya murah, mudah diperoleh dan mudah pula dibentuk. Kerugiannya yaitu cepat rusak dan penambat menjadi kurang kuat. Untuk memperpanjang umur bantalan, antara rel dan bantalan harus dipasang pelat andas. Adapun kayu yang dapat dipakai adalah : kayu besi, kayu jati.

2. Bantalan Baja

Bantalan baja digunakan dalam jalan rel karena lebih ringan hal ini dikarenakan ukuran ketebalannya yang lebih tipis, sehingga memudahkan pengangkutan. Bantalan baja mempunyai keuntungan yaitu mampu menghindari retak – retak yang timbul karena mempunyai elastisitas lebih besar. Kekurangannya adalah penampang melintangnya kurang baik karena stabilitas aksial dan lateralnya didapat dari konstruksi cengkramannya, serta geseran antara balas dan bantalannya kecil. Di samping itu relatif keras dan kurang nyaman.

3. *Bantalan Beton*

Bantalan beton digunakan karena mempunyai beberapa keuntungan, yaitu:

- Mempunyai kekuatan yang lebih besar, tidak mengalami korosi dan merupakan konduktor listrik yang jelek dan tidak mudah rusak.
- Konstruksi lebih berat sehingga bantalan beton akan lebih stabil letaknya pada balas sehingga mampu mempertahankan kedudukan track.

Kerugiannya adalah:

- Penanganannya sulit karena berat, sehingga harus menggunakan alat – alat khusus dan pembuatannya memerlukan ketepatan ukuran yang sangat tinggi sehingga cukup mahal harganya.
- Agak keras sehingga perlu landas elastik.

2.4.4. Balas

Lapisan balas pada dasarnya adalah terusan dari lapisan tanah dasar yang terletak di daerah yang mengalami konsentrasi tegangan yang terbesar akibat lalu lintas KA pada jalan rel, oleh karena itu materialnya harus terpilih.

Fungsi utama balas adalah untuk meneruskan dan menyebarkan beban bantalan ke tanah dasar, mengkokohkan kedudukan bantalan dan meluluskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air di sekitar bantalan dan rel.

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

1. Lapisan balas atas

Lapisan balas atas terdiri dari batu pecah yang keras dan bersudut tajam(angular). Lapisan ini harus dapat meneruskan air dengan baik.

Kemiringan lereng lapisan balas atas tidak boleh lebih curam dari 1:2.

Tebal lapisan balas atas:

$$d1 = d - d2 \text{ (sumber PD 10 hal 3-40)}$$

keterangan: $d1$ = tebal lapisan balas atas

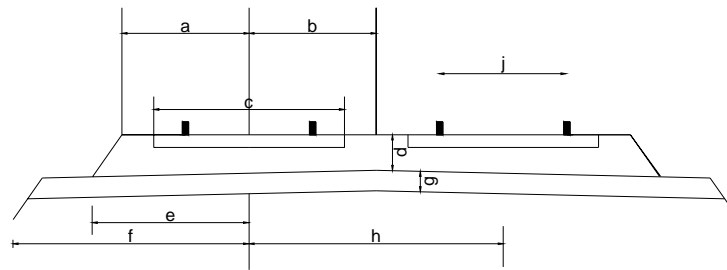
$d2$ = tebal lapisan balas bawah

d = tebal lapisan balas

2. Lapisan balas bawah

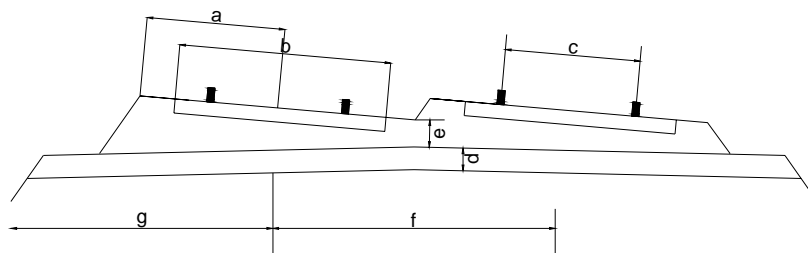
Lapisan balas bawah terdiri dari kerikil halus, kerikil sedang atau pasir kasar. Lapisan ini berfungsi sebagai lapisan penyaring (filter) antara tanah dasar dan lapisan balas atas serta harus dapat mengalirkan air dengan baik.

- Pada sepur lurus:



Gambar 2.8. Balas pada Sepur Lurus

- Pada tikungan:



Gambar 2.9. Balas pada Sepur Tikungan

3. Bahan balas

a) Balas atas

Balas terdiri dari batu pecah yang keras berukuran antara 2 – 6 cm, beratnya tidak boleh kurang dari 1400 kg/cm^2 , tahan lama serta bersudut (angular). Substansi yang merugikan tidak boleh terdapat dalam material balas melebihi prosentase tertentu, yaitu:

- Material lunak dan mudah pedah < %
- Material yang melalui ayakan no. 200 < 1 %
- Gumpalan – gumpalan lempung < 0,5 %

b) Balas Bawah

Pasir untuk material balas bawah harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

- Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5 % berat awal (lumpur adalah butiran-butiran yang dapat melalui ayakan 0.063 m)
- Tidak boleh tercampur dengan tumbuhan atau bagian tumbuhan atau benda-benda lain yang membusuk.

4. Daya dukung tanah

Daya dukung tanah sangat tergantung pada keadaan tanah di lapangan. Jika daya dukung tanah di lapangan tidak memenuhi, maka diperlukan stabilisasi terhadap tanah tersebut.

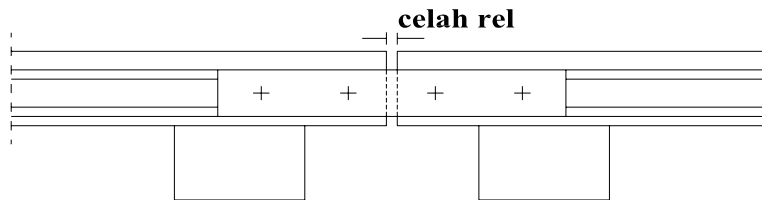
2.4.5. Sambungan Rel

Sambungan rel adalah konstruksi yang mengikat dua ujung rel sedemikian rupa sehingga operasi kereta api tetap aman dan nyaman. Sambungan harus kuat dan kokoh supaya kuat menahan momen pelenturan dan gaya-gayamaupun sentuhan yang ditimbulkan oleh kereta api. Akan tetapi konstruksinya juga harus memungkinkan memuainya rel.

1. Macam sambungan

Dari kedudukan terhadap bantalan dibedakan dua macam sambungan rel yaitu:

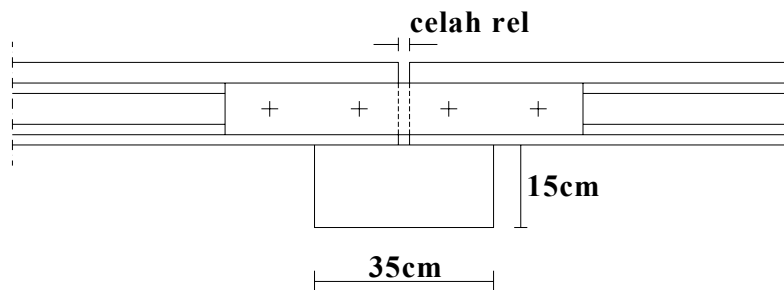
- Sambungan melayang



Gambar 2.10. Sambungan melayang.

Antara kedua bantalan ujung berjarak 30 cm. Jarak sumbu ke sumbu bantalan ujung 52 cm.

- Sambungan menumpu

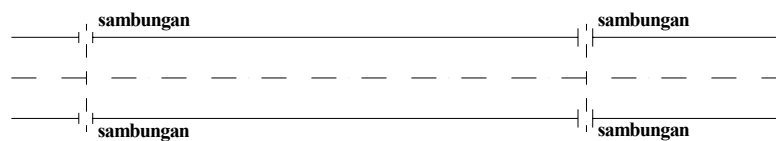


Gambar 2.11. Sambungan menumpu.

2. Penempatan sambungan di sepur

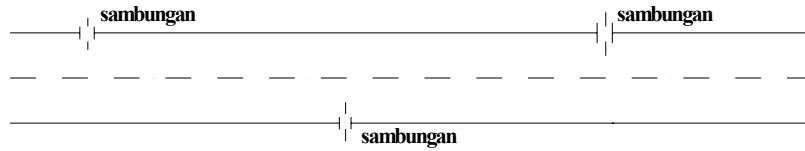
Penempatan sambungan di sepur ada dua macam yaitu:

- Penempatan secara siku (gambar 2.12), dimana kedua sambungan berada pada satu garis yang tegak-lurus terhadap sumbu sepur.



Gambar 2.12. Sambungan siku

- Penempatan secara berselang-seling (gambar 2.13), dimana kedua sambungan rel tidak berada pada satu garis yang tegak-lurus terhadap sumbu sepur.



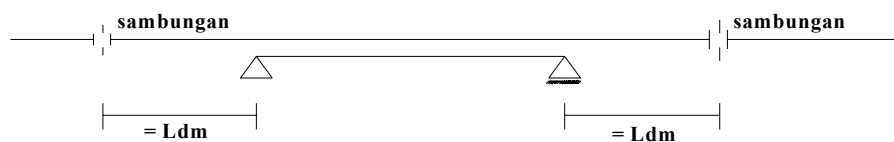
Gambar 2.13. Sambungan berselang-seling

3. Sambungan rel di jembatan.

- Di dalam daerah bentang jembatan harus diusahakan agar tidak ada sambungan rel.
- Rel dengan bantalan sebagai suatu kesatuan harus dapat bergeser terhadap gelegar pemikulnya.
- Yang dimaksud dengan gelegar pemikul adalah bagian dari konstruksi jembatan di mana bantalan menumpu secara langsung.
- Jika digunakan, rel standar atau rel pendek, letak sambungan rel harus berada di luar pangkal jembatan.
- Jika digunakan rel panjang, jarak antara ujung jembatan dengan sambungan rel, minimal harus sama dengan panjang daerah muai rel itu. Panjang daerah muai untuk bermacam-macam rel tercantum pada tabel 2.14.

Tabel 2.3 Panjang daerah muai rel (sumber PD.10 bab.3 hal.6)

Jenis bantalan	Tipe Rel			
	R.42	R.50	R.54	R.60
bantalan kayu	165 m	190 m	200 m	225 m
bantalan beton	100 m	115 m	125 m	140 m



Gambar 2.14. Penempatan sambungan rel panjang yang melintasi jembatan.

L_{dm} = panjang daerah muai.

2.5. ASPEK HIDROLOGI

Hidrologi adalah suatu ilmu yang membahas mengenai sirkulasi air yang ada di bumi, yang meliputi kejadian, distribusi, pergerakan, sifat-sifat fisik dan kimia serta hubungannya dengan lingkungan kehidupan. Data hidrologi yang meliputi data curah hujan dipergunakan untuk menghitung tinggi muka air pada saat ini dan pada masa yang akan datang dengan periode ulang 50 tahunan.

Masalah hidrologi sungai untuk perencanaan suatu jembatan diperlukan karena mempengaruhi perencanaan jembatan yang meliputi:

- Analisa curah hujan.
- Analisa debit banjir.

2.5.1. Analisa Curah Hujan

1. Distribusi curah hujan rata-rata

Untuk mendapatkan debit banjir rencana, terlebih dahulu membuat analisa curah hujan. Dalam perhitungan curah hujan ada beberapa pendekatan yang dapat dilakukan untuk menganalisis data curah hujan, antara lain:

- Cara rata-rata aljabar

Cara ini dipakai apabila daerah pengaruh hujan rata-rata dan setiap stasiun hampir sama, dimana humus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{R1 + R2 + R3 + R4 + Rn}{n} = \frac{\sum Ri}{n}$$

Dimana:

R = curah hujan rata-rata

Rn = curah hujan di tiap titik pengukuran

n = jumlah titik pengukuran

- Cara polygon *Thiessen*

Pada cara *Thiessen* dianggap bahwa data curah hujan dari satu tempat pengamatan dapat dipakai untuk daerah pengaliran di sekitar tempat itu. Langkah-langkahnya sebagai berikut:

- Tentukan stasiun penakar curah hujan yang berpengaruh pada daerah pengaliran.
- Menghitung luas Daerah Aliran Sungai pada wilayah yang dipengaruhi oleh stasiun penakar hujan tersebut.
- Menarik garis penghubung antar stasiun penakar hujan.
- Menarik garis sumbu dari tiap-tiap garis tersebut.

Rumus yang digunakan sebagai berikut:

$$R = \frac{A_1 \times R_1 + A_2 \times R_2 + \dots + A_n \times R_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

Dimana :

A_n = bagian daerah yang mewakili tiap titik pengukuran.

2. Curah hujan rencana

Analisa curah hujan ini untuk mengetahui besarnya curah hujan harian maksimum dalam periode ulang tertentu yang nantinya dipergunakan untuk perhitungan debit banjir rencana. Metode yang umum digunakan untuk perhitungan curah hujan rencana ini adalah:

- Metode *Gumbell*

$$R_T = R + (K \times S_x)$$

dimana:

R_T = curah hujan maksimum dengan periode ulang "T".

R = curah hujan rata-rata

K = faktor frekuensi *Gumbell*

$$= (0.78 (-\ln (-\ln (1 / T_R)) - 0.45)$$

T_R = periode ulang

S_x = standar deviasi bentuk normal

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (X_i - X)^2}$$

Tabel 2.4. Reduced Mean (Y_n)

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,4952	0,4996	0,5035	0,5070	0,5100	0,5128	0,5157	0,5181	0,5202	0,5220
20	0,5236	0,5252	0,5268	0,5283	0,5296	0,5300	0,5820	0,5882	0,5343	0,5353
30	0,5363	0,5371	0,5380	0,5388	0,5396	0,5400	0,5410	0,5418	0,5424	0,5430
40	0,5463	0,5442	0,5448	0,5453	0,5458	0,5468	0,5468	0,5473	0,5477	0,5481
50	0,5485	0,5489	0,5493	0,5497	0,5501	0,5504	0,5508	0,5511	0,5515	0,5518
60	0,5521	0,5524	0,5527	0,5530	0,5533	0,5535	0,5538	0,5540	0,5543	0,5545
70	0,5548	0,5550	0,5552	0,5555	0,5557	0,5559	0,5561	0,5563	0,5565	0,5567
80	0,5569	0,5570	0,5572	0,5574	0,5576	0,5578	0,5580	0,5581	0,5583	0,5585
90	0,5586	0,5587	0,5589	0,5591	0,5592	0,5593	0,5595	0,5596	0,5598	0,5599
100	0,5600									

Sumber : CD Soemarto, 1999

Tabel 2.5. Reduced Standard Deviation (S_n)

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,9496	0,9676	0,9833	0,9971	1,0095	1,0206	1,0316	1,0411	1,0493	1,0565
20	1,0628	1,0696	1,0754	1,0811	1,0864	1,0915	1,0961	1,1004	1,1047	1,1080
30	1,1124	1,1159	1,1193	1,1226	1,1255	1,1285	1,1313	1,1339	1,1363	1,1388
40	1,1413	1,1436	1,1458	1,1480	1,1499	1,1519	1,1538	1,1557	1,1574	1,1590
50	1,1607	1,1623	1,1638	1,1658	1,1667	1,1681	1,1696	1,1708	1,1721	1,1734
60	1,1747	1,1759	1,1770	1,1782	1,1793	1,1803	1,1814	1,1824	1,1834	1,1844
70	1,1854	1,1863	1,1873	1,1881	1,1890	1,1898	1,1906	1,1915	1,1923	1,1930
80	1,1938	1,1945	1,1953	1,1959	1,1967	1,1973	1,1980	1,1987	1,1994	1,2001
90	1,2007	1,2013	1,2026	1,2032	1,2038	1,2044	1,2046	1,2049	1,2055	1,2060
100	1,2065									

Sumber : CD Soemarto, 1999

Tabel 2.6. Reduce Variate (Y_i)

PERIODE ULANG	REDUCED VARIATE
2	0,3665
5	1,4999
10	2,2502
20	2,9606
25	3,1985
50	3,9019
100	4,6001
200	5,2960
500	6,2140
1000	6,9190
5000	8,5390
10000	9,9210

Sumber: CD Soemarto, 1999

- Metode Distribusi *Log Pearson III*

Metode ini menggunakan 3 macam parameter sehingga hasil yang didapat lebih akurat.

$$R_T = R + (k \times S_{x_2})$$

Dimana:

k = angka yang didapat dari tabel berdasarkan nilai C_s dan periode ulang (tabel 2.8).

S_{x_2} = standar deviasi bentuk logaritma untuk *Pearson*

III

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\log x_1 - \log x)^2}{n - 1}}$$

Tabel 2.7. Harga k untuk Distribusi Log Pearson III

Kemencengan (C_s)	Periode Ulang (tahun)							
	2	5	10	25	50	100	200	1000
	Peluang (%)							
	50	20	10	4	2	1	0,5	0,1
3,0	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051	4,970	7,250
2,5	-0,360	0,518	1,250	2,262	3,048	3,845	4,652	6,600
2,2	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705	4,444	6,200
2,0	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,912	3,605	4,298	5,910
1,8	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499	4,147	5,660
1,6	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388	3,990	5,390
1,4	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271	3,828	5,110
1,2	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149	3,661	4,820
1,0	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022	3,489	4,540
0,9	-0,148	0,769	1,339	2,018	2,498	2,957	3,401	4,395
0,8	-0,132	0,780	1,336	1,998	2,453	2,891	3,312	4,250
0,7	-0,116	0,790	1,333	1,967	2,407	2,824	3,223	4,105
0,6	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755	3,132	3,960
0,5	-0,083	0,808	1,323	1,910	2,311	2,686	3,041	3,815
0,4	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615	2,949	3,670
0,3	-0,050	0,824	1,309	1,849	2,211	2,544	2,856	3,525
0,2	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472	2,763	3,380
0,1	-0,017	0,836	1,292	1,785	2,107	2,400	2,670	3,235
0,0	0,000	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326	2,576	3,090
-0,1	0,017	0,836	1,270	1,761	2,000	2,252	2,482	3,950
-0,2	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178	2,388	2,810
-0,3	0,050	0,853	1,245	1,643	1,890	2,104	2,294	2,675
-0,4	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029	2,201	2,540
-0,5	0,083	0,856	1,216	1,567	1,777	1,955	2,108	2,400
-0,6	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880	2,016	2,275
-0,7	0,116	0,857	1,183	1,488	1,663	1,806	1,926	2,150
-0,8	0,132	0,856	1,166	1,488	1,606	1,733	1,837	2,035
-0,9	0,148	0,854	1,147	1,407	1,549	1,660	1,749	1,910
-1,0	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588	1,664	1,800
-1,2	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449	1,501	1,625

-1,4	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318	1,351	1,465
-1,6	0,254	0,817	0,994	1,116	1,166	1,200	1,216	1,280
-1,8	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,089	1,097	1,130
-2,0	0,307	0,777	0,895	0,959	0,980	0,990	1,995	1,000
-2,2	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905	0,907	0,910
-2,5	0,360	0,711	0,771	0,793	0,798	0,799	0,800	0,802
-3,0	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667	0,667	0,668

Sumber : CD Soemarto, 1995

2.5.2. Analisa debit banjir

1. Kecepatan aliran (V)

Menurut formula *Dr. Rizha*:

$$V = 72 \times \left(\frac{H}{L} \right)^{0,6}$$

Dimana : H = selisih elevasi (m)

L = panjang aliran (m)

2. Time Concentration (T_c)

$$T_c = \frac{L}{V}$$

3. Intensitas hujan (I)

$$I = \frac{X_{tr}}{24} \times \left(\frac{24}{T_c} \right)^{-0,67}$$

4. Debit Banjir

Formula racional mononobe:

$$Q = C \times I \times A \times 0,278$$

Dimana: I = intensitas hujan (m^3)

A = luas DAS (km^2)

C = koefisien run off

Tabel 2.8 Angka Pengaliran (koefisien Run Off)

Tipe Daerah aliran		Harga C
Perumputan	Tanah pasir, datar, 2%	0,05-0,10
	Tanah pasir, rata-rata, 2-7%	0,10-0,15
	Tanah pasir, curam, >7%	0,15-0,20
	Tanah gemuk, datar, 2%	0,13-0,17
	Tanah gemuk, rata-rata, 2-7%	0,18-0,22
	Tanah gemuk, curam, >7%	0,25-0,35
Business	Daerah kota lama	0,75-0,95
	Daerah pinggiran	0,50-0,70
Perumahan	Daerah "single family"	0,30-0,50
	"multi unit", terpisah-pisah	0,40-0,60
	"multi unit", tertutup	0,60-0,75
	"suburban"	
	Daerah rumah-rumah apartemen	0,25-0,40
Industri	Daerah ringan	0,50-0,70
	Daerah berat	0,60-0,90
Pertamanan, kuburan		0,10-0,25
Tempat bermain		0,20-0,35
Halaman kereta api		0,20-0,40
Daerah yang tidak dikerjakan		0,10-0,30
Jalan	Beraspal	0,70-0,95
	Beton	0,80-0,95
	Batu	0,70-0,85
Untuk berjalan dan naik kuda		0,75-0,85
Atap		0,75-0,95

2.6. ASPEK HIDROLIKA

Dalam aspek hidrolika dibahas mengenai tinggi muka air sungai maksimum dan pendalaman penggerusan oleh aliran sungai. Selanjutnya digunakan untuk menentukan elevasi minimum jembatan dan menentukan bentuk pilar jembatan.

2.6.1. Analisa Penampang

Adanya hasil dari analisa hidrologi, yaitu debit maksimum dan kecepatan aliran dari sungai maka dapat ditentukan tinggi muka air maksimum sungai dengan rumus:

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} A$$

Dimana:

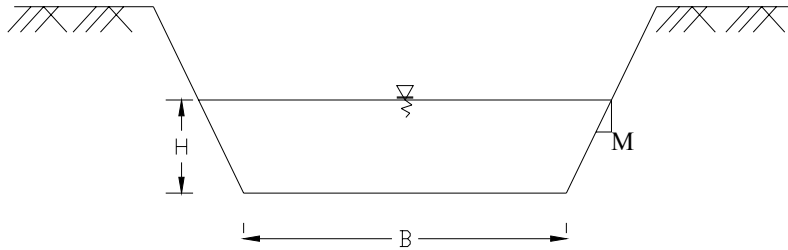
n = koefisien manning

R = jari-jari hidrolis

I = kemiringan saluran

A = luas penampang sungai

Q = debit banjir rencana (m^3/dtk)



Gambar 2.15. Penampang Melintang Sungai

V = kecepatan aliran (m/dtk)

B = lebar penampang sungai (m)

A = luas penampang basah (m^2)

H = tinggi muka air sungai (m)

M = kemiringan lereng sungai

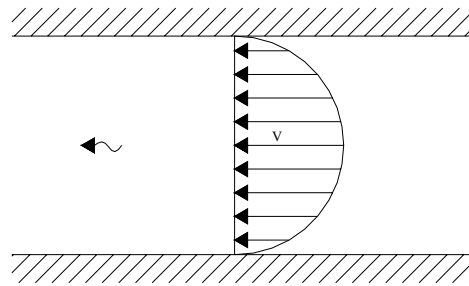
2.6.2. Tinjauan Kedalaman Penggerusan

- Untuk menghitung kedalaman penggerusan (*scouring*) digunakan metode *Lacey* yang tergantung pada jenis material dasar sungai. Faktor lempung *Lacey* dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.9. Faktor Lempung *Lacey*

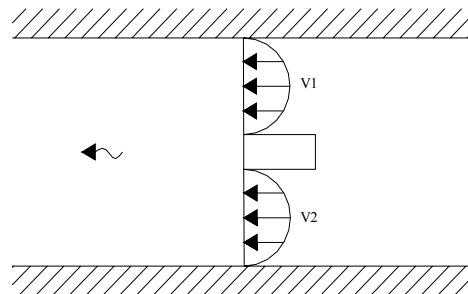
No	Type Material	ϕ (mm)	Factor
1	<i>Very fine silt</i> (lanau sangat halus)	0,052	0,40
2	<i>Fine silt</i> (lanau halus)	0,120	0,80
3	<i>Medium silt</i> (lanau medium)	0,233	0,85
4	<i>Standart silt</i> (lanau)	0,322	1,00
5	<i>Medium sand</i> (pasir)	0,525	1,25
6	<i>Coarse sand</i> (pasir halus)	0,725	1,50
7	<i>Heavy sand</i> (kerikil)	0,290	2,00

Kedalaman penggerusan pada sungai adalah tergantung dari kecepatan aliran air dan debit sungai. Adapun diagram aliran sungai sebagai berikut:



Gambar 2.16. Diagram Kecepatan Aliran Sungai.

Sedangkan pada bagian pilar diagram kecepatan akan berubah sesuai dengan perubahan luas penampang sungai yang dikurangi oleh luasan pilar. Diagram kecepatan aliran pada pilar jika dibandingkan dengan keadaan diatas sebagai berikut:



Gambar 2.17. Diagram Kecepatan Aliran Pada Pilar.

Rumus *lacey*:

$$L < W \Rightarrow d = H \times \left(\frac{L}{W} \right)^{0,61}$$

$$L < W \Rightarrow d = 0,473 \times \left(\frac{Q}{f} \right)^{0,333}$$

Dimana:

d = kedalaman penggerusan

Q = debit maksimum

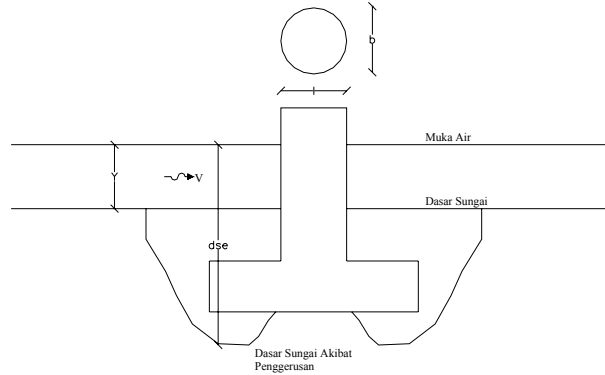
L = bentang jembatan

W = lebar alur sungai

H = tinggi banjir rencana

f = faktor lempung *lacey*

- Penggerusan lokal dihitung dengan humus *Carterns*:



Gambar 2.18. Gerusan Lokal Pada Pilar (Djoko Legono, 1987)

$$\frac{d_{se}}{b} = 0,546 \left(\frac{N^2 - 1,25}{N^2 - 5,02} \right)^{5/6} \quad (Djoko Legono, 1987)$$

Dimana:

$$H = 4,941 \text{ m}$$

d_{se} = kedalaman seimbang

$$b = \text{lebar pilar} = 2,5 \text{ m}$$

$$N = \text{sediment number} = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) g \cdot D}}$$

$$V = \text{Kecepatan rata-rata di hulu pilar} = 4,843 \text{ km/jam} = 1,345 \text{ m/s}$$

$$\gamma_s = \text{berat jenis butiran tanah} = 2,456 \text{ ton/m}^3$$

$$\gamma_w = \text{berat jenis air} = 1 \text{ ton/m}^3$$

$$g = \text{percepatan gravitasi} = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$D = \text{diameter butiran timbunan} = 0,322 \text{ mm}$$

$$N = \frac{1,345}{\sqrt{\left(\frac{2,456}{1} - 1 \right) 9,81 \cdot 0,00322}} = 6,27$$

2.7. ASPEK LALU LINTAS

2.7.1 Daya Angkut Lintas dan Kecepatan

Daya angkut lintas adalah jumlah angkutan anggapan yang melewati suatu lintas dalam jangka waktu satu tahun. Daya angkut lintas mencerminkan jenis serta jumlah beban total kecepatan kereta api yang lewat di lintas yang bersangkutan. Daya angkut lintas dan kecepatan yang melewati suatu ruas atau lintasan jalan rel tertentu, akan berpengaruh dalam perencanaan suatu jalan rel yaitu untuk menentukan kelas jalan rel dari lintasan tersebut.

2.8. BEBAN

Pada perencanaan jembatan kereta api harus diperhatikan terhadap beban-beban yang bekerja pada jembatan tersebut. Sedangkan beban-beban rencana yang bekerja menurut "Peraturan Untuk Perencanaan Jalan Rel Indonesia" antara lain:

- **Beban mati**

Beban mati terdiri atas semua beban yang berasal dari berat sendiri jembatan dan bagian jembatan yang menjadi satu kesatuan tetap, antara lain: struktur utama, rel, bantalan, penambat, ikatan angin, batang sandar, berat alat-alat sambung, dan berat andas.

- **Beban hidup**

Beban hidup terdiri dari semua beban yang berjalan sepanjang jembatan, antara lain: rangkaian kereta api dan orang-orang yang berjalan diatas jembatan. Dimana beban hidup rencana yang digunakan adalah rangkaian beban yang tercantum pada Skema Beban Gandar 1988.

- **Pengaruh kejut**

Selain mendapat tambahan beban dari pengaruh santak beban hidup juga harus ditambah dengan faktor kejut sebagai akibat pelimpahan sementara sebagian beban hidup dari rel kiri ke rel kanan atau sebaliknya. Faktor kejut diambil dengan rumus :

$$f_k = \frac{160 \times k \times n}{(L + 100)} \text{ atau } f_k = \frac{4300 \times k \times V}{(L + 30,4) \times D}$$

Dimana:

f_k = faktor kejut

k = faktor konstruksi jembatan

n = jumlah putaran roda gerak lokomotif perdetik

L = bentang jembatan (m)

V = kecepatan (km/jam)

D = diameter roda (mm)

- Gaya tumbukan

Gaya tumbukan diakibatkan oleh lokomotif terhadap jembatan yang pengaruhnya dapat disamakan dengan gaya horisontal T_u . Menurut "Peraturan Untuk Perencanaan Jalan Rel Indonesia" besarnya T_u didapatkan dari rumus:

$$T_u = P / 10$$

Dimana:

P = beban gandar lokomotif (ton)

- Gaya traksi

Gaya traksi ditimbulkan oleh gandar penggerak lokomotif. Besarnya gaya traksi ini adalah 25% dari beban gandar penggerak lokomotif tanpa pengaruh santak dan kejut.

- Gaya rem

Besarnya gaya rem adalah (1/6 berat lokomotif + 1/10 berat gerbong).

- Gaya angin

Gaya angin ditetapkan sebesar:

- Angin tekan 100 kg/m²
- Angin hisap 50 kg/m²

Pada jembatan rangka luas bidang yang terkena angin diperhitungkan sebesar 25% dari luas bidang sisi jembatan ditambah dengan luas lantai kendaraan dan luas beban hidup yang tidak tertutup bagian jembatan.

- Pengaruh perubahan suhu

Pengaruh perubahan suhu yaitu tegangan-tegangan akibat adanya perubahan suhu. Perbedaan suhu harus ditetapkan sesuai keadaan setempat.

- Gaya gesek perletakan

Gaya gesek perletakan ini diperoleh dari hasil koefisien gesek perletakan (f) dengan besar gaya reaksi vertikal perletakan.

- Pengaruh susut dan rangkai
- Gaya gempa

Gaya gempa dihitung dengan rumus:

$$G = K_g \times M$$

Dimana:

G = gaya gempa pada suatu bagian struktur yang ditinjau.

K_g = koefisien gempa.

M = berat bagian struktur yang didukung oleh bagian struktur yang ditinjau.

- Gaya tabrakan

Gaya ini bekerja jika jembatan rel melintangi jalan raya.

- Tekanan tanah

Tekanan tanah yaitu perhitungan bagian-bagian dari jembatan yang menahan tanah akibat tekanan tanah aktif maupun pasif.

- Tekanan aliran air

Semua bagian jembatan yang mengalami gaya-gaya aliran air harus diperhitungkan terhadap gaya ini. Tekanan air pada pilar dapat dihitung dengan rumus:

$$P = k \times v^2$$

Dimana:

P = tekanan aliran air (ton/m^2)

k = koefisien bentuk pilar

0,075 untuk pilar persegi

0,035 untuk pilar bulat

0,025 untuk sudut $< 30^\circ$

v = kecepatan aliran air (m/det)

- Beban pelaksanaan konstruksi
Beban selama pelaksanaan yaitu gaya-gaya khusus yang mungkin timbul selama pelaksanaan atau pembuatan jembatan.
- Beban khusus
Beban khusus yaitu beban-beban diluar beban-beban diatas.
Keseluruhan beban-beban diatas tidak bekerja bersamaan, tetapi digunakan kombinasi pembebanan. Kombinasi beban yang dipakai sebagai dasar perencanaan jembatan adalah kombinasi beban terbesar.

2.9. KRITERIA PERENCANAAN

Sebagai dasar perencanaan jembatan kereta api sebagai berikut:

- Skema Beban Gandar 1988 (SGB1988).
- Peraturan Umum Perencanaan Jembatan Jalan Rel Peraturan Dinas No. 10, PT. Kereta Api Indonesia.
- SKSNI T-15-1991-03.
- Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia (PPBBI)

2.10. ASPEK PERENCANAAN STRUKTUR

2.9.1. Struktur Atas

Untuk menganalisa kekuatan struktur atas, sebelumnya harus memperhatikan beberapa faktor dibawah ini, yaitu:

- Jenis atau tipe struktur
Pemilihan jenis struktur disesuaikan dengan beberapa hal, yaitu bentang, bentuk, kondisi setempat, pembuatan, pemasangan, dan perawatan. Jembatan yang dipakai antara lain adalah jembatan beton atau jembatan rangka baja.
- Panjang bentang
Untuk jembatan struktur baja, pemilihan bentuk jembatan berdasarkan bentang adalah rasuk tunggal, rasuk kembar, rasuk pelat, rasuk rangka, dinding pelat dan dinding rangka. Sedangkan untuk jembatan rangka dengan bentang lebih dari 35 meter adalah menggunakan dinding rangka.

Beban-beban yang bekerja pada jembatan dinding rangka baja adalah sesuai dengan beban-beban yang tercantum pada “Peraturan Perencanaan Jembatan Kereta Api Indonesia”. Konstruksi bangunan atas harus ditinjau terhadap berbagai kombinasi pembebanan yang mungkin terjadi. Kombinasi pembebanan yang mungkin terjadi pada jembatan rangka baja seperti pada tabel berikut

Tabel 2.11. Kombinasi Pembebanan Pada Struktur Atas

No	Kombinasi beban
1	$M+H+f_k+S_u+F$
2	$M+H+f_k+S_u+F+T_u+A$
3	$M+H+f_k+S_u+F+R$
4	$M+H+f_k+S_u+F+R_c+A$
5	$M+H+f_k+S_u+F+A$

Sumber: “Peraturan Perencanaan Jembatan Kereta Api Indonesia”

Dimana:

- M = beban mati
- H = beban hidup
- f_k = factor kejut
- S_u = perubahan suhu
- F = gaya gesek perletakan
- A = gaya angin
- T_r = traksi
- T_u = gaya tumbukan
- R_c = gaya rem

2.9.2. Struktur Bawah

Struktur bawah jembatan dalam hal ini adalah pangkal jembatan (*abutment*) dan pilar jembatan.

Beban-beban yang bekerja pada pilar dan pangkal jembatan adalah merupakan kombinasi beban-beban. Dimana kombinasi beban sebagai berikut:

Tabel 2.12. Kombinasi Pembebanan Pada Struktur Bawah

No	Kombinasi beban
1	$M+H+f_k+F+T_t+P$
2	$M+H+f_\delta+F+T_t+A+R_c$
3	$M+H+A+F+P$
4	$M+A+T_t+P+T_a$
5	$M+F+T_t+P+G$
6	$M+H+f_\delta+F+T_t+P+G$

Sumber: "Peraturan Perencanaan Jembatan Kereta Api Indonesia"

Dimana:

- M = beban mati
- H = beban hidup
- f_k = factor kejut
- F = gaya gesek perletakan
- P = tekanan aliran air
- A = gaya angin
- T_t = tekanan tanah
- R_c = gaya rem
- G = gaya gempa

Selain itu untuk perencanaan struktur bawah perlu juga diperhitungkan pengaruh terhadap guling, geser dan daya dukung tanah dengan rumus berikut:

- Kontrol terhadap guling

$$\frac{\sum M_v}{\sum M_H} \leq SF \quad SF=2,5$$

- Kontrol terhadap geser

$$\frac{\sum P_v}{\sum P_H} \leq SF \quad SF=1,5$$

- Kontrol terhadap daya dukung tanah

$$q_{\max} = \frac{\sum P_v}{B.L} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \leq \frac{q_{ult}}{SF}$$

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{\sum M_v - \sum M_H}{\sum V} \right)$$

$$q_{ult} = c \cdot N_c \cdot \left(1 + 0,3 \frac{B}{L}\right) + P_o \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma_{sub} \cdot B \cdot N_\gamma \cdot \left(1 - 0,2 \frac{B}{L}\right)$$

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{SF} \quad ; \text{dimana } SF = 3 \text{ untuk jembatan kereta api}$$

2.9.3. Pondasi

Dalam perencanaan pondasi pada jembatan kereta api ini harus diperhitungkan terhadap:

- Daya dukung tanah

$$P_{ult} =$$

$$(1,3 \times N_c + \gamma \times D_f \times N_q + 0,6 \times \gamma \times R \times N_\gamma) + \frac{2(c_A \times D_f + Ph \times \tan \delta)}{R}$$

$$P_{all} = \frac{P_{ult}}{FS}$$

dimana :

P_{ult} = daya dukung batas pondasi sumuran (Ton)

P_{all} = daya dukung ijin pondasi sumuran (Ton)

FS = *Factor of Safety* (3,0)

D_f = kedalaman pondasi sumuran (m)

R = jari-jari sumuran (m)

γ = berat jenis tanah (gr/cm^3)

c = kohesi tanah (kg/cm^2)

c_A = adhesi sisi vertikal pondasi (Ton/m^2)

Ph = resultante gaya horizontal setinggi D_f , per m' lebar pondasi

N_c, N_γ, N_q = faktor daya dukung tanah

(Sunggono kh)

- Tinjauan terhadap geser

$$A = a^2 \times (\pi - \beta + \sin \beta \times \cos \beta)$$

$$Hu = c \times A + P \times \tan \varphi_B \times A$$

dimana :

A = luas beban efektif dasar pondasi (m^2)

P = tegangan ijin maksimum pondasi sumuran (kg/cm^2)

ϕB = sudut geser antara dasar pondasi dan tanah pondasi
 a = 0,589
 c = nilai kohesi tanah

(Sosrodarsono dan Nakazawa, 2000)