

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Reaktivasi Jalan Rel Kereta Api

Keputusan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor KP 2128 Tahun 2018 Tentang Rencana Induk Perkeretaapian Nasional, pada halaman 52 poin (h) dijelaskan bahwa pemerintah memiliki rencana untuk mengaktifkan kembali jalur rel kereta api di suatu daerah. Dalam peraturan tersebut terdapat reaktivasi kereta yang direncanakan di daerah Rembang – Lasem. Jalur Rembang – Lasem merupakan bagian dari jalur rel utama yang menghubungkan antara kota Semarang dengan Bojonegoro. Berdasarkan peraturan tersebut maka dipilih jalur Rembang – Lasem.

Titik awal dan titik akhir dalam perancangan jalan rel kereta api ini adalah Stasiun Rembang dan Stasiun Lasem. Akan tetapi, saat ini Stasiun Rembang dan Stasiun Lasem merupakan stasiun nonaktif dan telah dipergunakan untuk tempat perdagangan masyarakat setempat. Maka dari itu, dalam perencanaan ini akan digunakan stasiun baru yang dijadikan titik awal dan titik akhir perancangan jalur rel Rembang – Lasem.

2.2. Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Rembang

Peraturan Daerah Kabupaten Rembang Nomor 14 Tahun 2011 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Rembang Tahun 2011 – 2031, dalam pasal 10 ayat 10 tercantum peraturan mengenai rencana pengembangan prasarana perkeretaapian. Kemudian pasal 37 ayat 1 pada poin (a) tercantum peraturan mengenai perwujudan jaringan transportasi.

2.3. Penetapan Trase Jalur Kereta Api

Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor: PM 11 Tahun 2012 tentang Tata Cara Penetapan Trase Jalur Kereta Api menjelaskan beberapa hal yang berkaitan dengan trase jalur perkeretaapian di Indonesia. Tujuan diberlakukannya peraturan tersebut adalah untuk memastikan bahwa

perencanaan trase jalur kereta api di Indonesia dapat dilakukan secara terkoordinasi dan terencana sehingga dapat memberikan kenyamanan dan manfaat yang maksimal bagi masyarakat dan lingkungan disekitarnya. Beberapa hal yang diatur dalam peraturan tersebut yaitu:

1. Penetapan trase jalur kereta api harus mempertimbangkan keamanan, efisiensi, lingkungan, serta kepentingan sosial dan ekonomi.
2. Proses penetapan trase jalur kereta api melalui beberapa tahap seperti studi kelayakan, analisis data, analisis dampak lingkungan, serta konsultasi dengan pihak-pihak terkait.
3. Pengumuman kepada masyarakat mengenai trase jalur kereta api yang telah ditetapkan.
4. Pembebasan lahan untuk jalur kereta api harus sesuai dengan peraturan yang berlaku.
5. Peraturan ini juga mengatur mengenai pembangunan dan pengoperasian jalur kereta api yang sudah ditetapkan.

2.4. Perancangan Teknis Jalan Rel Kereta Api

Ketentuan dan persyaratan perencanaan jalan rel kereta api secara teknis terdapat dalam Peraturan Menteri Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api dan Peraturan Dinas Nomor 10 Tahun 1986 tentang Perencanaan Konstruksi Jalan Rel. Dalam Tugas Akhir Perancangan ini dilaksanakan di Pulau Jawa sehingga digunakan persyaratan jalan rel dengan lebar sepur 1067 mm.

2.4.1. Ketentuan Umum

Jalur kereta api merupakan rangkaian petak jalan rel kereta api yang memuat semua hal mengenai sarana dan prasarana kereta api. Ruang manfaat, ruang milik, dan ruang pengawasan jalur kereta api merupakan bagian penting dalam perkeretaapian. Dalam perancangan konstruksi jalan kereta api harus dirancang sedemikian rupa supaya dapat dipertanggungjawabkan secara teknis dan ekonomis. Secara teknis konstruksi jalan rel kereta api harus

dapat dilalui oleh kereta api dengan aman serta dengan kenyamanan tertentu demi menjamin keselamatan dan kelancaran perjalanan. Secara ekonomis pembangunan dan pemeliharaan konstruksi jalan kereta api harus menjamin keamanan, keselamatan, serta kenyamanan dengan mengutamakan pengeluaran biaya seminimal mungkin. Perencanaan konstruksi jalan kereta api dipengaruhi oleh beberapa faktor tertentu. Maka dari itu, klasifikasi jalan rel didasari oleh jumlah beban, kecepatan maksimum, beban gandar dan pola operasi.

2.4.2. Kecepatan

Kecepatan dibagi menjadi 4, yaitu:

1) Kecepatan rencana merupakan kecepatan yang digunakan untuk merencanakan jalan rel dengan rumus sebagai berikut:

a) Untuk perencanaan struktur jalan rel.

$$V_{rencana} = 1,25 \times V_{maks} \quad (2.1)$$

b) Untuk perencanaan peninggian.

$$V_{rencana} = c \times \frac{\sum Ni \cdot Vi}{\sum Ni} \quad (2.2)$$

$$c = 1,25$$

N_i = Jumlah kereta api yang lewat

V_i = Kecepatan operasi

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

$$V_{rencana} = V_{maks} \quad (2.3)$$

2) Kecepatan maksimum merupakan kecepatan tertinggi yang diizinkan dalam operasi rangkaian kereta api.

3) Kecepatan operasi merupakan kecepatan rata-rata kereta api dalam jalan tertentu.

4) Kecepatan komersil merupakan kecepatan rata-rata kereta api sebagai hasil pembagian jarak dengan waktu.

2.4.3. Beban Gandar

Beban gandar merupakan beban yang diterima oleh jalan rel kereta api dalam satu gandar. Beban gandar untuk jalan rel kereta api dengan lebar 1067 mm adalah 18 ton pada semua kelas jalan rel.

2.4.4. Kelas Jalan Rel

Kelas jalan rel kereta api dengan lebar 1067 mm diklasifikasikan berdasarkan daya angkut lintasan, kecepatan maksimum, beban gandar, tipe rel, serta ketentuan lainnya ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut. Perancangan jalan rel dalam Tugas Akhir ini digunakan kelas jalan I.

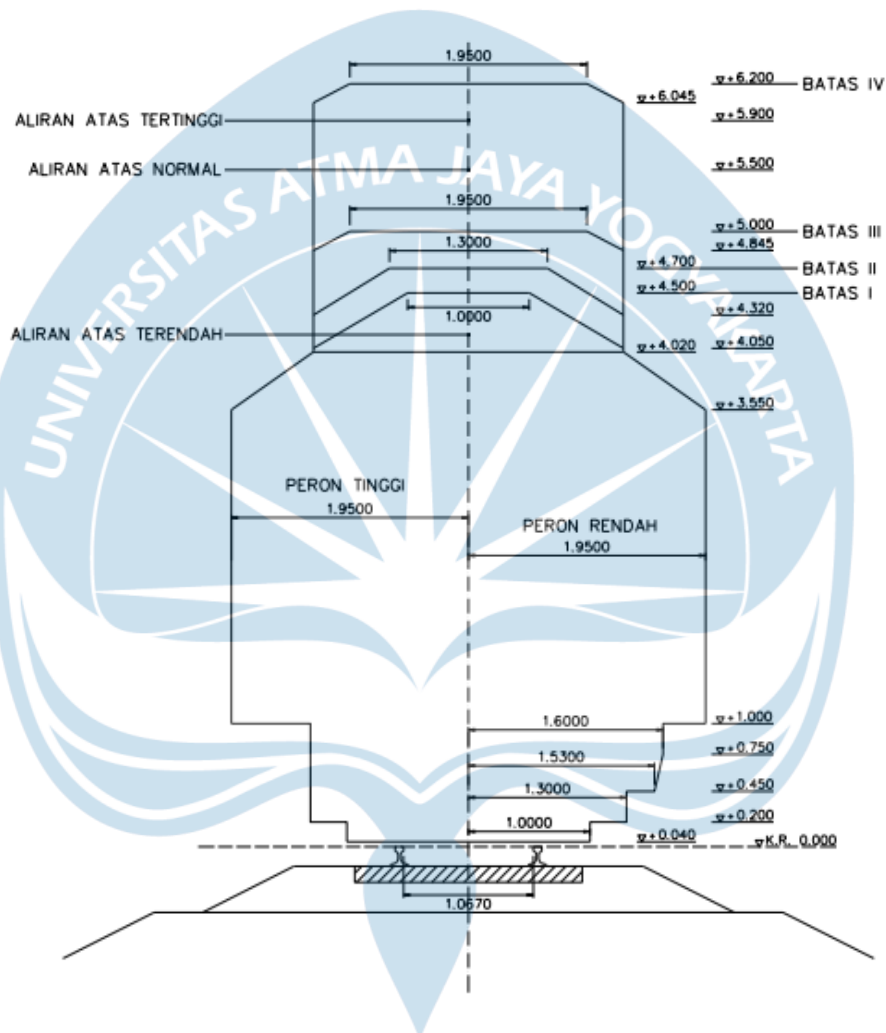
Tabel 2.1 Klasifikasi Kelas Jalan Rel

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

(sumber: Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012)

2.4.5. Ruang Bebas dan Ruang Bangun

Ruang bebas merupakan ruang diatas sepur yang harus terbebas dari berbagai benda penghalang dan rintangan seperti terlihat pada Gambar 2.1 hingga Gambar 2.4 berikut.

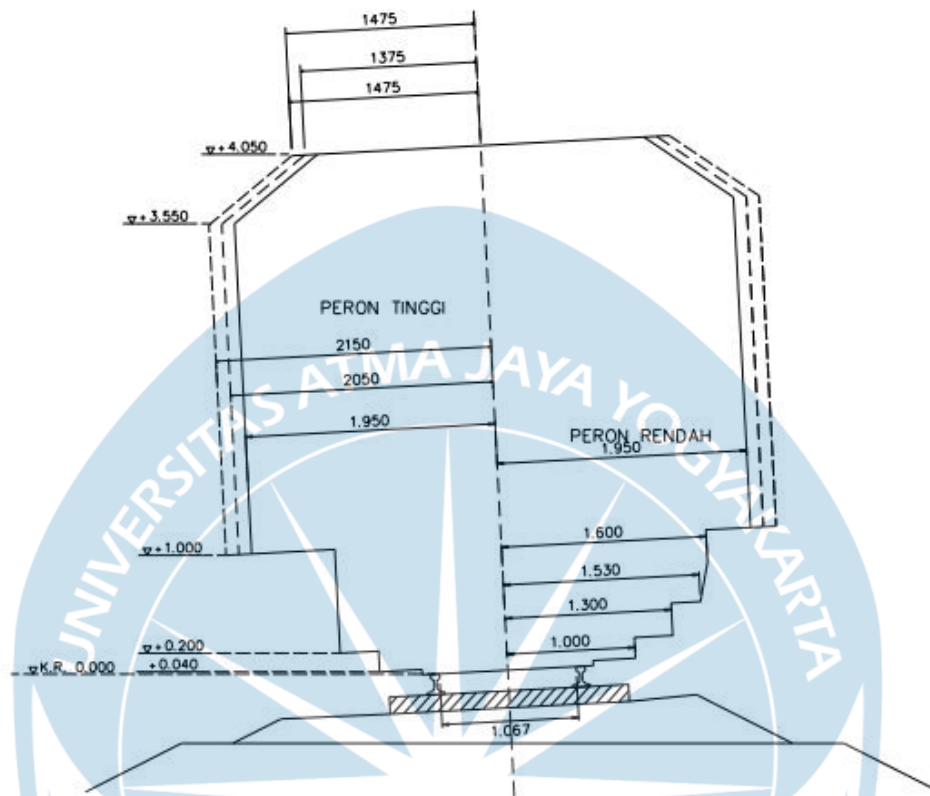


Keterangan :

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

Gambar 2.1 Ruang Bebas Pada Bagian Lurus

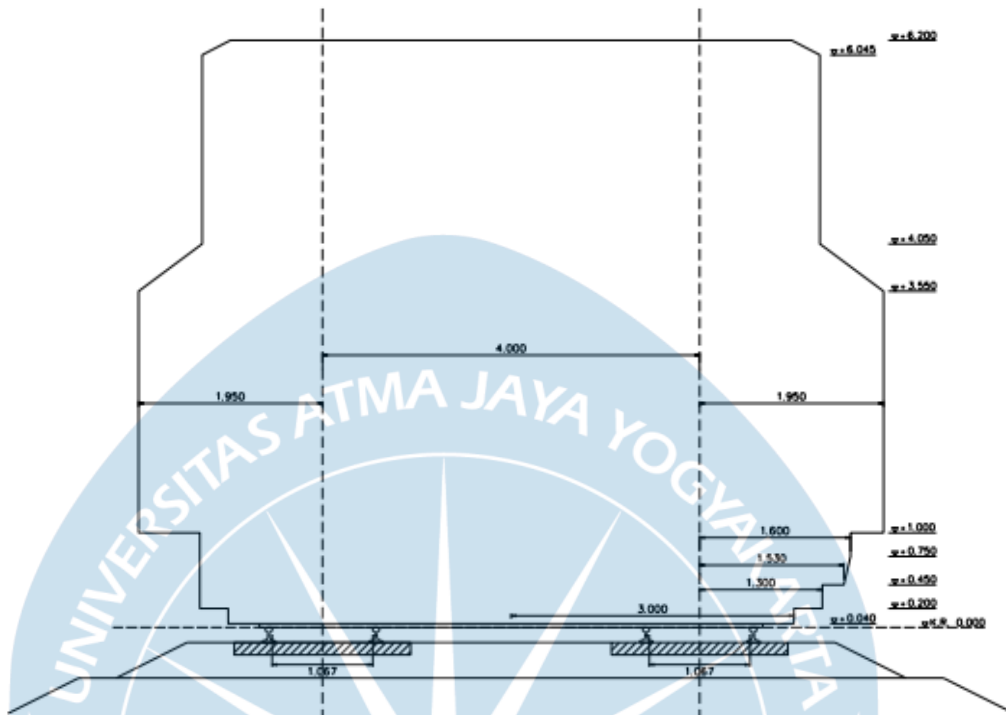
(sumber: Peraturan Dinas No. 10)



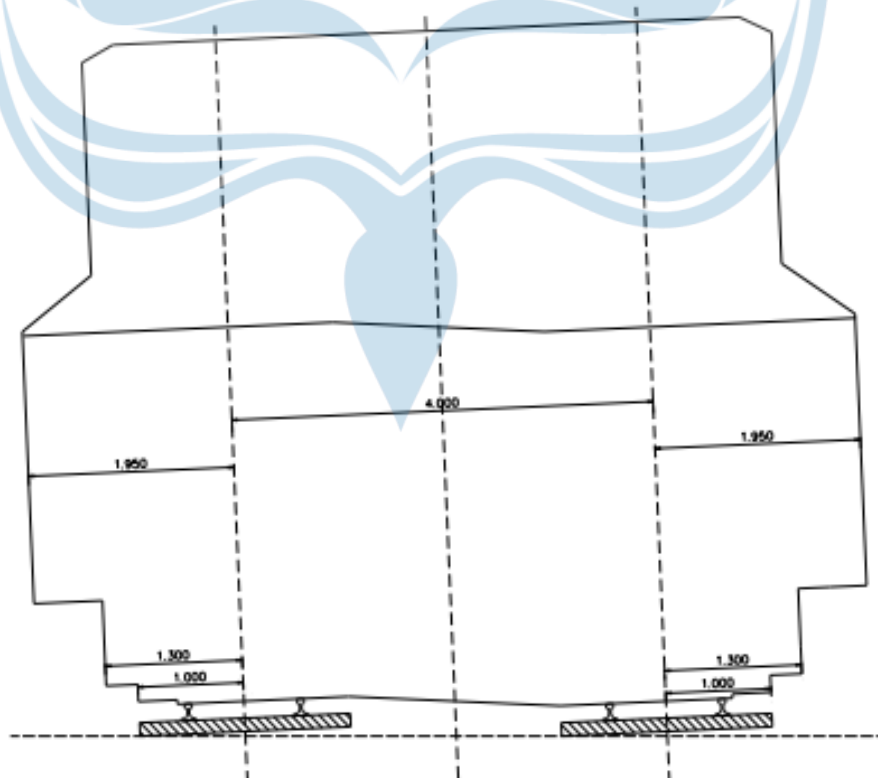
Keterangan :

- Batas ruang bebas pada lintas lurus dan pada bagian lengkungan dengan jari-jari > 3000 m.
- - - - - Batas ruang bebas pada lengkungan dengan jari-jari 300 sampai dengan 3000 m.
- - - - - Batas ruang bebas pada lengkungan dengan jari-jari < 300 m.

Gambar 2.2 Ruang Bebas Pada Lengkung
(sumber: Peraturan Dinas No. 10)



Gambar 2.3 Ruang Bebas Pada Jalur Lurus untuk Jalan Ganda
(sumber: Peraturan Dinas No. 10)



Gambar 2.4 Ruang Bebas Pada Jalur Lengkung untuk Jalan Ganda
(sumber: Peraturan Dinas No. 10)

Ruang bangun merupakan ruang di sisi sepur yang harus terbebas dari berbagai benda atau bangunan tetap yang ada. Jarak ruang bangun ditetapkan sebagai berikut:

- a) Pada lintas bebas:
2,35 sampai 2,53 m di kiri kanan sumbu sepur.
- b) Pada emplasemen:
1,95 m sampai 2,35 di kiri kanan sumbu sepur
- c) Pada jembatan:
2,15 m di kiri kanan sumbu sepur

2.5. Geometri Jalan Rel

Geometri jalan rel meliputi alinyemen horisontal dan alinyemen vertikal. Geometri jalan rel diatur juga diatur dalam Peraturan Menteri Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api dan Peraturan Dinas Nomor 10 Tahun 1986 tentang Perencanaan Konstruksi Jalan Rel.

2.5.1. Lengkung Horisontal

Dua bagian lurus yang perpanjangannya membentuk sudut harus dihubungkan lengkung berbentuk lingkaran dengan atau tanpa lengkung peralihan. Untuk berbagai kecepatan rencana dan jari-jari minimum yang diizinkan terdapat pada tabel 2.2 dan rumus seperti berikut.

Tabel 2.2 Jari-Jari Minimum yang Diizinkan Untuk 1067mm

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

(sumber: Peraturan Dinas No. 10)

Persamaan jari-jari minimum untuk lengkung lingkaran tanpa lengkung peralihan atau *Full Circle* (FC)

$$R_{\min} = 0,164 \times V^2 \quad (2.4)$$

R_{\min} = Jari-jari minimum yang diizinkan

V = Kecepatan Rencana untuk lengkung

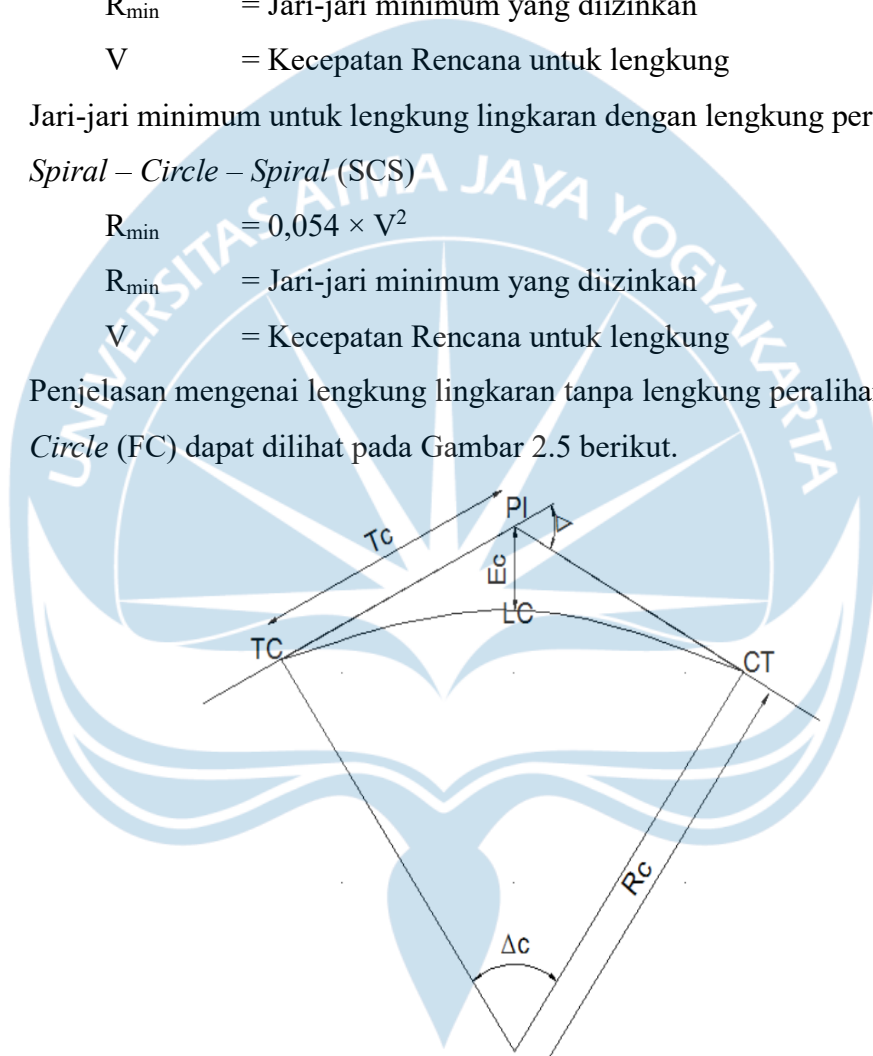
Jari-jari minimum untuk lengkung lingkaran dengan lengkung peralihan atau *Spiral – Circle – Spiral* (SCS)

$$R_{\min} = 0,054 \times V^2 \quad (2.5)$$

R_{\min} = Jari-jari minimum yang diizinkan

V = Kecepatan Rencana untuk lengkung

Penjelasan mengenai lengkung lingkaran tanpa lengkung peralihan atau *Full Circle* (FC) dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Lengkung *Full Circle*
(sumber: Hendarsin, *Perencanaan Teknik Jalan Raya*, 2000)

Keterangan:

PI = *Point of Intersection* (titik potong antar *Tangen*)

TC = Titik antara *Tangen* dengan *Circle*

CT = Titik antara *Circle* dengan *Tangen*

Ec = Jarak antara PI ke busur lingkaran

- LC = Panjang busur lingkaran dari TC ke CT (m)
 Rc = Panjang jari-jari lingkaran (m)
 Tc = Panjang *Tangen* dari TC ke PI atau PI ke CT (m)
 Δ_c = Sudut lingkaran ($^\circ$)
 Δ = Sudut tikungan ($^\circ$)

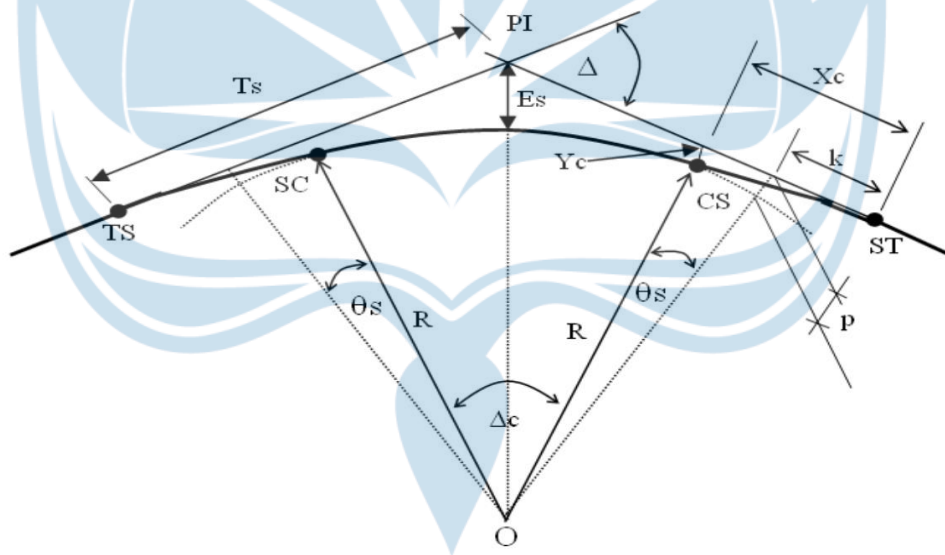
Untuk parameter lengkung lingkaran tanpa lengkung peralihan (FC) dapat dilihat melalui Persamaan 2.6.a, 2.6.b, dan 2.6.c.

$$T_c = R_c \cdot \tan \frac{1}{2} \Delta \quad (2.6.a)$$

$$E_c = T_c \cdot \tan \frac{1}{4} \Delta \quad (2.6.b)$$

$$L_c = 2 \cdot \pi \cdot R_c \cdot \frac{\Delta}{360} \quad (2.6.c)$$

Penjelasan mengenai lengkung lingkaran dengan lengkung peralihan atau *Spiral – Circle – Spiral* (SCS) dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Lengkung Spiral – Circle – Spiral
 (Sumber: Hendarsin, *Perencanaan Teknik Jalan Raya*, 2000)

Keterangan:

- PI = *Point of Intersection* (titik potong antar *Tangen*)
 TS = Titik antara *Tangen* dengan *Spiral*
 Sc = Titik antara *Spiral* dengan *Circle*
 Cs = Titik antara *Circle* dengan *Spiral*

ST	= Titik antara <i>Spiral</i> dengan <i>Tangen</i>
Es	= Jarak antara PI ke busur lingkaran
LC	= Panjang busur lingkaran dari Sc ke Cs (m)
R	= Panjang jari-jari lingkaran (m)
Ts	= Panjang <i>Tangen</i> dari TS ke PI atau PI ke ST (m)
Xc	= Absis pada titik Sc pada <i>Tangen</i> , jarak lurus dari TS ke Sc (m)
Yc	= Ordinat titik Sc pada garis tegak lurus <i>Tangen</i> , jarak tegak lurus garis <i>Tangen</i> ke Sc pada lengkung (m)
k	= Jarak lurus dari <i>Tangen</i> ke <i>Spiral</i> (m)
p	= Pergeseran <i>Tangen</i> terhadap <i>Spiral</i>
Ls	= Panjang lengkung <i>Spiral</i> dari titik TS ke Sc atau Sc ke ST (m)
Δ_c	= Sudut dalam lingkaran ($^\circ$)
Δ	= Sudut tikungan ($^\circ$)
θ_s	= Sudut dalam lengkung <i>Spiral</i> ($^\circ$)

Untuk parameter lengkung lingkaran dengan lengkung peralihan (SCS) dapat dilihat melalui Persamaan 2.7.a, 2.7.b, 2.7.c, 2.7.d, 2.7.e, 2.7.f, dan 2.7.g.

$$\theta_s = \frac{90}{\pi} \cdot \frac{L_s}{R} \quad (2.7.a)$$

$$LC = \frac{\Delta - 2\theta_s}{180} \cdot \pi \cdot R \quad (2.7.b)$$

$$p = \frac{L_s^2}{6R} - R(1 - \cos \theta_s) \quad (2.7.c)$$

$$k = L_s - \frac{L_s^3}{40R} - R \cdot \sin \theta_s \quad (2.7.d)$$

$$T_s = (R + p) \tan \frac{1}{2} \Delta + k \quad (2.7.e)$$

$$E_s = (R + p) \sec \frac{1}{2} \Delta + R \quad (2.7.f)$$

$$Y_c = \frac{L_s^2}{6R} \quad (2.7.g)$$

2.5.2. Lengkung Peralihan

Lengkung peralihan merupakan suatu lengkung yang memiliki jari-jari berubah beraturan. Lengkung peralihan pada umumnya digunakan untuk peralihan antara bagian yang lurus dan bagian lingkaran serta sebagai

peralihan antara dua jari-jari lingkaran yang berbeda. Lengkung peralihan biasanya digunakan pada jari-jari lingkaran yang relatif kecil. Panjang minimum lengkung peralihan dapat dihitung dengan Persamaan sebagai berikut:

$$L_h = 0,01 \times h \times V \quad (2.8)$$

Dimana : L_h = Panjang minimal lengkung peralihan

h = Peninggian relatif antara dua bagian yang dihubungkan (m)

V = Kecepatan rencana untuk lengkung peralihan (km/jam)

2.5.3. Pelebaran Sepur

Pelebaran sepur biasanya digunakan agar roda kereta api dapat melewati lengkung tanpa adanya hambatan. Besar pelebaran sepur yang diizinkan terdapat pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Pelebaran Sepur Untuk 1067mm

Pelebaran Sepur (mm)	Jari-jari tikungan (meter)
0	$R > 600$
5	$550 < R < 600$
10	$400 < R < 550$
15	$350 < R < 400$
20	$100 < R < 350$

(sumber: Peraturan Dinas No. 10)

2.5.4. Peninggian Rel

Pada lengkung jalan rel, elevasi rel bagian luar dibuat lebih tinggi dibanding elevasi rel bagian dalam untuk menangani gaya sentrifugal yang dialami oleh rangkaian kereta api. Besar peninggian rel kereta api terdapat pada Tabel 2.4 dan Persamaan berikut.

$$h_{\text{normal}} = 5,95 \times \frac{(V_{\text{rencana}})^2}{\text{jari-jari}} \quad (2.9)$$

Tabel 2.4 Peninggian Jalan Rel Untuk 1067mm

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

(sumber: Peraturan Dinas No. 10)

2.5.5. Kelandaian

Berdasarkan pengelompokan lintasan kelandaian dari sumbu jalan rel dibedakan menjadi 4 yang tercantum pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5 Pengelompokan Lintas Berdasar pada Kelandaian

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

(sumber: Peraturan Dinas No. 10)

Landai penentu merupakan suatu kelandaian yang ada pada suatu lintasan kereta api. Besar landai penentu berpengaruh pada kombinasi daya tarik lok dan rangkaian yang beroperasi. Untuk masing-masing kelas jalan rel, besar landai penentu terdapat pada Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2.6 Landai Penentu Maksimum

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

(sumber: Peraturan Dinas No. 10)

2.5.6. Lengkung Vertikal

Lengkung vertikal merupakan proyeksi sumbu jalan rel kereta api pada bidang vertikal yang melalui sumbu jalan rel. Besar jari-jari minum lengkung

vertikal bergantung pada kecepatan rencana yang tercantum pada Tabel 2.7 berikut.

Tabel 2.7 Jari-Jari Minimum Lengkung Vertikal

Kecepatan Rencana	Jari-Jari Minimum Lengkung Vertikal (m)
Lebih dari 100	8000
Sampai 100	6000

(sumber: Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012)

2.5.7. Penampang Melintang

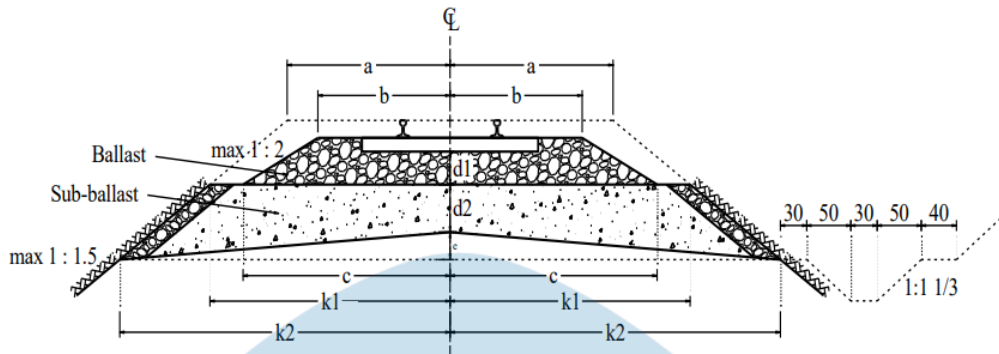
Potongan melintang jalan rel merupakan potongan dengan arah tegak lurus sumbu jalan rel, sehingga terlihat bagian-bagian dan ukuran-ukuran jalan rel dalam arah melintang. Ukuran-ukuran melintang jalan rel terdapat pada Tabel 2.8 berikut ini.

Tabel 2.8 Penampang Melintang Jalan Rel

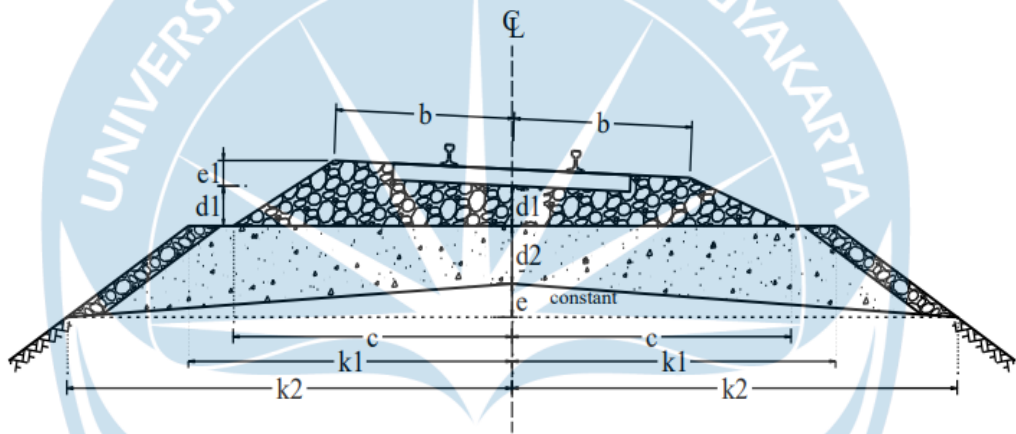
Kelas Jalan Rel	V_{maks} (km/jam)	d_1 (cm)	b (cm)	c (cm)	k_1 (cm)	d_2 (cm)	e (cm)	k_2 (cm)	a (cm)
1	120	30	150	235	265-315	15-50	25	375	185-237
2	110	30	150	254	265-315	15-50	25	375	185-137
3	100	30	140	244	240-270	15-50	22	325	170-200
4	90	25	140	234	240-250	15-35	20	300	170-190
5	80	25	135	211	240-250	15-35	20	300	170-190

(sumber: Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012)

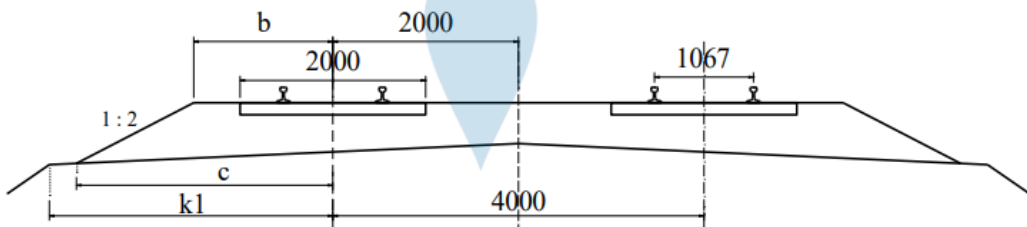
Dengan keterangan seperti pada Gambar-gambar berikut:



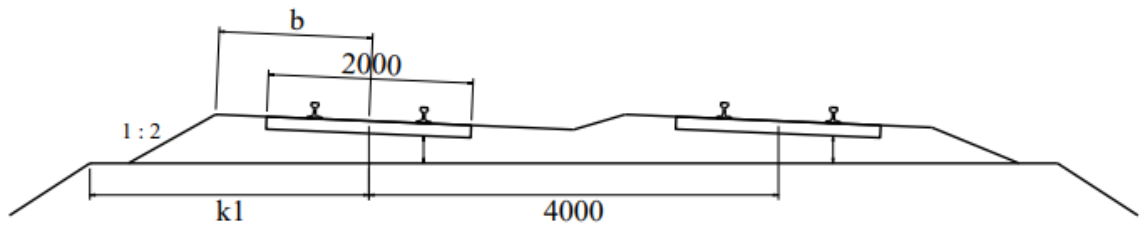
Gambar 2.7 Penampang Melintang Jalan Rel Pada Bagian Lurus – Jalur Tunggal
(sumber: Peraturan Dinas No. 10)



Gambar 2.8 Penampang Melintang Jalan Rel Pada Lengkung – Jalur Tunggal
(sumber: Peraturan Dinas No. 10)



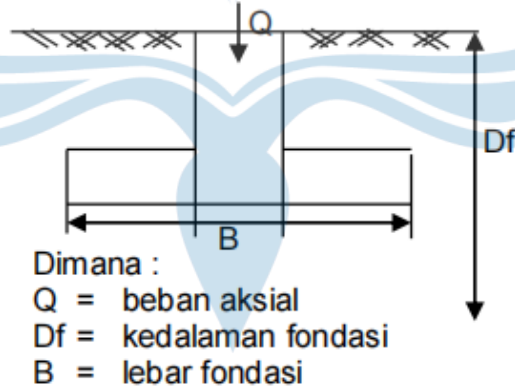
Gambar 2.9 Penampang Melintang Jalan Rel Pada Bagian Lurus – Jalur Ganda
(sumber: Peraturan Dinas No. 10)



Gambar 2.10 Penampang Melintang Jalan Rel Pada Lengkung – Jalur Ganda
(sumber: Peraturan Dinas No. 10)

2.6. Pondasi Dangkal

Menurut Terzaghi 1943 dalam Martini (2009) bahwa fondasi dangkal adalah apabila kedalaman fondasi lebih kecil atau sama dengan lebar fondasi dan anggapan bahwa penyebaran tegangan pada struktur fondasi ke lapisan tanah dibawahnya yang berupa lapisan penyangga lebih kecil atau sama dengan lebar fondasi ke lapisan tanah dibawahnya yang berupa lapisan penyangga lebih kecil atau sama dengan lebar fondasi. Fondasi dangkal dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Fondasi Dangkal

2.7. Analisis Daya Dukung Tanah

Tanah harus mampu menopang dan mempertahankan beban setiap struktur yang direncanakan di atas tanah tanpa keruntuhan geser serta mampu menahan deformasi tekan struktur.

Persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi dalam perancangan fondasi adalah:

(1) Faktor aman terhadap keruntuhan akibat terlampauinya daya dukung harus dipenuhi. Dalam hitungan daya dukung, umumnya digunakan faktor aman 3.

(2) Penurunan fondasi harus masih dalam batas-batas nilai yang ditoleransikan. Khususnya penurunan yang tak seragam (differential settlement) harus tidak mengakibatkan kerusakan pada struktur.

Ada beberapa persamaan-persamaan yang diusulkan oleh para peneliti pendahulu untuk menganalisis kapasitas daya dukung tanah. Daya dukung berdasarkan data uji lapangan dapat menggunakan data SPT atau CPT seperti disarankan oleh Bowles (1997), Hasil perencanaan pondasi berupa tipe, kedalaman, dan dimensi pondasi berdasarkan data nilai SPT dapat dibandingkan dengan hasil yang diperoleh berdasarkan data sifat fisis dan mekanis dari pengujian laboratorium. Perhitungan daya dukung pondasi berdasarkan data laboratorium dapat menggunakan metode Terzaghi (1943) atau metode Meyerhof (1956). Metode perhitungan daya dukung Meyerhof atau Terzaghi mendasarkan pada nilai phi (ϕ) dan kohesi c serta berat volume tanah (γ_s).

2.7.1. Analisis Daya Dukung metode Schmertmann (1978)

Menurut Schmertmann (1978), bahwa nilai q_c (kg/cm^2) dapat dirata-ratakan selama interval kedalaman berada dari sekitar $B/2$ diatas hingga $1,1 B$ dibawah dasar pondasi. Dengan nilai q_c rata-rata tersebut dapat dipergunakan untuk memprediksi daya dukung pondasi dangkal dengan persamaan sebagai berikut:

1. Untuk tanah tanpa kohesi (*noncohesive soil*)

Pondasi Menerus;

$$Q_{ult} = 28 - 0,0052(300 - q_c)^{1,5} \quad (2.10)$$

2. Untuk tanah berkohesi (*cohesive soil*)

Pondasi Menerus;

$$Q_{ult} = 2 - 0,28 \cdot q_c \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (2.11)$$

Dimana:

Qult : Daya dukung ultimit pondasi (kg/cm²)

Qc : Tahanan konus (kg/cm²)

2.7.2. Analisis Daya Dukung metode Meyerhof (1956)

Meyerhof (1956) menyarankan persamaan daya dukung tanah dengan kedalaman yang diperhitungkan dalam hitungan nilai N, adalah sampai Df+B.

Untuk pondasi telapak dengan lebar B > 1,2 meter:

$$q_{all} = 8N_{spt} \left(\frac{B+0,3}{B} \right)^2 \cdot K_d \quad (2.12)$$

Dengan:

$$K_d = 1 + 0,33 \cdot \frac{D}{B} \leq 1,33 \quad (2.13)$$

Dimana:

Qall : Daya dukung ijin tanah (kg/cm²)

Nspt : Nilai rerata

B : Lebar pondasi (m)

Kd : Nilai koreksi

2.7.3. Analisis Daya Dukung Tanah metode Terzaghi

Menurut Terzaghi (1943) dalam Hardiyatmo (1998) bahwa fondasi dangkal ditentukan dari $D_f \leq B$, dengan Df adalah kedalaman fondasi dangkal dan B merupakan lebar fondasi. Perhitungan daya dukung tanah untuk fondasi menerus dapat dilihat pada persamaan berikut:

1. Untuk keruntuhan geser umum

$$Q_{un} = \alpha \cdot c \cdot N_c + q \cdot (N_q - 1) + \beta \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma \quad (2.14)$$

2. Untuk keruntuhan geser lokal

$$Q_{un} = \alpha \cdot c \cdot N_c' + q \cdot (N_q' - 1) + \beta \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma' \quad (2.15)$$

Dengan:

$$C' = 2/3 \cdot c \quad (2.16)$$

Dimana:

Q_{un} : Daya dukung ultimit netto (kN/m^2)

α, β : Faktor bentuk pondasi

c : Kohesi tanah (kN/m^2)

q : Beban tanah (kN/m^2)

B : Lebar pondasi (m)

γ : Berat volume tanah (kN/m^3)

N_c, N_q, N_γ : Faktor daya dukung tanah Terzaghi untuk keruntuhan geser umum

N_c', N_q', N_γ' : Faktor daya dukung tanah Terzaghi untuk keruntuhan geser lokal

Nilai-nilai N_c, N_q, N_γ adalah fungsi dari besarnya sudut gesek dalam (ϕ) yang diberikan Terzaghi. Serta untuk keruntuhan geser lokal digunakan ϕ' yang diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\tan \phi' = 2/3 \cdot \tan \phi \quad (2.17)$$

Melalui sudut gesek yang ada dapat diperoleh faktor daya dukung tanah Terzaghi yang tertera pada Tabel 2.9 berikut.

Tabel 2.9 Nilai-nilai faktor daya dukung Terzaghi

θ°	Keruntuhan Geser Umum			Keruntuhan Geser Lokal		
	N_c	N_q	N_γ	N_c'	N_q'	N_γ'
0	5,7	1	0	5,7	1	0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2

θ°	Keruntuhan Geser Umum			Keruntuhan Geser Lokal		
	Nc	Nq	N γ	Nc'	Nq'	N γ '
10	9,6	2,7	1,2	8	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35	233,7	11,7	9
35	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50	347,6	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1

2.7.4. Analisis Daya Dukung metode Hansen

Hansen (1970) dalam Bowles (1992) menyarankan persamaan daya dukung tanah sebagai berikut:

$$q_{un} = s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot c \cdot N_c + s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot P_o \cdot (N_q - 1) + s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (2.18)$$

Dengan:

$$N_c = (N_q - 1) \operatorname{ctg} \varphi \quad (2.19)$$

$$N_q = e^{(\pi \operatorname{tg} \varphi)} \operatorname{tg}^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2.20)$$

$$N_\gamma = 1,5 (N_q - 1) \operatorname{tg} \varphi \quad (2.21)$$

Dimana:

Qu : daya dukung ultimit

Nc, Nq, N γ : Faktor daya dukung untuk fondasi memanjang

Sc, sq, s γ : faktor bentuk fondasi (Tabel 2.10)

Dc, dq, d γ : faktor kedalaman fondasi (Tabel 2.11)

- i_c, i_q, i_γ : faktor kemiringan beban (Tabel 2.12)
 B : lebar fondasi
 $P_o = D_f \cdot \gamma$: tekanan overburden pada dasar fondasi
 D_f : kedalaman fondasi
 γ : berat volume tanah

Untuk mengetahui faktor-faktor yang disarankan oleh Hansen, dapat dilihat pada Tabel 2.10 hingga Tabel 2.12 dibawah ini.

Tabel 2.10 Faktor bentuk fondasi persamaan Hansen

Faktor bentuk	Nilai	Keterangan
S_c	$1+0,2 (B/L) \text{tg}^2(45+ \phi/2)$	Untuk sembarang ϕ
$S_q = S_\gamma$	$1+0,1 (B/L) \text{tg}^2(45+ \phi/2)$ 1	Untuk $\phi > 10$ Untuk $\phi = 0$

Tabel 2.11 Faktor kedalaman fondasi persamaan Hansen

Faktor kedalaman	Nilai	Keterangan
d_c	$1+0,2 (D_f/L) \text{tg} (45+ \phi/2)$	Untuk sembarang ϕ
$d_q = d_\gamma$	$1+0,1 (B/L) \text{tg} (45+ \phi/2)$ 1	Untuk $\phi > 10$ Untuk $\phi = 0$

Tabel 2.12 Faktor kemiringan beban persamaan Hansen

Faktor kemiringan beban	Nilai	Keterangan
$i_c = i_q$	$(1 + \frac{\partial^\circ}{90^\circ})^2$	Untuk sembarang ϕ
i_γ	$(1 + \frac{\partial^\circ}{\emptyset^\circ})^2$ 1	Untuk $\phi > 10$ Untuk $\phi = 0$

2.8. Penurunan Segera (S_i)

Janbu, Bjerrum, dan Kjaernli (1956) mengusulkan cara penurunan segera rata-rata untuk beban terbagi rata fleksibel berbentuk empat persegi panjang dan lingkaran, dengan E yang bervariasi dan angka Poisson $\mu = 0,5$, adalah sebagai berikut:

$$S_i = \mu_1 \mu_0 \left(\frac{qB}{E} \right) \quad (\text{untuk } \mu = 0,5) \quad (2.22)$$

Dimana :

S_i : Penurunan segera rata-rata (m)

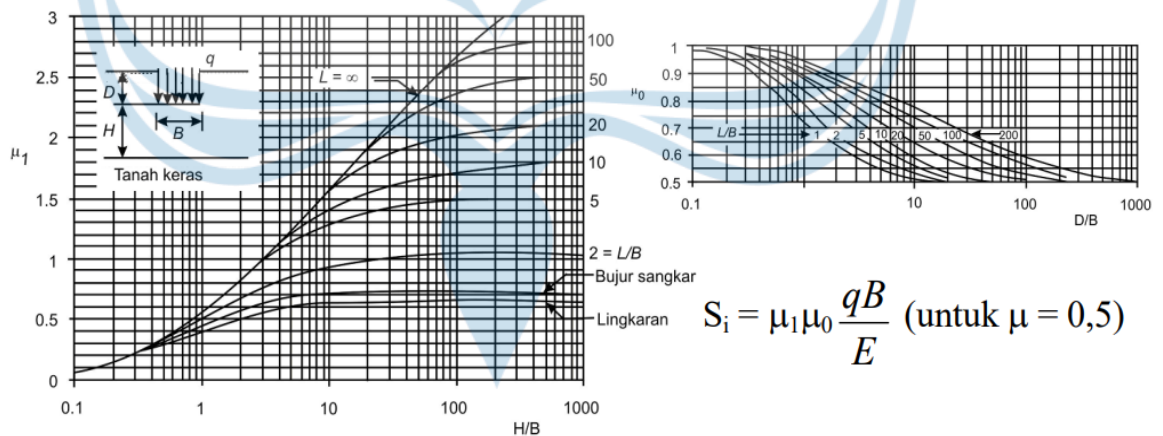
μ_1 : Faktor koreksi untuk lapisan tanah dengan tebal terbatas H (Gambar 2.2)

μ_0 : Faktor koreksi untuk kedalaman fondasi D_f (gambar 2.2)

B : Lebar fondasi empat persegi Panjang atau diameter lingkaran (m)

q : Tekanan fondasi netto (fondasi dipermukaan $q = q_n$) (kN/m^2)

E : Modulus elastis tanah (kN/m^2)



Gambar 2.12 Grafik faktor koreksi

(sumber: Janbu dkk, 1956)

Menurut Bowles (1977) nilai modulus elastis tanah (E) dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis tanah tersebut. Untuk nilai modulus elastis tanah (E) dapat dilihat pada tabel 2.13 berikut.

Tabel 2.13 Perkiraan modulus elastis tanah E

Macam Tanah	E (kg/cm ²)
Lempung:	
Sangat lunak	3-30
Lunak	20-40
Sedang	45-90
Keras	70-200
Berpasir	300-425
Pasir:	
Berlanau	50-200
Tidak padat	100-250
Padat	500-1000
Pasir dan kerikil:	
Padat	800-2000
Tidak padat	500-1400
Lanau	20-200
Loess	150-600
Serpilh	1400-14000

(Sumber: Bowles, 1977)

2.9. Penurunan konsolidasi (S_c)

Penurunan konsolidasi primer dapat dihitung berdasarkan persamaan-persamaan berikut ini (Hardiyatmo, 2007):

- a. Penurunan untuk lempung *normally consolidated* ($p_0' = p_0$) dengan tegangan aktif sebesar p_1' :

$$S_c = c_c \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p_1'}{p_0} \quad (2.23)$$

- b. Penurunan untuk lempung *overconsolidated* ($p_c' > p_0$) penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan yang bergantung nilai

p_1 .

Bila, $p_1' < p_c$

$$S_c = c_r \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p_1'}{p_0} \quad (2.24)$$

Bila, $p_1' > p_c$

$$S_c = c_r \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p_c'}{p_0} + c_c \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p_1'}{p_c'} \quad (2.25)$$

Dengan:

$$P_0 = D_f \cdot \gamma \quad (2.26)$$

$$C_c = 0,3 \cdot (e_0 - 0,27) \quad (2.27)$$

$$\Delta p = 2 \cdot I \cdot q \quad (2.28)$$

$$p_1' : p_0 + \Delta p \quad (2.29)$$

Dimana:

C_r : Indeks pemampatan Kembali

C_c : Indeks pemampatan

H : Tebal lapisan tanah

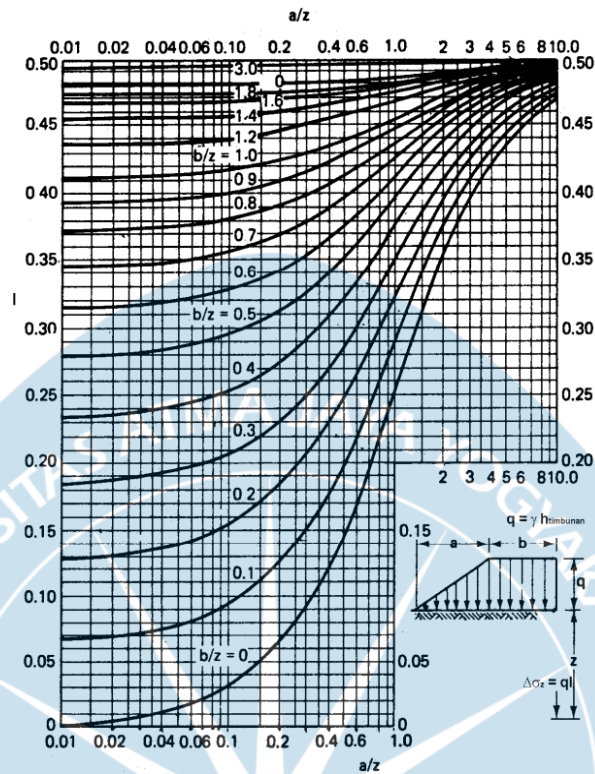
p_c' : Tekanan prakonsolidasi

e_0 : Angka pori awal

p_0 : Tekanan overburden efektif mula-mula sebelum dibebani

S_{c_i} : Penurunan konsolidasi pada lapisan ke-i

Dengan keterangan, nilai c_c berdasarkan korelasi empiris untuk tanah *inorganic silty clay* (Hough, 1957). Untuk perhitungan dibawah muka air tanah digunakan $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$, dan nilai I dapat dilihat dari grafik pada gambar 2.13 dibawah ini:



Gambar 2.13 Grafik Untuk Mencari Nilai I
(sumber: Janbu dkk, 1956)

2.10. Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas dipengaruhi oleh banyak faktor yang mempengaruhi hasil perhitungan. Faktor tersebut antara lain, misalnya kondisi lapisan tanah, kuat geser tanah, infiltrasi air ke dalam tanah, dan lain-lain. Terzaghi (1950) membagi penyebab tanah longsor menjadi dampak internal dan dampak eksternal. Pengaruh eksternal. Secara khusus, efeknya adalah meningkatkan gaya geser tanpa mengubah ketahanan geser tanah. Misalnya, aktivitas manusia telah meningkatkan kemiringan tebing atau memperdalam dan mengikis sungai. Dampak daJam yaitu tanah longsor terjadi tanpa adanya perubahan kondisi eksternal atau gempa bumi. Contoh umum dari kondisi ini adalah efek peningkatan tekanan air pori pada suatu lereng. Adapun faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng antara lain sebagai berikut:

a. Pengaruh Iklim

Dalam permukaan tanah, kekuatan geser tanah berubah seiring waktu bergantung pada iklim. Beberapa jenis tanah mengembang pada musim

hujan dan menyusut pada musim kemarau. Pada musim hujan, kuat geser tanah sangat lemah dibandingkan dengan musim kemarau.

b. Pengaruh Air

Pengaruh aliran atau rembesan air merupakan faktor yang sangat penting dalam kestabilan lereng, namun pengaruh ini sulit ditentukan secara akurat. Telah diteliti bahwa fenomena rembesan air yang terjadi di dalam tanah menimbulkan gaya rembesan yang sangat mempengaruhi kestabilan lereng.

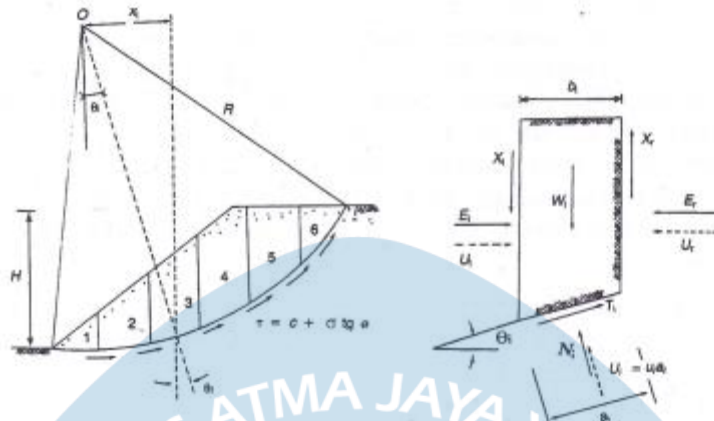
c. Pengaruh Rangkak

Di dekat permukaan tanah yang miring, tanah dipengaruhi siklus kembang-susut. Siklus ini dapat terjadi oleh akibat perubahan temperatur, perubahan dari musim kemarau ke musim hujan, dan di daerah dingin dapat diakibatkan oleh pengaruh pembekuan air.

Angka keamanan lereng dapat diperoleh dengan melakukan *Trial and Error* terhadap beberapa bidang longsor yang umumnya berupa busur lingkaran dan kemudian diambil nilai F minimum sebagai indikasi bidang longsor kritis. Analisis stabilitas lereng dapat dilihat pada Gambar 2.14 berikut.

2.10.1. Metode Irisan (*Method of Slice*)

Metode irisan digunakan apabila tanah tidak homogen dan aliran rembesan terjadi didalam tanah tidak menentu. Dengan metode irisan, tanah yang akan longsor dipecah menjadi beberapa irisan vertical, kemudian diseimbangkan tiap irisannya. Metode irisan dapat dilihat pada Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Gaya-gaya yang bekerja pada irisan
(sumber: Hardiyatmo, 2010)

Dimana:

- X_1, X_r : Gaya geser efektif disepanjang sisi irisan
- E_1, E_r : Gaya normal efektif sepanjang sisi irisan
- T_i : resultan gaya geser efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan
- N_i : resultan gaya normal efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan
- U_1, U_r : tekanan air pori yang bekerja dikedua sisi irisan
- U_i : tekanan air pori didasar irisan

2.10.2. Metode Bishop

Metode Bishop disederhanakan (Bishop, 1955) menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal. Persamaan metode Bishop disederhanakan adalah sebagai berikut.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + (W_i - u_i b_i)] \tan \theta \left(\frac{1}{\cos \theta \left(1 + \frac{\tan \theta \tan \phi}{F} \right)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (2.30)$$

Dimana:

- F : faktor aman
- c' : kohesi tanah efektif (kN/m²)
- ϕ : sudut gesek dalam tanah efektif (derajat)

- b_i : lebar irisan ke-i (m)
- W_i : berat irisan tanah ke-i (kN)
- θ_i : sudut yang didefinisikan dalam Gambar 2.4 (derajat)
- u_i : tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m²)

2.10.3. Metode Janbu

Metode Janbu mengasumsikan bidang keruntuhan berbentuk busur dengan menggunakan gaya-gaya yang bekerja secara vertikal dan horisontal. Persamaan metode Janbu dapat dilihat sebagai berikut.

$$FS = \frac{\sum(c.b + (w-ub)\tan\phi \frac{\sec a^2}{1 + \tan a \tan \phi/F}}{\sum W \tan a} \quad (2.31)$$

Dimana:

- FS : faktor keamanan
- c' : kohesi (jika Analisa dalam kondisi *undrained* diambil nilai C_u , jika dalam kondisi *drained* diambil nilai kohesi efektif)
- b_i : panjang horizontal bidang irisan ke-i
- W_i : gaya akibat beban tanah ke-i
- α : sudut antara titik Tengah bidang irisan dengan titik pusat busur bidang longsor
- ϕ' : sudut geser tanah (jika dalam kondisi *undrained* nilai sudut geser 0)
- u : tekanan air pori

Pada metode Janbu, nilai faktor keamanan yang didapat dari persamaan diatas harus dikalikan lagi dengan faktor koreksi

$$F = f_0 \times FS \quad (2.32)$$

Dengan:

$$f_0 = 1 + b1 \left[\frac{d}{L} - 1.4 \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right] \quad (2.33)$$

Dimana:

- F : Faktor keamanan setelah dikoreksi
- FS : Faktor keamanan dari hasil kalkulasi awal
- F_0 : Faktor koreksi

2.11. Distribusi Curah Hujan

Data curah hujan yang diperlukan untuk perancangan jalan rel Rembang-Lasem adalah data curah hujan harian dalam 10 tahun periode 2010-2019 yang diambil dari titik pengamatan Stasiun Meteorologi Maritim Emas dan Jawa Tengah.

2.12. Analisa Frekuensi

Analisa frekuensi digunakan untuk menghitung debit banjir rencana, terdapat parameter penting dalam Analisa frekuensi meliputi rerata, deviasi standar, koefisien varian, koefisien kemencengan, dan koefisien kurtosis. Menurut Triatmodjo (2008), tidak semua variat dari variabel hidrologi sama dengan nilai reratanya, tetapi ada yang lebih besar atau lebih kecil. Besarnya derajat sebaran variat di sekitar nilai reratanya disebut varian (variance) atau penyebaran dispersi (dispersion). Penyebaran data dapat diukur dengan deviasi standar (*standard deviation*) dan varian.

1. Nilai rerata

$$X_{rt} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.34)$$

Dimana : X_{rt} : rerata
 x_i : curah hujan harian
 n : jumlah data

2. Standar deviasi

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{rt})^2}{n-1}} \quad (2.35)$$

Dimana : S_d : Standar deviasi
 x_i : curah hujan harian
 X_{rt} : rerata curah hujan harian
 n : jumlah data

3. Koefisien varian

$$Cv = \frac{Sd}{\bar{Xrt}} \quad (2.36)$$

4. Koefisien kemencengan

$$Cs = \frac{n \sum_{i=1}^n (Xi - \bar{Xrt})^3}{(n-1)(n-2)Sd^3} \quad (2.37)$$

5. Koefisien kurtosis

$$Ck = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Xi - \bar{Xrt})^4}{Sd^4} \quad (2.38)$$

2.13. Distribusi Probabilitas

Masing-masing sebaran memiliki sifat-sifat khas sehingga setiap data hidrologi harus diuji kesesuaiannya dengan sifat statistik masing-masing sebaran tersebut. Cara yang digunakan dalam penentuan jenis sebaran untuk analisis frekuensi dalam penelitian ini adalah dengan menentukan parameter yang sesuai dengan syarat yang telah ditentukan dari distribusi normal, log normal, gumbel, dan log pearson III. Syarat penentuan distribusi dapat dilihat pada Tabel 2.14 dibawah ini:

Tabel 2.14 Syarat Penentuan Distribusi

Distribusi	Syarat
Normal	$C_s \approx 0$ $C_k \approx 3$
Log Normal	$C_s \approx 3$ $C_s \approx 3C_v$
Gumbel	$C_s = 1,1396$ $C_k = 5,4002$
Log Pearson III	$C_s \neq 0$

(sumber: SNI 2415 Tahun 2016)

2.14. Distribusi Log Pearson III

Perhitungan hujan kala ulang metode distribusi log pearson III menggunakan nilai logaritma dan dipengaruhi oleh nilai k yang dapat dilihat pada Tabel 2.15 dibawah.

Tabel 2.15 Nilai K untuk Distribusi Log Pearson III

Cs	Probabilitas Terjadi (%)												
	99.00	95.00	90.00	80	50	20	10	4	2	1	0.5	0.2	0.1
	Kala ulang												
	1.01	1.05	1.11	1.25	2.00	5.00	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1000.00
-3.0	-4.05	-2.00	-1.18	-0.42	0.40	0.64	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
-2.9	-4.01	-2.01	-1.20	-0.44	0.39	0.65	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
-2.8	-3.97	-2.01	-1.21	-0.46	0.38	0.67	0.70	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.72
-2.7	-3.93	-2.01	-1.22	-0.48	0.38	0.68	0.72	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
-2.6	-3.89	-2.01	-1.24	-0.50	0.37	0.70	0.75	0.76	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
-2.5	-3.85	-2.01	-1.25	-0.52	0.36	0.71	0.77	0.79	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
-2.4	-3.80	-2.01	-1.26	-0.54	0.35	0.73	0.80	0.82	0.83	0.83	0.83	0.83	0.84
-2.3	-3.75	-2.01	-1.27	-0.56	0.34	0.74	0.82	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87
-2.2	-3.71	-2.01	-1.28	-0.57	0.33	0.75	0.84	0.89	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91
-2.1	-3.66	-2.00	-1.29	-0.59	0.32	0.77	0.87	0.92	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95
-2.0	-3.61	-2.00	-1.30	-0.61	0.31	0.78	0.90	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00
-1.9	-3.55	-1.99	-1.31	-0.62	0.29	0.79	0.92	1.00	1.02	1.04	1.04	1.05	1.06

Cs	Probabilitas Terjadi (%)												
	99.00	95.00	90.00	80	50	20	10	4	2	1	0.5	0.2	0.1
	Kala ulang												
	1.01	1.05	1.11	1.25	2.00	5.00	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1000.00
-1.8	-3.50	-1.98	-1.32	-0.64	0.28	0.80	0.95	1.04	1.07	1.09	1.10	1.11	1.13
-1.7	-3.44	-1.97	-1.32	-0.66	0.27	0.81	0.97	1.08	1.12	1.14	1.16	1.17	1.20
-1.6	-3.39	-1.96	-1.33	-0.68	0.25	0.82	0.99	1.12	1.17	1.20	1.22	1.24	1.28
-1.5	-3.33	-1.95	-1.33	-0.69	0.24	0.83	1.02	1.16	1.22	1.26	1.28	1.32	1.37
-1.4	-3.27	-1.94	-1.34	-0.71	0.23	0.83	1.04	1.20	1.27	1.32	1.35	1.39	1.47
-1.3	-3.21	-1.93	-1.34	-0.72	0.21	0.84	1.06	1.24	1.32	1.38	1.42	1.47	1.54
-1.2	-3.15	-1.91	-1.34	-0.73	0.20	0.84	1.09	1.28	1.38	1.45	1.50	1.55	1.63
-1.1	-3.09	-1.89	-1.34	-0.75	0.18	0.85	1.11	1.32	1.44	1.52	1.58	1.63	1.71
-1.0	-3.02	-1.88	-1.34	-0.76	0.16	0.85	1.13	1.37	1.49	1.59	1.66	1.72	1.80
-0.9	-2.96	-1.86	-1.34	-0.77	0.15	0.85	1.15	1.41	1.55	1.66	1.75	1.81	1.91
-0.8	-2.89	-1.84	-1.34	-0.78	0.13	0.86	1.17	1.45	1.61	1.73	1.84	1.91	2.04
-0.7	-2.82	-1.82	-1.33	-0.79	0.12	0.86	1.18	1.45	1.66	1.81	1.93	2.01	2.15
-0.6	-2.76	-1.80	-1.33	-0.80	0.10	0.86	1.20	1.53	1.72	1.88	2.02	2.11	2.28
-0.5	-2.69	-1.74	-1.32	-0.81	0.08	0.86	1.22	1.57	1.78	1.96	2.11	2.22	2.40
-0.4	-2.62	-1.75	-1.32	-0.82	0.07	0.86	1.23	1.61	1.83	2.03	2.20	2.33	2.54
-0.3	-2.54	-1.73	-1.31	-0.82	0.05	0.85	1.25	1.64	1.89	2.10	2.29	2.44	2.68
-0.2	-2.47	-1.70	-1.30	-0.83	0.03	0.85	1.26	1.68	1.95	2.18	2.39	2.55	2.81
-0.1	-2.40	-1.67	-1.29	-0.84	0.02	0.85	1.27	1.72	2.00	2.25	2.48	3.03	3.95
0.0	-2.33	-1.65	-1.28	-0.84	0.00	0.84	1.28	1.75	2.05	2.33	2.58	2.77	3.09
0.1	-2.25	-1.62	-1.27	-0.85	-0.02	0.84	1.29	1.79	2.11	2.40	2.67	2.88	3.24
0.2	-2.18	-1.59	-1.26	-0.85	-0.03	0.83	1.30	1.82	2.16	2.47	2.76	3.62	3.38
0.3	-2.10	-1.56	-1.25	-0.85	-0.05	0.82	1.31	1.85	2.21	2.54	2.86	3.11	3.53
0.4	-2.03	-1.52	-1.23	-0.86	-0.07	0.82	1.32	1.88	2.26	2.52	2.95	3.22	3.67
0.5	-1.96	-1.49	-1.22	-0.86	-0.08	0.81	1.32	1.91	2.31	2.69	3.04	3.33	3.82
0.6	-1.88	-1.46	-1.20	-0.86	-0.10	0.80	1.33	1.94	2.36	2.76	3.13	3.44	3.96
0.7	-1.81	-1.42	-1.18	-0.86	-0.12	0.79	1.33	1.97	2.41	2.82	3.23	3.56	4.11
0.8	-1.73	-1.39	-1.17	-0.86	-0.13	0.78	1.34	1.99	2.45	2.89	3.31	3.66	4.25
0.9	-1.66	-1.35	-1.15	-0.85	-0.15	0.77	1.34	2.02	2.50	2.96	3.40	3.77	4.40
1.0	-1.59	-1.32	-1.13	-0.85	-0.16	0.76	1.34	2.04	2.54	3.02	3.49	3.88	4.54
1.1	-1.52	-1.28	-1.11	-0.85	-0.18	0.75	1.34	2.07	2.59	3.09	3.58	3.99	4.68
1.2	-1.45	-1.24	-1.09	-0.84	-0.20	0.73	1.34	2.09	2.63	3.15	3.66	4.10	4.82
1.3	-1.38	-1.21	-1.06	-0.84	-0.21	0.72	1.34	2.11	2.67	3.21	3.75	4.20	4.97
1.4	-1.32	-1.17	-1.04	-0.83	-0.23	0.71	1.34	2.13	2.71	3.27	3.83	4.31	5.11
1.5	-1.26	-1.13	-1.02	-0.83	-0.24	0.69	1.33	2.15	2.74	3.33	3.91	4.41	5.25
1.6	-1.20	-1.09	-0.99	-0.82	-0.25	0.68	1.33	2.16	2.78	3.39	3.99	4.52	5.39

Cs	Probabilitas Terjadi (%)												
	99.00	95.00	90.00	80	50	20	10	4	2	1	0.5	0.2	0.1
	Kala ulang												
	1.01	1.05	1.11	1.25	2.00	5.00	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1000.00
1.7	-1.14	-1.06	-0.97	-0.81	-0.27	0.66	1.32	2.18	2.82	3.44	4.07	4.62	5.53
1.8	-1.09	-1.02	-0.95	-0.80	-0.28	0.64	1.32	2.19	2.85	3.50	4.15	4.71	5.66
1.9	-1.04	-0.98	-0.92	-0.79	-0.29	0.63	1.31	2.21	2.88	3.55	4.22	4.79	5.74
2.0	-0.99	-0.95	-0.90	-0.78	-0.31	0.61	1.30	2.22	2.91	3.61	4.40	4.97	5.91
2.1	-0.95	-0.91	-0.87	-0.77	-0.32	0.59	1.29	2.23	2.94	3.66	4.37	4.89	5.75
2.2	-0.91	-0.88	-0.84	-0.75	-0.33	0.57	1.28	2.24	2.97	3.71	4.44	5.10	6.20
2.3	-0.87	-0.85	-0.82	-0.74	-0.34	0.56	1.27	2.25	3.00	3.75	4.52	5.20	6.34
2.4	-0.83	-0.82	-0.80	-0.73	-0.35	0.54	1.26	2.26	3.02	3.80	4.58	5.29	6.47
2.5	-0.80	-0.79	-0.77	-0.71	-0.36	0.52	1.25	2.26	3.05	3.85	4.65	5.38	6.60
2.6	-0.77	-0.76	-0.75	-0.70	-0.37	0.50	1.24	2.27	3.07	3.89	4.72	5.47	6.74
2.7	-0.74	-0.74	-0.72	-0.68	-0.38	0.48	1.22	2.27	3.09	3.93	4.78	5.56	6.87
2.8	-0.71	-0.71	-0.70	-0.67	-0.38	0.46	1.21	2.28	3.11	3.97	4.85	5.65	7.00
2.9	-0.69	-0.69	-0.68	-0.65	-0.39	0.44	1.20	2.28	3.13	4.01	4.91	5.74	7.13
3.0	-0.67	-0.67	-0.66	-0.64	-0.40	0.42	1.18	2.28	3.15	4.02	4.97	5.83	7.25
	1.01	1.05	1.11	1.25	2.00	5.00	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1000.00

(Sumber: Bambang, 2008)

Prosedur perhitungan hujan kala ulang dengan menggunakan metode distribusi Log Pearson III adalah sebagai berikut.

1. Memilih puncak-puncak banjir setiap tahun selama 10 tahun atau lebih.
2. Mengubah nilai puncak-puncak banjir menjadi nilai logaritma.
3. Menghitung parameter statistik, yaitu standar deviasi (Sd) dan koefisien kemencengan (Cs) yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

Standar Deviasi

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log Xi - \log Xrt)^2}{n-1}} \quad (2.39)$$

Koefisien kemencengan/Skewness

$$Cs = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log Xi - \log Xrt)^3}{(n-1)(n-2)Sd^3} \quad (2.40)$$

4. Menentukan nilai K (berdasarkan Tabel 2.15)

5. Menghitung hujan periode ulang dengan Metode Distribusi Log Pearson III dengan rumus:

$$X_t = 10^{\log x + KS} \quad (2.41)$$

2.15. Uji Kecocokan Distribusi

Uji kecocokan distribusi dilakukan untuk menguji kecocokan dari distribusi frekuensi sampel data terhadap fungsi distribusi peluang yang diperkirakan dapat menggambarkan distribusi frekuensi tersebut. Metode yang dipakai dalam uji kecocokan distribusi adalah metode Chi-Kuadrat dan Smirnov-Kolmogorov.

2.15.1. Uji Chi-Kuadrat

Uji Chi-Kuadrat dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi yang akan dipilih dapat mewakili distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Xh^2 = \sum_{i=1}^G \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2.42)$$

Dimana:

Xh^2 = parameter chi-kuadrat terhitung

O_i = jumlah nilai pengamatan pada sub kelompok ke-i

E_i = jumlah nilai teoritis pada sub kelompok ke-i

Untuk suatu nilai nyata tertentu (*level of significant*) yang sering diambil adalah 5%. Analisis dapat diterima jika nilai chi kuadrat terhitung < chi kuadrat kritis. Nilai chi kuadrat kritis dapat dilihat pada tabel 2.16 berikut.

Tabel 2.16 Nilai kritis Chi Kuadrat

Dk	Derajat Kepercayaan							
	0,995	0,99	0,975	0,95	0,05	0,025	0,01	0,005
1	0.0000393	0.000157	0.000982	0.00393	3.841	5.024	6.635	7.879
2	0.100	0.0201	0.0506	0.103	5.991	7.378	9.210	10.597
3	0.0717	0.115	0.216	0.352	7.815	9.348	11.345	12.838

Dk	Derajat Kepercayaan							
	0,995	0,99	0,975	0,95	0,05	0,025	0,01	0,005
4	0.207	0.297	0.484	0.711	9.488	11.143	13.277	14.860
5	0.412	0.554	0.831	1.145	11.070	12.832	15.086	16.750
6	0.676	0.872	1.237	1.635	12.592	14.449	16.812	18.548
8	0.989	1.239	1.69	2.167	14.067	16.013	18.475	20.278
9	1.344	1.646	2.18	2.733	15.507	17.535	20.09	21.955
10	1.735	2.088	2.7	3.325	16.919	19.023	21.666	23.589
11	2.156	2.558	3.247	3.940	18.307	20.483	23.209	25.188
12	2.603	3.053	3.816	4.575	19.675	214.92	24.725	26.757
13	3.074	3.571	4.404	5.226	21.026	23.337	26.217	28.300
14	3.565	4.107	5.009	5.892	22.362	24.736	27.688	29.819
15	4.075	4.660	5.629	6.571	23.685	26.119	29.141	31.319
16	5.142	5.812	6.908	7.962	26.296	28.845	32.000	34.267
17	5.697	6.408	7.564	8.672	27.587	30.191	33.409	35.718
18	6.265	7.015	8.231	9.390	28.869	31.526	34.805	37.156
19	6.844	7.633	8.907	10.117	30.144	32.852	36.191	38.582
20	7.434	8.260	9.591	10.851	31.410	34.17	37.566	39.997
21	8.034	8.897	10.283	11.591	32.671	35.479	38.932	41.401
22	8.643	9.542	10.982	12.338	33.924	36.781	40.289	42.796
23	9.260	10.196	11.689	13.091	36.172	38.076	41.638	44.181
24	9.886	10.856	12.401	13.848	36.415	39.364	42.980	45.558
25	10.52	11.524	13.120	14.611	37.652	40.646	44.314	46.928
26	11.16	12.198	13.844	15.379	38.885	41.923	45.642	48.290
27	11.808	12.879	14.573	16.151	40.113	43.194	46.963	49.645
28	12.461	13.565	15.308	16.928	41.337	44.461	48.278	50.993
29	13.121	14.256	16.047	17.708	42.557	45.722	49.588	52.336
30	13.787	14.953	16.791	18.493	43.773	46.979	50.892	53.672

(Sumber: Soemarto, 1999)

2.15.2. Uji Smirnov-Kolmogorov

Uji kecocokan Smirnov-Kolmogorov sering disebut juga uji kecocokan non parametrik, karena pengujiannya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu.

Prosedur pelaksanaannya adalah sebagai berikut :

1. Urutkan data (dari besar ke kecil atau sebaliknya) dan tentukan besarnya peluang dari masing-masing data tersebut.

$$X_1 = p(x_1);$$

$$X_2 = p(x_2);$$

$$X_3 = p(x_3), \text{ dan seterusnya.}$$

2. Urutkan nilai masing-masing peluang teoritis dari hasil penggambaran data (persamaan distribusinya).

$$X_1 = p'(x_1);$$

$$X_2 = p'(x_2);$$

$$X_3 = p'(x_3) \text{ dan seterusnya.}$$

3. Dari kedua nilai peluang tersebut, tentukan selisih tersebarnya antar peluang pengamatan dengan peluang teoritis.

$$D = \text{maksimum} (P(X_n) - P'(X_n)) \quad (2.43)$$

4. Berdasarkan Tabel 2.17 terkait nilai kritis (smirnov-kolmogorov test) digunakan untuk menentukan harga D_0 .

Tabel 2.17 Nilai kritis D_0

N	A (derajat kepercayaan)			
	20%	10%	5%	1%
5	0.45	0.51	0.56	0.67
10	0.32	0.37	0.41	0.49
15	0.27	0.3	0.34	0.4
20	0.23	0.26	0.29	0.36
25	0.21	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.2	0.23	0.27

N	A (derajat kepercayaan)			
	20%	10%	5%	1%
40	0.17	0.19	0.21	0.25
45	0.16	0.18	0.2	0.24
50	0.15	0.17	0.19	0.23
>50	Menggunakan persamaan			

(Sumber: Soewarno, 1995)

2.16. Koefisien Limpasan

Koefisien limpasan diperkirakan berdasarkan tata guna lahan dapat dilihat pada Tabel 2.18 berikut.

Tabel 2.18 Nilai Koefisien Limpasan

Jenis daerah	Koefisien aliran	Kondisi Permukaan	Koefisien Aliran
Daerah Perdagangan		Jalan Aspal	
Kota	0,70 – 0,95	Aspal dan beton	0,75 – 0,95
Sekitar kota	0,50 – 0,70	Batu bata dan batako	0,70 – 0,85
Daerah Pemukiman		Atap Rumah	0,70 – 0,95
Satu rumah	0,30 – 0,50	Halaman berumput, tanah pasir	
Banyak Rumah, terpisah	0,40 – 0,60	Datar, 2%	0,05 – 0,10
Banyak Rumah, rapat	0,60 – 0,75	Rata-rata, 2-7%	0,10 – 0,15
Permukiman, pinggiran Kota	0,25 – 0,40	Curam, 7% atau lebih	0,15 – 0,20
Apartemen	0,50 – 0,70		
Daerah Industri		Halaman berumput, tanah pasir padat	
Ringan	0,50 – 0,80	Datar, 2%	0,13 – 0,17
Padat	0,60 – 0,90	Rata-rata, 2-7%	0,18 – 0,22
Lapangan, kuburan, dan sejenisnya	0,10 -0,25	Curam, 7% atau lebih	0,25 – 0,35

Jenis daerah	Koefisien aliran	Kondisi Permukaan	Koefisien Aliran
Halaman, jalan kereta api, dan sejenisnya	0,20 – 0,35		
Lahan tidak terpelihara	0,10 – 0,30		

(Sumber: SNI 2415, 2016)

Untuk daerah yang memiliki tata guna lahan berbeda-beda dapat digunakan persamaan (C) gabungan yang dapat dilihat sebagai berikut.

$$C = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + C_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + A_n} \quad (2.44)$$

Dimana:

C = Koefisien limpasan gabungan

C₁, C₂, C_n = Koefisien limpasan sesuai kondisi permukaan yang ada

A₁, A₂, A_n = Luas daerah yang diperhitungkan sesuai kondisi permukaan

2.17. Intensitas Hujan

Perhitungan intensitas hujan digunakan untuk mencari debit banjir rencana. Dalam perhitungan ini digunakan persamaan sebagai berikut.

$$I = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{2/3} \quad (2.45)$$

Dimana:

I = Intensitas hujan (mm/jam)

t = Lamanya waktu hujan (jam)

R₂₄ = Curah hujan maksimum dalam 24 jam (mm)

2.18. Debit Banjir Rencana

Perhitungan debit banjir rencana digunakan untuk mencari dimensi saluran menggunakan metode rasional dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q = 0,278 \times C \times I \times A \quad (2.46)$$

Dimana:

Q = Debit banjir rencana (m³/detik)

I = Intensitas hujan (mm/jam)

A = Luas daerah aliran (km³)

2.19. Dimensi Saluran Terbuka

Dalam dimensi saluran terbuka didasari oleh Pd. T-02-2006-B Perencanaan Sistem Drainase Jalan sehingga digunakan persamaan perhitungan komponen penampang saluran segi empat sebagai berikut.

1. Luas (F)

$$F = b \times h \quad (2.47)$$

2. Keliling (P)

$$P = b + 2 \times h \quad (2.48)$$

3. Jari-jari Hidrolis (R)

$$R = \frac{b \times h}{b + 2 \times h} \quad (2.49)$$

4. Kecepatan Rencana (V_{rencana})

$$V_{rencana} = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times i^{1/2} \quad (2.50)$$

5. Debit Saluran (Q_{saluran})

$$Q_s = F \times V_{rencana} \quad (2.51)$$

Keterangan :

b = Lebar atas (m)

h = Tinggi muka air (m)

i = Kemiringan saluran (%)

n = Angka kekasaran, digunakan nilai 0,016 yang merupakan saluran beton buatan dengan kualitas yang baik.

2.20. Drainase Saluran Bawah Tanah

Saluran bawah tanah memiliki fungsi untuk menjaga air pada tanah agar tidak naik ke permukaan. Perhitungan dimensi saluran bawah tanah menggunakan persamaan Hooghoudt dengan cara *trial and error*. Adapun persamaan Hooghoudt adalah sebagai berikut.

$$S^2 = \frac{4k_a h^2}{q} + \frac{8k_b d_e h}{q} \quad (2.52)$$

$$d_e = \frac{\pi S}{8 \ln \left(\frac{S}{\pi r_0} \right)} \quad (2.53)$$

Dimana:

S = Jarak antar pipa (m)

q = Laju infiltrasi (m/hari)

k_a = Konduktifitas hidrolik tanah atas (m/hari)

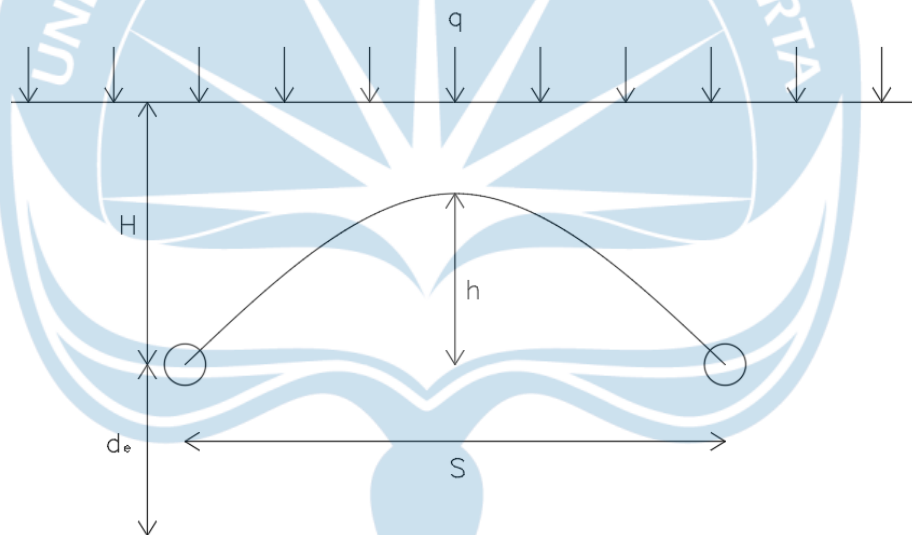
k_b = Konduktifitas hidrolik tanah bawah (m/hari)

h = Tinggi air tanah dari pipa (m)

d_e = Kedalaman ekivalen (m)

r_0 = Jari-jari pipa (m)

Adapun parameter saluran bawah tanah dapat dilihat pada Gambar 2.15 sebagai berikut.



Gambar 2.15 Saluran Drainase Bawah Tanah

2.20.1. Konduktivitas Hidrolik

Konduktivitas hidrolik merupakan besaran kemampuan media berpori dalam mengalirkan air yang melewatinya persatuan waktu. Adapun konduktivitas hidrolik berdasarkan jenis tanahnya dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 2.19 Konduktivitas Hidrolik Berdasarkan Jenis Tanah

Material	Konduktivitas Hidrolik (cm/detik)
Lempung	$10^{-9} - 10^{-6}$
Lanau, lanau pasiran, pasir lempung, <i>till</i>	$10^{-6} - 10^{-4}$
Pasir lanauan, pasir halus	$10^{-5} - 10^{-3}$
Pasir terpilah baik, <i>glacial outwash</i>	$10^{-3} - 10^{-1}$
Kerikil terpilih baik	$10^{-2} - 10^0$

(Sumber: Fetter, 2001)

2.20.2. Laju Infiltrasi

Laju infiltrasi merupakan banyaknya air yang masuk ke dalam tanah persatuan waktu. Menurut Bachtiar, Harisuseno, & Fidari (2022) dalam jurnal berjudul Prediksi Laju Infiltrasi Berdasarkan Sifat Porositas Tanah, Distribusi Butiran Pasir, dan Lanau diperoleh persamaan untuk mencari laju infiltrasi tanah dengan persamaan sebagai berikut.

$$Y = -13,734 + 1,884X_1 + 0,586X_2 + 1,776X_3 \quad (2.53)$$

Dimana:

Y = Laju Infiltrasi (mm/menit)

X_1 = Distribusi butiran pasir (%)

X_2 = Distribusi butiran lanau (%)

X_3 = Porositas (%)