

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Provinsi Jawa Tengah merupakan salah satu provinsi yang bergerak aktif dalam sektor ekonomi. Salah satu kota di Provinsi Jawa Tengah yang memiliki peran aktif itu adalah Kudus dan Pati. Pergerakan industri ekonomi di kota Kudus sangat berpotensi berkembang lebih besar lagi. Kudus merupakan kota penghasil rokok terbesar di Jawa Tengah, sampai saat ini industri rokok di kota Kudus terus berkembang baik skala besar, menengah, maupun kecil. Tercatat dari data BPS pita cukai rokok yang dihasilkan oleh Kabupaten Kudus tercatat 24,06 triliun rupiah pada tahun 2014. Kota Kudus juga merupakan daerah industri yang didominasi pada sektor industri pengolahan, di mana berfokus pada pemrosesan dari bahan baku menjadi bahan jadi. Bukan hanya kota Kudus, kota Pati juga merupakan kota yang tidak kalah pentingnya berperan dalam sektor ekonomi di Jawa Tengah. Pati merupakan kota yang memiliki potensi yang besar dalam sektor Industri dan pangan, salah satu contohnya kota pati adalah penghasil buah manggis terbesar ke dua di Jawa Tengah. Sektor industri yang berkembang di kota Pati adalah industri tekstil, industri makanan, industri kerajinan, dan industri kehutanan. Dilansir dari situs resmi pemerintah Kabupaten Pati, sektor industri kota Pati sangat berpotensi besar dikembangkan yakni industri gula, industri garam, dan industri tepung tapioka. Selain sektor industri sektor pangan kota Pati juga memiliki potensi besar, yakni sentral padi dan kacang, perkebunan kopi, usaha susu sapi dan buah. Selain hal tersebut kota Pati juga memiliki sektor wisata yang tak kalah saing terutama pada wisata alamnya.

Dari potensi dan keunggulan ekonomi yang ada pada kedua kota tersebut tentu sungguh sangat disayangkan jika pendistribusiannya terhambat, oleh karena itu dibutuhkan moda transportasi yang efisien dalam menunjang pendistribusian yang ada di kota Kudus dan kota Pati.

Pemerintah daerah sudah seharusnya menyediakan sarana dan prasarana khususnya pada sektor transportasi. Menurut Mithani (199:1), salah satu yang memberi konstibusi yang sangat penting bagi pertumbuhan ekonomi dan

pembangunan adalah transportasi. Kontribusi tersebut dapat diwujudkan jika ada sistem transportasi yang memadai dan efisien untuk pergerakan manusia dan barang. Keuntungan dari perluasan sistem transportasi adalah sebagai penghubung kawasan kegiatan yang terpaut dengan jarak yang jauh, mempertinggi mobilitas faktor-faktor produksi, menentukan bentuk kota, serta mendorong distribusi kegiatan ekonomi. Maksud dari pembangunan sektor transportasi adalah untuk menggerakkan berbagai potensi daerah. Dengan demikian, pertumbuhan pada kawasan-kawasan di perkotaan dapat didukung dengan adanya pembangunan sarana dan prasarana transportasi.

Dengan keberadaan moda transportasi dari kota Kudus ke kota Pati menjadi sangat penting. Hal tersebut dikarenakan sektor transportasi merupakan sektor yang memasok dukungan terhadap hampir semua sektor lainnya, terutama pada kegiatan ekonomi masyarakat. Ditambah lagi pada era sekarang ini, pembangunan dituntut untuk ramah lingkungan maka dari itu sektor transportasi juga diarahkan pada moda-moda yang ramah lingkungan. Selain ramah lingkungan, efisiensi yang tinggi juga menjadi pertimbangan dalam memilih moda transportasi. Dengan pertimbangan yang ada, kereta api dapat menjadi alternatif pilihan untuk moda transportasi berbasis ramah lingkungan. Kereta api merupakan salah satu opsi moda transportasi yang tidak kalah saing dari transportasi lain, tidak bisa dipungkiri bahwa kereta api bagi sebagian masyarakat merupakan pilihan utama. Kereta api memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri, misalnya dalam segi kapasitas, kecepatan, keamanan, peneghematan energi, ramah terhadap lingkungan serta keperluan lahan yang relatif sedikit.

Pembangunan jalur kereta api pada kota Kudus ke kota Pati diharapkan dapat menunjang mobilitas bagi masyarakat. Selain itu, pembangunan kereta api dari kota Kudus ke kota Pati juga bertujuan untuk mengolah arus distribusi keluar masuk barang. Pendistribusian barang keluar dan masuk yang berjalan dengan baik tentunya dapat meningkatkan ekonomi pada kota Kudus dan kota Pati, terutama pada kota Kudus yang berfokus di sektor industri pengolahan. Dengan adanya moda transportasi kereta api, distribusi bahan baku diharapkan dapat lancar karena akses arus masuk barang ke kota Kudus semakain cepat serta dengan kapasitas yang lebih banyak. Selain itu, dengan adanya pembangunan jalur kereta api dapat menjadikan

pasar yang besar bagi kota Kudus dan kota Pati, aksesibilitas yang semakin lancar akan membuat potensi yang ada dalam daerah Kudus dan Pati dapat dipasarkan dengan baik sehingga dapat meningkatkan perekonomian kota. Mobilitas massa dan barang yang terbilang besar pada kota Kudus dan kota Pati menjadi landasan bahwa kebutuhan kereta api tidak dapat dihindari. Didukung dengan adanya Undang-Undang Nomer 23 Tahun 2017 tentang Perkeretaapian telah mendorong peran pemerintah daerah dalam penyelenggaraan transportasi perkeretaapian di daerah. Dengan ini, pemerintahan kota Kudus dan kota Pati seharusnya dapat memanfaatkan kesempatan tersebut untuk membangun transportasi perkeretaapian di wilayah Kudus dan Pati supaya laju pertumbuhan ekonomi semaksimal mungkin dapat dipercepat.

Konsumsi bahan bakar kereta api terbilang efisien, dapat dilihat dari jumlah penumpang yang dapat diangkut ataupun jarak perjalanan serta konsumsi energinya. Hal tersebut dapat ditunjukkan dari perbandingan moda transportasi darat yang lain; misalnya mobil pribadi dan bus. Kereta api mengonsumsi energi per kilometer per penumpang sebesar 0,002 lt; mobil pribadi 0,002 lt dan bus 0,0125. Dapat dilihat dari tabel di bawah ini:

Tabel 1.1 Perbandingan Konsumsi Energi BBM/KM pnp

Moda Transportasi	Volume Angkutan	Konsumsi Energi BBM/KM	Penggunaan Energi BBM/Km/Pnp
Kereta Api	1.500 org	3 liter	0,0020
Mobil	40 org	0,5 liter	0,0200
Bus	5 org	0,1 liter	0,0125

Keterangan: apabila diasumsikan dengan penggunaan bahan bakar yang sama.

Sumber: RIPNas 2030

Namun perlu diingat bahwa pada tabel di atas merupakan perbandingan jika bahan bakar yang digunakan berjenis sama. Sehingga mendapatkan hasil seperti pada yang tertampil di **Tabel 1.1**.

Dengan pertimbangan dalam segi kehematan energi tersebut dapat dipastikan kereta api merupakan opsi yang sangat baik demi kelancaran perekonomian yang ada di kota Kudus dan kota Pati. Sebenarnya Kudus dan Pati memiliki jalur kereta api namun jalur kereta api Kudus menuju Pati sudah tutup operasionalnya sejak lama yakni pada tahun 1986. Memang sangat disayangkan pada jaman itu kereta api kalah saing dengan kendaraan pribadi. Sebaliknya dimasa sekarang kendara

pribadi malah menimbulkan masalah di mana kendaraan pribadi saat ini sudah menjamur sehingga membuat kemacetan dalam mobilitas. Maka dari itu pengaktifan kembali kereta api jalur Kudus ke Pati perlu dilakukan demi menunjang permasalahan mobilitas yang ada saat ini.

1.2 Rumusan Masalah

Pembuatan Tugas Akhir Perancangan Infrastruktur ini memiliki beberapa perumusan masalah, yakni sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan geometri jalan rel kereta api antara kota Kudus-Pati sesuai dengan kondisi topografi guna pengaktifan kembali jalur kereta api kota Kudus-Pati?
2. Bagaimana perancangan struktur jalan rel kereta api agar sesuai dengan peraturan yang ada?
3. Berapa lama periode yang dibutuhkan untuk pengembalian estimasi modal biaya awal pada perancangan jalan rel kereta api Kudus-Pati?
4. Berapa nilai daya dukung tanah dan penurunan tanah pada perancangan jalan rel kereta api Kudus-Pati?
5. Berapa ukuran drainase yang diperlukan pada perancangan jalan rel kereta api Kudus-Pati?

1.3 Tujuan

Pembuatan Tugas Akhir Perancangan Infrastruktur ini bermaksud untuk melakukan perencanaan jalan rel dengan jalur yang direaktivasi antara kota Kudus-Pati. Tujuan yang ingin dicapai dalam pembuatan Tugas Akhir Perancangan Infrastruktur ini sebagai berikut:

1. Merancang geometri jalan rel yang sesuai dengan topografi guna pengaktifan kembali jalur kereta api kota Kudus-Pati.
2. Merancang struktur jalan rel sesuai dengan peraturan guna pengaktifan kembali jalur kereta api kota Kudus-Pati.
3. Melakukan perhitungan lama waktu pengembalian biaya modal awal pembangunan jalan rel kereta api Kudus-Pati.

4. Menghitung nilai daya dukung dan penurunan tanah pada perancangan jalan rel Kudus-Pati.
5. Merencanakan ukuran saluran drainase sesuai dengan debit air pada jalan rel yang direncanakan.

1.4 Manfaat

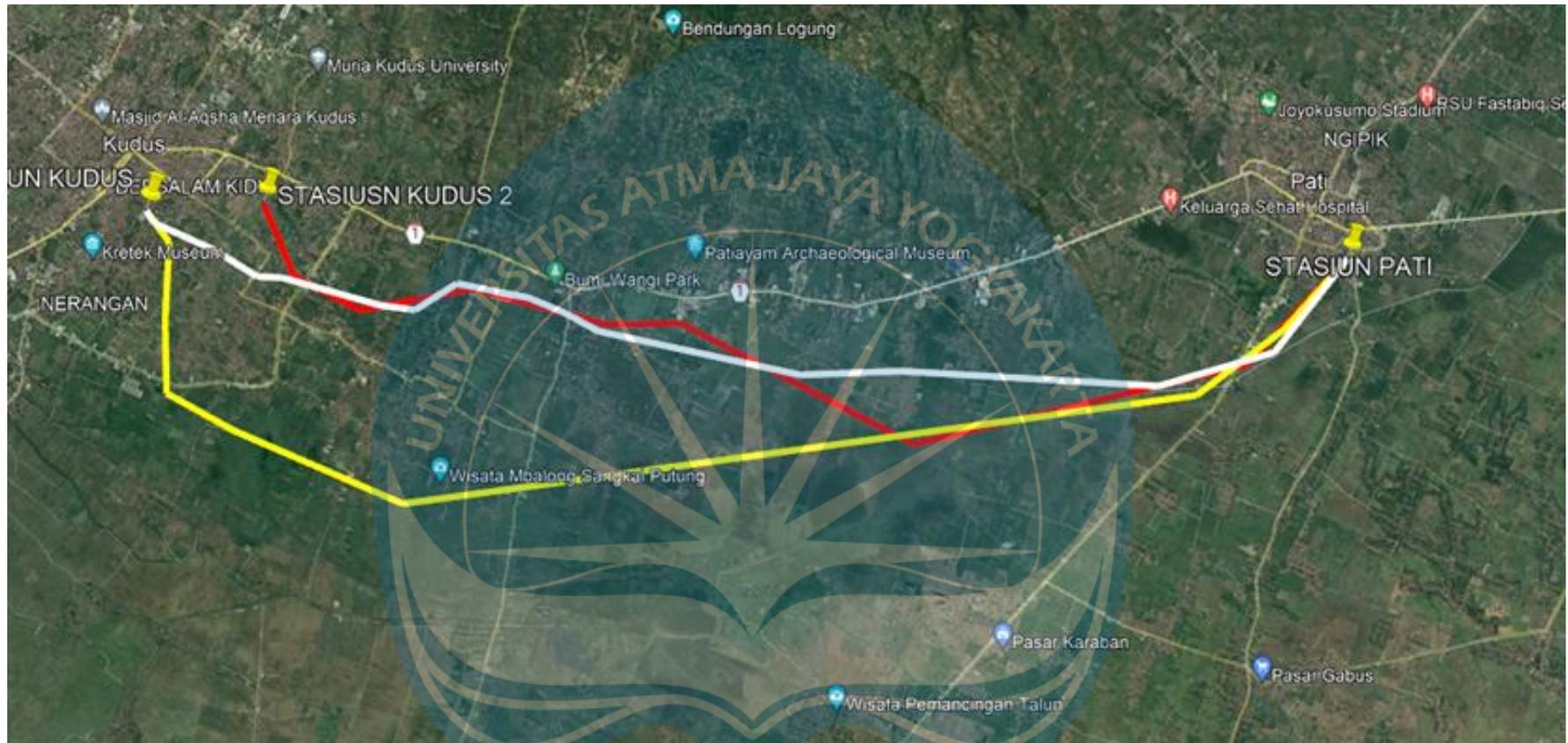
1. Mahasiswa dapat mengaplikasikan teori-teori yang didapatkan dari perkuliahan pada praktik sebenarnya.
2. Dapat mejadi panduan atau referensi alternatif perancangan geometri jalan rel guna reaktivasi jalur kereta api kota Kudus-Pati.

1.5 Ruang Lingkup

Tugas Akhir Perancangan Infrastruktur ini mengulas tentang perancangan geometri jalan rel, alternatif trase dari beberapa pilihan, struktur rel, pengolahan data tanah dan perencanaan saluran drainase pada jalur rel kereta api antara kota Kudus-Pati. Data yang digunakan adalah data sekunder. Jalur yang digunakan dalam perencanaan ini adalah jalur ganda (*double track*) dengan kecepatan rencana 150 km/jam. Dalam pembuatan Tugas Akhir Perancangan Infrastruktur yang dilakukan ini tidak melakukan perhitungan perkiraan waktu, rumah sinyal, dan jembatan.

1.6 Lokasi

Pada Pembuatan Tugas Akhir Perancangan Infrastruktur ini mengambil lokasi perancangan jalan rel kereta api dengan jalur Kudus – Pati. Pada perencanaan terdapat 3 alternatif trase, seperti terlihat pada **Gambar 1.1**.



Gambar 1.1 Peta Alternatif Semua Trase Kereta Api antara Kudus – Pati.

Keterangan :

— Trase 1

— Trase 2

— Trase 3

Sumber: *Google Earth Pro*

1.7 Landasan Teori

1.7.1. Jalan Kereta Api

Jalan rel adalah konstruksi yang terdiri atas beton, baja, atau konstruksi lainnya yang terletak di atas permukaan, di bawah, atau di atas tanah bergantung pada pengikatnya dan digunakan sebagai jalur perlewatan dari kereta api.

Perencanaan jalan kereta api merupakan sebuah hal yang sangat kompleks serta harus sesuai dengan peraturan yang sudah disepakati karena di dalamnya harus terdapat pertanggungjawaban secara teknis beserta ekonomis. Sebuah rel secara teknis harus dapat dilalui oleh kendaraan rel dengan tingkat kenyamanan tertentu sesuai dengan umur dari konstruksi rel tersebut. Namun, secara ekonomis jalan rel diharapkan memiliki nilai nominal atau biaya yang sekecil mungkin dengan tetap mempertimbangkan faktor keamanan sebagai acuan yang utama. Faktor yang berpengaruh terhadap perencanaan jalan rel sendiri antara lain kecepatan maksimum, beban gandar, jumlah beban, serta pola operasi.

1.7.2. Pengelompokkan Jalan Rel

Sesuai dengan kebutuhan sudut pandangnya, jalan rel dikelompokkan menjadi beberapa kelompok yakni:

1. Menurut lebar sepur.
2. Menurut kecepatan ijin maksimal.
3. Menurut kelandaian.
4. Menurut jumlah jalur.
5. Menurut kelas jalan rel.

Di bawah ini merupakan penjelasan mengenai lima kategori pengelompokan jalan rel :

1. Pengelompokkan Menurut Lebar Sepur

Lebar sepur (*rail gauge*) adalah jarak terpendek antara dua kepala rel yang diukur dari sisi dalam kepala rel dari sisi satu sampai sisi dalam kepala rel lainnya. Lebar dari sepur yang digunakan tetap meskipun dimensi dari rel berbeda.

Kelompok sepur dibagi menjadi tiga, sebagai berikut:

- a. Sepur standar (*standar gauge*), memiliki lebar sepur 1.435 mm atau 4 feet 8,5 inch.

- b. Sepur lebar (*broad gauge*), memiliki lebar sepur >1.435 mm.
 - c. Sepur sempit (*narrow gauge*), memiliki lebar sepur <1.435 mm.
2. Pengelompokan Menurut Kecepatan Maksimum
- Kecepatan maksimum (V) kereta api yang diijinkan berhubungan dengan kelas dari jalan rel, dan terdapat pada **Tabel 1.2**.

Tabel 1.2 Kecepatan Maksimum Sesuai Kelas Jalan Rel

Kelas Jalan Rel	Kecepatan Maksimum (km/jam)
I	120
II	110
III	100
IV	90
V	80

Sumber: Utomo, 2006.

Penentuan dari kecepatan rencana (*design speed*) yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Untuk perencanaan struktur jalan rel.
V perancangan = $1,25 \times V$ maksimum.
 - b. Untuk perencanaan jari-jari tikungan serta lengkung peralihan.
V perancangan = V maksimum.
3. Pengelompokan Menurut Kelandaian
- Di Indonesia pengelompokan jalan rel menurut kelandaian diatur sebagaimana pada **Tabel 1.3**.

Tabel 1.3 Lintas Jalan Rel Menurut Kelandaian

Kelompok Lintas Jalan Rel	Kelandaian (‰)
Lintas Datar	0 sampai 10‰
Lintas Pegunungan	10 sampai 40‰
Lintas dengan rel gigi	40‰ sampai 80‰

Sumber: Utomo, 2006.

Kelandaian jalan rel dibatasi 0-1,5 ‰. Kelandaian ini dibatasi agar:

- a. Kereta api yang sedang berhenti pada emplasemen tidak bergerak karena berat sendiri, tiupan angin, maupun dorongan lainnya.
- b. Lokomotif ketika sudah berjalan memerlukan tenaga yang besar untuk melawan tahanan, sehingga tidak ada tenaga berlebih untuk mengatasi tanjakan.

4. Pengelompokan Menurut Jumlah Jalur

Jumlah jalur yang dimaksud adalah jumlah jalur pada lintas bebas. Sesuai dengan jumlah jalur yang dimaksudkan adalah sebagai berikut:

- a. Jalur Tunggal (*single track*): jumlah jalur pada lintas hanya satu serta digunakan untuk arus kereta api dua arah,
- b. Jalur Ganda (*double track*): Jumlah jalur pada lintas terdiri dari dua buah: setiap jalur hanya melayani arus kereta api dari satu arah saja.

5. Pengelompokan Menurut Kelas Jalan Rel

Perencanaan serta perancangan dari Peraturan Dinas 10 PJKA menggunakan satu macam beban gandar yakni 18-ton yang dimaksudkan agar:

- a. Perpindahan dari kereta api dari satu sepur ke sepur lainnya yang kelasnya lebih rendah dapat dilakukan tanpa mengurangi muatannya terlebih dahulu.
- b. Setiap lokomotif dapat digunakan di semua sepur meski kelasnya berbeda.

Dengan demikian klasifikasi jalan rel hanya berdasarkan kapasitas angkut lalu lintas serta kecepatan maksimum. Kapasitas angkut lintas adalah jumlah angkutan yang melewati suatu lintas dalam satu tahun dengan satuan ton/tahun.

Tabel 1.4 Kelas Jalan Rel di Indonesia

Kelas Jalan Rel	Kapasitas Angkut Lintas (x 10 ⁶ ton/tahun)	Kecepatan Maksimum (km/jam)	Beban Gandar Maksimum (ton)
I	>20	120	18
II	10 – 20	110	18
III	5 – 10	100	18
IV	2,5 – 5	90	18
V	< 2,5	80	18

Sumber: Peraturan Dinas 10 PJKA (1986).

Untuk menghitung besarnya kapasitas angkut lintas dapat digunakan rumus:

$$T = 360 \times S \times TE$$

$$TE = Tp + (Kb \times Tb) + (K1 \times T1)$$

Dengan :

T = kapasitas angkut lintas (ton/tahun).

TE = tonase ekivalen (ton/hari).

- Tp = tonase penumpang serta kereta harian.
 Tb = tonase barang dan gerbong harian.
 T1 = tonasi lokomotif harian.
 S = koefisien yang besarnya bergantung pada kualitas lintas.
 S = 1,1 untuk lintas kereta penumpang dengan V maks 120 km/jam.
 S = 1,0 untuk lintas tanpa kereta penumpang.
 Kb = koefisien tergantung beban gandar.
 Kb = 1,5 untuk beban gandar <18 ton.
 Kb = 1,3 untuk beban gandar >18 ton.
 K1 = koefisien ditentukan 1,4.

1.7.3. Standar Jalan Rel di Indonesia

Sebagai standar dari perencanaan dan perancangan struktur atas jalan rel, maka digunakan standar sebagai berikut:

Tabel 1.5 Standar Jalan Rel di Indonesia

Kelas Jalan	Daya Angkut Lalu 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	$>20 \cdot 10^6$	120	18	R60/R.54	Beton 600	Elastis Ganda	30	50
II	$10 \cdot 10^6 - 20 \cdot 10^6$	110	18	R.54/R.50	Beton/Kayu 600	Elastis Ganda	30	50
III	$5 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^6$	100	18	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/Baja 600	Elastis Ganda	30	40
IV	$2.5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$	90	18	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/Baja 600	Elastis Ganda/Elastis Tunggal	25	40
V	$< 2.5 \cdot 10^6$	80	18	R.42	Kayu/Baja 600	Elastis Tunggal	25	35

Sumber: PD 10 Perencanaan Rel Kereta Api.

1.7.4. Geometri Jalan Rel

Geometri jalan rel adalah bentuk dan ukuran rel, baik memanjang maupun melebar yang terdiri atas lebar sepur, kelandaian, lengkung horizontal, lengkung vertikal, peninggian rel, pelebaran sepur. Tujuan dari perancangan geometri jalan rel adalah agar mendapat hasil yang efisien, aman, nyaman, dan ekonomi. Di bawah ini merupakan penjelasan lengkap mengenai geometri jalan rel.

1. Lebar Sepur

Lebar sepur yang digunakan di Indonesia adalah 1.067 mm yang merupakan tergolong sepur sempit. Lebar tersebut untuk jalur lurus dan besarnya tetap. Pada lengkung horizontal diperlukan pelebaran tergantung dari jari-jari lengkung horizontalnya. Hubungan antara lebar sepur, ukuran dan posisi roda di atas kepala rel adalah sebagai berikut:

$$S = r + 2.f + 2c$$

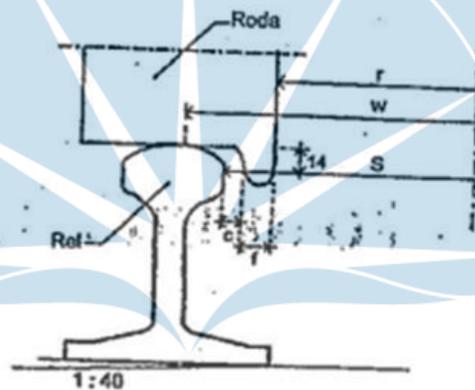
Dengan :

S = Lebar Sepur (mm).

r = jarak bagian terdalam roda (mm).

f = tebal flens (mm).

c = celah tepi-dalam flens dengan kepala rel (mm).

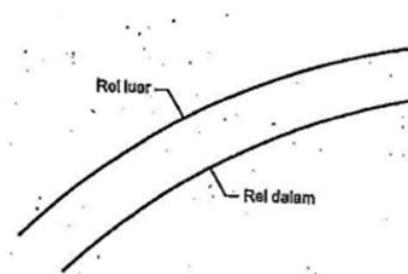


Gambar 1.2 Lebar Sepur.

Sumber: Utomo, 2006.

2. Lengkung Horizontal

Pada lengkung horizontal akan terjadi gaya sentrifugal pada kereta sehingga untuk mencegah akibat-akibat tersebut perlu diberikan peninggian pada rel bagian luarnya.

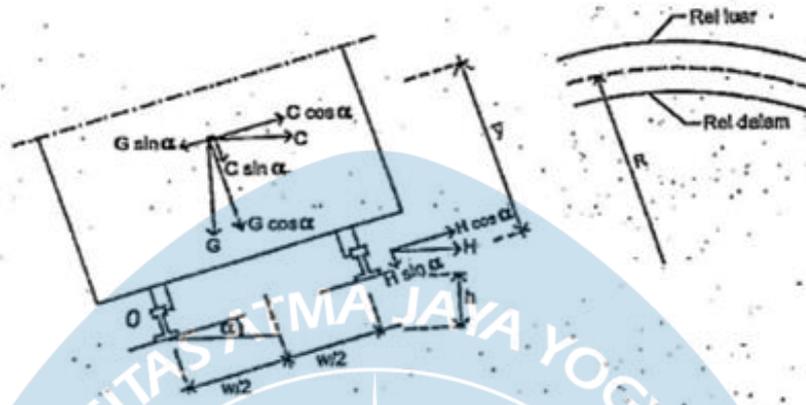


Gambar 1.3 Lengkung Horizontal.

Sumber: Utomo, 2006.

3. Lengkung Lingkaran

Pada saat melalui lengkung horizontal kedudukan dari badan kereta api mengalami gaya sentrifugal. Dukungan kompon dapat dilihat pada gambar.



Gambar 1.4 Kedudukan Kereta Pada Aaat Melalui Lengkung Horizontal.

Sumber: Utomo, 2006.

Gaya sentrifugal kereta api saat tikungan, untuk berbagai kecepatan rencana, nominal jari-jari minimum dapat dilihat dari kondisi:

- a. Gaya sentrifugas timbul diimbangi dengan gaya berat saja:

Gaya sentrifugal yang muncul:

$$C = \frac{m.V^2}{R}$$

Dengan :

C = gaya sentrifugal.

R = Jari-jari lengkung lingkaran.

V = kecepatan kereta api.

$$m = \text{massa} = \frac{G}{g}$$

g = percepatan gravitasi = 9,81 m/detik².

Gaya sentrifugal yang timbul diimbangi gaya berat.

$$G \cdot \sin \alpha = C \cos \alpha$$

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

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

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \frac{V^2}{g.R}$$

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

$$h = \frac{m.V^2}{g.R}$$

Dengan satuan praktis, yaitu:

R = jari-jari lengkung horizontal (m).

G = berat kereta (ton).

V = kecepatan rencana (km/jam).

h = peninggian rel pada lengkung (mm).

w = jarak titik kontak roda dengan kepala sebesar 1120 mm.

Sehingga:

$$R = \frac{8,8.V^2}{h}$$

Dengan peninggian maksimum 110 mm maka besar jari-jari yang didapatkan adalah sebesar $0,08 V^2$.

- b. Gaya sentrifugal yang timbul diimbangi dengan komponen struktur jalur rel. pada gambar gaya sentrifugal yang timbul diimbangi dengan gaya berat dan kemampuan dukung komponen jalur rel. sehingga:

$$C \cos \alpha = G \sin \alpha + D \cos \alpha$$

$$\frac{m.V^2}{R} \cos \alpha = G \sin \alpha + D \cos \alpha$$

$$G \sin \alpha = \left(\frac{m.V^2}{R} - D \right) \cos \alpha$$

$$G \tan \alpha = \frac{m.V^2}{R} - D$$

Besar dari komponen struktur rel tergantung dari massa serta percepatan sentrifugal, yaitu:

$$D = m.a$$

Dengan :

a = percepatan sentrifugal.

m = massa.

Dikarenakan:

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

Maka rumus percepatan dalam satuan m/detik adalah:

$$a = 0,077 \frac{V^2}{R} - g \frac{h}{w}$$

Supaya penumpang kereta api nyaman, besar a_{maks} adalah 0,0478 g.

Kemudian dengan jarak kedua titik kontak roda dan rel 1120 mm maka diperoleh.

$$13R = \frac{v^2}{0,0478g + g \frac{h}{1220}}$$

Dengan peninggian maksimum (h_{maks}) 110 mm, maka:

$$13R = \frac{v^2}{0,0478g + g \frac{110}{1220}}$$

$$R = 0,0537 V^2$$

Sehingga digunakan:

$$R_{\text{minimum}} = 0,054 V^2$$

Dengan :

R_{minimum} = jari-jari minimal yang diperlukan saat kondisi sentrifugal.

V = kecepatan rencana (km/jam).

4. Lengkung Lingkaran Tanpa Lengkung Transisi

Pada lengkung horizontal tanpa lengkung transisi serta tanpa peninggian rel, berdasarkan pada persamaan minimum:

$$h = 8,8 V^2/R - 53,54$$

Karena tidak ada peninggian (h).

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

Tabel 1.6 Persyaratan Jari-jari Minimum Lengkung Horizontal

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

Sumber: PJKA, 1986.

5. Lengkung Transisi

Pengurangan pengaruh gaya sentrifugal terhadap badan kereta untuk menjaga kenyamanan dari kereta api digunakan lengkung peralihan. Maka panjang dari lengkung peralihan yang diperlukan dapat menggunakan persamaan di bawah ini.

$$L_h = 0,01 \cdot h \cdot V$$

Dengan :

L_h = panjang minimum lengkung peralihan (m).

- h = peninggian rel pada lengkung lingkaran (mm).
 V = kecepatan rencana (km/jam).
 R = jari – jari lengkung lingkaran (m).

Contoh dari salah satu bentuk lengkung transisi ialah *Cubic* Parabola (parabola pangkat tiga).

Diagram kelengkungannya adalah seperti pada gambar.



Gambar 1.5 Diagram Kelengkungan lengkung transisi.

Sumber: Utomo, 2006.

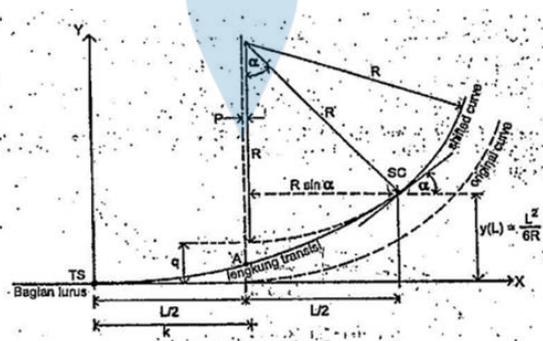
Persamaan *Cubic* Parabola adalah sebagai berikut:

$$y = x^2/(6.R.L)$$

Dengan :

- y = koordinat arah y.
 x = koordinat arah x.
 R = jari-jari lengkung (m).
 L = Panjang lengkung (m).

Gambar dari lingkaran beserta bagian pentingnya adalah seperti gambar di bawah.



Gambar 1.6 Lengkung transisi bentuk kubik parabola.

Sumber: Utomo, 2006.

Pada gambar di atas diketahui bahwa;

TS= merupakan titik pertemuan lengkung transisi dengan bagian lurus.

SC= merupakan titik pertemuan lengkung transisi dengan lengkung lingkaran.

$$p = L/2 - R \cdot \sin \alpha$$

$$k = L - R \cdot \sin \alpha$$

$$q = L^2/(6 \cdot R) + R \cdot \cos \alpha - R$$

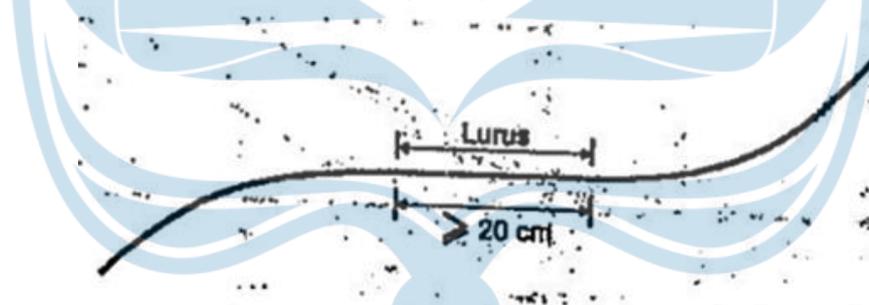
L merupakan panjang dari lengkung peralihan (Lh). Sedangkan lengkung transisi yang berbentuk parabola dari TS melalui A sampai dengan titik SC. Kemudian dilanjutkan dengan lengkung lingkaran yang dimulai dari SC.

Dengan lengkung transisi di atas maka terjadi pergeseran letak lengkung yakni dari letak lengkung semula (original curve) tanpa lengkung transisi, ke letak lengkung bergeser (shifted curve) oleh karena lengkung transisi.

6. Lengkung S

Dua lengkung dari sebuah lintas dengan arah lengkungan berbeda namun terletak bersambungan maka hal tersebut akan membentuk lengkung membalik (*reverse curve*) dengan huruf S sehingga sering dikenal sebagai “Lengkung S”.

Pada antara lengkung yang berbeda arah harus diberi bagian lurus setidaknya 20 meter diluar dari lengkung transisi, seperti pada gambar.



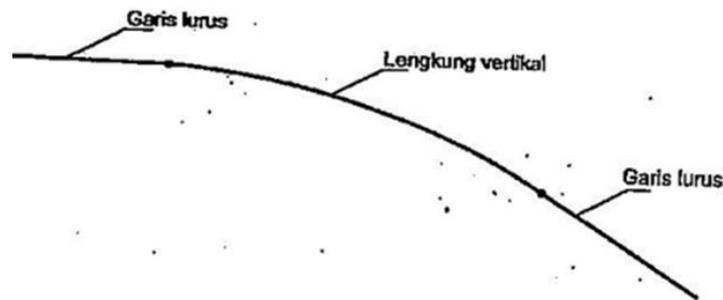
Gambar 1.7 Bentuk Lengkung S.

Sumber: Utomo, 2006.

7. Lengkung Vertikal

Alinyemen vertikal adalah proyeksi dari jalan rel pada bidang bertikal melalui sumbu jalan rel yang dimaksud, terdiri atas:

- a. Garis lurus yang memiliki kelandaian atau tidak memiliki kelandaian.
- b. Lengkung vertikal.



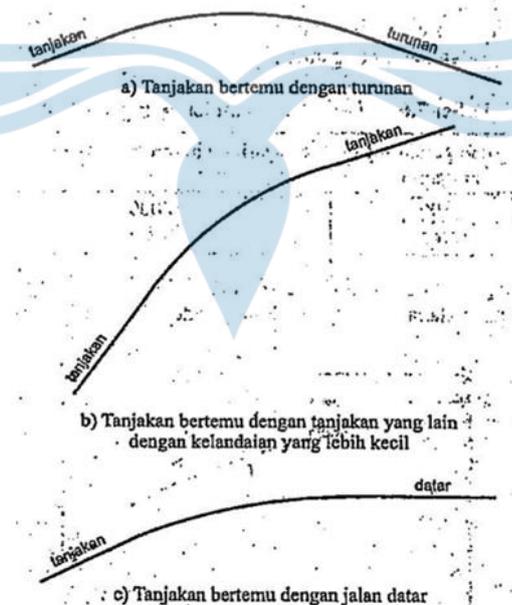
Gambar 1.8 Alinyemen Vertikal.

Sumber: Utomo, 2006.

Lengkung vertikal merupakan transisi suatu kelandaian menuju kelandaian berikutnya, sehingga perubahan kelandaian dapat berangsur dan beraturan. Selain itu, lengkung vertikal memberikan cukup akan pandangan serta keamanan dan keselamatan kereta api. Terdapat dua kelompok pada lengkung vertikal yakni lengkung cembung dan lengkung cekung.

8. Lengkung Cembung

Lengkung cembung merupakan lengkung vertikal yang memiliki kecembungan ke atas. Sering dikenal sebagai summit curve atau sepur curve. Kondisi ini biasanya dibuat pada kondisi tanjakan yang bertemu dengan turunan, tanjakan dengan tanjakan, atau tanjakan dengan jalan datar.



Gambar 1.9 Landai Cembung

Sumber: Utomo, 2006

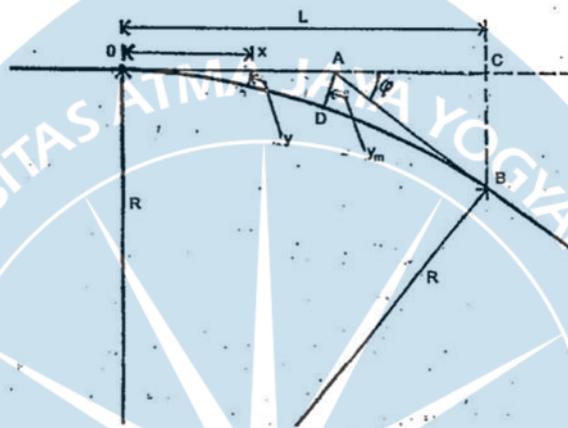
Besar jari-jari minimum dari lengkung tersebut berupa lengkung lingkaran yang disesuaikan dengan kecepatan rencana.

Tabel 1.7 Jari-jari Minimum Lengkung Vertikal

Kecepatan Rencana (km/jam)	Jari-jari minimum lengkung vertikal (m)
>100	8000
≤100	6000

Sumber: PD 10 PJKA, 1986.

Penggunaan pendekatan dapat menggunakan cara berikut:



Gambar 1.10 Lengkung Vertikal Berbentuk Lengkung Lingkaran.

Sumber: Utomo, 2006.

Ketentuan pada gambar :

R = jari-jari lengkung vertikal.

L = panjang lengkung vertikal.

A = titik pertemuan perpanjangan kedua landai.

Φ = perbedaan landai.

OA = $0,5L$.

Penentuan letak titik A (x_m , y_m) menggunakan persamaan:

$$x_m = R/2 \phi$$

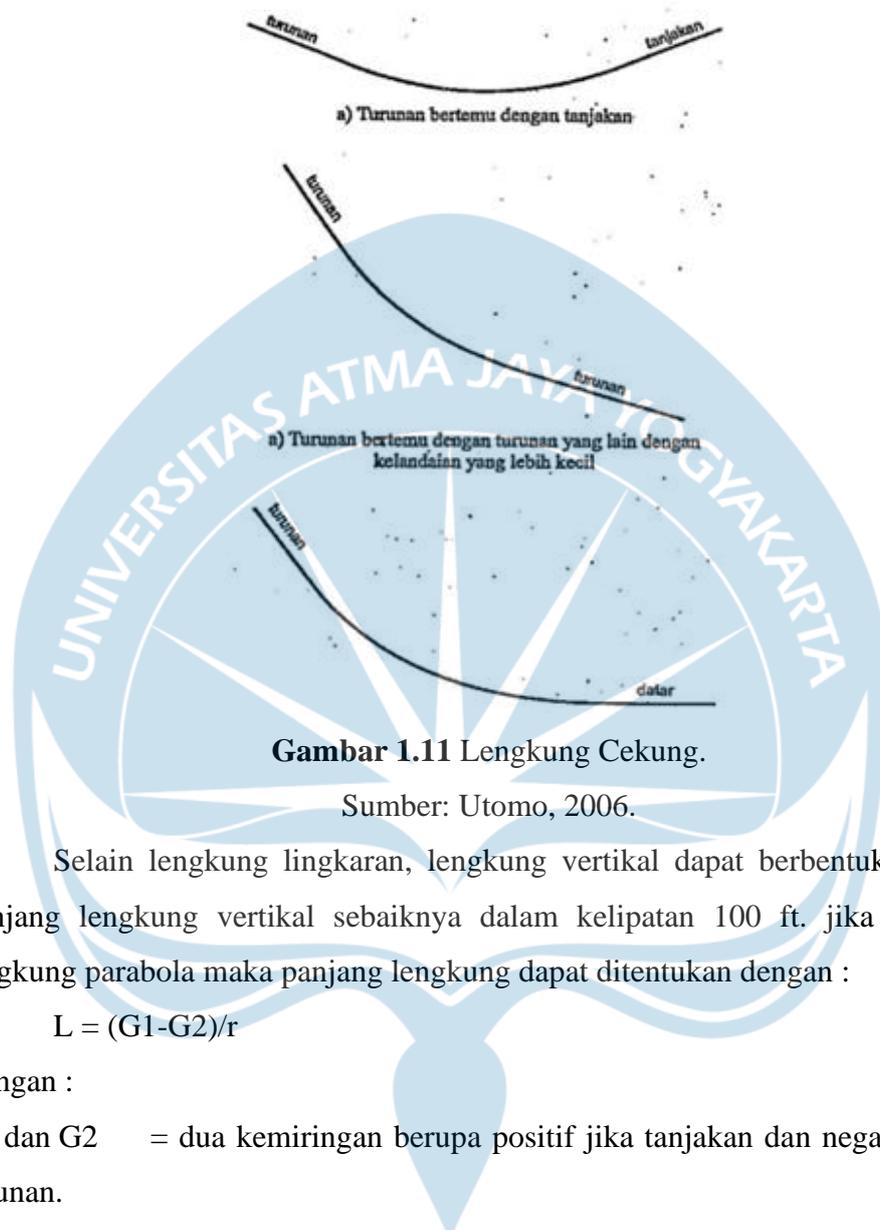
$$y_m = R/8 \phi^2$$

Sehingga ketika jari-jari lengkung vertikal ditetapkan perbedaan landai dapat dihitung dan dapat dicari letak titik x_m serta y_m .

9. Lengkung Cekung

Merupakan lengkung vertikal dengan kecekungan ke bawah. Sering dikenal dengan *valley curve* atau *sag curve*. Lengkung cekung digunakan pada kondisi

turunan bertemu dengan tanjakan, turunan dengan turunan lain, maupun pada kondisi turunan bertemu dengan jalan datar.



Gambar 1.11 Lengkung Cekung.

Sumber: Utomo, 2006.

Selain lengkung lingkaran, lengkung vertikal dapat berbentuk parabola. Panjang lengkung vertikal sebaiknya dalam kelipatan 100 ft. jika berbentuk lengkung parabola maka panjang lengkung dapat ditentukan dengan :

$$L = (G1-G2)/r$$

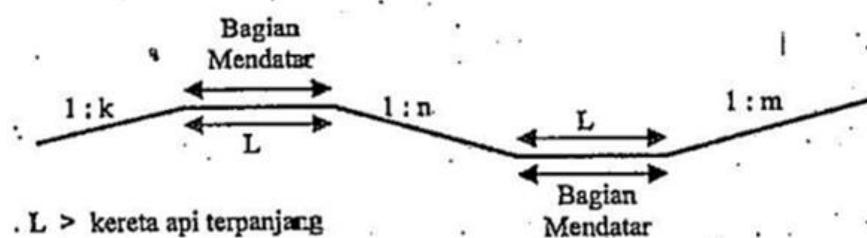
Dengan :

G1 dan G2 = dua kemiringan berupa positif jika tanjakan dan negative ketika turunan.

L = merupakan panjang lengkung (kelipatan 100ft).

R = tingkat perubahan kemiringan tiap 100 feet (%).

Ketika sebuah tanjakan yang kemudian diikuti dengan turunan atau sebaliknya maka di antara lengkung vertikal yang merupakan lengkung peralihan yang panjangnya tidak boleh kurang dari kereta api terpanjang pada lintasan tersebut.



Gambar 1.12 Bagian Mendatar di Antara Lengkung Vertikal.

Sumber: Utomo, 2006

10. Kelayakan

Kelayakan terbagi menjadi 2 kategori dengan masing-masing kategori dijelaskan sebagai berikut ini.

a. Landai Penentu

Landai penentu merupakan kelayakan terbesar pada lintas lurus. Besaran landai penentu berpengaruh pada kombinasi daya tarik lok serta rangkaian yang dioperasikan. Untuk masing-masing kelas jalan rel, besar landai penentu adalah:

Tabel 1.8 Landai Penentu Maksimum

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

Sumber: PM 60 tahun 2012.

b. Landai Curam

Pada keadaan tertentu seperti pegunungan, kelayakan suatu lintasan lurus terkadang melebihi landai penentu. Landai tersebut disebut sebagai Landai Curam (S_c). Panjang maksimum landai curam dibatasi sesuai dengan persamaan berikut:

$$l_c = (V_k^2 - V_p^2) / (2 \cdot g \cdot (S_p - S_c))$$

Dengan :

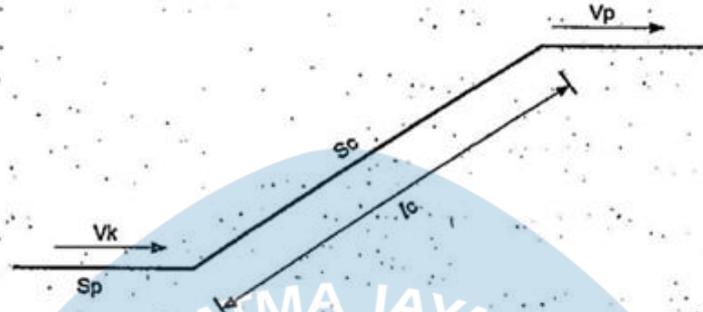
l_c = panjang landai curam (m).

V_k = Kecepatan minimum di kaki landai curam (m/detik).

V_p = kecepatan minimum diterima di puncak landai curam (m/detik).

Berketentuan $V_p \geq 0,5 V_k$.

- G = percepatan gravitasi (m/detik²).
 Sp = landai penentu (‰).
 Sc = landai curam (‰).



Gambar 1.13 Landai Curam.

Sumber: Utomo, 2006.

11. Percepatan sentrifugal

Ketika kereta api melintasi lengkung horizontal maka akan terjadi gaya sentrifugal ke arah luar. Percepatan sentrifugal merupakan fungsi dari kecepatan dan jari-jari lengkung sebagai berikut:

$$a = V^2/R$$

Dengan :

- a = percepatan sentrifugal.
 V = kecepatan rencana.
 R = jari-jari lengkung.

Percepatan sentrifugal yang timbul dapat mempengaruhi antara lain seperti kenyamanan penumpang kereta api, tergesernya barang-barang di dalam kereta, serta mempengaruhi keausan rel serta bahaya tergulingnya kereta api.

Sebagai upaya untuk mengurangi pengaruh tersebut maka harus dilakukan langkah-langkah seperti berikut:

- a. Pemilihan jari-jari lengkung horizontal (R) yang besar.
- b. Membatasi kecepatan kereta (V).
- c. Melakukan peninggian sebelah luar dari rel.

Dengan mempertimbangkan kenyamanan penumpang serta barang yang ada di dalam kereta agar tidak bergeser, maka percepatan sentrifugal harus dibatasi sebagai berikut:

$$a \text{ maksimum} = 0,0478.g$$

Dengan :

g = percepatan gravitasi (m/detik²).

12. Peninggian Rel

Peninggian rel sebagai salah satu komponen penting dalam penunjang kenyamanan dan keamanan laju kereta api harus dirancang sesuai dengan beberapa aturan dan rumus yang berlaku. Peninggian rel memiliki beberapa nilai sesuai dengan medan dan kondisi serta sesuai dengan kecepatan rencana. Peninggian tersebut antara lain sebagai berikut.

a. Peninggian Normal

Peninggian normal merupakan kondisi komponen jalan rel tidak turut serta menahan gaya sentrifugal serta pada kondisi ini gaya sentrifugal hanya diimbangi oleh gaya berat saja. Perhitungan peninggian normal adalah sebagai berikut:

$$h_{\text{normal}} = 5,95 V^2/R$$

Dengan :

V = kecepatan rencana (km/jam).

R = jari-jari lengkung horizontal (m).

h_{normal} = peninggian normal (mm).

b. Peninggian Minimum

Peninggian minimum berdasar pada kondisi gaya maksimal yang mampu ditahan dengan komponen jalan rel serta kenyamanan dari penumpang. Sebagai perhitungannya maka digunakan:

$$h_{\text{minimum}} = 8,8 (V^2)/R - 53,54$$

Dengan :

h_{minimum} = peninggian minimum.

V = kecepatan rencana (km/jam).

R = jari-jari lengkung horizontal (m).

c. Peninggian Maksimum

Peninggian maksimum berdasarkan dari stabilitas kereta saat berhenti di bagian lengkung dibatasi pada kemiringan maksimum sebesar 10%. Namun jika melebihi 10% maka benda pada lantai kereta api dapat dipindah kearah sisi dalam. Dengan kemiringan maksimum 10% peninggian rel

maksimum yang digunakan adalah 110 mm. Mengenai faktor keamanannya adalah.

$$SF \times G \times \sin \alpha \times y = G \times \cos \alpha \times w/2$$

$$\tan \alpha = w/(SF \times 2 \times y)$$

Dengan :

SF = faktor keamanan terhadap bahaya guling.

Sehingga :

$$SF = w/(SF \times 2 \times y)$$

Apabila digunakan $h = h_{maks} = 110$ mm, $w = 1120$ mm dan y untuk kereta api Indonesia = 1700 mm maka $SF = 3,35$. Dengan demikian faktor keamanan yang digunakan pada bagian lengkung horizontal dengan h_{maks} 110 mm adalah sebesar 3,35.

d. Penggunaan Peninggian Rel

Ditinjau dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa peninggian rel pada lengkung horizontal ditentukan berdasarkan h_{normal} .

$$h_{normal} = 5,95 \sqrt{V^2/R} \text{ (mm)}.$$

Dengan batasan :

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

$$h_{maksimum} = 8,8 (V^2) / R - 53,54 \text{ (mm)}.$$

Peninggian rel yang diperoleh sesuai dengan teori di atas dibulatkan ke 5 mm terdekat ke atas. Sebagai contoh jika diperoleh $h = 3,5$ mm maka peninggian rel yang digunakan adalah 5 mm.

Pada lengkung horizontal yang tidak menggunakan lengkung transisi, peninggian rel dicapai serta dihilangkan sepanjang suatu “panjang transisi” dengan batasan minimum yang ada pada dasarnya dapat dihitung dengan persamaan:

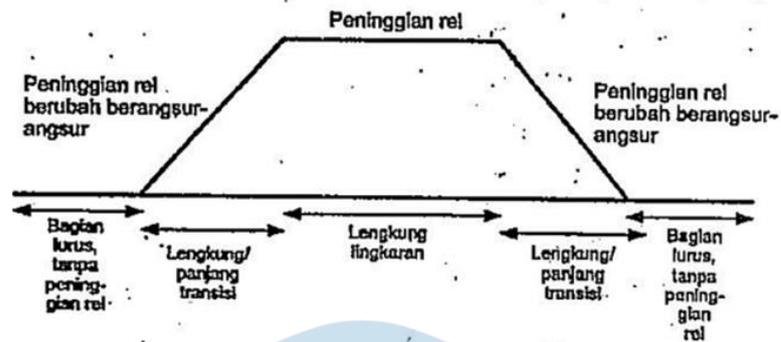
$$Ph = 0,01.h.V$$

Dengan :

Ph = panjang minimum “panjang transisi” (m).

h = peninggian rel pada lengkung lingkaran (mm).

V = kecepatan rencana (km/jam).



Gambar 1.14 Diagram Peninggian Rel.

Sumber: Utomo, 2006.

Tabel 1.9 Peninggian Jalan Rel 1067 mm

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

Sumber: PJKA, 1986.

Lanjutan Tabel 1.9 Peninggian Jalan Rel 1067 mm

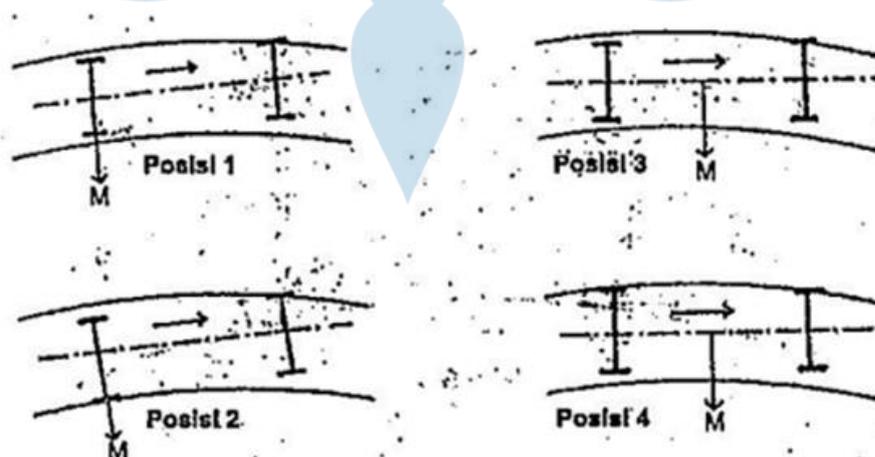
Jari-jari (m)	Peninggian (mm) pas (km/hr)						
	120	110	100	90	80	70	60
3000	30	25	20	20	15	10	10
3500	25	25	20	15	15	10	10
4000	25	20	15	15	10	10	10

Sumber: PJKA, 1986.

13. Pelebaran Sepur

Analisis pelebaran sepur berdasarkan pada kereta yang memiliki dua gandar. Dua gandar depan dan belakang merupakan kesatuan, sehingga disebut Gandar Teguh (*right wheel base*). Karena menggunakan gandar teguh maka gandar belakang akan tetap sejajar dengan bagian gandar depan, sehingga saat melewati lengkung akan membentuk 4 kemungkinan posisi:

- Posisi 1: Posisi Jalan Bebas, di mana gandar depan mencapai rel luar, serta gandar belakang pada posisi bebas antara rel dalam dan rel luar.
- Posisi 2: Gandar depan mencapai rel luar, gandar belakang menempel rel akan tetapi tidak menekan, dan gandar belakang radial terhadap lengkung horizontal.
- Posisi 3: gandar depan menempel pada bagian luar rel, gandar belakang menekan rel, serta kedua gandar tidak radial terhadap pusat lengkung.
- Posisi 4: Posisi Jalan Tali Busur, kedua gandar menempel pada rel luar. Posisi ini terjadi ketika kereta pada kecepatan tinggi.



Gambar 1.15 Posisi Roda dan Gandar Pada Saat Melalui Lengkung.

Sumber: Utomo, 2006.

Tabel 1.10 Persyaratan Jari-jari Minimum Lengkung Horisontal

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 10 PJKA Tahun 1986.

1.7.5. Pengertian Tanah

Dalam bidang pekerjaan Teknik Sipil tanah memiliki peran yang penting. Pada kasus yang ada tanah dapat menjadi fondasi suatu konstruksi bangunan, namun dalam kasus lain tanah juga dapat menjadi beban penyebab gaya luar pada suatu konstruksi bangunan. Das (1992), mendefinisikan bahwa tanah merupakan material yang didalamnya berisi agregat (butiran) mineral padat yang tidak tersementasi semuanya (terikat secara kimia) dan bisa berasal dari bahan-bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut. Dalam pendefinisian lain Hardiyanto (1992), menjelaskan tanah dalam bidang ilmu Teknik Sipil didefinisikan sebagai kumpulan material, bahan organik dan endapan-endapan yang lepas (*loose*) yang terletak di atas batu dasar.

Tanah memiliki jenis ukuran butir yang berbeda-beda. Pada umumnya dibedakan menjadi 4 jenis tanah berdasarkan ukuran butirnya, yaitu:

1. Batu kerikil (*gravel*).
2. Pasir (*sand*).
3. Lanau (*slit*).
4. Lempung (*clay*).

Dari 4 jenis tanah berdasarkan ukuran butir tersebut, digolongkan menjadi 2 jenis tanah yakni tanah berbutir kasar/ tidak kohesif dan tanah berbutir halus/ kohesif. Tanah yang tergolong tidak kohesif adalah tanah berjenis batu krikil dan pasir, sedangkan tanah yang tergolong kohesif adalah tanah yang berjenis lanau dan lempung.

1.7.6. Parameter Tanah

Parameter tanah merupakan hal pertama yang sangat penting dalam melakukan analisis geoteknik. Analisis geoteknik tidak dapat dilakukan jika parameter tanah belum didapatkan terlebih dahulu, karena parameter tanah adalah acuan untuk mendapatkan nilai dari hasil suatu proses perubahan yang terjadi dalam tanah. Hasil dari proses tersebut dapat berupa sifat fisik dan jenis tanah. Berikut merupakan penjelasan mengenai parameter-parameter tanah yang digunakan dalam melakukan analisis geoteknik.

1. Modulus Elastisitas

Modulus Elastisitas adalah perbandingan antara tegangan dan regangan aksial dalam deformasi yang elastis, sehingga modulus elastisitas menunjukkan kecenderungan suatu material untuk berubah bentuk dan kembali lagi ke bentuk semula bila diberi beban (SNI 2826-2008). Modulus elastisitas merupakan ukuran kekakuan suatu material, maka nilai modulus elastisitas sangat berpengaruh pada perubahan bentuk apabila diberikan gaya. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas bahan, akan semakin sedikit perubahan bentuk yang terjadi apabila diberikan gaya.

Tiap kategori jenis tanah memiliki nilai modulus elastisitas yang berbeda. Bowles (1997), telah membuat perkiraan nilai modulus elastisitas berdasarkan kategori jenis tanah yang ditunjukkan pada **Tabel 1.11** berikut:

Tabel 1.11 Perkiraan Nilai Modulus Elastisitas Tanah

Jenis Tanah	E (kg/cm ²)
LEMPUNG	
Sangat lunak	3-300
Lunak	20-40
Sedang	45-90
Berpasir	300-425
PASIR	
Berlanau	500-200
Tidak padat	100-250
Padat	500-1000
PASIR DAN KERIKIL	
Padat	800-2000
Tidak padat	500-1400
Lanau	20-200
Loses	150-600
Cadas	1400-14000

Sumber: Bowles (1997).

2. Angka Poisson μ

Youder dan Witczak (1975), menyatakan angka poisson atau poisson ratio adalah perbandingan antara nilai dari ragangan horizontal dengan regangan vertikal yang berasal dari beban sejajar subu dan regangan aksial.

3. Kohesi c

Kohesi dapat didefinisikan sebagai gaya tarik menarik antar partikel yang ada dalam tanah. Kohesi akan semakin besar apabila kekuatan gesernya semakin besar. Nilai kohesi (c) didapat dari pengujian kuat geser langsung (*direct shear strength test*) dan pengujian triaxial (*triaxial test*).

4. Berat Isi γ

Menurut Lembaga Penelitian Tanah (1979), berat isi tanah adalah berat tanah utuh (*undisturbed*) dalam keadaan tanah kering dibagi dengan volume tanah. Rumus untuk berat isi (γ) adalah sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Dengan :

W = Berat butiran (g).

V = Volume total (cm³).

γ = Berat isi tanah (g/cm³).

5. Sudut Geser ϕ

Sudut geser dalam adalah sudut yang terbentuk dari perbandingan tegangan geser tanah terhadap tegangan normal. Semakin besar nilai sudut geser tanah, maka tanah akan semakin kuat dalam menahan tegangan.

6. Indeks Kompresi (Cc)

Fungsi dari indeks kompresi adalah sebagai pengukur seberapa kaku tanah lempung ketika kondisi terkonsolidasi biasa dan merupakan parameter penting dalam proses konsolidasi akhir. Indeks kompresi telah diklasifikasikan berdasarkan jenis tanah oleh Sridharan dan Nagaraj (2000) dan Djoenaidi (1985), dapat dilihat seperti pada **Tabel 1.12**.

Tabel 1.12 Indeks Kompresi

Jenis Tanah	Cc	Referensi
<i>Normal Consolidated Medium Sensitive Clays</i>	0,2 – 0,5	Haltz and Kovacs (1981)
<i>Organic Silt and Clayey Silts (ML – MH)</i>	1,5 – 4,0	
<i>Organic Clays (OH)</i>	>4	
<i>Peat (Pt)</i>	10 - 15	

Sumber: Kumpulan Parameter Geoteknik dan Fondasi 2019.

7. Angka Pori e

Angka Pori (*void ratio*) adalah rasio volume butir padat tanah dengan volume ruang kosong. Semakin besar nilai angka pori pada tanah, maka nilai daya dukung tanah semakin kecil.

1.7.7. Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah dalam mendukung beban fondasi yang bekerja di atasnya. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mencari daya dukung tanah, beberapa diantaranya adalah metode Terzaghi.

Untuk merumuskan daya dukung tanah ada banyak cara yang telah dibuat, namun seluruhnya hanyalah merupakan pendekatan guna mempermudah dalam perhitungan. Analisis keruntuhan daya dukung dilakukan dengan menganggap bahwa tanah bersifat plastis. Konsep ini pertama kali dikenalkan oleh Prandl, yang kemudian dilakukan pengembangan oleh Terzaghi (1943), Meyerhof (1953) dan lain-lain.

Berdasarkan metode Terzaghi keruntuhan geser terbagi menjadi 2 yaitu keruntuhan geser umum (*general shear failure*) dan keruntuhan geser lokal (*local shear failure*), dengan rumus seperti di bawah ini.

$q_u = cN_c + D_f\gamma N_q + 0,5\gamma BN_\gamma$; untuk keruntuhan geser umum (*general shear failure*).

$q_u = c'N_c' + D_f\gamma N_q' + 0,5\gamma BN_\gamma'$; untuk keruntuhan geser lokal (*local shear failure*).

Pada kondisi keruntuhan geser lokal maka digunakan faktor kapasitas dukung tanah pada kondisi keruntuhan geser lokal dengan menggunakan nilai N_c' , N_q' , dan N_γ' .

Dengan :

c = kohesi (kN/m^2).

c' = $(2/3) c$ (kN/m^2).

D_f = kedalaman fondasi (m).

γ = berat volume tanah (kN/m^3).

B = lebar fondasi (m).

N_c, N_q, N_γ = faktor kapasitas dukung tanah (fungsi φ).

N_c', N_q', N_γ' = faktor kapasitas dukung tanah (fungsi $\text{tg } \varphi'$).

Untuk nilai N_c, N_q , dan N_γ didapat dari tabel berikut:

Tabel 1.13 Nilai-nilai Faktor Kapasitas Daya Dukung Tanah Terzaghi

φ	Terzaghi					
	N_c	N_q	N_γ	N_c'	N_q'	N_γ'
0	5,7	1,0	0,0	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8,0	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5,0	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2

Sumber: Terzaghi (1943).

Rumus perhitungan di atas merupakan analisis untuk fondasi bentuk memanjang. Sedangkan untuk bentuk fondasi lain, Terzaghi memberikan faktor bentuk berdasarkan pada analisis fondasi memanjang, sebagai berikut:

1. Untuk fondasi lajur memanjang.

$$q_u = cN_c + P_o N_q + 0,5\gamma B N_\gamma$$

2. Untuk fondasi berbentuk bujur sangkar.

$$q_u = 1,3 cN_c + P_o N_q + 0,4\gamma B N_\gamma$$

3. Untuk fondasi berbentuk lingkaran.

$$q_u = 1,3 cN_c + P_o N_q + 0,3\gamma B N_\gamma$$

Dengan :

c = kohesi (kN/m^2).

P_o = $D_f \gamma$ = Tekanan *overboden* pada dasar fondasi (kN/m^2).

γ = berat volume tanah (kN/m^3).

B = lebar fondasi (m).

N_c, N_q, N_γ = faktor kapasitas dukung tanah (fungsi φ).

1.7.8. Penurunan

Penurunan dibedakan menjadi beberapa jenis;

1. Penurunan segera (S_i)

Penurunan segera adalah penurunan yang terjadi sesaat setelah ada pembebanan, akibat deformasi elastik tanah (tanpa disertai dengan perubahan kadar air tanah).

2. Penurunan konsolidasi (S_c)

Penurunan konsolidasi adalah penurunan yang terjadi akibat terdispersinya tekanan air pori berlebih akibat pembebanan dan bergantung pada waktu.

3. Penurunan konsolidasi lanjut (S_{cs})

Penurunan konsolidasi lanjut adalah penurunan yang terjadi pada jangka waktu lama (beberapa tahun) setelah penurunan konsolidasi.

Rumus dari penurunan adalah sebagai berikut:

Untuk Penurunan Konsolidasi.

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \text{Log} \frac{P'_0 + \Delta P}{P'_0}$$

Untuk Penurunan Segera.

$$S_i = \mu_1 \mu_0 \frac{qB}{E}$$

Untuk Penurunan Total.

$$S_{total} = S_c + S_i$$

Dengan :

S_c = penurunan konsolidasi.

S_i = penurunan segera.

μ_1 = faktor koreksi untuk lapisan tanah dengan tebal terbatas H .

μ_0 = faktor koreksi untuk kedalaman fondasi D_f .

B = lebar fondasi empat persegi panjang (m).

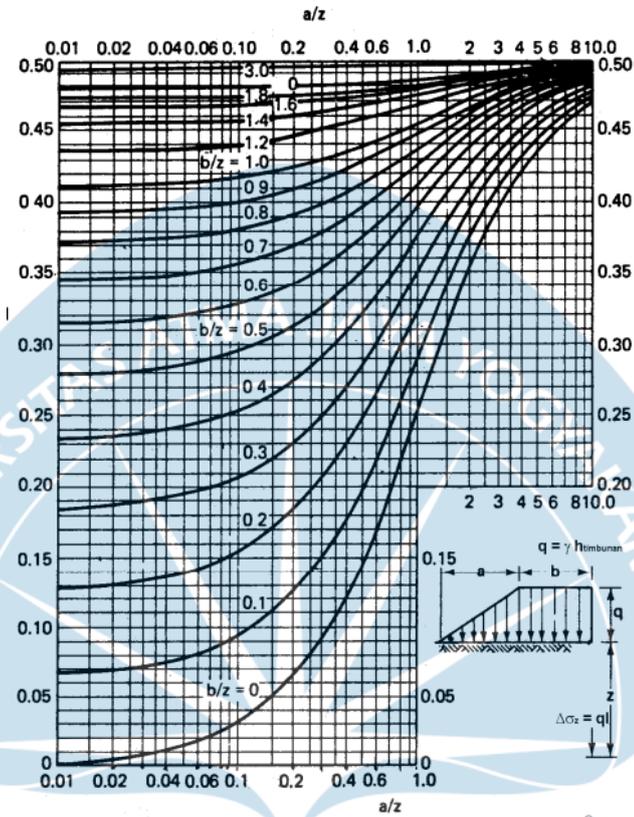
q = tekanan fondasi neto (fondasi di permukaan $q = q_n$) (kN/m^2).

E = modulus elastis tanah (kN/m^2).

$P_0 = z \cdot \gamma'$.

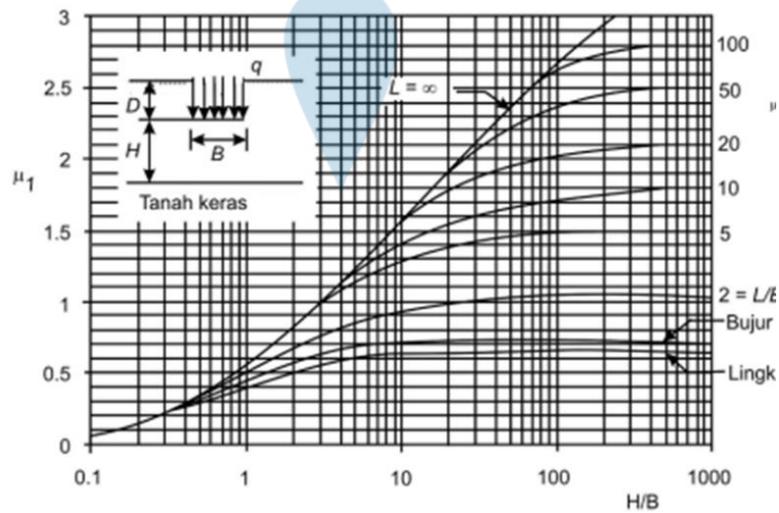
$$\Delta P = 2 \cdot I \cdot q$$

Nilai I merupakan faktor pengaruh beban titik. Faktor pengaruh beban titik pada Teori Boussinesq (1885) didefinisikan menggunakan grafik sebagai berikut:

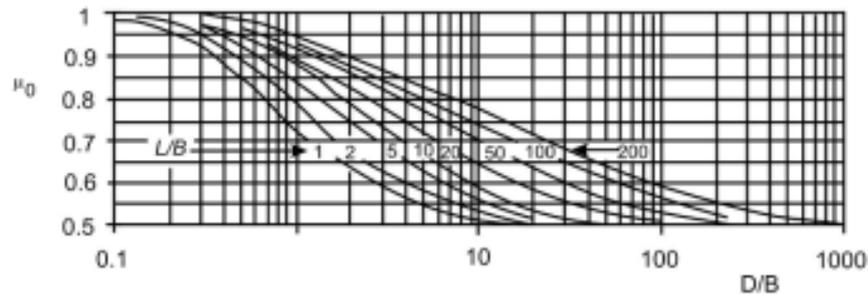


Gambar 1.16 Grafik Faktor Pengaruh Beban.

Untuk menentukan μ_1 & μ_0 dapat dilakukang dengan melihat grafik di bawah ini;



Gambar 1.17 Grafik Penentuan μ_1 .



Gambar 1.18 Grafik Penentuan μ_0 .

1.7.9. Stabilitas Lereng

Lereng adalah suatu bidang miring yang menghubungkan bidang-bidang lain yang mempunyai elevasi berbeda-beda. Pada dasarnya lereng dapat terbentuk secara alamin ataupun buatan campur tangan manusia. Secara umum lereng terbagi menjadi 3 bagian yang didasarkan pada jenisnya, yaitu:

1. Lereng alami

Lereng alami merupakan lereng yang terbentuk akibat proses-proses alamiah, misalnya lereng pada perbukitan.

2. Lereng buatan pada tanah asli

Lereng buatan pada tanah asli adalah lereng yang dibuat dengan memotong tanah sebagai pembuatan jalan ataupun saluran irigasi.

3. Lereng buatan dari tanah yang dipadatkan

Lereng buatan dari tanah yang dipadatkan biasanya dilakukan guna pembuatan tanggul atau bendungan urugan tanah.

Dari ketiga jenis lereng tersebut tidak menutup kemungkinan untuk terjadi kelongsoran pada tanah, karena tanah yang memiliki kemiringan atau tanah yang tidak rata dapat menyebabkan komponen gravitasi dari berat memiliki kecenderungan untuk menggerakkan tanah dari elevasi yang tinggi ke elevasi yang lebih rendah.

Lereng dikatakan stabil dan tidak stabil dinilai dari besarnya faktor aman (*safety factor, F*). Ray dan De Smitd (2009) menyarankan klasifikasi kesetabilan lereng ditunjukkan seperti pada tabel berikut:

Tabel 1.14 Kestabilan Lereng

Faktor Aman	Klasifikasi kestabilan lereng	Keterangan
$F > 1,5$	Stabil	Hanya gangguan besar dapat membuat ketidakstabilan
$1,25 < F < 1,25$	Kestabilan sedang	Gangguan ketidakstabilan sedang dapat membuat ketidakstabilan
$1 < F < 1,25$	Agak stabil	Gangguan ketidakstabilan minor dapat mengganggu stabilitas
$F < 1$	Tidak stabil	Memerlukan perbaikan stabilitas lereng

Sumber: Ray dan Ge Smitd (2009).

Stabilitas sangat tergantung pada kohesi (c) dan sudut gesek dalam tanah (φ). Pada umumnya jika tanah semakin kering maka faktor aman semakin tinggi, sedangkan jika tanah semakin jenuh maka faktor aman semakin rendah.

1.7.10. Perancangan Drainase

Drainase merupakan salah satu komponen dalam struktur jalan rel yang berfungsi untuk mengatur aliran air yang berada pada konstruksi jalan rel baik untuk mengatur aliran air di badan jalan rel maupun sebagai media kontrol atas kondisi air di bawah badan jalan rel. penggunaan dari drainase permukaan ini diatur dalam PM No.60 Tahun 2012 dan merupakan bagian dari konstruksi jalan rel bagian bawah.

Sesuai dengan PM No.60 Tahun 2012 disebutkan bahwa terdapat beberapa syarat untuk drainase sebagai berikut.

1. Kemiringan minimal dari struktur drainase sebesar 0,3% untuk meminimalkan endapan.
2. Diameter dari saluran pipa sebagai bagian dari saluran Sub-drainase adalah sebesar 15 cm agar mempermudah pembersihan.
3. Pada badan jalan berupa tanah timbunan, permukaan lapis dasar harus memiliki kemiringan 5% agar air dapat mengalir ke lereng.
4. Pada jalur ganda, diperlukan saluran di antara dua jalur (*U-ditch* atau *French Drain*).

5. Lapis dasar harus dapat menopang jalan rel dengan aman dan bagian terbawah dari fondasi harus memiliki jarak minimum 0,75 meter di atas muka air tanah tertinggi.

Perancangan drainase sendiri membutuhkan beberapa analisis dan harus sesuai dengan peraturan yang ada. Analisis drainase memiliki beberapa komponen penting dalam perancangannya. Perancangan dari saluran drainase yang baik harus memenuhi seluruh komponen yang ada tanpa terkecuali. Komponen yang dimaksud adalah sebagai berikut.

1. Drainase Permukaan

Drainase permukaan merupakan drainase berbentuk saluran dapat terbuka maupun tertutup yang berguna untuk mengatur aliran air pada konstruksi jalan rel. penggunaan saluran drainase permukaan dapat berbentuk saluran yang terbuat dari pasangan batu maupun terbuat dari beton bertulang.

2. Drainase Bawah Permukaan

Drainase bawah permukaan atau yang disebut sebagai sub-drainase merupakan saluran tertutup berupa pipa yang ditanam di dalam tanah untuk mengatur air yang ada di dalam tanah sehingga bagian bawah dari badan jalan rel dapat aman dari air tanah yang dapat berpengaruh terhadap kekuatan daya dukung tanah yang terjadi.

3. Analisis Curah Hujan Rencana

Hujan rencana merupakan prakiraan dari hujan yang akan terjadi dengan menggunakan data dari stasiun hujan. Data yang dibutuhkan dalam perhitungan hujan rencana adalah memerlukan data minimal sebanyak 10 tahun (2022, Buku Saku Petunjuk Konstruksi Drainase dan Irigasi Kementerian PUPR.) Data pada hujan rencana dapat diambil dari pusat data BMKG pada stasiun hujan terdekat. Ketika ditemui data hilang dapat dilakukan koreksi data dengan metode perbandingan normal menurut Bambang Triatmdjo (2010) dengan rumus sebagai berikut.

$$\frac{P_x}{N_x} = \frac{1}{n} \left(\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \dots + \frac{P_n}{N_n} \right)$$

Dengan :

P_x = hujan pada stasiun x.

- P_1, P_2, P_n = data hujan pada stasiun sekitarnya pada periode yang sama.
 N_x = hujan tahunan pada stasiun x.
 N_1, N_2, N_n = hujan tahunan di stasiun sekitar x.
 n = jumlah stasiun di sekitar x.

hasil dari perhitungan tersebut akan menghasilkan data $R_{maksimum}$ yang kemudian dihitung secara rata-rata dari kedua stasiun.

4. Analisis Frekuensi

Analisis frekuensi merupakan prakiraan terjadinya peristiwa maupun kejadian hidrologi pada masa lalu ataupun masa depan. Metode yang dapat digunakan dalam analisis frekuensi curah hujan adalah dengan menggunakan metode Gumbel (1941), Log Normal, dan Log Pearson III (2022, Buku Saku Petunjuk Konstruksi Drainase dan Irigasi Kementerian PUPR).

a. Metode Distribusi Gumbel (1941)

Metode Gumbel (1941) merupakan metode analisis distribusi dengan tahapan sebagai berikut.

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

$$X_T = \bar{x} + \frac{Y_T - Y_n}{\sigma_n} S_d$$

Dengan :

$\sum x_i$ = curah hujan maksimum rata-rata.

n = Banyak data tahun pengamatan.

S = Standar deviasi.

Y_n = *Reduced mean* .

Y_{Tr} = *Reduced variate*.

S_n = *Reduced standar seviation*.

σ_n = *Reduce standar deviasi*.

b. Metode Distribusi Log Normal

Metode distribusi log normal merupakan metode distribusi dengan menggunakan nilai logaritmik dengan langkah sebagai berikut.

$$\text{Log } X_T = \text{Log } \bar{X} + K_T \times S_d \cdot \text{Log } X$$

Dengan :

$\text{Log } X_T$ = Nilai log hujan rencana dengan periode ulang T tahun (mm).

$\text{Log } X$ = Nilai rata-rata dari $\text{Log } X_i$ (mm).

S = Standar deviasi dari $\text{Log } X$.

K_{Tr} = Koefisien frekuensi dari nilai C_s dengan Periode Ulang T.

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (\text{Log } x_i - \text{Log } \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)S^2}$$

c. Metode Distribusi Log Pearson III

Metode ini menggunakan analisis logaritmik dan perbedaannya dengan Log Normal adalah pada faktor frekuensi yang digunakan. Nilai-nilai pada metode distribusi Log Pearson III dapat dihitung dengan langkah sebagai berikut.

- 1) Mengubah data menjadi bentuk Logaritmik ($X = \text{Log } X$).
- 2) Menghitung rata-rata Logaritma.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

- 3) Hitung Simpangan Baku.

$$Sd = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{Log } X_t - \text{Log } \bar{X})^2}$$

- 4) Hitung koefisien kemenangan.

$$G = \frac{n \sum_{i=1}^n (\text{Log } X_t - \text{Log } \bar{X})^2}{(n-1)(n-2)Sd^3}$$

- 5) Hitung logaritma curah hujan dengan periode ulang 10 tahun.

$$\text{Log } X_T = \text{Log } \bar{X} + K \cdot Sd$$

Dengan :

$\text{Log } X$ = Rata-rata logaritma.

n = Banyak Tahun.

Sd = Standar deviasi.

G = Koefisien kemenangan.

K = Variabel standar untuk X berdasarkan koefisien kemiringan.

d. Uji Distribusi Probabilitas Metode Chi-Kuadrat

Uji Chi-Kuadrat merupakan salah satu uji komparatif yang dilakukan pada dua variabel di mana skala data kedua variabel adalah nominal (Sutrisno, 2000). Uji distribusi Chi-Kuadrat merupakan uji non parameteris yang sering digunakan. Adapun langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

- 1) Menghitung jumlah kelas yang ada dengan rumus.

$$K = 1 + 3,322 \text{ Log } n$$

Dengan :

K = Jumlah kelas.

n = Banyaknya data.

- 2) Membuat kelompok dari kelas sesuai dengan jumlah kelas.
 3) Menghitung frekuensi pengamatan $O_j = n/\text{jumlah kelas}$.
 4) Mencari besarnya curah hujan dalam batas kelas (E_j).
 5) Perhitungan dengan rumus.

$$X^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j}$$

Dengan :

X^2 = Parameter chi-kuadrat terhitung.

K = Jumlah kelas.

O_j = Frekuensi pengamatan kelas.

E_j = Frekuensi teoritis kelas.

- 6) Menentukan X^2 dengan menggunakan taraf signifikan beserta derajat kebebasan dengan rumus.
 7) Menentukan X^2 dengan menggunakan taraf signifikan dan derajat kebebasan.

$$Dk = K - (p + 1)$$

Dengan :

Dk = Derajat kebebasan.

K = Jumlah kelas.

P = Banyaknya parameter untuk Chi-Kuadrat (2).

- 8) Menyimpulkan hasil dari perbandingan antara hasil perhitungan dengan Chi Kritis dan harus memenuhi di mana Chi-Hitung < Chi-Kritis.

5. Analisis Debit Banjir Rencana

Debit banjir rencana adalah debit maksimum dari suatu sungai, atau saluran yang besarnya didasarkan kala ulang tertentu (Prosedur dan Instruksi Kerja Perhitungan Debit Banjir Rencana PUPR, 2011). Dalam perhitungannya dapat dilakukan dengan kala ulang, 1, 5, 10, 25, dan 50 tahun. Sebagai perhitungannya debit banjir rencana dapat dihitung dengan menggunakan rumus.

$$Q = \frac{1}{3,6} C.I.A$$

Dengan :

- Q = debit aliran air (m³/detik).
- C = koefisien pengaliran.
- I = intensitas curah hujan (mm/jam).
- A = luas daerah layanan (km²).

6. Intensitas Curah Hujan

Intensitas curah hujan adalah jumlah curah hujan yang dinyatakan dalam tinggi hujan atau volume hujan tiap satuan waktu, yang terjadi pada satu kurun waktu air hujan terkonsentrasi (Wesli, 2008). Besaran intensitas curah hujan ini sangat bervariasi tergantung dari posisi maupun pengaruh iklim pada suatu wilayah tertentu. Perhitungan pada intensitas curah hujan dapat menggunakan persamaan Mononobe. Persamaan dapat dilihat sebagai rumus berikut.

$$I = \frac{R}{24} \times \left[\frac{24}{tc} \right]^{2/3}$$

Dengan

- I = intensitas curah hujan (mm/jam).
- Tc = lamanya curah hujan (menit).
- R₂₄ = curah hujan maksimum dalam 24 jam.

7. Koefisien Pengaliran

Koefisien pengaliran merupakan koefisien yang besarnya tergantung dari permukaan tanah, kemiringan medan dan jenis tanah. Tabel yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 1.15 Koefisien Aliran

No.	Kondisi permukaan tanah	Koefisien pengaliran (C)
	Bahan	
1	Jalan beton & jalan aspal	0,70 – 0,95
2	Jalan kerikil & jalan tanah	0,40 – 0,70
3	Bahu jalan:	
	-Tanah berbutir halus	0,40 – 0,65
	-Tanah berbutir kasar	0,10 – 0,20
	-Batuan masif keras	0,70 – 0,85
	-Batuan masif lunak	0,60 – 0,75
	Tata Guna Lahan	
1	Daerah perkotaan	0,70 – 0,95
2	Daerah pinggir kota	0,60 – 0,70
3	Daerah industri	0,60 – 0,90
4	Permukiman padat	0,40 – 0,60
5	Permukiman tidak padat	0,40 – 0,60
6	Taman dan kebun	0,20 – 0,40
7	Persawahan	0,45 – 0,60
8	Perbukitan	0,70 – 0,80
9	Pegunungan	0,75 – 0,90

Sumber: Pedoman perencanaan sistem drainase (Departemen Pekerjaan Umum, 2006).

8. Daerah Tangkapan Air Hujan

Daerah tangkapan air hujan merupakan luas area yang menerima curah hujan dalam kurun waktu tertentu. Semakin besar daerah tangkapan air hujan maka akan semakin besar debit yang terjadi. Penentuan dari daerah tangkapan air adalah dengan menggunakan prinsip beda tinggi. Air yang mengalir dari tempat yang tinggi ke tempat yang lebih rendah. Untuk kawasan yang cenderung datar pembagian daerah tangkapan air hujan dapat diasumsikan terbagi rata pada tiap sisi menuju saluran drainase. Untuk daerah-daerah berbukit, penentuan daerah tangkapan air hujan berpatokan pada titik tertinggi yang kemudian akan mengalir ke tempat yang lebih rendah berdasarkan alur topografi (Nurhamidin, 2015).

9. Sistem Drainase

Perencanaan sistem drainase merupakan salah satu tahapan penentuan dari ukuran saluran drainase itu sendiri. Perencanaan ini membandingkan antara debit yang terjadi dengan debit yang tersedia pada sistem drainase. Perbandingan yang disyaratkan adalah $Q_{Hitung} < Q_{Rencana}$. Perhitungan perencanaan dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

- a. Luas Saluran Drainase.

$$F = b \times h$$

b. Keliling Drainase.

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

c. Jari-jari Hidrolis.

$$R = \frac{F}{P}$$

d. Angka kekasaran maning.

Tabel 1.16 Angka Kekasaran Manning (n)

No	Tipe Saluran	Baik Sekali	Baik	Sedang	Jelek
Saluran Buatan					
1.	Saluran tanah, lurus teratur	0,017	0,020	0,023	0,025
2.	Saluran tanah yang dibuat dengan <i>excavator</i>	0,023	0,028	0,030	0,040
3.	Saluran pada dinding batuan, lurus, teratur	0,020	0,030	0,033	0,035
4.	Saluran pada dinding batuan, tidak lurus, tidak teratur	0,035	0,040	0,045	0,045
5.	Saluran batuan yang diledakkan, ada tumbuh-tumbuhan	0,025	0,030	0,035	0,040
6.	Dasar saluran dari tanah, sisi saluran berbatu	0,028	0,030	0,033	0,035
7.	Saluran lengkung, dengan kecepatan aliran rendah	0,020	0,025	0,028	0,030
Saluran Alam					
8.	Bersih, lurus, tidak berpasir dan tidak berlubang	0,025	0,028	0,030	0,033
9.	Seperti no.8 tapi ada timbunan atau kerikil	0,030	0,033	0,035	0,040
10.	Melengkung, bersih, berlubang dan berinding pasir	0,030	0,035	0,040	0,045
11.	Seperti no.10, dangkal, tidak teratur	0,040	0,045	0,050	0,055
12.	Seperti no.10, berbatu dan ada tumbuh-tumbuhan	0,035	0,040	0,045	0,050
13.	Seperti no.11, sebagian berbatu	0,045	0,050	0,055	0,060
14.	Aliran pelan, banyak tumbuh-tumbuhan dan berlubang	0,050	0,060	0,070	0,080
15.	Banyak tumbuh-tumbuhan	0,075	0,100	0,125	0,150
Saluran Buatan, Beton, atau Batu Kali					
16.	Saluran pasangan batu, tanpa penyelesaian	0,025	0,030	0,033	0,035
17.	Seperti no.16, tapi dengan penyelesaian	0,017	0,020	0,025	0,030
18.	Saluran beton	0,014	0,016	0,019	0,021
19.	Saluran beton halus dan rata	0,010	0,011	0,012	0,013
20.	Saluran beton pracetak dengan acuan baja	0,013	0,014	0,014	0,015
21.	Saluran beton pracetak dengan acuan kayu	0,015	0,016	0,016	0,018

Sumber: Pedoman perencanaan sistem drainase (Departemen Pekerjaan Umum, 2006).

e. Kecepatan.

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times i^{1/2}$$

f. Kapasitas Rancangan Saluran.

$$Q = F \times V$$

10. Tinggi Jagaan

Tinggi jagaan merupakan jarak antara muka air rencana dengan bagian atas dari saluran drainase yang direncanakan. Tinggi jagaan menurut Anggrahini, 1997 dirangkum dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 1.17 Tinggi Jagaan Minimal Saluran Pembuangan

Debit (m ³ /dtk)	Tinggi jagaan (m)
< 0,5	0,20
0,5 – 1,5	0,20
1,5 – 5,0	0,25
5,0 – 10,0	0,30
10,0 – 15,0	0,40
> 15,0	0,50

Sumber: Anggrahini, 1997.

Tinggi jagaan memiliki hubungan yang erat dengan ukuran drainase yang digunakan dan juga bergantung dengan debit air yang direncanakan. Tinggi jagaan dapat didapatkan dari persamaan berikut.

$$Tinggi\ Jagaan = h - \left(\frac{Q_{10}}{b \cdot v_{rencana}} \right)$$

11. Ukuran Pipa Sub-Drainase

Ukuran pipa Sub-drainase yang disyaratkan dalam PM No.60 adalah dengan menggunakan pipa dengan ukuran minimal sebesar 15cm. hal ini akan berpengaruh terhadap jarak antar pipa. Semakin besar pipa maka akan semakin besar juga jarak antar pipa yang dibutuhkan.

12. Laju Infiltrasi

Laju infiltrasi adalah banyaknya jumlah air yang masuk ke dalam tanah melalui permukaan tanah dalam waktu tertentu (Maghfiroh, 2020). Laju infiltrasi dapat dinyatakan dalam millimeter per jam maupun dalam meter per hari.

13. Koefisien Permeabilitas

Koefisien permeabilitas merupakan kecepatan rembesan air dalam tanah. Nilai yang ada diatur dalam Pedoman Perencanaan Teknis Drainase Bawah Permukaan oleh Kementerian PUPR. Sebagian nilai estimasi sesuai dengan buku pedoman dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

Tabel 1.18 Estimasi Nilai Permeabilitas

Klasifikasi Visual	Permeabilitas k (m/detik)
Kerikil bersih	> 0,01
Pasir bersih dan campuran bersih pasir dan kerikil	$10^{-5} < k < 0,01$
Pasir sangat halus, lanau; campuran pasir, lanau, dan lempung; <i>glacial tills</i> ; lempung berlapis (<i>stratified clays</i>)	$10^{-9} < k < 10^{-5}$
Tanah kedap, lempung utuh dan homogen di bawah zona pelapukan	$k > 10^{-9}$
Tanah kedap, termodifikasi oleh vegetasi, pelapukan, <i>fissured</i> , lempung terkonsolidasi berlebih (<i>overconsolidated</i>)	$\approx 5 \times 10^{-8} < k < \approx 5 \times 10^{-5}$

Sumber : Pedoman Perencanaan Teknis Drainase Bawah Permukaan oleh kementerian PUPR

14. Persamaan Hooghoudt

Persamaan Hooghoudt (1994) merupakan persamaan yang digunakan untuk mengetahui berbagai parameter dari konstruksi pipa di dalam tanah. Persamaan tersebut melibatkan jarak antar pipa, laju infiltrasi, koefisien permeabilitas, tinggi air di tengah pipa pada kondisi stabil, dan kedalaman equivalen. Persamaan Hooghoudt dapat dilihat dalam persamaan berikut.

$$S^2 = \frac{4k_a h^2}{q} + \frac{4k_b d_e h}{q}$$

Dengan keterangan sebagai berikut :

S = Jarak antar pipa.

q = laju infiltrasi.

ka = koefisien permeabilitas di atas pipa.

kb = koefisien permeabilitas di bawah pipa.

h = tinggi air ditengah jarak antara kedua pipa pada kondisi stabil.

de = kedalaman equivalen.

Dengan kedalaman equivalen yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

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

Dengan keterangan sebagai berikut :

S = Jarak Antar Pipa.

r₀ = Diameter Pipa.

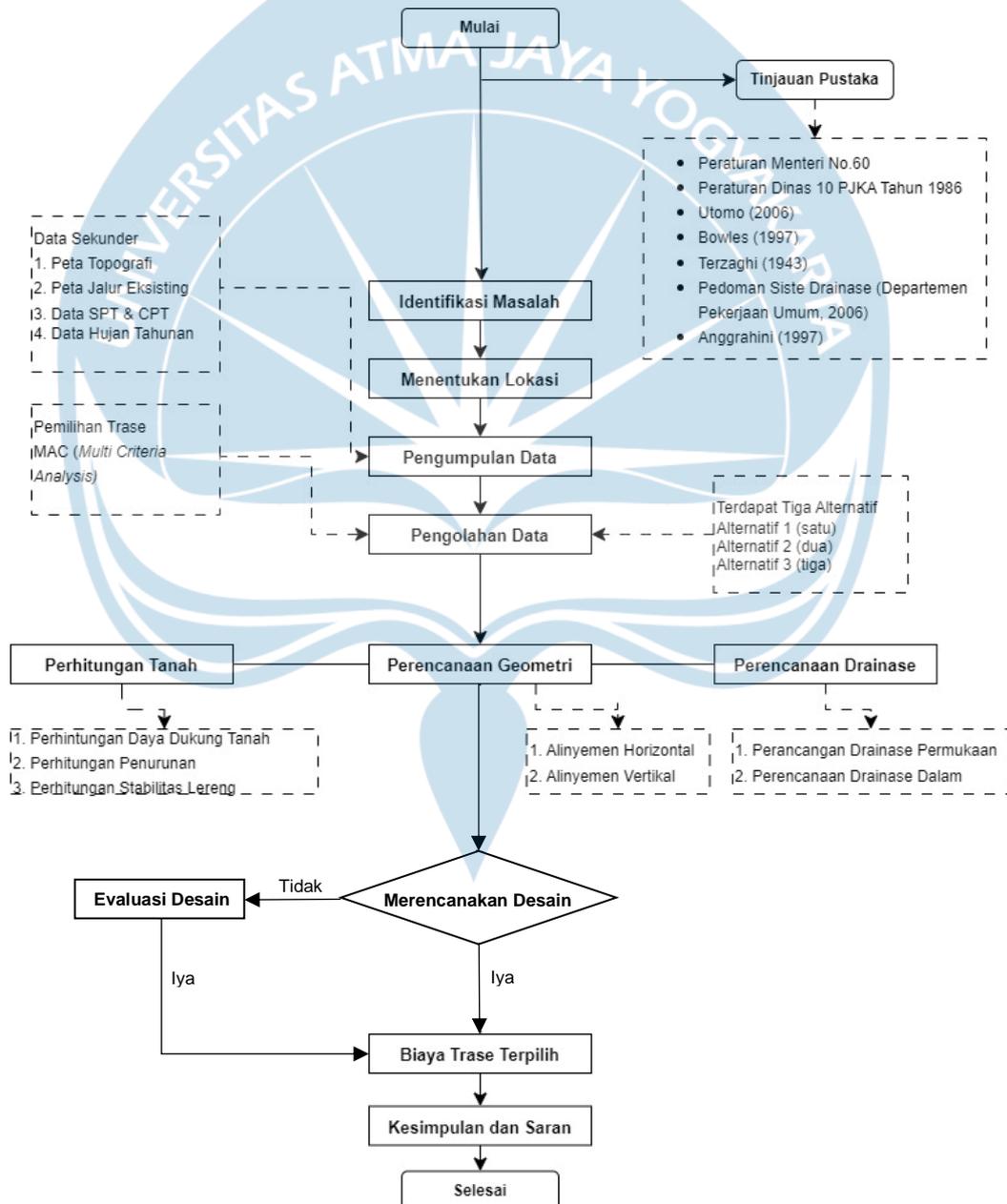
Penggunaan persamaan tersebut harus menggunakan metode uji coba sehingga akan ditemukan nilai yang sesuai.

1.8 Metodologi

Bab ini berisi tentang penjelasan tata cara atau metode yang digunakan dalam melakukan pengerjaan tugas akhir perancangan jalan rel.

1.8.1. Diagram Alir

Diagram Alir merupakan diagram yang berisi tentang tata urutan atau langkah-langkah perencanaan jalan rel dari awal sampai akhir.



1.8.2. Identifikasi Masalah

Melakukan perumusan masalah yang sesuai dengan kondisi saat ini serta merencanakan untuk mencari solusi dari permasalahan tersebut. Perancangan jalan rel kereta api membutuhkan perancangan yang mendetail seperti perancangan geometri, perancangan struktur jalan rel, analisis perhitungan tanah, analisis perancangan drainase, dan analisis biaya.

1.8.3. Menentukan Lokasi

Pada langkah menentukan lokasi, lokasi ditentukan berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 11 tahun 2012 tentang tata cara penetapan trase jalur kereta api dan Peraturan Dinas No.10 tahun mengenai perencanaan konstruksi jalan rel. penentuan lokasi trase jalur kereta api juga memperhatikan beberapa faktor, faktor-faktor tersebut mencakup;

1. Kondisi geografi.
2. Kebutuhan transportasi.
3. Potensi pertumbuhan ekonomi.
4. Potensi bencana alam.

1.8.4. Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan dalam perancangan trase meliputi.

1. Peta topografi, diperlukan untuk mengetahui kontur dan tata guna lahan.
2. Peta jalur eksisting, digunakan untuk penentuan geometri trase jalan rel kereta api.
3. Data estimasi harga, digunakan untuk melakukan perhitungan estimasi biaya awal pembangunan trase jalan rel kereta api.
4. Data *Standard Penetration Test*, digunakan untuk melakukan perhitungan tanah berupa daya dukung dan penurunan pada tanah.
5. Data *Cone Penetration Test*, digunakan untuk melakukan perhitungan tanah berupa daya dukung tanah.
6. Data curah hujan tahunan, digunakan untuk mengetahui debit air yang terjadi pada trase rencana jalan rel kereta api.

1.8.5. Pengolahan Data

Pengolahan data mencakup pemilihan trase dengan membuat 3 trase alternatif yang kemudian dipertimbangkan aspek topografi, keadaan trase, panjang trase, kebutuhan trase dengan metode *Multi Criteria Analysis* sehingga akan ditemukan trase terpilih yang kemudian akan digunakan untuk perhitungan lebih lanjut.

1.8.6. Perencanaan Geometri

Perhitungan geometri jalan rel merupakan salah satu perancangan geometri yang meliputi:

1. Alinyemen horzontal.
2. Alinyemen vertikal.

1.8.7. Perhitungan Tanah

Perhitungan tanah pada perancangan jalan rel kereta api Kudus-Pati meliputi perhitungan dari:

1. Perhitungan daya dukung tanah.
2. Perhitungan penurunan.
3. Perhitungan Stabilitas Lereng.

1.8.8. Perencanaan Drainase

Perancangan drainase pada perancangan jalan rel kereta api Kudus-Pati meliputi perancangan dari:

1. Perancangan Drainase Permukaan.
2. Perancangan Drainase Dalam.

1.8.9. Merencanakan Desain

Dilakukan perancangan desain trase sesuai dengan pedoman peraturan yang berlaku. Dilakukan untuk mengetahui bentuk trase, dimensi, kebutuhan trase, dan kesesuaian trase dengan peraturan menggunakan data yang telah didapatkan.

1.8.10. Evaluasi Desain

Fungsi dari evaluasi desain adalah untuk mengevaluasi apakah desain trase telah sesuai dengan persyaratan-persyaratan yang berlaku meliputi persyaratan teknis, integrasi jaringan, dan sosial. Evaluasi juga digunakan untuk memastikan bahwa trase yang didesain efektif, efisien, aman, dan nyaman.

1.8.11. Gambar Rencana

Setelah semua faktor terpenuhi, perencanaan trase digambar menggunakan aplikasi Civil 3D dan Autocad. Hasil dari gambar perencanaan ini berupa Plan Profil, gambar trase jalan rel, diagram galian-timbunan, gambar potongan struktur jalan rel, gambar dimensi dan peletakan drainase.

1.8.12. Biaya Trase Terpilih

Perhitungan analisis biaya trase terpilih dilakukan untuk mengetahui estimasi biaya total guna menghitung kelayakan secara finansial dan secara ekonomi pada trase terpilih serta untuk melakukan perhitungan lama waktu pengembalian estimasi biaya awal.

1.8.13. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan adalah hasil akhir dari perancangan, pengolahan, dan analisis data yang sudah direncanakan.