

ANALISIS STRUKTUR JALAN REL

(Studi kasus : Ketapang, Sungkai Selatan, Lampung Utara)

FadlunMias¹, Sri Atmaja P. Rosyidi² Agus Setyo Muntohar³

¹ Mahasiswa (NIM.20110110046) ² Dosen Pembimbing 1 ³ Dosen Pembimbing 2

ABSTRAK

Naiknya tanah ke permukaan balas merupakan indikator struktur jalan rel telah mengalami kerusakan. Untuk itu diperlukan perbaikan yang segera sebelum menyebabkan kereta api anjlok. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis penyebab kerusakan secara analitik untuk mengetahui tegangan vertikal pada tanah dasar, berdasarkan variasi kelas jalan I, tipe rel R54, bantalan beton pratekan blok tunggal dengan variasi kecepatan 80, 100, 120 km/jam, beban dinamis menggunakan teori Talbot, Area dan Eisenmann, dan variasi ketebalan balas 30, 60 dan 90 cm. Hasil analisis didapatkan perbandingan beban dinamis menurut teori Talbot kecepatan 120 km/jam di dapat 88,23%, kecepatan 100 km/jam 72,68 %, kecepatan 80 km/jam 57,15% lebih besar dari beban statis yang digunakan, pada metode Area kecepatan 120 didapat 76,91 % , kecepatan 100 km/jam didapat 64,09% dan metode Eissenmann kecepatan 120 km/jam didapat 16,42 % kecepatan 100 km/jam didapat 14,64% kecepatan 80 km/jam didapat 12,85 % . Pada bagian pembebanan di rel dengan menggunakan tipe rel R54 dan variasi di atas telah memenuhi syarat tegangan ijin sebesar 1325 kg/cm² dan tahanan momen dasar sebesar 1176,8 kg/cm². Pada bantalan dengan variasi di atas telah memenuhi syarat momen dan tegangan ijin beton. Hasil dari balas merupakan hasil perbandingan menggunakan grafik hubungan tegangan dan ketebalan, dan grafik hubungan tegangan dengan kecepatan dengan membandingkan metode sesuai Peraturan Dinas Nomor 10 Tahun 1986, metode Sederhana, Semi-Empirik dan Empirik. Hasil Tegangan vertikal yang diterima tanah dasar dengan menggunakan perhitungan menurut Peraturan Daerah Nomor 10 Tahun 1986 dengan metode BoEF (*Beam of Elastic Foundation*) dan JNR (*Japanese National Railways*) dengan variasi kecepatan, beban gandar, dan teori beban dinamis mampu menahan tegangan vertikal ke tanah dasar sesuai dengan daya dukung tanah di lokasi penelitian. Dari hasil analitis ini diperoleh bahwa fakta kecepatan sangat mempengaruhi nilai tegangan.

Kata kunci : Struktur Jalan Rel, Tegangan Vertikal, Peraturan Dinas Nomor 10 Tahun 1986

1. PENDAHULUAN

Tanah merupakan bagian badan jalan rel, baik itu dari tanah asli ataupun sudah diperbaiki yang akan mengalami penurunan bentuk akibat memikul beban dari kereta dan penurunan tanah yang berlebihan akan mengakibatkan terjadinya kerusakan pada struktur jalan rel.

Terjadi penurunan dan naiknya tanah ke permukaan balas. Oleh karena itu, diperlukannya analisis struktur jalan rel untuk mengetahui penyebab terjadi penurunan tersebut dengan beberapa variasi pembebanan dan kecepatan.

Pada penelitian yang dilakukan di ketapang, sungkai, Lampung utara, yang mengalami penurunan pada bagian struktur jalan rel yang terparah pada KM 117+600 sampai 117+800 yang untuk kedepannya akan dilakukan pengembangan jalur kereta api dari jalur tunggal menjadi jalur ganda, untuk itu diperlukannya untuk mengetahui penyebab terjadinya penurunan pada struktur jalan rel dengan rumusan masalah sebagai berikut :

- a. Berapa besar tegangan yang diterima struktur jalan rel sampai tanah dasar?
 - b. Berapa besar perbandingan tegangan vertikal yang diterima struktur jalan rel dengan variasi kecepatan dengan beban dinamis menggunakan metode Talbot, Area dan Eisenmann?
 - c. Apakah kecepatan mempengaruhi tegangan?
- Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :
- a. Menghitung tegangan yang terjadi pada struktur jalan rel sampai tanah dasar.
 - b. Membandingkan pengaruh distribusi pembebanan dengan variasi kecepatan 80, 100 dan 120 km/jam dengan beban dinamis menggunakan metode Talbot, Area dan Eisenmann.
 - c. Menganalisis pengaruh dari kecepatan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Pembebanan Jalan Rel

Struktur jalan rel merupakan sistem pendistribusian beban dari beban roda kereta api yang disalurkan melalui rel ke bantalan dan selanjutnya tanah dasar melalui lapisan balas. Besaran tanah dasar sangat tergantung dari tebal lapisan balas. Secara praktisnya, pembebanan jalan rel sangat dipengaruhi oleh kemampuan komponen jalan rel untuk memenuhi beberapa kriteria perancangan. Komponen struktur jalan rel yang didesain harus didasarkan kemampuan elemennya dalam menerima dan mendistribusikan beban kereta api, diantaranya harus memenuhi (tidak boleh melebihi) :

1. tegangan lentur pada rel yang diijinkan
2. tegangan lentur pada bantalan yang diijinkan
3. tekanan balas yang diijinkan, dan
4. tekanan tanah dasar yang diijinkan.

2.2 Rel

Rel merupakan batangan baja longitudinal yang berhubungan secara langsung, dan memandu serta memberikan tumpuan terhadap pergerakan roda kereta api secara berterusan.

2.3.1 Gaya dan Pembebanan Rel

1. Gaya Vertikal

Perhitungan gaya vertikal yang dihasilkan oleh gandar, lokomotif, kereta dan gerbong merupakan beban statik, sedangkan pada kenyataannya beban yang terjadi pada jalan rel merupakan beban dinamis yang dipengaruhi oleh faktor aerodinamik (hambatan udara dan beban angin).

$$(P_{\text{statis}}) = \frac{\frac{W_{\text{lok}}}{2}}{\text{jumlah bogie}} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$V_r = 1.25 \times V_{\text{maks}} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan,

- W_{lok} = berat lokomotif
- P_{statis} = gaya roda statik
- V_{maks} = Kecepatan rencana maksimum

Transformasi gaya statis ke gaya dinamik untuk menghitung beban yang lebih realistis. Untuk menentukan gaya vertikal pada jalan rel dengan persamaan :

$$P_d = I_d \times P_s \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan,

- P_d = beban gaya dinamik rencana (kN/kg),
- P_s = beban roda statik dari kendaraan /kereta api (kN/kg),

I_d = faktor atau indeks beban dinamik dimensionless (nilainya >1).

Nilai faktor dinamik atau indeks beban dinamik diperoleh dari percobaan empirik dan parameter kecepatan kendaraan atau kereta api. Nilai indeks beban dinamik juga ditentukan dari kualitas instrumen dan komponen jalan rel yang digunakan dan asumsi-asumsi yang digunakan dalam perencanaan struktur jalan rel. Adapun nilai persamaan faktor dinamik diantaranya:

Persamaan *TALBOT*: Persamaan Talbot (1918) memberikan transformasi gaya berupa pengkali faktor dinamis sebagai berikut:

$$I_d = 1 + 0.01 \frac{V_r}{1.609} - 5 \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan,

- I_d = faktor/indeks beban dinamis
- V_r = Kecepatan rencana (km/jam)

Persamaan *AREA* : Persamaan *the American Railroad Engineering Association* (AREA) (1974) merekomendasikan persamaan indeks beban dinamik untuk perhitungan gaya vertikal rencana sebagai berikut :

$$I_d = 1 + 5.21 \frac{V_r}{D} \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan,

- D = diameter roda (mm)
- V_r = Kecepatan rencana (km/jam)

Persamaan *Eisenman*: Eisenmann (1972) menentukan indeks beban dinamik sebagai berikut:

$$I_d = 1 + \delta \times \eta \times t \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan,

- δ = kualitas jalan rel yang ditentukan
- $\delta = 0,1$ untuk jalan rel pada kondisi yang sangat bagus,
- $\delta = 0,2$ untuk jalan rel pada kondisi yang bagus,
- $\delta = 0,3$ untuk jalan rel pada kondisi yang buruk,
- η = Kecepatan kendaraan/kereta api yang ditentukan dari :
 - $\eta = 1$, untuk kendaraan hingga kecepatan 60 km/jam,,
 - $\eta = 1 - \frac{v-60}{140}$, untuk kendaraan hingga kecepatan 60 hingga 200 km/jam,
- t = ditentukan dari nilai *Upper Confidence Limit* (UCL) yang didasarkan dari probabilitas tegangan rel maksimum atau defleksi rel, dengan nilai sebagai berikut:
 - $t = 0$, UCL = 50%
 - $t = 2$, UCL = 97,7 %

$t = 1$, UCL = 84,1 % $t = 3$, UCL = 99.9 %

2. Pembebanan pada rel

Pembebanan pada jalan rel menggunakan konsep *Beam on Elastik Foundation* (BoEF) yang dikembangkan oleh Winkler pada tahun 1867 untuk memperhitungkan tegangan komponen jalan rel.

Untuk menghitung *dumping factor* dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dan untuk memperhitungkan nilai momen maksimum, defleksi dan gaya geser pada setiap titik sepanjang rel akibat gaya titik terpusat dapat dituliskan sebagai :

$$M_m = \frac{P_d}{4\lambda} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$Y_m = \frac{P_d}{2k} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$F_m = k \times Y \dots\dots\dots(2.10)$$

Dengan,

- λ = *dumping factor*
- k = modulus jalan rel (kg/cm²)
- E = modulus elastisitas jalan rel (kg/cm)
- I = inersia rel
- M_m = momen maksimum (kg.cm)
- P_d = beban dinamis (kg)
- Y_m = beban dinamis (kg)
- F_m = gaya geser maksimum (kg/cm)

Untuk reduksi perhitungan momen dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$M_a = 0.85 \times \frac{P_d}{4\lambda} \dots\dots\dots(2.11)$$

Untuk mendapatkan nilai tegangan lentur yang terjadi di dasar rel dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$S_{base} = M_a / W_b \dots\dots\dots(2.12)$$

Tinjauan terhadap tegangan ijin kelas jalan dinyatakan dalam bentuk:

$$\sigma' = (M_a \times y) / I_x \dots\dots\dots(2.13)$$

Dengan,

- M_a = reduksi momen (kg.cm)
- W_b = tahanan momen dasar.

2.3.2 Bantalan

Bantalan memiliki beberapa fungsi yang penting, diantaranya menerima beban dari rel dan mendistribusikannya kepada lapisan balas dengan tingkat tekanan (tegangan) menjadi lebih kecil, mempertahankan sistem penambat untuk mengikat rel pada kedudukannya dan menahan pergerakan rel arah longitudinal, lateral dan vertikal.

1. Pembebanan pada bantalan

Doyle (1980) menyatakan bahwa sebelum struktur bantalan di analisis dan diperhitungkan kapasitasnya untuk menerima pembebanan dari rel, yang perlu dikaji terlebih dahulu bagaimana distribusi tekanan yang diterima bantalan itu sendiri.

Beban yang didistribusikan kepada struktur bantalan merupakan beban merata tepi bawah rel. Persamaan BoEF untuk menentukan beban rel maksimum (q_r) pada kedudukan rel dituliskan sebagai berikut :

$$q_r = S \times k \times Y_m \times F_1 \dots\dots\dots(2.14)$$

Dengan,

- S = Jarak bantalan (m),
- k = Modulus jalan rel (kg/cm²),
- Y_m = defleksi rel maksimum
- F_1 = Nilai faktor keamanan (F_1) sama dengan 1

Konsep BoEE selanjutnya digunakan dalam peraturan Dinas No.10 Tahun 1986 untuk menentukan pembebanan pada bantalan. Selanjutnya dituliskan kembali dan disesuaikan sebagai :

$$F = k \times Y_{maks} \dots\dots\dots(2.15)$$

Y_{maks} diperhitungkan pengaruh super posisi gandar pada kereta api, maka distribusikan beban (Q_1) ke bantalan dapat ditulis:

$$Q = 2 \times F \times S = 2 \times (k \times \frac{P_d}{k \times X_1}) \times S = 0,786 \times \frac{P_d \times S}{X_1} \dots\dots\dots(2.16)$$

2. Bantalan Beton Pratekan Blok Tunggal

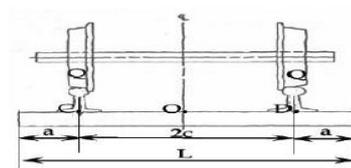
Pehitungan modulus elastisitas berdasarkan nilai f_{cu} (mutu beton) dinyatakan dalam bentuk:

$$E = 6400\sqrt{f_{cu}} \dots\dots\dots(2.17)$$

Perhtungan λ pada bagian di bawah rel dan tegan bantalan:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Perhitungan momen dititik C dan D, tepat dibawah kaki rel dalam persamaan :



Gambar 2.2 Letak kondisi pembebanan

$$M_{C/D} = \frac{Q}{4\lambda} \times \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} \times [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2 \lambda c + \cosh \lambda L) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2 \lambda c + \cos \lambda L) - \sinh 2 \lambda a (\sin 2 \lambda c + \sinh \lambda L) - \sin 2 \lambda a (\sinh 2 \lambda c + \sin \lambda L)] \dots\dots\dots(2.19)$$

Perhitungan momen di titik O (tengah bantalan) dinyatakan dalam persamaan:

$$M_o = -\frac{Q}{2\lambda} x \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} x [\sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda (L - c)) + \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda (L - c)) + \cosh \lambda c \cdot \cos \lambda (L - c) - \cos \lambda (L - c)] \dots \dots \dots (2.20).$$

Analisis tegangan tahap pratekan awal ditentukan dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{P_{intial}}{A} - \frac{P_{intial} \cdot e}{W} \text{ (sisi atas bantalan bawah rel)} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$\sigma = \frac{P_{intial}}{A} + \frac{P_{intial} \cdot e}{W} \text{ (sisi bawah bantalan bawah rel)} \dots \dots \dots (2.22)$$

$$\sigma = \frac{P_{intial}}{A} + \frac{P_{intial} \cdot e}{W} \text{ (sisi atas tengah bantalan rel)} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$\sigma = \frac{P_{intial}}{A} - \frac{P_{intial} \cdot e}{W} \text{ (sisi bawah tengah bantalan rel)} \dots \dots \dots (2.24)$$

Analisis tegangan tahap pratekan efektif ditentukan dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{P_{intial}}{A} - \frac{P_{intial} \cdot e}{W} + \frac{M}{W} \text{ (sisi atas bantalan bawah rel)} \dots \dots \dots (2.25)$$

$$\sigma = \frac{P_{intial}}{A} + \frac{P_{intial} \cdot e}{W} - \frac{M}{W} \text{ (sisi bawah bantalan bawah rel)} \dots \dots \dots (2.26)$$

$$\sigma = \frac{P_{intial}}{A} + \frac{P_{intial} \cdot e}{W} - \frac{M}{W} \text{ (sisi atas tengah bantalan rel)} \dots \dots \dots (2.27)$$

$$\sigma = \frac{P_{intial}}{A} - \frac{P_{intial} \cdot e}{W} + \frac{M}{W} \text{ (sisi bawah tengah bantalan rel)} \dots \dots \dots (2.28)$$

Dengan,

- λ = *damping factor*
- I_x = momen inersia rel pada sumbu x-x
- M = momen pada bantalan
- P_d = beban dinamis pada kendaraan
- Q = beban yang didapat diterima oleh bantalan
- W = momen tahanan
- A = luasan bantalan

1.3.1 Balas

Konstruksi lapisan balas terdiri dari material granular/butiran dan diletakan sebagai lapisan permukaan (atas) dari konstruksi substuktur.

Dan lapisan sub-balas merupakan diantara lapisan balas dan lapisan tanah dasar. Lapisan ini berfungsi sebagaimana lapisan balas, diantaranya mengurangi tekanan di bawah balas sehingga dapat

mendistribusikan kepada lapisan tanah dasar sesuai dengan tingkatannya.

1. Analisis Lapisan Balas

Pendekatan analitik yang dapat digunakan untuk menentukan distribusi tekanan vertikal dengan parameter tebal balas yaitu :

a. Model teori sederhana

Berikut ini adalah solusi teoritis sederhana mengenai distribusi tekanan vertikal dengan kedalaman balas :

1). Teori *Boussinesq*

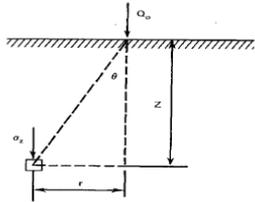
Teori ini dikenal dengan teori lapisan elastik tunggal karena teori ini mengasumsikan lapisan balas dan subgrade sebagai lapisan semitak hingga homogen dan isotropik. Dengan persamaan berikut:

Perubahan tegangan vertikal σ_z (kg/cm²) dibawah beban titik

$$\sigma_z = \frac{3Q_o}{2\pi} \times \frac{z^3}{(r^2+z^2)^{2.5}} \dots \dots \dots (2.29)$$

Dengan,

- Q_o = Beban titik,
- z = kedalaman vertikal pada titik diatas permukaan (cm),
- r = radius horizontal dari vertikal pada posisi beban titik ke posisi di bawah permukaan (cm).



Gambar 2.3 Konsep teori *boussinesq* untuk menentukan tegangan vertikal dibawah beban terpusat di permukaan

Dan untuk luasan beban yang diasumsikan sebagai lingkaran, maka persamaan perubahan tegangan vertikal σ_z (kg/cm²) dituliskan menjadi:

$$\sigma_z = Pa \times \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \dots \dots \dots (2.30)$$

2). Teori *Eisenmann*

Teori ini untuk menentukan tegangan di bawah bantalan dengan panjang yang tak terhingga. Bantalan dikondisikan sebagai lajur beban yang seragam dengan panjang tak terhingga. Analisis didasarkan dari pendekatan tegangan Mohr yang selanjutnya dituliskan dalam persamaan berikut :

Tegangan vertikal σ_z (kg/cm²) pada titik (x,z)

$$\sigma_z = \frac{Pa}{\pi} \left[\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right] \dots \dots \dots (2.31)$$

Tegangan horizontal σ_x (kg/cm²) pada lokasi (x,z)

$$\sigma_x = \frac{Pa}{\pi} \theta_2 - \theta_1 + \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \dots \dots \dots (2.32)$$

Tegangan geser utama τ_{xz} (kg/cm²) dalam setiap lokasi (x,z)

$$\tau_{xz} = \frac{Pa}{2\pi} (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) \dots \dots (2.33)$$

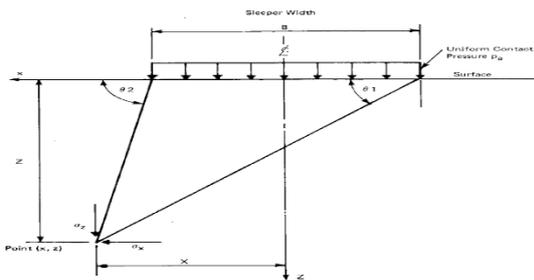
Tegangan geser maksimum τ_{max} (kg/cm²)

$$\tau_{max} = \frac{Pa}{\pi} \sin(\theta_2 - \theta_1) \dots \dots \dots (2.34)$$

Dengan,

P_a = Tekanan seragam rata-rata antara bantalan dan balas (KPa).

θ_1 dan θ_2 sudut yang ditunjukkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Penerapan dasar Boussinesq vertikal terkonsentrasi dengan beban merata pada bantalan persegi panjang.

b. Model teori semi-empirik

Beberapa penyelesaian semi-empirik yang telah dikembangkan untuk menentukan distribusi tegangan vertikal terhadap pengaruh tebal formasi balas :

1). Metode Sebaran Beban (*Load Spread*)

Tekanan vertikal berdasarkan sebaran beban 1:1, dengan bantalan bentuk persegi panjang (BxL) dinyatakan dalam bentuk :

$$\sigma_z = 2P_a \left[\frac{B.L}{(B+2z)(L+2z)} \right] \dots \dots \dots (2.35)$$

Dengan,

- B = Lebar bantalan (cm)
- L = panjang bantalan dibawah kedudukan rel (cm)

2). Metode Schramm

Metode Schramm (1961) menentukan tekanan vertikal pada formasi balas yang melibatkan parameter sudut friksi internal dari bahan atau material balas. Bahan balas dengan friksi yang tinggi akan berpengaruh pada pola sebaran tekanannya pada kedalaman yang lebih besar dari panjang bantalannya. Batas atas sudut friksi (θ) untuk bahan balas berbutir, kasar dan kering sebesar 40°, sedangkan batas bawah untuk bahan halus dan cenderung basah adalah 30°.

Tekanan vertikal σ_z (KPa) pada tanah dasar berdasarkan kedalaman ballast z (m) dapat di hitung dengan menggunakan :

$$\sigma_z = P_a \left[\frac{1.5(\ell-g).B}{\{3(\ell-g)+B\} z \tan \theta} \right] \dots \dots \dots (2.36)$$

Dengan,

- ℓ = panjang bantalan (cm)
- g = jarak antara pusat rel (cm)
- θ = sudut friksi internal pada ballast(°)

Tebal lapisan balas dapat ditentukan pada persamaan berikut:

$$z_{min} = \frac{S-B}{2 \tan \theta} \dots \dots \dots (2.37)$$

Dengan,

- S = Jarak bantalan (cm)

c. Model teori empirik

1). Persamaan Empirik Talbot

Menurut Talbot (1919), tekanan vertikal maksimum σ_z (KPa) pada lapisan balas terletak dibawah kedudukan rel dinyatakan sebagai berikut :

$$\sigma_z = P_a \left\{ \frac{1}{5.9 z^{1.25}} \right\} \dots \dots \dots (2.38)$$

Persamaan ini dikembangkan untuk balas dengan ukuran (2642 x 203mm) dengan ketebalan balas antara 0,1 hingga 0,76, Clarke (1957) mengungkapkan tekanan vertikal maksimum dijelaskan oleh persamaan talbot yang disederhanakan dengan persamaan berikut:

$$\sigma_z = P_a \left\{ \frac{0.254}{z} \right\} \dots \dots \dots (2.39)$$

2). Persamaan *Japanese National Railways* (JNR)

Beberapa persamaan empirik yang direkomendasikan oleh JNR diantaranya (Okabe, 1961) :

• Persamaan Hirokoshi

$$\sigma_z = P_a \left\{ \frac{58}{10+(100 \times z)^{1.35}} \right\} \dots \dots \dots (2.40)$$

- Persamaan Okabe untuk balas dengan material batuan pecah

$$\sigma_z = P_a \left\{ \frac{350}{240 + (100 \times z)^{1,6}} \right\} \dots \dots \dots (2.41)$$
- Persamaan Okabe untuk balas dengan material batuan kerikil (*gravel*) :

$$\sigma_z = P_a \left\{ \frac{125}{50 + (100 \times z)^{1,5}} \right\} \dots \dots \dots (2.42)$$

Analisis tekanan pada balas σ_1 , dapat dihitung dengan menggunakan konsep *beam on elastic foundation* menggunakan persamaan berikut :

$$\sigma_1 = \frac{Pd \times \lambda}{2b} x \frac{1}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} x [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2 \lambda c + \cosh \lambda L) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2 \lambda c + \cos \lambda L) + \sinh 2 \lambda a (\sin 2 \lambda c - \sinh \lambda L) - \sin 2 \lambda a (\sinh 2 \lambda c - \sin \lambda L)] \dots \dots \dots (2.43)$$

$$P_d = \left[1 + 0,01 x \left(\frac{V_r}{1,609} - 5 \right) P_s \right] x \% \dots \dots \dots (2.44)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \dots \dots \dots (2.45)$$

$$k = b \times k_e \% \dots \dots \dots (2.46)$$

Dengan,

- B = lebar bawah bantalan (cm)
- Ke = modulus reaksi balas (kg/cm³)
- EI = kekakuan lentur bantalan (kg/cm²)
- L = panjang bantalan (cm)

Untuk mengetahui nilai koefisien balas dapat dilihat pada Tabel 2.1

Kondisi balas	Koefisien balas
Buruk	3
Sedang	8-10
Baik	12-15

2.3.4 Tanah Dasar

1. Perhitungan tegangan pada lapisan tanah dasar

- Metode *Beam on Elastic Foundation* (BoEF) dan JNR

Metode ini mengasumsikan bahwa bantalan diibaratkan sebagai balok serta sebagai tumpuan elastik yang diibaratkan pegas. Adapun tekanan dibawah bantalan dapat dihitung :

$$\sigma_2 = \frac{58 \times \sigma_1}{10 + d^{1,35}} \dots \dots \dots (2.47)$$

Dengan,

- σ_2 = lebar bawah bantalan (cm)
- σ_1 = modulus reaksi balas (kg/cm³)
- d = tebal balas total (cm)

- Metode AREA dan Talbot
Metode AREA dan Talbot menggunakan persamaan empiris sebagai berikut :

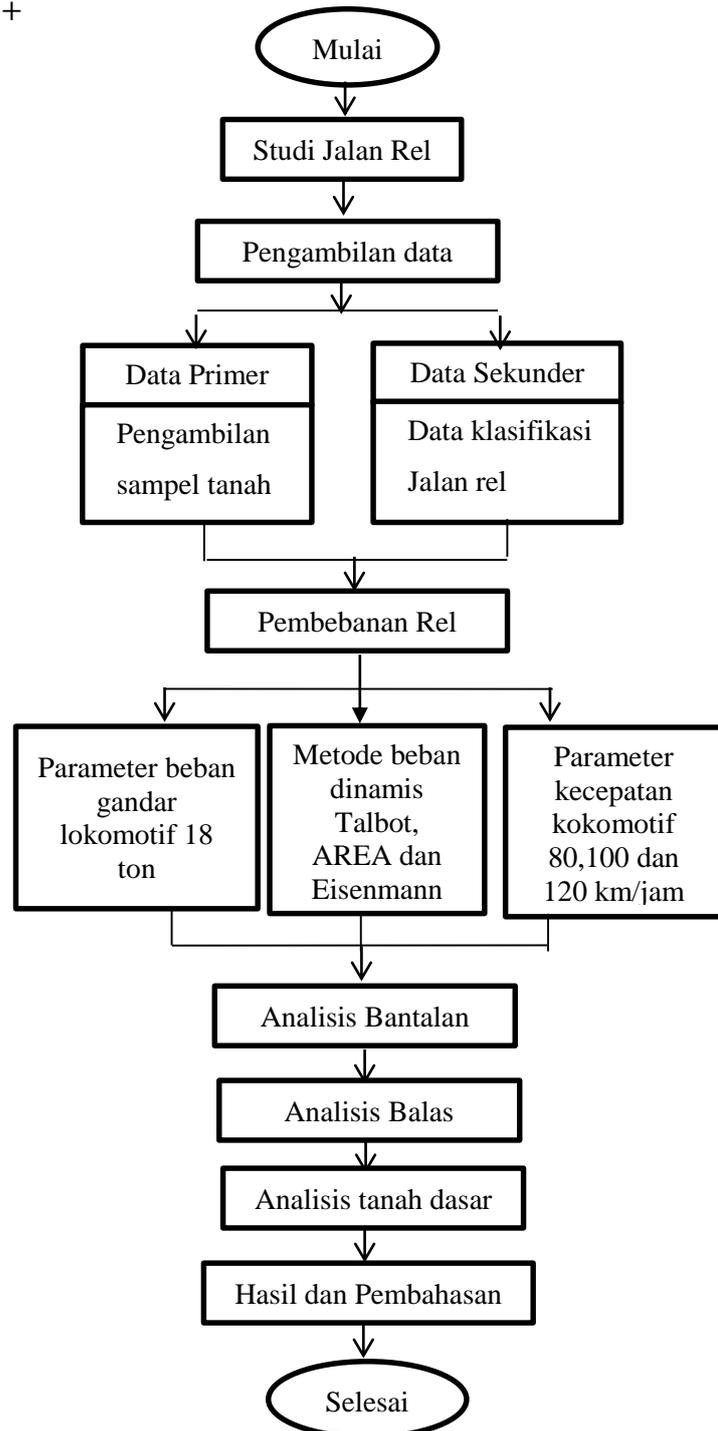
$$\sigma_1 = \frac{3 \times p}{b+l} \dots \dots \dots (2.48)$$

$$\sigma_2 = \frac{53,87 \times \sigma_1}{d^{1,25}} \dots \dots \dots (2.49)$$

3. METODE PENELITIAN

3.1 Bagan Alir Penelitian

Tahapan analisis dan penafsiran data dapat dijelaskan dalam bagan alir di bawah ini (Gambar 3.1) :



3.2 Studi Literatur

Pada langkah ini peneliti melakukan kajian tentang pustaka atau literatur yang berkaitan dengan struktur jalan rel berupa buku-buku mengenai rekayasa jalan kereta api dan peraturan-peraturan mengenai kereta api. Hasil dari studi literatur digunakan sebagai dasar melakukan langkah berikutnya.

3.3 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada ruas jalan rel Ketapang, Sungkai, Lampung Utara pada KM 117+600 sampai KM 117+800 seperti dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Lokasi penelitian

3.4 Data Penelitian

Pada penelitian ini data-data yang dikumpulkan untuk analisis berupa data primer dan data sekunder.

3.4.1 Data Primer

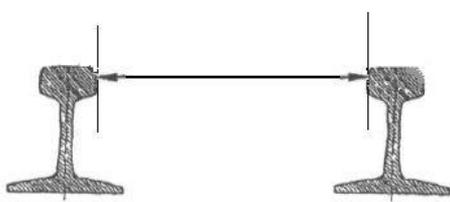
Data ini merupakan data yang diperoleh atau dikumpulkan oleh peneliti secara langsung dari sumber datanya. Data ini berupa pengambilan sampel tanah yang berada di Ketapang, Sungkai Selatan, Lampung Utara yang akan diuji langsung di laboratorium Universitas Muhammadiyah Yogyakarta untuk mengetahui daya dukung tanah yang berada di lokasi penelitian.

3.4.2 Data Sekunder

Adapun beberapa klasifikasi sesuai dengan Peraturan Dinas No. 10 Tahun 1986 dan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 yang mengatur klasifikasi jalan rel sebagaimana dijelaskan sebagai berikut :

1. Klasifikasi Jalan Rel

Lebar sepur merupakan jarak terkecil di antara kedua sisi kepala rel (bagian dalam), diukur pada daerah 0-14 mm di bawah permukaan teratas kepala rel, bisa dilihat pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Ukuran jarak lebar sepur

3.5 Pembebanan Rel

Pembebanan pada rel diperoleh hasil berupa beban dinamis dengan menggunakan metode Talbot, Area dan Eisenmenn. Yang berfungsi untuk mendapatkan nilai distribusi beban rel ke bantalan.

3.6 Analisis Bantalan

Pada analisis bagian struktur bantalan untuk memperoleh hasil berupa tegangan dan momen yang terjadi dibantalan dengan menggunakan bantalan berupa bantalan beton blok tunggal.

3.7 Analisis Balas

Pada analisis balas untuk memperoleh hasil berupa tegangan dengan teori sederhana, semi-empirik dan empirik dan menurut Peraturan Dinas Nomor 10 Tahun 1986.

3.8 Analisis Tanah Dasar

Pada analisis tanah dasar untuk memperoleh hasil akhir berupa tegangan untuk mengetahui kelayakan struktur jalan rel dengan membandingkan tegangan tanah dasar pada lokasi penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Parameter dan Asumsi Jalan Rel

Tabel 4.1 Klasifikasi Jalan Rel

Kelas Jalan	V _{maks} (km/jam)	Daya angkut Lintas (ton/tahun)	Jarak Bantalan (cm)
I	120	>20.10 ⁶	600
II	110	10.10 ⁶ -20.10 ⁶	600
III	100	5.10 ⁶ -10.10 ⁶	600
IV	90	2,5.10 ⁶ -5.10 ⁶	600
V	80	<2,5.10 ⁶	600

Sumber PM 60 Tahun 2012

Dari klasifikasi jalan rel diatas digunakan tipe jalan rel I dengan memvariasikan kecepatan 80,100 dan 120 km/jam.

Tabel 4.2 Dimensi profil rel

Besaran Geometrik Rel	Tipe Rel			
	R42	R50	R54	R60
H (mm)	110	127	140	150
B (mm)	68,5	65	70	74,3
D (mm)	13,5	15	16	16,5
E (mm)	40,5	49	49,4	51
F (mm)	23,5	30	30,2	31,5
G (mm)	72	76	74,79	80,95
R (mm)	320	500	508	120
A (cm ²)	54,26	64,2	69,39	76,86
W (kg/m)	42,59	50,4	54,43	60,43
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _b	68,5	71,6	76,2	80,95

A = Luas penampang

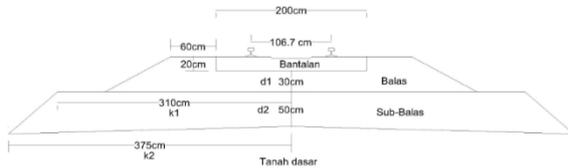
W = Berat rel per meter

Y_b = Momen inersia terhadap sumbu x

I_x = Jarak tepi bawah rel ke garis netral

Disesuaikan dengan kelas jalan di lapangan maka digunakan tipe rel R54.

Ukuran bagian konstruksi balas dan sub-balas sesuai dengan kelas jalan menurut Peraturan Daerah Nomor 10 Tahun 1986, Asumsi ukuran balas dan sub-balas dapat dilihat pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Asumsi ukuran balas dan sub-balas

Adapun contoh hasil perhitungan dengan kecepatan 120 km/jam, beban gandar 18 ton dan teori beban dinamis menggunakan teori Talbot, Area dan Eisenmann dapat dilihat pada table 4.3

Tabel 4.3 hasil beban dinamis

Kecepatan (km/jam)	120		
Beban (ton)	18		
Beban dinamis	Talbot	Area	Eisenmen
Pd (kg)	16940.3	15922.74	10478.57

Adapun contoh hasil perhitungan tegangan ijin dan tagangan dasar rel kecepatan 120 km/jam, beban gandar 18 ton beban dinamis menggunakan teori Talbot, Area dan Eisenmann dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4.4 hasil tegangan ijin dan tegangan dasar rel

Kecepatan (km/jam)	120		
Beban (ton)	18		
Beban dinamis	Talbot	Area	Eisenmen
σ_x (kg/cm ²)	1196.027	1124.184	739.8125
Sbase (kg/cm ²)	1150.705	1081.584	711.7783

Adapun contoh hasil perhitungan beban yang di distribusikan ke bantalan dengan kecepatan 120 km/jam, beban dinamis 18 ton menggunakan teori Talbot, Area dan Eisenmann dapat dilihat pada tabel 4.5

Table 4.5 hasil beban yang di distribusikan ke bantalan

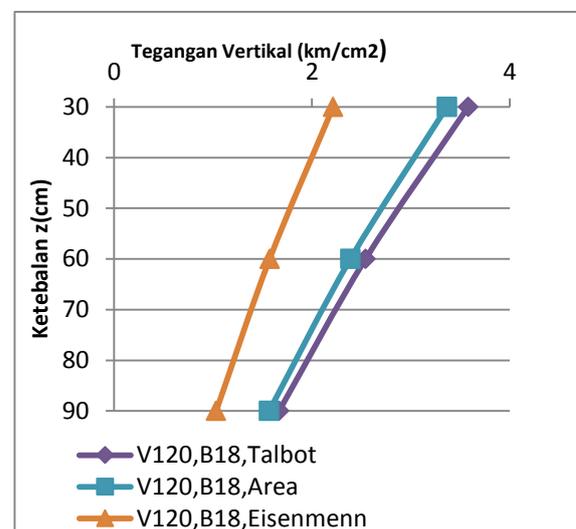
Kecepatan (km/jam)	120		
Beban (ton)	18		
Beban dinamis	Talbot	Area	Eisenmen
Q (kg)	9944.236	9346.907	6151.093

Adapun contoh hasil perhitungan pada balas menggunakan model sederhana teori boussinesq untuk beban diasumsikan sebagai lingkaran kecepatan 120 km/jam, beban gandar 18 ton, beban dinamis teori Talbot, Area dan Eisenmann dengan variasi ketebalan balas 30,60 dan 90 cm dapat dilihat pada tabel 4.6

Tabel 4.6 hasil tegangan di balas dengan variasi ketebalan balas 30,60 dan 90 cm

Kecepatan (km/jam)	120			
Beban (ton)	18			
Beban dinamis	Talbot	Area	Eisenmen	
σ_z (kg/cm ²) dengan z (cm)	30	3.57897	3.36399	2.21380
σ_z (kg/cm ²) dengan z (cm)	60	2.54087	2.38825	1.57168
σ_z (kg/cm ²) dengan z (cm)	90	1.66640	1.56631	1.03077

Adapun contoh grafik pengaruh tegangan vertikal dengan variasi ketebalan balas 30,60 dan 90 cm, model sederhana teori Boussinesq dengan kecepatan 120 km/jam. Dapat dilihat pada gambar 4.7



Gambar 4.7 Pengaruh tegangan vertikal dengan ketebalan balas model sederhana teori Boussinesq dengan kecepatan 120 km/jam

Dari grafik dapat dijelaskan semakin tebal balas yang digunakan tegangan vertikal diterima balas semakin kecil.

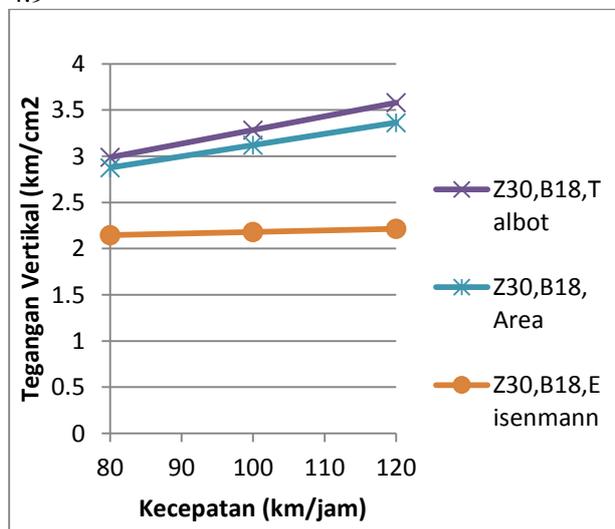
Adapun contoh hasil perhitungan pada balas menggunakan model sederhana teori boussinesq untuk beban diasumsikan sebagai lingkaran variasi kecepatan 80,100 dan 120 km/jam, beban gandar 18 ton, beban dinamis teori Talbot, Area dan

Eisenmann dengan ketebalan balas 30 cm dapat dilihat pada tabel 4.8

Tabel 4.8 hasil tegangan pada ketebalan balas 30cm dengan variasi kecepatan 80,100 dan 120km/jam

Kecepatan (km/jam)		120		
Beban (ton)		18		
Beban dinamis		Talbot	Area	Eisnmen
σ_z (kg/cm ²) dengan z (cm)	30	3.578	3.363	2.213
Kecepatan (km/jam)		100		
Beban (ton)		18		
Beban dinamis		Talbot	Area	Eisnmen
σ_z (kg/cm ²) dengan z (cm)	30	3.283	3.120	2.179
Kecepatan (km/jam)		80		
Beban (ton)		18		
Beban dinamis		Talbot	Area	Eisnmen
σ_z (kg/cm ²) dengan z (cm)	30	2.988	2.87	2.145

Adapun contoh grafik pengaruh tegangan vertikal dengan variasi kecepatan 80,100 dan 120 km/jam, model sederhana teori Boussinesq dengan ketebalan balas 30 cm. Dapat dilihat pada gambar 4.9



Gambar 4.9 Pengaruh tegangan vertikal dengan variasi kecepatan model sederhana teori Boussinesq dengan kedalaman 30 cm

Dari hasil Grafik dapat dijelaskan bahwa semakin tinggi kecepatan semakin besar tegangan vertikal yang diterima.

Adapun contoh perhitungan tegangan vertikal yang diterima tanah dasar menurut teori BoEf (*Beam on Elastic Foundation*) dan JNR (*Japanese National*

Railways) dengan kecepatan 120 km/jam beban dinamis menggunakan teori Talbot, Area dan Eissenmann, beban gandar 18 ton ketebalan keseluruhan balas dan sub-balas 80 cm dapat dilihat pada tabel 4.10

Tabel 4.10 hasil tegangan vertikal

Kecepatan (km/jam)		120		
Beban (ton)		18		
Beban dinamis		Talbot	Area	Eisnmen
σ_2 (kg/cm ²)	30	0.635876	0.59768	0.39332

Dari hasil diatas di dibandingkan dengan tegangan daya dukung tanah sebesar 1,014 kg/cm².

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Tegangan vertikal yang diterima tanah dasar dengan menggunakan perhitungan menurut Peraturan Dinas Nomor 10 Tahun 1986 dengan metode BoEF (*Beam of Elastic Foundation*) dan JNR (*Japanese National Railways*) dengan variasi kecepatan, teori beban dinamis mampu menahan tegangan vertikal ke tanah dasar sesuai dengan daya dukung tanah di lokasi penelitian. Sedangkan tegangan yang diterima tanah dasar menurut teori Area dan Talbot yang mampu menahan tegangan vertikal yaitu variasi kecepatan 120,100,80 km/jam dengan metode beban dinamis Eissenmann.
2. Adanya pengaruh untuk kecepatan terhadap tegangan yang diterima pada struktur jalan rel, untuk itu perlunya perencanaan yang sangat baik untuk menentukan kecepatan yang sesuai dengan daya dukung tanah.
3. Penyebab penurunan struktur jalan rel yang terjadi bukan karena kegagalan struktur jalan rel melainkan penyebab lain yaitu buruknya sistem drainase yang mengakibatkan air mengendap dan menjadikan lumpur masuk ke kantong balas menjadikan agregat balas berlumpur sehingga performa balas tidak maksimal untuk menahan getaran yang di salurkan dari bantalan.

5.1 Saran

1. Untuk kedepannya mengkaji tentang berapa besar beban gandar yang mampu diterima tegangan vertikal sampai kondisi tegangan yang diterima maksimal.
2. Merencanakan struktur jalan rel menggunakan kereta api cepat, dengan kecepatan kereta api diatas 120 km/jam.
3. Menrencakan struktur jalan rel ganda.

DAFTAR PUSTAKA

- PJKA.1986. Penjelasan Perencanaan Kontruksi Jalan Rel (Penjelasan Peraturan Dinas No.10). Bandung.
- PJKA.1986. Perencanaan Kontruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10). Bandung
- Menteri Perhubungan Republik Indonesia. 2012.Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api (Petaturan Meneteri No.60). Jakarta.
- Doyle, N. F. 1980. Railways Track Design. A Review of Current Practice. BHP Melbourne Research Laboratories, Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Rosyidi, Sri Atmaja P. 2015. Rekayasa Jalan Kereta Api. Lembaga Penelitian, Publikasi dan Pengabdian Masyarakat Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (LP3M UMY).Yogyakarta
- Direktur Jendral Peraturan Darat.2002.Peteunjuk Teknik Penggunaan Beton Monoblok denga Proses Protension. Jakarta