

**Perencanaan Jalur Ganda (*Double Track*) Jalan Rel
Ruas Semarang – Gubug
*Design of Double Track Railway of Semarang – Gubug Segment***

Christianto Pancara Adi¹, Erha Intan Sukmajati¹, Siti Hardiyati²,
Sri Prabandiyani R.W³,

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Diponegoro

ABSTRAK

Berdasarkan Rencana Induk Perkeretaapian Nasional (RIPNAS) Direktorat Jenderal Perkeretaapian Kementerian Perhubungan (2011), pada tahun 2030, peningkatan jumlah perjalanan orang menggunakan moda kereta api di Pulau Jawa sebesar 858,5 juta orang/tahun dan perjalanan barang di Pulau Jawa sebesar 534 juta ton/tahun. Oleh karena itu, pemerintah berencana untuk mengembangkan jaringan jalan rel di Jawa dengan program *Double Track* atau jalur ganda agar dicapai pelayanan yang optimal, antara lain pengembangan jalur tunggal menjadi jalur ganda antara Stasiun Semarang Tawang di Semarang dan Stasiun Gubug di Grobogan.

Dari hasil perencanaan didapat penempatan trase jalur ganda di sisi kanan trase eksisting dari arah Semarang ke Gubug dimana ketersediaan lahan terbuka lebih banyak dengan elevasi track baru setinggi elevasi track eksisting. Konstruksi jalan rel sesuai kelas jalan rel I dengan tipe rel R54, penambat elastis ganda Pandrol tipe e-clip dengan *rubber pad*, bantalan beton pratekan tipe N-67 produksi PT.WIKA Beton, ketebalan balas atas 30 cm, balas bawah setebal 15 cm. Tubuh jalan rel *double track* lebih banyak terletak pada posisi timbunan dengan tinggi antara 30 cm hingga 165 cm menggunakan perkuatan penahan tanah. Pematasan permukaan berupa saluran samping dengan penampang persegi panjang dari beton bertulang.

Kata Kunci: *Double Track*, Semarang - Gubug, Pemilihan Trase, Konstruksi Jalan Rel

ABSTRACT

Based on National Railways Master Plan (RIPNAS) of Directorate General of Railways Ministry of Transportation (2011), in 2030, number of railway passengers in Java increased in the amount of 858.5 million people / year and freight in Java amounted to 534 million tons / year. Therefore, the government planed to develop the railway network in Java with Double Track program or multiple pathways in order to achieve optimal service, the development of a single track to double track between Semarang Tawang Station in Semarang until Gubug station in Grobogan were included.

From the design performed, the double track alignment will be placed on the right side of the existed alignment in direction from Semarang to Gubug where there are more open land availability, with the new lines elevation as high as the existed lines elevation. Railway constructed in accordance with the first class railway classification with R54 rails type, double elastic's fastening system using Pandrol e-clip type with rubber pad, PT.WIKA Beton prestressed concrete sleepers N-67 type , upper ballast thickness of 30 cm and 15 cm thick sub ballast. Double track railway's subgrade situated more on the fill positions between 30 cm to 165 cm height using retaining wall reinforcement. Side channel surface drainage with a rectangular cross section from reinforced concrete.

keywords: Double Track, Semarang - Gubug, Alignment, Railway Construction

1. Mahasiswa S1 Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro.
2. Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro.
3. Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro.

I. PENDAHULUAN

A. Latar belakang

Peningkatan perjalanan penumpang dan barang kereta api membutuhkan ketersediaan prasarana dan sarana yang mampu mendukung terselenggaranya pelayanan kereta api yang optimal. Panjang jalan kereta api yang beroperasi tahun 2009 sepanjang 4.684 km (P. Jawa sepanjang 3.464 Km dan P. Sumatera sepanjang 1.350 Km) belum cukup untuk memenuhi permintaan perjalanan tersebut.

Dengan jalur tunggal yang ada sekarang sering terjadi penundaan kereta yang menyebabkan keterlambatan kedatangan maupun keberangkatan kereta. Oleh karena itu, pemerintah berencana untuk mengembangkan jaringan jalan rel di Jawa dengan program *double track* atau jalur ganda antara lain pengembangan jalur tunggal menjadi jalur ganda lintas utara (Cirebon – Semarang – Bojonegoro – Surabaya) agar dicapai pelayanan yang optimal. (Ditjen Perkeretaapian, 2011).

B. Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari perencanaan jalur ganda jalan rel ruas Semarang - Gubug adalah merencanakan letak trase jalan kereta api jalur ganda yang baik dan efisien berdasarkan pertimbangan trase eksisting jalur tunggal. Mendesain struktur jalan rel mulai dari pemilihan profil rel, dimensi dan jarak bantalan hingga balas, untuk track lurus, dan tikungan. Merencanakan perbaikan tanah dan kontrol stabilitas atau kelongsoran pada timbunan dan galian yang dilewati struktur jalan rel tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Klasifikasi Jalan Rel

Jalan rel diklasifikasikan berdasarkan daya angkut lintas per tahunnya (Tabel 1).

Tabel 1. Klasifikasi Jalan Rel

Klasifikasi Jalan KA	Pasing Ton Tahunan (Juta Ton)	Perencanaan Kecepatan KA Maksimum V_{max} (km/jam)	Tekanan Gandar P max (ton)	Tipe Rel	Tipe dari Bantalan Jarak Bantalan (mm)	Tipe Alat Penambat	Tebal balas dibawah Bantalan (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
1	> 20	120	18	R60 / R54	<u>Beton</u> 600	EG	30	50
2	10 – 20	110	18	R54 / R50	<u>Beton/Kayu</u> 600	EG	30	50
3	5 – 10	100	18	R54/ R50/ R42	<u>Beton/Kayu/Baja</u> 600	EG	30	40
4	2,5 – 5	90	18	R54/ R50/ R42	<u>Beton/Kayu/Baja</u> 600	EG/ET	25	40
4	< 2,5	80	18	R42	<u>Kayu/Baja</u> 600	ET	25	35

(Sumber: PJKA, 1986)

Daya angkut lintas adalah jumlah angkutan anggapan yang melewati suatu lintas dalam jangka waktu satu tahun. Daya angkut lintas dihitung dengan Persamaan (1):

$$T = 360 \times S \times TE \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

TE = tonase ekivalen (ton/hari)

$$TE = T_p + (K_b \times T_b) + (K_l \times T_l)$$

T_p = tonase penumpang dan kereta harian

T_b = tonase barang dan gerbong harian

T_l = tonase lokomotif harian

$S = 1,1$ untuk lintas kereta api penumpang dengan kecepatan maksimum 120 km/jam

$S = 1,0$ untuk lintas tanpa kereta penumpang

K_l = koefisien yang besarnya = 1,4

Kb = Koefisien yang besarnya bergantung pada beban gandar

Kb = 1,5 untuk beban gandar < 18 ton

Kb = 1,3 untuk beban gandar > 18 ton

Kecepatan rencana adalah kecepatan yang digunakan untuk merencanakan konstruksi jalan rel dihitung dengan Persamaan (2).

$$V_{\text{rencana}} = 1,25 \times V_{\text{maks}} \dots\dots\dots(2)$$

B. Ruang Bebas

Ruang bebas adalah ruang di atas sepur yang senantiasa harus bebas dari segala rintangan dan benda penghalang, ruang ini disediakan untuk lalu lintas rangkaian kereta api. Untuk jalur ganda, jarak antar sumbu untuk jalur lurus dan lengkung sebesar 4,00 m. Pertimbangan penentuan trase meliputi:

1. Jarak terhadap pusat pemukiman.
2. Sedikit mungkin melintasi pemukiman.
3. Sedikit mungkin melakukan pekerjaan *cut and fill*.

C. Pembebanan

Beban dinamis (Pd) diperoleh dari perkalian faktor dinamis (Ip) terhadap beban statis (Ps), Persamaan (3).

$$Pd = Ps \times Ip \dots\dots\dots(3)$$

dimana,

$$Ip = 1 + 0,01 \left(\frac{V}{1,609} - 5 \right)$$

V = kecepatan rencana kereta api (km/jam)

D. Geometrik

Geometri jalan rel direncanakan berdasar pada kecepatan rencana serta ukuran-ukuran kereta yang melewatinya dengan memperhatikan faktor keamanan, kenyamanan, ekonomi dan kesertaan dengan lingkungan sekitarnya.

- **Lengkung Lingkaran**

Dua bagian lurus yang perpanjangannya saling membentuk sudut harus dihubungkan dengan lengkung berbentuk lingkaran, dengan atau tanpa lengkung-lengkung peralihan. Untuk berbagai kecepatan rencana, besar jari-jari minimum yang diijinkan adalah seperti tercantum dalam

Tabel 2. Tabel Persyaratan Perencanaan Lengkungan

Kecepatan rencana (km/jam)	Jari-jari minimum lengkung lingkaran tanpa lengkung peralihan (m)	Jari-jari minimum lengkung lingkaran yang diijinkan 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: PJKA, 1986)

Dengan peninggian maksimum, $h_{\text{maks}} = 110 \text{ mm}$,

$$R_{\text{min}} = 0,054V^2 \dots\dots\dots(4)$$

jika tidak ada peninggian yang harus dicapai ($h=0$)

$$R = 0,164 V^2 \dots\dots\dots(5)$$

dimana:

R = Jari-jari lengkung horizontal (m)

V = Kecepatan rencana (km/jam)

- Lengkung Peralihan

Lengkung peralihan adalah suatu lengkung dengan jari-jari yang berubah beraturan.

Panjang minimum dari lengkung peralihan ditetapkan dengan Persamaan (6):

$$L_h = 0,01 h.v \dots\dots\dots(6)$$

Dimana,

L_h = panjang minimal lengkung peralihan.

h = pertinggian relatif antara dua bagian yang dihubungkan (mm).

v = kecepatan rencana untuk lengkungan peralihan (km/jam)

- Peninggian Rel

Peninggian rel dihitung menggunakan Persamaan (7) dan Persamaan (8).

$$h_{normal} = 5,95 \frac{v^2}{R} \dots\dots\dots(7)$$

Dengan batas-batas,

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

$$h_{minimum} = 8,8 \frac{v^2}{R} - 53,5 \dots\dots\dots(8)$$

Alur Perhitungan Lengkung Horisontal

Untuk merencanakan suatu lengkung diperhitungkan bagian-bagian lengkung seperti terlihat dalam Gambar 1 dengan menggunakan Persamaan (9) s/d Persamaan (19).

$$L_h = L_s = 0,01 . v . h \dots\dots\dots(9)$$

$$\theta_s = \frac{90 \cdot L_s}{\pi \cdot R} \dots\dots\dots(10)$$

$$\theta_c = \Delta_s - 2\theta_s \dots\dots\dots(11)$$

$$L_c = \frac{\theta_c}{360} - 2 \cdot \pi \cdot R \dots\dots\dots(12)$$

$$L = 2L_s + L_c \dots\dots\dots(13)$$

$$X_c = L_s - \frac{L_s^3}{40 \cdot R^2} \dots\dots\dots(14)$$

$$Y_c = \frac{L_s^2}{6 \cdot R} \dots\dots\dots(15)$$

$$p = Y_c - R (1 - \cos \theta_s) \dots\dots\dots(16)$$

$$k = X_c - R \sin \theta_s \dots\dots\dots(17)$$

$$T_s = (R + p) \tan \frac{\Delta_s}{2} + k \dots\dots\dots(18)$$

$$E_s = (R + p) \sec \frac{\Delta_s}{2} - R \dots\dots\dots(19)$$

dimana:

PI = titik perpotongan garis tangen utama

R = jari-jari lengkung lingkaran

l = panjang busur spiral dari TS ke suatu titik sembarang

L_h = L_s = panjang lengkung peralihan

Tt = jarak dari MBA ke PI

Es = panjang eksternal total dari PI ke tengah busur lingkaran

Lc = panjang lengkung lingkaran

k = jarak dari MBA ke titik proyeksi pusat lingkaran pada tangen

p = jarak dari busur lingkaran tergeser terhadap garis tangen

Δ_s = sudut pertemuan antara tangen utama

θ_s = sudut lengkung peralihan

θ_c = sudut lengkung lingkaran

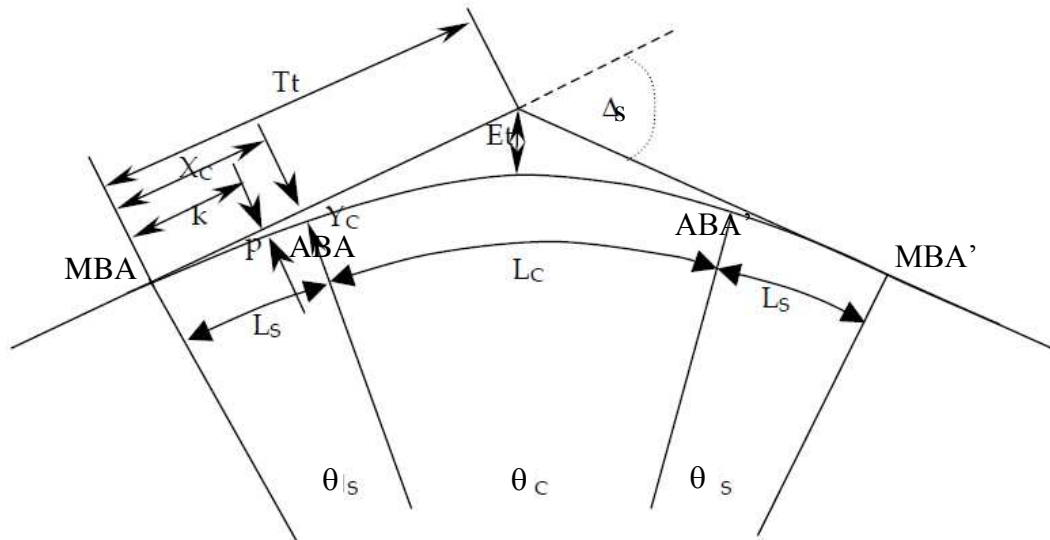
Sta MBA = Mulai busur alih = PI - Tt

Sta ABA = Awal busur alih = MBA + L_s

Sta ABA' = MBA + L_s + L_c

Sta MBA' = MBA + L_s + L_c + L_s

Menggambar proyeksi lengkung horizontal:



Gambar 1. Lengkung Horizontal

E. Rel

Dalam perhitungan perencanaan dimensi rel digunakan konsep "beam on elastic foundation". Secara umumnya, alur perhitungan dimensi rel menggunakan Persamaan (3) s/d Persamaan (23):

1. Menghitung beban dinamis
2. Menghitung *damping factor*

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EIx}} \dots\dots\dots(20)$$

3. Menghitung momen maksimum

$$Mm = \frac{Pd}{4\lambda} \dots\dots\dots(21)$$

4. Tinjauan terhadap tegangan ijin kelas jalan

$$\sigma' = \frac{M1.y}{Ix} \dots\dots\dots(22)$$

5. Tinjauan terhadap tegangan yang terjadi di dasar rel

$$S_{base} = M1/Wb \dots\dots\dots(23)$$

dimana,

- Pd = beban dinamis roda (kg)
- P = beban statis (kg)
- V_{rencana} = 1.25 x Vmaks
- λ = *damping factor*
- k = modulus elastisitas jalan rel
- Ix = momen inersia rel pada sumbu x – x
- E = modulus elastisitas rel
- Mm = momen maksimum
- σ' = tegangan yang terjadi
- y = jarak tepi bawah rel ke garis netral
- M1 = 0,85 Mo akibat super posisi beberapa gandar
- S_{base} = tegangan di dasar rel
- Wb = tahanan momen dasar rel

Menurut panjangnya dibedakan tiga jenis rel, yaitu:

1. Rel standar, panjangnya 25 meter.
2. Rel pendek, panjangnya maksimal 100 m.
3. Rel panjang, panjang minimumnya tercantum pada Tabel 3.

Tabel 3. Panjang Minimum Rel Panjang

Jenis bantalan	Tipe Rel			
	R 42	R. 50	R.54	R. 60
Bantalan kayu	325 m	375 m	400 m	450 m
Bantalan beton	200 m	225 m	250 m	275 m

(Sumber: PJKA, 1986)

Panjang ℓ (bagian rel yang memuai dan menyusut) dapat dihitung dengan Persamaan (24).

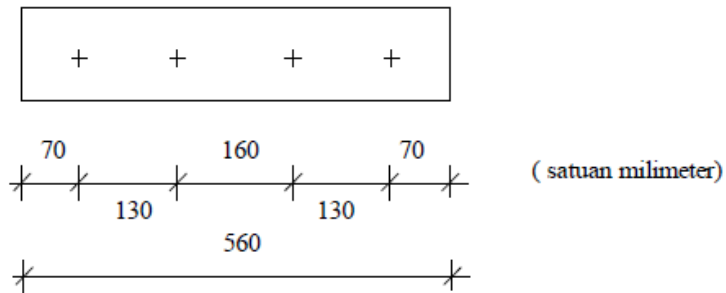
$$\ell = O M = \frac{E \alpha A \Delta T}{r} \dots \dots \dots (24)$$

panjang minimum rel panjang digunakan Persamaan (25).

$$L \geq 2 \ell \dots \dots \dots (25)$$

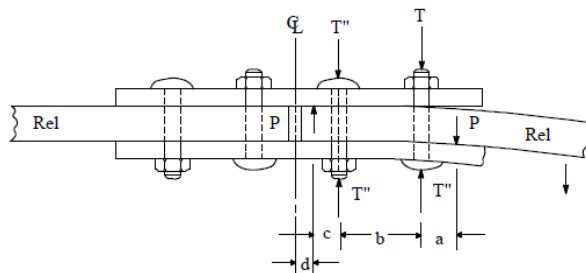
dimana:

- ΔL = Pertambahan panjang (m)
- L = Panjang rel (m)
- α = Koefisien muai panjang ($^{\circ} C^{-1}$)
- ΔT = Kenaikan temperature ($^{\circ} C$)
- E = modulus elastisitas *Young* (kg/cm^2)
- A = luas penampang (cm^2)



Gambar 2. Pelat Penyambung untuk Rel R.42, R.50 dan R.54. \varnothing Lubang 24mm Tebal Pelat 20mm. Tinggi Disesuaikan dengan Masing-masing Rel.

(Sumber: PJKA, 1986)



Gambar 3. Gaya-gaya pada Baut Pelat Penyambung

(Sumber: PJKA, 1986)

Baut dan pelat penyambung (Gambar 2), harus kuat menahan gaya-gaya pada baut dan pelat penyambung (Gambar 3) yang dihitung menggunakan Persamaan (26) s/d Persamaan (31).

$$N_o = 75\% A_c \cdot \sigma \dots \dots \dots (26)$$

$$T = 0,5 \cdot N_o \dots \dots \dots (27)$$

$$H = Q \cdot \tan \alpha \dots \dots \dots (28)$$

$$H = T + T'' \dots \dots \dots (29)$$

$$M = M_1 + M_2 = Q \cdot a + m \cdot Q \cdot h \dots \dots \dots (30)$$

$$\sigma = M / W \dots \dots \dots (31)$$

dimana,

σ = tegangan yang terjadi (kg/cm^2)

- b = tebal pelat
- W = momen kelembaman (cm^3) = $1/6 * b * h^2$
- Q = tekanan rel pada pelat penyambung
- m = koefisien geser maks
- h = jarak vertikal garis gaya geser
- No = kekuatan baut
- T = Kekuatan baut akibat beban bolak-balik
- H = gaya lateral yang bekerja di tengah-tengah pelat penyambung
- T'' T''' = gaya tarik baut sebelah luar dan dalam
- M = momen total arah lateral.

Di sambungan rel harus ada celah untuk menampung timbulnya perubahan panjang rel akibat perubahan suhu. Perpanjangan rel akibat adanya perubahan suhu dihitung menggunakan Persamaan (32):

$$G = \frac{E * A * \alpha * (50 - T)^2}{2r} + 2 \dots\dots\dots(32)$$

dimana:

- E = Modulus elastisitas rel (kg/cm^2)
- A = Luas penampang rel (cm^2)
- α = Koefisien muai rel ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- r = gaya lawan bantalan per satuan panjang (kg/m)
- T = suhu pemasangan ($^{\circ}\text{C}$)

F. Penambat rel

Penambat rel adalah suatu komponen yang menambatkan rel pada bantalan sedemikian rupa sehingga kedudukan rel adalah tetap, kokoh dan tidak bergeser. Jenis penambat terdiri dari penambat elastik dan penambat kaku (mur & baut, paku rel, dan tirepon). Penambat elastis terdiri dari penambat elastis tunggal (dolken, DE clip, pandrol, nabla, F clip, dan KA klip) dan elastis ganda (penambat elastis tunggal ditambah alas karet/ *rubber pad*). Penambat dirancang untuk mampu menahan gaya rangkak/*creep* rel (F) yang terjadi akibat pemuaian yang ditentukan dengan Persamaan

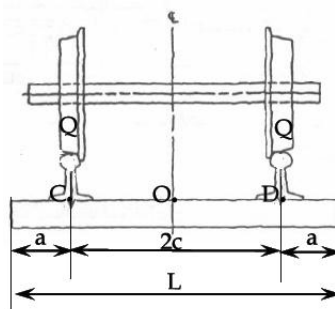
$$F = E * A * \alpha * \Delta T \dots\dots\dots(33)$$

dimana :

- E = modulus elastisitas *Young* (kg/cm^2)
- A = luas penampang (cm^2)
- α = Koefisien muai panjang ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- ΔT = Kenaikan temperature ($^{\circ}\text{C}$)

G. Bantalan

Bantalan berfungsi meneruskan beban dari rel ke balas, menahan lebar sepur dan stabilitas kearah luar jalan rel.



Gambar 4. Titik Perhitungan Momen Bantalan
(Sumber: PJKA, 1986)

Perhitungan Momen tepat dibawah kaki rel (titik C dan D) dengan Persamaan (34):

$$M = \frac{q}{4\lambda} x \frac{1}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \left[2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda l) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda l) \right] - \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda l) - \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c + \sin \lambda l) \dots (34)$$

perhitungan momen di tengah bantalan (titik o) dalam Persamaan (35):

$$M = \frac{-q}{2\lambda} x \frac{1}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \left[\frac{\sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda(l-c)) + \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda(l-c))}{+ \cosh \lambda c \cos \lambda(l-c) - \cos \lambda c \cosh \lambda(l-c)} \right] \dots (35)$$

Perhitungan jarak maksimum bantalan (ℓ) berdasarkan momen menggunakan Persamaan

$$M_{maks} = 1/8 * q * \ell^2 + 1/4 * P * \ell \dots (36)$$

dimana,

$$M_{maks} = \sigma^- * W$$

$$W = I_x/y$$

q = beban bantalan

P = Pd = Beban dinamis yang bekerja pada rel

I_x = momen inersia sumbu x rel

y = jarak dari tepi bawah rel ke sumbu utama rel

σ⁻ = Tegangan Ijin rel

H. Balas

Fungsi Utama balas adalah untuk:

1. Meneruskan dan menyebarkan beban bantalan ke tanah dasar
2. Mengokohkan kedudukan bantalan
3. Mematiskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air di sekitar bantalan rel.

Lapisan balas atas terdiri dari batu pecah yang keras, dengan bersudut tajam (*angular*) dengan salah satu ukurannya antara 0,75-2,5 inch dengan gradasi pada Tabel 4.

Tabel 4. Gradasi Balas Atas

Ukuran nominal (inch)	Persen lolos saringan							
	Ukuran saringan (inch)							
	3	2.5	2	1.5	1	0.75	0.5	3/8
2.5-0.75	100	90-100	25-60	25-60		0-10	0-5	
2-1		100	95-100	35-70	0-15		0-5	
1.5-0.75			100	90-100	20-15	0-15		0-5

(Sumber: Utomo, Suryo, 2003)

Catatan:

1. Untuk jalan rel kelas I dan II digunakan ukuran minimal 2.5 - 0.75 inch.
2. Untuk jalan rel kelas III digunakan ukuran minimal 2 - 1 inch.

Jarak dari sumbu jalan rel ke tepi atas lapisan balas (b) dihitung dengan Persamaan (37).

$$b > \frac{1}{2} L + x \dots (37)$$

Dimana: L = panjang bantalan (cm)

X = 50 cm untuk kelas I dan II

= 40 cm untuk kelas III dan IV

= 35 untuk kelas V

Kemiringan lereng lapisan balas atas tidak boleh lebih curam dari 1:2. Lapisan balas bawah terdiri dari kerikil halus, kerikil sedang atau pasir kasar dengan gradasi pada Tabel 5.

Tabel 5. Gradasi Balas Bawah

Ukuran saringan	2"	1"	3/8"	No.10	N0.40	No.200
% lolos (optimum)	100	95	67	38	21	7
Daerah yang diperbolehkan (% lolos)	100	90-100	50-84	26-50	12-30	0-10

(Sumber: Utomo, Suryo, 2003)

Tebal lapisan balas (d2) bawah dihitung dengan Persamaan (38).

$$d = d1 + d2 \dots (38)$$

Jarak dari sumbu jalan rel ke tepi atas lapisan balas bawah (k1) dihitung dengan Persamaan (39).

$$k_1 > b + 2d_1 + m + t \dots\dots\dots(39)$$

Jarak dari sumbu jalan rel ke tepi atas lapisan balas bawah (k_1) pada tikungan dengan Persamaan

$$k_1 = b + 2d_1 + 2e + m \dots\dots\dots(40)$$

Dimana,

d = tebal lapisan balas

d_1 = tebal lapisan balas atas

d_2 = tebal lapisan balas bawah

e = tebal balas tambahan pada tikungan

m = jarak tepi bawah balas atas ke tepi atas balas bawah

t = tebal bantalan

I. Tubuh Jalan Rel

Tubuh jalan rel merupakan lapisan tanah, baik dalam keadaan asli maupun dalam bentuk diperbaiki ataupun dalam bentuk buatan yang memikul beban yang dikerjakan oleh lapisan balas atas dan balas bawah. Tubuh jalan rel bisa berada di daerah galian atau timbunan. Bisa menumpu pada endapan tanah atau endapan batuan (*rock*). Tubuh jalan pada timbunan terdiri dari tanah dasar (*subgrade*) berupa tanah timbunan. Sedangkan tubuh jalan pada galian terdiri dari tanah dasar (*subgrade*) dari tanah asli.

Tegangan yang terjadi diatas tanah dasar akibat beban di atasnya dapat dihitung dari distribusi tegangan yang terjadi di bawah bantalan dengan Persamaan (41):

$$\sigma_2 = \frac{58 \cdot \sigma_1}{10 + d^{1,35}} \dots\dots\dots(41)$$

Tanah dasar harus mempunyai daya dukung sebesar 5,626 kg/cm² atau CBR 8% minimal setebal 30 cm.

Daya dukung tanah menurut Terzaghi dihitung dengan Persamaan (42).

$$q_u = c \cdot N_c + \gamma \cdot D \cdot N_q + 0,5 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma \dots\dots\dots(42)$$

dimana,

c = kohesi tanah

γ = berat jenis tanah

D = kedalaman pondasi

B = lebar pondasi

N_c, N_q, N_γ = faktor daya dukung tanah

Penurunan tanah asli akibat pembebanan timbunan dan beban diatas timbunan dihitung dengan Persamaan (43).

$$S = \frac{Cc \cdot H}{1 + e_0} \log \left[\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right] \dots\dots\dots(43)$$

Dengan:

S = penurunan

Cc = indeks pemampatan (*compression index*)

H = panjang pengaliran;

$H = D$ untuk pengaliran satu arah,

$H = 1/2D$ untuk pengaliran dua arah,

D = tebal lapisan yang ditinjau,

e_0 = angka pori mula-mula,

p_0 = tekanan mula-mula akibat beban timbunan di atasnya (*overburden*),

Δp = pertambahan tekanan vertikal

Tinggi timbunan kritis dapat dihitung dengan Persamaan (44)

$$h_{cr} \leq c \cdot N_c / \gamma t \dots\dots\dots(44)$$

dimana:

h_{cr} = tinggi timbunan kritis

c = kohesi

N_c = faktor daya dukung tanah
 γ_t = berat unit bahan timbunan

Analisa kelongsoran untuk pra rencana digunakan metoda Taylor, Persamaan (45) dan Persamaan (46).

$$Fk = \frac{c}{cd} \geq 1,5 \dots\dots\dots(45)$$

$$Cd = \frac{(\gamma_t \times h_t) + q}{N_s} \dots\dots\dots(46)$$

Dimana,

C = kohesi tanah
 cd = kohesi yang diperlukan untuk stabilitas lereng
 q = beban di atas timbunan
 N_s = factor stabilitas Taylor yang merupakan fungsi dari kemiringan dan tinggi timbunan.
 nd = faktor kedalaman = $\frac{H+D}{H}$
 H = ketinggian timbunan
 D = kedalaman lapisan tanah

Analisis stabilitas lereng dapat menggunakan metode irisan (*Method of slides*) Persamaan (47).

$$F_s = \frac{\sum Sl}{\sum W \sin \theta} = \frac{\sum \{C + (W \cos \theta - ul) \operatorname{tg} \theta'\}}{\sum W \sin \theta} \dots\dots\dots(47)$$

Dimana:

F_s = angka keamanan
 W = berat irisan tanah tiap satuan lebar,
 l = panjang lengkungan irisan longsor,
 θ = sudut yang dibentuk oleh irisan dan permukaan bidang longsor ($^\circ$),
 u = tekanan air pori tanah,
 S = tahanan geser tanah.

Konstruksi dinding penahan tanah dihitung dengan Persamaan (48) s/d Persamaan (56)

- Menghitung tekanan tanah aktif (P_a)

$$P_a = \sigma_a \cdot h \dots\dots\dots(48)$$

$$\sigma_a = \gamma \cdot h \cdot k_a - 2 \cdot c \cdot \sqrt{k_a} \dots\dots\dots(49)$$

$$k_a = \tan^2(45 - \frac{\theta}{2}) \dots\dots\dots(50)$$

- Menghitung tekanan tanah pasif (P_p)

$$P_p = \sigma_p \cdot h \dots\dots\dots(51)$$

$$k_p = \tan^2(45 + \frac{\theta}{2}) \dots\dots\dots(52)$$

$$\sigma_p = \gamma \cdot h \cdot k_p + 2 \cdot c \cdot \sqrt{k_p} \dots\dots\dots(53)$$

- Menghitung momen horisontal (M_h)

$$M_h = P \cdot l \dots\dots\dots(54)$$

- Menghitung momen vertikal (M_v)

$$M_v = W \cdot l \dots\dots\dots(55)$$

$$W = \gamma_{dpt} \cdot f \dots\dots\dots(56)$$

Dimana,

σ = tegangan tanah
 γ = berat jenis tanah
 h = tinggi lapisan tanah
 k_a = koefisien tekanan tanah aktif
 k_p = koefisien tekanan tanah pasif
 θ = sudut geser dalam tanah
 c = kohesi
 l = jarak titik kerja tekanan ke titik tinjauan
 W = berat DPT
 γ_{dpt} = berat jenis DPT

f = luasan DPT

Konstruksi dinding penahan tanah harus memenuhi 2 keadaan:

Cek terhadap guling dengan Persamaan (57).

$$\frac{\Sigma MV}{\Sigma MH} \geq 2 \dots\dots\dots(57)$$

Cek terhadap geser dengan Persamaan (58).

$$\frac{\Sigma PV \tan \theta + B \cdot c + \Sigma PH}{\Sigma PH} \geq 1,5 \dots\dots\dots(58)$$

Dinding penahan tanah juga dikontrol terhadap

- Tinjauan terhadap eksentrisitas dengan Persamaan

$$e < 1/6 B$$

$$e = 1/2 B - \frac{\Sigma MA}{\Sigma Pv} \dots\dots\dots(59)$$

$$\Sigma MA = \Sigma M_V - \Sigma M_H \dots\dots\dots(60)$$

- Tinjauan terhadap TOE

$$\sigma_{TOE} < \sigma_{tekan}$$

$$\sigma_{tekan} = 1,6 \times \sqrt{f'c} \dots\dots\dots(61)$$

$$\sigma_{TOE} = \frac{M_x}{W} \dots\dots\dots(62)$$

- Tinjauan terhadap HEEL

$$\sigma_{HEEL} < \sigma_{tarik}$$

$$\sigma_{tarik} = 0,46 \times \sqrt{f'c} \dots\dots\dots(63)$$

$$\sigma_{HEEL} = \frac{M_y}{W} \dots\dots\dots(64)$$

dimana,

B = lebar dasar DPT

c = kohesi

W = berat DPT

f = luasan DPT

f'c = kuat tekan beton

Kedalaman pemancangan *sheet pile* tergantung pada stabilitas momen pada ujung bawah *sheet pile* yang dipengaruhi oleh tegangan aktif dan tegangan pasif tanah. Kedalaman aktual pancang *sheet pile* ditambahkan faktor kedalaman 25% (Persamaan (65)).

$$D \text{ aktual} = 1,25 \times (A+B) \dots\dots\dots(65)$$

J. Pematusan

Ukuran penampang saluran terbuka dihitung menggunakan Persamaan (66) dan Persamaan (67).

$$Q_s > 1,20 Q_r \dots\dots\dots(66)$$

$$Q_s = A_s * V_s$$

$$Q_s = 2h * h * \frac{1}{n} \left(\frac{b * h}{b + 2h} \right)^{2/3} S_1^{1/2} \dots\dots\dots(67)$$

Dimana:

Qr = Debit air yang dibuang (m3/ det)

Qs = Debit air rencana saluran

h = tinggi saluran

b = lebar saluran, untuk persegi b = 2h

S = Kemiringan muka aliran air dalam saluran rencana

n = Koefisien kekasaran saluran rencana.

Pematusan bawah tanah lebih dimaksudkan untuk menjaga agar elevasi muka air tanah tidak akan mendekati permukaan tanah tubuh jalan yang harus dilindungi, sehingga konsistensi dan kepadatan tubuh jalan dibawah balas kondisinya tetap baik. Tubuh jalan yang dilindungi khususnya yang ada pada kondisi permukaan asli, atau daerah galian; dimana tebal tanah tubuh jalan yang harus tetap kering adalah lebih besar atau sama dengan 75 cm dibawah dasar balas.

Bagi tubuh jalan yang merupakan tanah timbunan, maka konstruksi pematas bawah tanah tidak diperlukan,

III. HASIL PERHITUNGAN

A. Klasifikasi Jalan Rel

Dari hasil perhitungan Grafik Perjalanan Kereta Api atau GAPEKA (PT.KAI, 2011) didapatkan lalulintas kereta pada ruas Semarang-Gubug sebanyak 56 perjalanan perhari dengan besarnya tonase penumpang dan kereta harian (Tp) sebesar 9925 ton, tonase barang dan gerbong harian (Tb) sebesar 12429 ton, dan tonase lokomotif harian (Tl) sebesar 3818 ton, maka hasil perhitungan daya angkut lintas dengan Persamaan (1) diperoleh:

$T = 13,430$ juta ton/tahun yang termasuk kelas jalan II (Tabel 1).

Berdasarkan RIPNAS tahun 2011 diperkirakan pada tahun 2030 untuk Pulau Jawa akan terjadi peningkatan penumpang sebesar 11,64 kali lipat dan barang sebesar 142,55 kali lipat. Maka perkiraan jumlah beban untuk penumpang sebesar $11,64 \cdot 9925 = 115527$ ton/hari dan perkiraan beban barang yaitu sebesar $142,55 \cdot 12429 = 1771753,95$ ton/hari. Sehingga perkiraan daya angkut (belum termasuk lokomotif) diperoleh:

$T = 998336853$ ton/tahun, maka untuk perencanaan jalur ganda menggunakan perencanaan jalan rel kelas I.

B. Trase

Dari data berupa foto udara yang diambil dari aplikasi komputer Google Earth dapat dilihat kondisi sekitar rel tunggal sebagai pertimbangan penentuan trase rel jalur ganda. Berdasarkan kondisi jalur tunggal, maka perencanaan jalur ganda (*double track*) berada di sebelah kanan dari jalur tunggal (eksisting). Dengan pertimbangan ketersediaan lahan terbuka di sebelah kanan lebih banyak, maka biaya pembebasan lahan akan lebih sedikit. Apabila jalur ganda berada di sebelah kiri jalur tunggal dimana terdapat kawasan pabrik di daerah Kaligawe dan Mranggen, maka biaya pembebasan lahan akan lebih banyak.

C. Geometrik

Trase baru di sebelah kanan jalur eksisting direncanakan mengikuti lengkung trase jalur eksisting. Elevasi rel baru mengikuti elevasi rel eksisting sesuai landai atau lengkung vertikalnya. Perhitungan lengkung horisontal menggunakan Persamaan (4) s.d Persamaan (19) yang tersaji pada Tabel 6 dengan contoh perhitungan untuk lengkung no 12b, pusat lengkung (PI) STA 2+697,5 arah lengkung kanan, sudut (Δ_s)= $10^\circ 48' 0''$.

- Kecepatan rencana lengkung horisontal jalan rel kelas I

$$V_{rencana} = V_{maks} = 120 \text{ km/jam.}$$

- Perencanaan Jari-jari horisontal (R)

$$R_{min} = 0,054 \cdot V^2 = 0,054 \cdot 120^2 = 777,6 \text{ m}$$

$$R_{min} = 0,164 \cdot V^2 = 0,164 \cdot 120^2 = 2361,6 \text{ m}$$

Rmin menurut Tabel 2 untuk $V_{rencana}$ 120 km/jam, $R_{min} = 780$ m

digunakan R rencana = 800 m

- Perencanaan Peninggian rel

$$h_{min} = 104,9 \text{ mm}$$

$$h_n = 107,1 \text{ mm}$$

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

$$h_{min} < h_n < h_{maks}$$

105,69 mm < 107,1 mm < 110 mm (OK!)

Digunakan peninggian rel 110 mm

$L_s = 132 \text{ m}$

$\theta_s = 4,72690181 = 4^\circ 43' 36,85''$

$\theta_c = 1^\circ 20' 46,31''$

$L_c = 18,796 \text{ m}$

$L = 282,796 \text{ m}$

$X_c = 131,91 \text{ m}$

$Y_c = 3,63 \text{ m}$

$p = 0,909 \text{ m}$

$k = 65,985 \text{ m}$

$T_s = 141,693 \text{ m}$

$E_s = 4,479 \text{ m}$

Perhitungan STA

Sta MBA = PI - Tt = 2697,5 - 141,693 = 2+555,807

Sta ABA = MBA + Ls = 2555,807 + 132 = 2+687,807

Sta ABA' = MBA + Ls + Lc = 2687,807 + 18,796 = 2+706,603

Sta MBA' = MBA + Ls + Lc + Ls = 2+706,603 + 2+838,603

Tabel 6. Hasil Perhitungan Lengkung Horisontal

No urut	Nomor Lengkung	STA pusat lengkung	Arah	Sudut	V maks (Km/Jam)	Radius (R) (m)	Peninggian Rel (h) (mm)	Panjang lengkung peralihan (Ls) (m)	Panjang lengkung lingkaran(Lc) (m)	MBA	ABA	ABA'	MBA'
RESORT 4.10 GUBUG													
1	12b	2697,5	kanan	10° 48' 0"	120	800	110	132	18,796	2555,807	2687,807	2706,603	2838,603
2	13b	3051	kiri	7° 32' 51"	120	1200	75	90	68,074	2926,832	3016,832	3084,906	3174,906
12	23b	14455,5	Kiri	30° 42' 35"	120	800	110	132	296,789	14169,587	14301,587	14598,375	14730,375
13	24b	15335	Kanan	11° 10' 34"	120	2000	45	54	336,120	15112,313	15166,313	15502,433	15556,433
14	25b	18919	Kiri	2° 51' 58"	120	2000	45	54	46,046	18841,965	18895,965	18942,011	18996,011
15	26b	22584	Kiri	12° 16' 3"	120	2000	45	54	374,217	22342,064	22396,064	22770,280	22824,280
16	27b	22879	Kiri	4° 0' 46"	120	2000	45	54	86,072	22781,933	22835,933	22922,006	22976,006
19	30b	30173	Kiri	28° 39' 44"	120	2000	45	54	946,500	29635,034	29689,034	30635,535	30689,535

D. Rel

Digunakan tipe rel R54 dengan karakteristik:

- Berat rel teoritis permeter panjang = 54,43 kg/m'
- Momen Inersia searah sumbu X (Ix) = 2346 cm⁴
- Modulus elastisitas = 2,1 x 10⁶ kg/cm²
- Luas penampang melintang = 69,34 cm²
- Jarak tepi bawah kaki rel ke garis netral = 76,20 mm
- Dipakai bantalan beton dengan jarak = 60 cm
- Beban gandar = 18 ton
- Lebar sepur = 1067 mm
- Tegangan ijin rel (σ) = 1325 kg/cm²
- Tegangan dasar rel (σ_i) = 1176,8 kg/cm²

Kecepatan maksimum 120 km/jam, tekanan gandar 18 ton.

Beban dinamis (Pd) dihitung dengan Persamaan (3) sebesar:

Pd = 6940,3 kg.

Dumping factor (λ) dihitung menggunakan Persamaan (20) diperoleh:

$$\lambda = 9,776 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-4}$$

Momen maksimum (Mm) dihitung dengan Persamaan (21) didapat:

$$Mm = 423150,5 \text{ kgcm}$$

Tegangan yang terjadi (σ) dihitung dengan Persamaan (22) sebesar:

$$\sigma = 1193,1 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma \leq \sigma'$$

$$1193,1 \text{ kg/cm}^2 \leq 1352 \text{ kg/cm}^2$$

Tegangan yang terjadi didasar rel menggunakan Persamaan (23) diperoleh:

$$S_{\text{base}} = 1167,79 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_{\text{base}} \leq S'_{\text{base}}$$

$$1167,79 \text{ kg/cm}^2 \leq 1176,8 \text{ kg/cm}^2$$

- Perencanaan Panjang Minimum Rel Panjang (*Continuous Welded Rail*)

Panjang bagian rel yang memuai (ℓ) dihitung dengan Persamaan (24) sepanjang:

$$\ell = 116,94 \text{ m.}$$

Panjang minimum rel panjang tipe R.54 (L) dihitung menggunakan Persamaan (25) sepanjang:

$$L = 232,98 \text{ m,}$$

maka digunakan panjang minimum rel panjang dengan panjang 250 m sesuai ketentuan Tabel 3.

- Sambungan Rel

$$\text{Diameter baut } (\varnothing) = 23 \text{ mm}$$

$$\text{Luas penampang baut } (A_c) = 4,15 \text{ cm}^2$$

$$\text{Tegangan ijin baut } (\sigma') = 4000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Tegangan ijin pelat } (\sigma') = 1325 \text{ kg/cm}^2$$

Perhitungan kekuatan baut (No) dengan Persamaan (26) didapat:

$$N_o = 12450 \text{ kg}$$

Kekuatan baut akibat beban bolak-balik (T) dihitung dengan Persamaan (27) diperoleh:

$$T = 6225 \text{ kg}$$

gaya lateral yang bekerja di tengah-tengah pelat penyambung (H) dihitung dengan Persamaan (28) sebesar:

$$H = 3080,05 \text{ kg}$$

gaya tarik baut sebelah luar (T') dan sebelah dalam (T'') dihitung menggunakan Persamaan (29) diperoleh:

$$T' = 4264,7 \text{ kg}$$

$$T' < T$$

$$4264,7 < 6225 \text{ kg} \dots(\text{OK})$$

$$T'' = - 1184,65 \text{ kg}$$

$$T'' \leq T$$

$$- 1184,65 \text{ kg} \leq 6225 \text{ kg} \dots (\text{OK})$$

Momen lateral (M) yang terjadi pada pelat dihitung menggunakan Persamaan (30) diperoleh:

$$M = 4510,70 \text{ kgcm}$$

Tegangan yang terjadi (σ) pada pelat dihitung menggunakan Persamaan (31) diperoleh:

$$\sigma = 1153,63 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma \leq \sigma'$$

$$1153,63 \text{ kg/cm}^2 \leq 1325 \text{ kg/cm}^2 \dots (\text{OK})$$

Perpanjangan rel akibat adanya perubahan suhu dihitung menggunakan Persamaan (32) didapat:

$$G = 11,397 \text{ mm}$$

Jadi celah yang di sediakan sepanjang 12 mm.

E. Penambat Rel

Penambat rel elastis ganda yang digunakan adalah penambat jenis pandrol e-clip ditambah dengan *rubber pad*. $F' = 600 \text{ kg}$

Gaya rangkai (F) yang terjadi pada rel dihitung dengan Persamaan (33) menghasilkan

$$F = 52451,04 \text{ kg}$$

$$\text{Panjang rel} = 250 \text{ m}$$

$$\text{Jarak bantalan} = 600 \text{ mm} = 0,6 \text{ m}$$

Sehingga jumlah penambat tiap rel panjang adalah

$$= 250/0,6 = 416,67 = 416 \text{ buah}$$

Gaya yang ditahan oleh sebuah penambat:

$$F = F/416$$

$$= 52451,04 / 416$$

$$= 126,012 \text{ kg}$$

$$F \leq F'$$

$$126,012 \text{ kg} \leq 600 \text{ kg} \dots\dots(\text{OK})$$

F. Bantalan

Bantalan yang digunakan adalah bantalan beton produksi PT. WIKA Beton tipe N-67.

- Kekuatan Bantalan

dumping factor (λ) di bawah kaki rel,

$$\lambda = 0,011 \text{ cm}^{-1}$$

di tengah bantalan,

$$\lambda = 0,012 \text{ cm}^{-1}$$

Momen pada daerah di bawah kaki rel

$$M = 113289,08 \text{ kgcm}$$

$$M < M'$$

$$113289,08 \text{ kgcm} < 150000 \text{ kg cm} \dots\dots(\text{OK})$$

Momen pada daerah tengah bantalan

$$M = -37060,77 \text{ kgcm}$$

$$M < M'$$

$$-37060,77 \text{ kgcm} < 66000 \text{ kg cm} \dots\dots(\text{OK})$$

Jarak Bantalan (ℓ) ditentukan berdasarkan momen maksimum yang dihitung dengan Persamaan (36) didapat

$$\ell_{\text{maks}} = 96,148 \text{ cm}$$

$$\text{Diambil } \ell = 60 \text{ cm}$$

G. Balas

Lebar Bahu balas atas (b) dihitung dengan Persamaan (37).

$$b = 150 \text{ cm}$$

Lapisan balas bawah terdiri dari kerikil halus, kerikil sedang atau pasir kasar. Tebal lapisan balas bawah (d_2) dihitung dengan Persamaan (38) dan diperoleh.

$$d_2 = 15 \text{ cm}$$

Jarak dari sumbu jalan rel ke tepi atas lapisan balas bawah (k_1) pada sepur lurus dihitung dengan Persamaan (39).

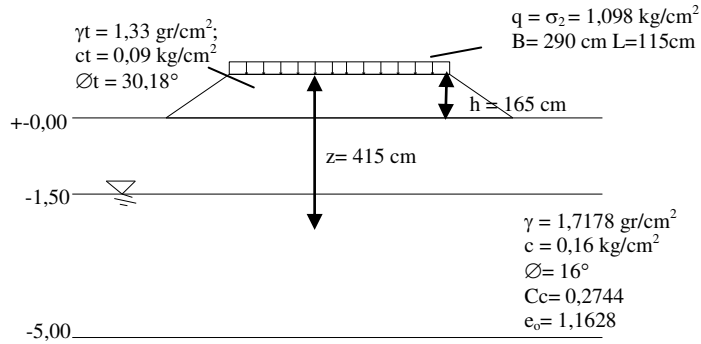
$$k_1 = 271 \text{ cm}$$

Jarak dari sumbu jalan rel ke tepi atas lapisan balas bawah (k_1) pada tikungan dihitung dengan Persamaan (40)

$$k_1 = 320 \text{ cm}$$

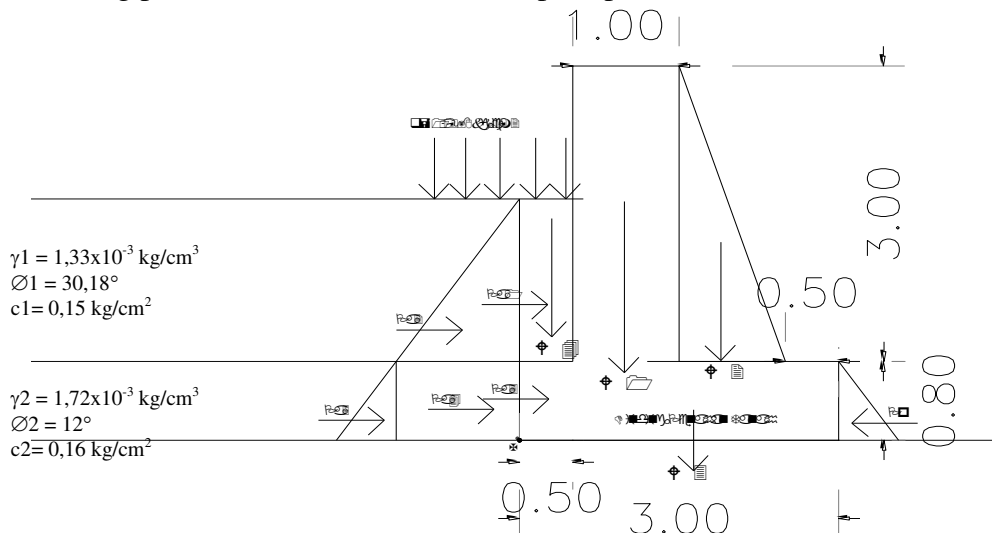
H. Tubuh Jalan Rel STA 10+000

STA 10+000 berupa timbunan yang dimodelkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan Timbunan STA 10+000

- Tinggi timbunan kritis dihitung dengan Persamaan (44)
 $ht \leq 1313,68 \text{ cm}$
 $165 \text{ cm} \leq 1313,68 \text{ cm} \dots\dots(\text{OK})$
- Analisa kelongsoran pra rencana dengan Persamaan (45) dan Persamaan (46)
 $Cd = 0,24 \text{ kg/cm}^2$
 $Fk = 0,375 \leq 1,5$ (NOT OK)
 tidak memenuhi angka keamanan sehingga perlu diperkuat dengan konstruksi penahan tanah.
- Analisa stabilitas lereng dihitung menggunakan Persamaan (47)
 $Fs = 1,58 > 1,5$ (OK)
 Berdasarkan perhitungan, pemodelan irisan untuk analisa kelongsoran memenuhi faktor keamanan yang disyaratkan pada ketinggian maksimum sebesar 299,63 cm atau 3 m dari top timbunan.
- Penurunan tanah asli dihitung dengan Persamaan (43)
 $S = 3,8744 \text{ cm}$
 $S < S'$
 $3,8744 \text{ cm} < 50 \text{ cm} \dots (\text{OK})$
- Perhitungan Dinding Penahan Tanah
 Dinding penahan tanah direncanakan seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Pemodelan Dinding Penahan Tanah

Hasil perhitungan tekanan tanah dan momen horisontal dengan menggunakan Persamaan (48) s/d Persamaan (54) dirangkum dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Tekanan Tanah dan Momen Horisontal

	GAYA (Kg)	LENGAN (cm)	MOMEN (Kgcm)
Pa 1	59,78	162,5	9,714.25
Pa 2	-2,56	135	-345.60
Pa 3	57,62	40	2,304.80
Pa 4	-4,61	40	-184.40

	GAYA (Kg)	LENGAN (cm)	MOMEN (Kgcm)
Pa 5	3,61	26.67	96.28
Pp 1	- 15,81	26.67	-421.65
JUMLAH	98.03		11,163.68

Hasil perhitungan momen vertikal dengan Persamaan (55) dan Persamaan (56) dirangkum dalam Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Momen Vertikal

	GAYA (Kg)	LENGAN (cm)	MOMEN (Kgcm)
W1	72	110	7.920
W2	36	210	7.560
W3	57,6	150	8.640
W4	10,97	25	274.313
JUMLAH	176,57		24.394.3

- Cek terhadap guling dengan Persamaan (57)

$$\frac{\Sigma MV}{\Sigma MH} \geq 2$$

$$\frac{24.394.3}{11,163.68} \geq 2$$

$$2,19 > 2 \dots\dots\dots (\text{OK})$$

- Cek terhadap geser dengan Persamaan (58)

$$\frac{\Sigma PV \tan \theta + B.c2 + \Sigma PH}{\Sigma PH} \geq 1,5$$

$$\frac{176,57 \tan 12 + 300 .0,091 + 98.03}{98.03} \geq 1,5$$

$$1,66 > 1,5 \dots\dots\dots (\text{OK})$$

- Kontrol terhadap eksentrisitas dihitung dengan Persamaan (59) dan Persamaan (60) diperoleh

$$e < 1/6 B$$

$$15,03 < 300/6$$

$$15,03 \text{ cm} < 50 \text{ cm} \dots\dots (\text{OK})$$

- Tinjauan terhadap TOE dihitung dengan Persamaan (61) dan Persamaan (62) diperoleh

$$\sigma_{\text{tekan}} = 19,45 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{TOE}} = -0,73 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{TOE}} < \sigma_{\text{tekan}}$$

$$-0,73 \text{ kg/cm}^2 < 19,45 \text{ kg/cm}^2 \dots\dots\dots (\text{OK})$$

- Tinjauan terhadap HEEL dihitung dengan Persamaan (63) dan Persamaan (64) diperoleh

$$\sigma_{\text{tarik}} = 5,59 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{HEEL}} = 0,06 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{HEEL}} < \sigma_{\text{tarik}}$$

$$0,06 < 5,59 \dots\dots\dots (\text{OK})$$

- Cek kuat dukung tanah dengan Persamaan (42)

$$q_u > q$$

$$q_u = 3,12 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_{\text{toe}} = -0,73 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_u > q_{\text{toe}}$$

$$3,12 \text{ kg/cm}^2 > -0,73 \text{ kg/cm}^2 \dots\dots\dots (\text{OK})$$

$$q_{\text{heel}} = 0,06 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_u > q_{\text{heel}}$$

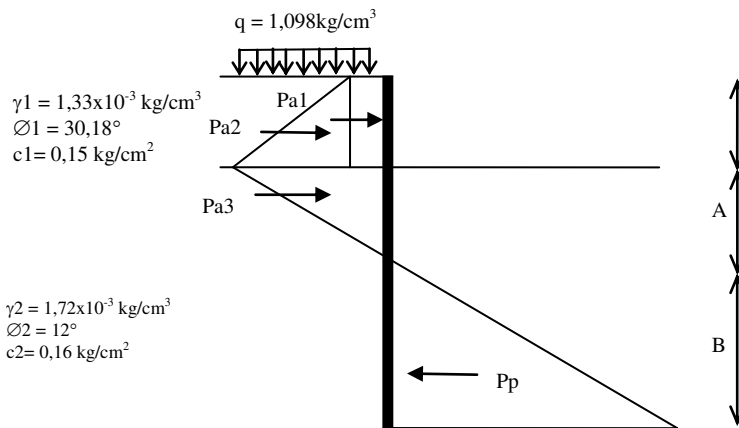
$$3,12 \text{ kg/cm}^2 > 0,06 \text{ kg/cm}^2 \dots\dots\dots (\text{OK})$$

- Cek penurunan dengan Persamaan (43)

$$S = 1,99 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

- Perhitungan *Sheet Pile*

Sheet pile direncanakan dengan pemodelan seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Pemodelan Sheet Pile

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \gamma_2 (k_p - k_a) A \\ \sigma_1 + \sigma_2 &= 1,72 \times 10^{-3} (1,52 - 0,66) A \\ 0,26 &= 1,72 \times 10^{-3} (1,52 - 0,66) A \\ A &= 175,77 \text{ cm} \end{aligned}$$

Stabilitas turap berdasarkan momen terhadap titik X:

$$\begin{aligned} Pa_1 \cdot (82,5 + A) + Pa_2 \cdot (55 + A) + Pa_3 \cdot (0,67A) &= P_p \cdot (0,33B) \\ 31,35 \cdot (82,5 + 175,77) + 21,45 \cdot (55 + 175,7) + 22,85 \cdot (0,67 \cdot 175,77) &= 7,4 \times 10^{-3} B^2 \cdot (0,33B) \\ 15737,73 &= 2,44 \times 10^{-4} B^3 \\ B^3 &= 64498893 \\ B &= 401,03 \text{ cm} \end{aligned}$$

Jadi kedalaman pancang dilapangan dengan faktor keamanan 25% dengan Persamaan (65)

$$D = 722,08 \text{ cm} \approx 723 \text{ cm}$$

Panjang total sheet pile = 165 + 723 = 888 cm.

- Dimensi *sheet pile*

$$\sigma_{\text{maks}} = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

$$W = M_{\text{maks}} / \sigma' = 31788,31 / 2400 = 13,25 \text{ cm}^3$$

$$\text{Pakai FSP 1A} = W = 523 \text{ cm}^3$$

Cek

$$\sigma = M_{\text{max}} / W = 25947,99 / 523 = 49,61 \text{ kg/cm}^2 < 2400 \text{ kg/cm}^2$$

I. Saluran Samping

Dimensi saluran samping dihitung dengan Persamaan (66) dan Persamaan (67)

$$Q_s \geq 1,2 Q_r$$

$$Q_s = 1,2 Q_r = 1,2 * 0,177 = 0,2124 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$0,2124 = 2h^2 * \frac{1}{0,012} \left(\frac{2h^2}{4h} \right)^{2/3} 0,006^{1/2}$$

Dengan cara iterasi diperoleh h sebesar 0,255 m.

- Cek terhadap kecepatan aliran ijin saluran sebesar 3,00 m/s maka,

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{0,012} \left(\frac{2 * 0,255^2}{4 * 0,255} \right)^{2/3} 0,006^{1/2} \\ &= 1,64 \text{ m/s} \dots \text{OK} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh dimensi saluran

$$\text{Tinggi saluran (h)} = 0,255 \text{ m}$$

$$\text{Lebar saluran (b)} = 2 * 0,255 = 0,51 \text{ m}$$

$$\text{tinggi jagaan} = 30\% h = 0,15 \text{ m}$$

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Berdasarkan peta topografi dan foto udara, rel jalur ganda direncanakan berada sisi kanan jalur tunggal dari arah Semarang menuju Gubug.
2. Perkiraan daya angkut lintas (belum termasuk lokomotif) tahun 2030 yaitu 998336853 ton/tahun > 20000000 ton/tahun. Maka untuk perencanaan jalur ganda menggunakan perencanaan jalan rel kelas I. Dengan kriteria perencanaan:
 - Kecepatan rencana 120 km/jam
 - Beban gandar 18 ton
 - Tipe rel R. 54
 - Bantalan beton, digunakan bantalan beton WIKA N-67
 - Penambat elastik ganda, tipe pandrol dengan alas karet (*rubber pad*).
 - Balas batu pecah 2-6 cm dengan tebal (d1) 30 cm dan kemiringan bahu 1:2.
 - Subbalas pasir batu dengan tebal (d2) 15 cm.
3. Perkuatan dan perlindungan tanah timbunan yang tinggi dengan memasang dinding penahan tanah. Alternatif penahan tanah yang digunakan berupa
 - DPT tipe semi gravitasi dengan material beton bertulang, dengan dimensi:
 - Lebar dasar = 3 m
 - Tinggi kaki = 0,8 m
 - Lebar kaki = 0,5 m
 - Tinggi dinding = 3 m
 - Lebar atas = 1 m
 - *Sheet pile* baja profil FSP 1A dengan panjang total 888cm dan panjang tanam 723 cm.
4. Pematusan yang digunakan hanya pematusan permukaan dengan perencanaan:
 - Saluran berbentuk segi empat
 - Material saluran = Beton bertulang
 - Tinggi saluran (h) = 0,255 m
 - Lebar saluran (b) = 0,51 m
 - tinggi jagaan = 0,15 m

B. Saran

1. Perlu adanya penjadwalan ulang Kereta Api untuk mengoptimalkan kinerja jalur ganda.
2. Dengan adanya peningkatan lalu lintas kereta pada jalur ganda maka perlu diperhatikan perlintasan sebidang jalan raya yang padat untuk mengantisipasi kemacetan.
3. Peningkatan pengamanan ruang bebas disekitar jalur ganda guna menghindari kecelakaan.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Christady, Hary. 2002. *Mekanika Tanah I, Edisi Ketiga*. Yogyakarta: Gajahmada University Press
- Christady, Hary. 2002. *Mekanika Tanah II*. Yogyakarta: Gajahmada University Press
- Direktorat Perguruan Tinggi Swasta. 1997. *Rekayasa Fundasi I: Konstruksi Penahan Tanah*. Jakarta: Gunadarma
- Direktorat Perguruan Tinggi Swasta. 1997. *Rekayasa Fundasi II: Fundasi Dangkal dan Fundasi Dalam*. Jakarta: Gunadarma
- Google Earth: "Semarang". 2012.
- Kementerian Perhubungan Ditjen Perkeretaapian. 2011. *Rencana Induk Perkeretaapian Nasional*. Jakarta
- PJKA. 1986. *Penjelasan Peraturan Dinas No.10 tentang Perencanaan Konstruksi Jalan Rel*.
- PJKA. 1986. *Peraturan Dinas No.10 tentang Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel*.
- Utomo, Suryo H, Ir., Ph.D. 2003. *Jalan Rel*. Yogyakarta: Beta Offset
- Wesli. 2008. *Drainase Perkotaan*. Yogyakarta: Graha Ilmu