

BAB II

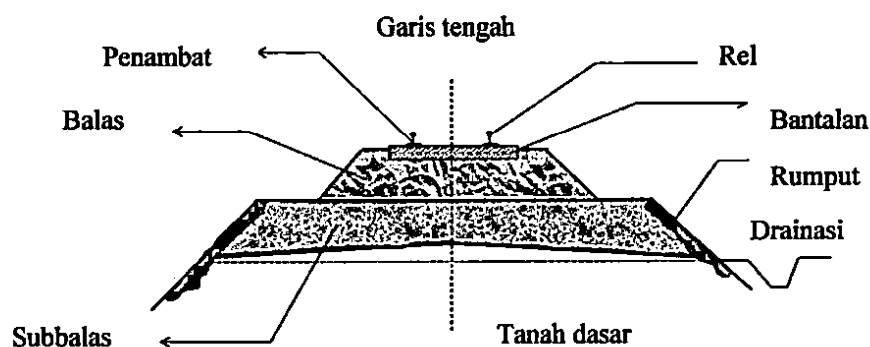
TINJAUAN PUSTAKA

A. Struktur Jalan Rel Kereta Api

Struktur jalan rel adalah suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana infrastruktur dan perjalanan kereta api. Konsep struktur jalan rel merupakan rangkaian superstruktur dan sub-struktur menjadi satu kesatuan yang saling berhubungan untuk menerima dan mendukung pergerakan kereta api secara aman (Rosyidi, 2015).

Adapun komponen struktur jalan rel dibagi menjadi dua bagian yaitu:

1. Struktur bagian atas (*superstructure*) yang terdiri dari komponen rel (*rail*) termasuk pelat penyambung didalamnya, penambat (*fastening*) dan bantalan (*sleeper, tie, cross tie*). Pada komponen ini akan langsung menerima beban dari lokomotif, kereta, atau gerbong yang langsung menyebarkan beban ke substruktur.
2. Struktur bagian bawah (*substructure*) yang terdiri dari komponen balas (*ballast*), subbalas (*subballast*), tanah dasar (*improve subgrade*) dan tanah asli (*natural ground*). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Gambar konstruksi jalan rel

Secara umum komponen-komponen penyusun jalan rel dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Rel (*Rail*)

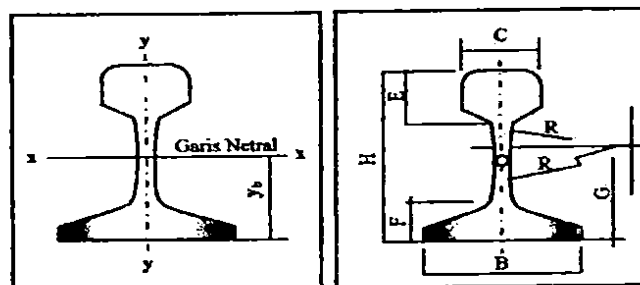
Rel merupakan batangan baja longitudinal yang berhubungan secara langsung dan memandu serta memberikan tumpuan terhadap pergerakan roda kereta api secara berterusan. Oleh karena itu, rel juga harus memiliki nilai kekuatan tertentu untuk menerima dan mendistribusikan beban dari kereta api dengan baik. Tipe rel untuk masing-masing kelas jalan tercantum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kelas jalan dan tipe rel

Kelas Jalan	Tipe Rel
I	R 60 / R 54
II	R 54 / R 50
III	R 54 / R 50 / R 42
IV	R 54 / R 50 / R 42
V	R 42

Sumber : PM No. 60 tahun 2012

Masing-masing profil rel memiliki karakteristik penampang yang berbeda, seperti pada Gambar 2.2 dan dijelaskan dalam Tabel 2.2 sesuai dengan PM No. 60 tahun 2012.



Gambar 2.2 Gambar penampang rel

Tabel 2.2 Karakteristik Penampang

Besaran Geometrik Rel	Tipe Rel			
	R42	R50	R54	R60
H (mm)	138	153	159	172
B (mm)	110	127	140	150
C (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	69.34	76.86
W (kg/m)	42.59	50.4	54.43	60.43
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _b (mm)	68.5	71.6	76.2	80.95

Sumber : PM No. 60 tahun 2012

2. Bantalan (*Sleeper/Tie/Crosstie*)

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. Bantalan dapat terbuat dari kayu, baja/besi, ataupun beton.

PM No. 60 tahun 2012 menyebutkan syarat untuk bantalan beton dengan lebar jalan rel 1067 mm sebagai berikut :

- a. Untuk lebar jalan rel 1067 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 500 kg/cm², dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar 16.876 kg/cm² (1.655 MPa). Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sebesar +1500 kg m pada bagian dudukan rel dan -930 kg m pada bagian tengah bantalan.

subbalas merupakan material yang biasa juga digunakan untuk konstruksi base dan sub-base jalan raya (Rosyidi, 2015).

5. Lapisan tanah dasar (*subgrade*)

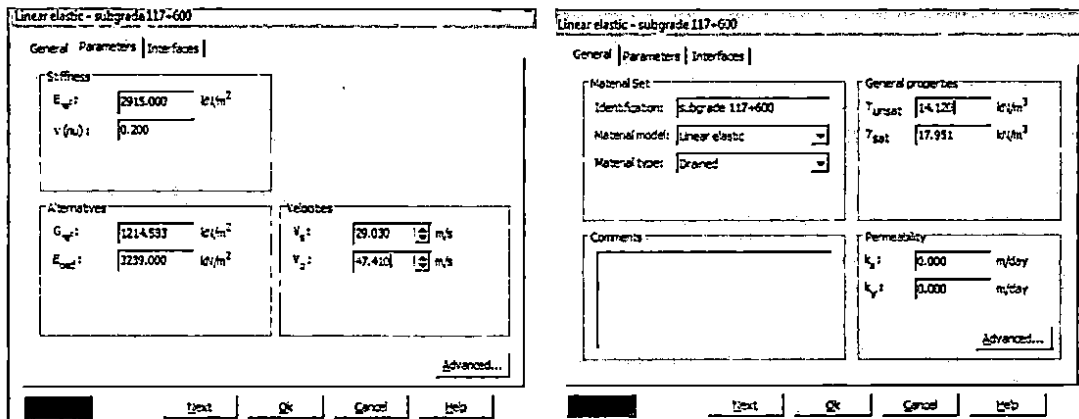
Lapisan tanah dasar merupakan lapisan dasar pada struktur jalan rel yang harus dibangun terlebih dahulu. Lapisan *subgrade* merupakan lapisan yang memiliki fungsi sebagai penerima beban akhir dari kendaraan kereta api, sehingga lapisan ini perlu dirancang dan dipersiapkan untuk mampu menerima beban secara optimum tanpa terjadi adanya deformasi tetap.

B. Parameter Material

Dalam PLAXIS 2D, input material yang digunakan tergantung dari tipe model yang digunakan sebagai pemodelan. Dalam penelitian ini digunakan model material *Linier elastic* untuk memodelkan material tanah dasar, lapisan subbalas, dan lapisan balas dari struktur jalan rel. Sementara, untuk bantalan menggunakan *Plates*. Parameter yang digunakan pada model *Linier elastic* seperti terlihat dalam Gambar 2.3 antara lain:

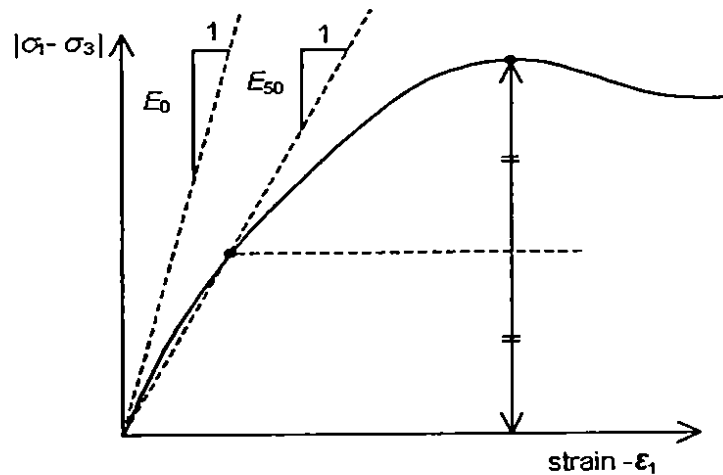
1. *Modulus Young* (E)

Nilai *modulus young* menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan. *Modulus young* digunakan dalam PLAXIS sebagai modulus kekakuan dasar dalam model *Linier elastic*. Nilai *modulus young* bisa didapatkan dari kurva tegangan regangan pengujian triaksial. Dalam mekanika tanah, kemiringan awal kurva tegangan regangan diindikasikan sebagai E_0 dan modulus kekakuan pada kekuatan 50% disebut sebagai E_{50} (Gambar 2.4). Secara umum untuk pembebanan tanah menggunakan E_{50} . Nilai perkiraan modulus elastisitas menurut Bowles dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Gambar 2.3 Jendela parameter model *Plane Strain*

Tabel 2.3 Nilai perkiraan modulus elastisitas (Bowles, 1997)

Macam tanah	Modulus elastisitas, E (Kg/cm ²)
Lempung	
• Sangat lunak	3 - 30
• Lunak	20 - 40
• Sedang	45 - 90
• Berpasir	300 - 425
Pasir	
• Berlanau	50 - 200
• Padat	100 - 250
• Tidak padat	500 - 1000
Pasir dan kerikil	
• Padat	800 - 2000
• Tidak padat	500 - 1400
Lanau	20 - 200
Loses	150 - 600
Cadas	1400 - 14000



Gambar 2.4 Definisi E_0 dan E_{50} untuk hasil standar uji triaksial terdrainasi
(Brikgreve dkk., 1998)

2. Poisson Ratio (ν)

Nilai *poisson ratio* didefinisikan sebagai rasio regangan aksial terhadap regangan lateral. Hasil standar uji triaksial terdrainase dapat menunjukkan penurunan volume secara signifikan pada awal pembebanan dan mengakibatkan nilai awal yang rendah pada *angka poisson* (ν_0). Nilai *poisson ratio* dapat ditentukan berdasar jenis tanah seperti yang terlihat pada Tabel 2.4 di bawah ini.

Tabel 2.4 Hubungan antara jenis tanah dan *poisson ratio* (Bowles, 1997)

Jenis Tanah	Poissin Ratio (ν)
Lempung jenuh	0,4 – 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 – 0,3
Lempung berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir	0,1 – 1,0
Batuan	0,1 – 0,4
Umum dipakai untuk tanah	0,3 – 0,4

3. Berat volume tanah (γ)

Berat isi tanah (γ) adalah berat suatu volume tanah dalam keadaan utuh, dinyatakan dalam kN/m^3 . Jenis dan karakteristik dari suatu tanah dapat mempengaruhi nilai dari berat volumenya, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.5. Persamaan perhitungan untuk mencari nilai berat volume tanah dinyatakan sebagai berikut :

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.1)$$

Dengan, W = Berat total tanah (kN)

V = Volume tanah (m^3)

Tabel 2.5 Nilai tipikal berat volume tanah

Jenis Tanah	γ_{sat} (kN/m^3)	γ_{dry} (kN/m^3)
Kerikil	20 - 22	15 - 17
Pasir	18 - 20	13 - 16
Lanau	18 - 20	14 - 18
Lempung	16 - 22	14 - 21

Sumber : Terzaghi dkk., 1996

Pada bagian bantalan dari struktur jalan rel dimodelkan menggunakan *Plates*. *Plates* merupakan objek struktural yang digunakan untuk memodelkan struktur yang ramping dengan kekakuan lentur dan kekakuan normal. Parameter yang digunakan untuk *Plates* terlihat dalam Gambar 2.6 antara lain:

1. Parameter kekakuan lentur/*bending stiffness* (EI)

Untuk menghitung nilai parameter kekakuan lentur/*bending stiffness* (EI) pada model *plane strain* digunakan persamaan sebagai berikut :

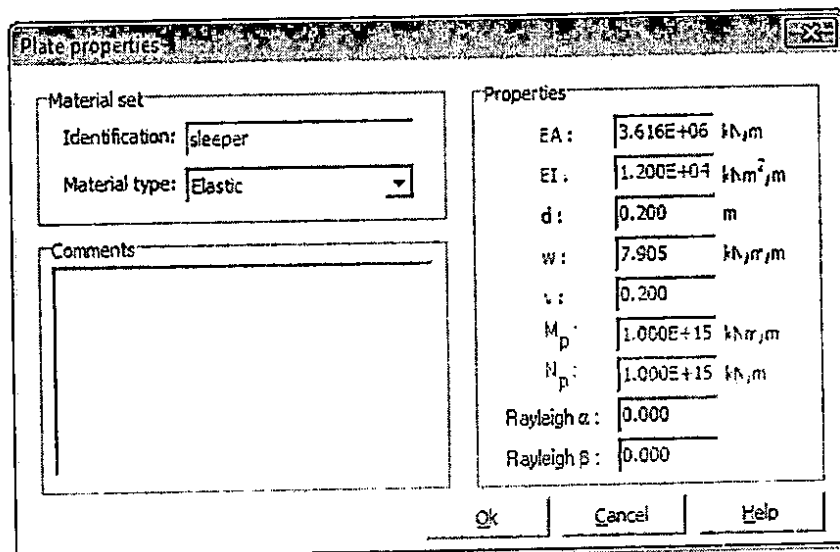
$$EI_{psp} = EI_p \times \frac{n_p - row - i}{L_r} \quad (2.2)$$

Dengan, EI_{psp} = Kekakuan lentur untuk tiang *plane strain* ($kN/m^2/m$)

EI_p = Kekakuan lentur untuk satu tiang ($kN/m^2/m$)

$n_{p-row-i}$ = Jumlah tiang dalam baris i

L_r = Panjang bidang (m)



Gambar 2.6 Jendela parameter *Plates*

2. Parameter kekakuan normal/*normal stiffness* (EA)

Untuk menghitung nilai parameter kekakuan normal/*normal stiffness* (EA) pada model *plane strain* digunakan persamaan sebagai berikut :

$$EA_{psp} = EA_p \times \frac{n_{p-row-i}}{L_r} \quad (2.3)$$

Dengan, EA_{psp} = Kekakuan normal untuk tiang *plane strain* ($kN/m^2/m$)

EA_p = Kekakuan normal untuk satu tiang ($kN/m^2/m$)

Sementara persamaan yang digunakan untuk menghitung berat dari tiang *plane strain* yaitu :

$$W_{psp} = W_p \times \frac{n_{p-row-i}}{L_r} \quad (2.4)$$

Dengan, W_{psp} = Berat untuk tiang *plane strain* (kN/m²/m)

W_p = Berat untuk satu tiang (kN/m²/m)

C. Beban Kereta Api

Beban kereta api merupakan beban lalu lintas yang akan diterima rel selama masa layanan. Beban kereta api bervariasi tergantung beban muatan kereta apinya. Ukuran, jumlah dan jarak gerbong kereta api berpengaruh terhadap pendistribusian beban kereta ke dalam rel kereta. Beban kereta api di Indonesia menggunakan kriteria pembebanan dalam PM No.60 Tahun 2012, yaitu sebesar 18 ton untuk beban gandar maksimum.

Distribusi pembebanan pada kereta api dimulai dari dasar rel ke bantalan dengan perantara pelat andas ataupun alas karet (Gambar 2.7). Selanjutnya, beban vertikal dari bantalan akan didistribusikan ke lapisan balas dan subbalas menjadi lebih kecil dan melebar. Pola distribusi beban yang melebar akan menghasilkan tekanan yang lebih kecil yang dapat diterima oleh lapisan tanah dasar. Gaya vertikal yang dihasilkan oleh beban gandar oleh lokomotif, kereta, dan gerbong merupakan beban statik. Oleh karena itu, diperlukan transformasi dari beban statik ke beban dinamik untuk merencanakan beban yang lebih realistis. Persamaan umum untuk menentukan gaya vertikal pada jalan rel sebagai fungsi dari beban statik roda kereta api dapat dinyatakan sebagai:

$$P_d = I_d \times P_s \quad (2.5)$$

Dimana, P_d = Beban roda 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)

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

$$I_d = 1 + 0,01 \left[\frac{V_r}{1,609} - 5 \right] \quad (2.6)$$

Dimana, I_d = Faktor/indeks beban dinamis (*dimensionless*/tidak berdimensi)

V_r = Kecepatan rencana (dalam km/jam)

Persamaan Talbot di atas, adalah persamaan yang digunakan sebagai standar perencanaan struktur jalan kereta api di Indonesia (Peraturan Dinas No.10 tahun 1986, dan Peraturan Menteri Perhubungan No.60 tahun 2012).

Rel didisain menggunakan konsep "*beam on elastic foundation model*" dengan mengansumsikan bahwa setiap rel akan berperilaku sebagai balok menerus (*infinite beam*) yang diletakkan di atas tumpuan elastik linier (Rosyidi, 2015). Ketika beban eksternal (beban dari roda kendaraan) disalurkan di atas balok (rel) yang diletakkan di atas fondasi elastik linier, maka gaya reaksi pada fondasi nilainya adalah proporsional terhadap nilai defleksi yang terjadi pada setiap titik pada balok tersebut. Asumsi ini menjadi dasar perhitungan model *beam on elastic foundation* (BoEF). Pembebanan pada bantalan diperhitungkan menggunakan rumus :

$$Q_1 = 0,786 \times \frac{P_d \times S}{X_1} \quad (2.7)$$

Dimana, Q_1 = Distribusi beban ke bantalan (kg)

P_d = Beban roda dinamik rencana (kN/kg)

S = Jarak bantalan (cm)

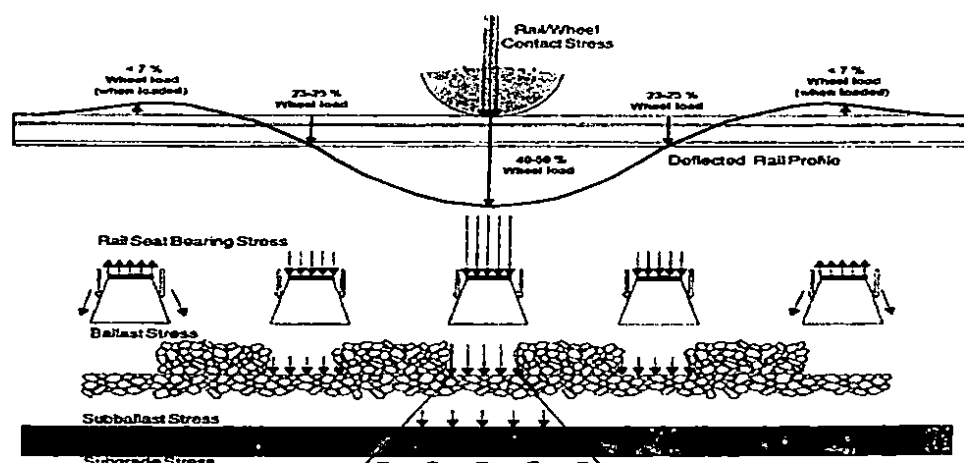
X_1 = Jarak momem 0 ke momen maksimal (cm)

$$\text{Maka, } X_1 = \frac{\pi}{4\lambda} \text{ dengan } \lambda = \left[\frac{k}{4EI} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.8)$$

Dimana, E = Modulus elastisitas jalan rel (kg/cm^2)

I = Momen Inersia (cm^4)

k = Modulus jalan rel (Mpa)



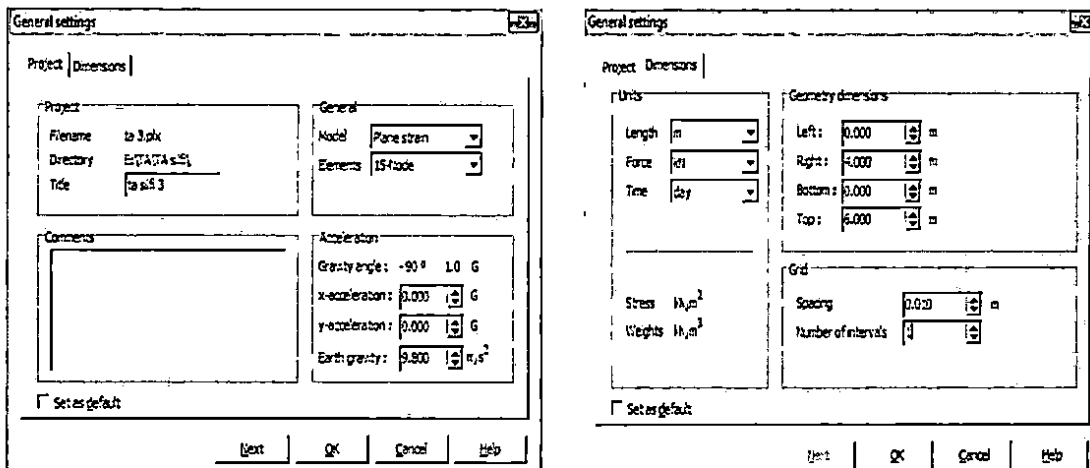
Gambar 2.7 Pola distribusi beban kereta api pada struktur jalan rel
(Selig dan Water, 1994)

D. Pemodelan Numerik PLAXIS 2D

PLAXIS (*Finite Element Code For Soil and Rock Analysis*) adalah suatu program yang dikembangkan untuk menganalisa deformasi dan stabilitas tanah, serta material geoteknik dengan menggunakan pendekatan metode elemen hingga. Melalui input yang sederhana, PLAXIS mampu melakukan perhitungan elemen hingga yang kompleks serta menyediakan fasilitas *output* tampilan yang cukup detail dan hasil perhitungan yang akurat, sehingga mampu membantu dalam memecahkan suatu masalah yang berkaitan dengan tanah dan geoteknik. Adapun beberapa langkah pemodelan dalam PLAXIS secara umum sebagai berikut :

1. General setting

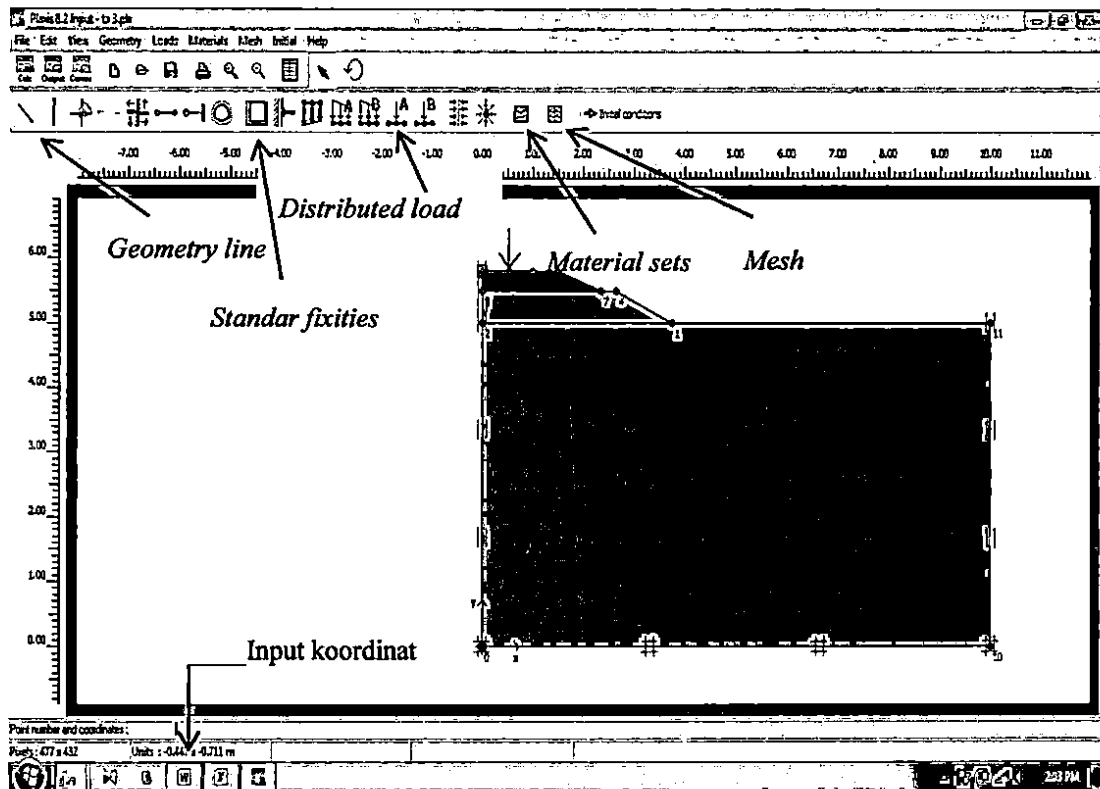
Tahap awal ini berfungsi untuk mendefinisikan nama, model, jumlah *node* elemen, satuan, dan dimensi area PLAXIS yang akan digunakan untuk pemodelan (Gambar 2.8).



Gambar 2.8 Tampilan *General setting* pada PLAXIS

2. Geometry model and loading

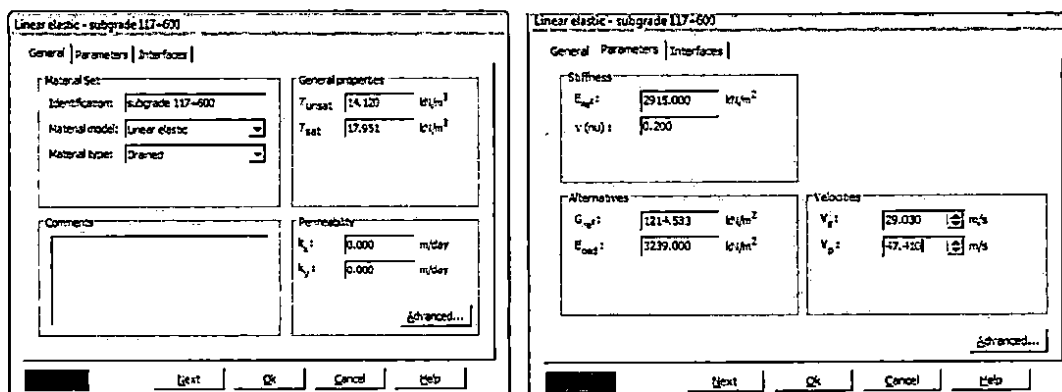
Pada tahap ini pemodelan dimulai dengan cara memasukkan koordinat geometri sehingga model membentuk seperti kondisi aslinya dengan menggunakan *geometry line*. Bisa dilakukan dengan cara menarik garis pada *grid-grid* yang sudah ada atau dengan mengetikkan setiap titik koordinat untuk memperoleh hasil yang akurat. Setiap lapisan tanah dan elemen yang terkait di lapangan, dimodelkan dalam tahap ini. Ketika koordinat sudah selesai dimasukkan, maka diberi batasan dengan *standard fixities*. Selain itu pada tahap ini juga diberikan posisi beban yang akan bekerja pada lapisan jalan rel kereta api dan tanah menggunakan *point load* dan input setiap titik koordinat beban seperti sebelumnya (Gambar 2.9).



Gambar 2.9 Jendela utama PLAXIS

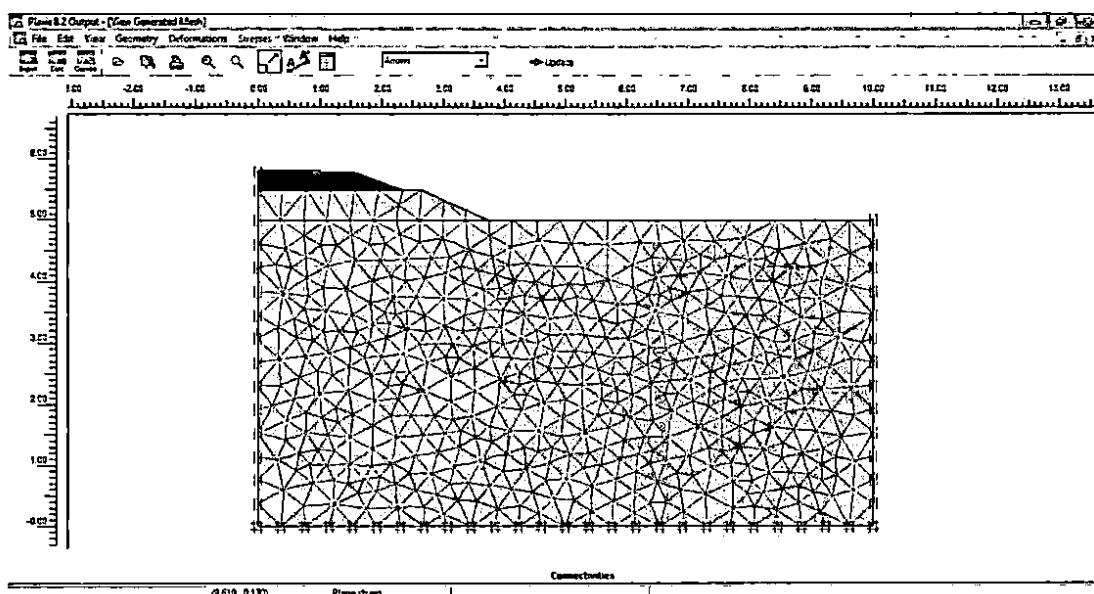
3. Material

Setiap jenis material didefinisikan dalam tahap ini. Mulai dari model material, tipe material hingga parameter-parameter teknis yang akan digunakan pada tahap perhitungan nanti pada menu *material sets* (Gambar 2.10).

Gambar 2.10 Tampilan *input* material

4. Mesh

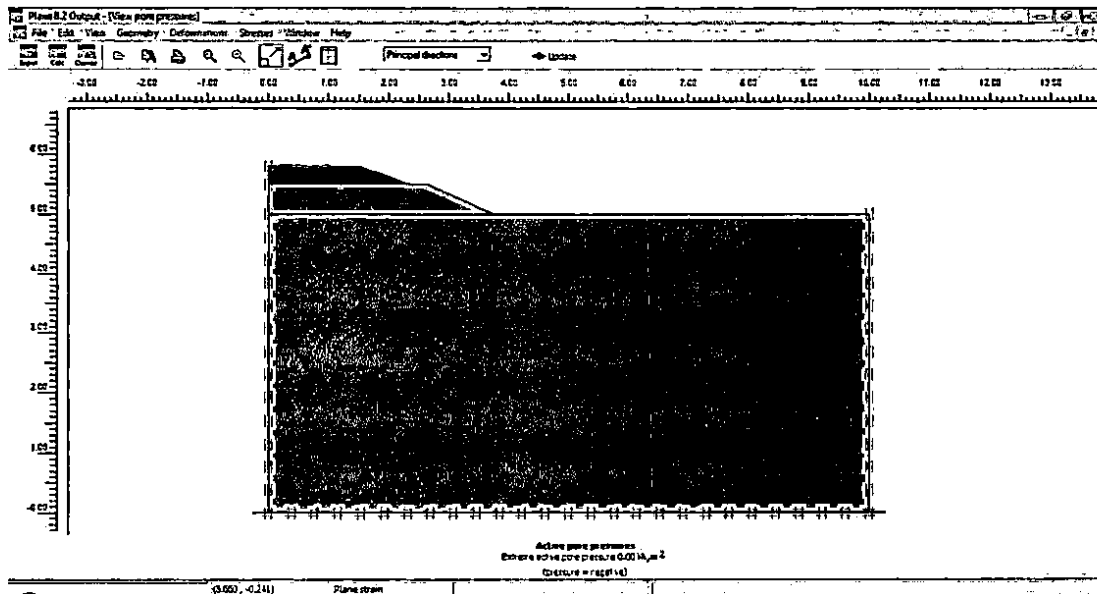
Mesh dilakukan untuk membagi elemen menjadi bagian yang lebih kecil berbentuk jaring-jaring segitiga. Tujuannya untuk memudahkan perhitungan dengan metode elemen hingga dan memperoleh hasil yang akurat. *Mesh* dilakukan setelah tahap pemodelan geometri dan material sudah selesai dilakukan (Gambar 2.11).



Gambar 2.11 Tampilan *mesh*

5. Initial Condition

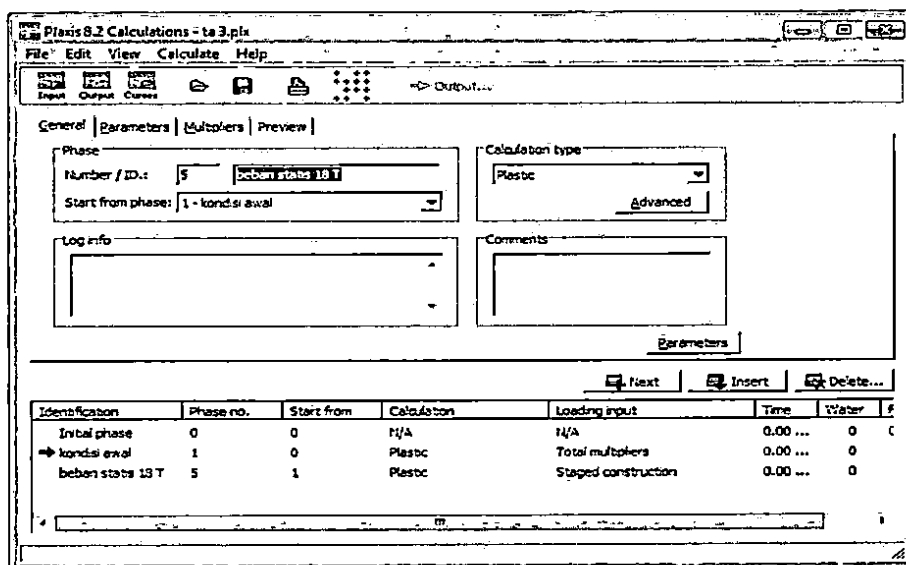
Initial Condition diperlukan untuk memberikan kondisi awal pada tanah sesuai keadaan aslinya. Terdapat dua kondisi awal yang bisa diberikan yaitu tekanan air pori (*pore water pressure*) dan tegangan awal (*initial stress*) (Gambar 2.12). Kondisi awal sangat mempengaruhi hasil perhitungan akhir.



Gambar 2.12 Tampilan *Initial Condition* pada kondisi *pore water pressure*

6. Calculation

PLAXIS dapat melakukan perhitungan sesuai dengan urutan proses pekerjaan (*stage construction*) di lapangan (Gambar 2.13). Setiap proses urutan pekerjaan dapat dikondisikan secara individu dan saling terkait secara berurutan. Sehingga PLAXIS dapat dikatakan juga berfungsi untuk mensimulasikan masalah-masalah yang dijumpai di lapangan.



Gambar 2.13 Jendela *calculation* pada PLAXIS

