

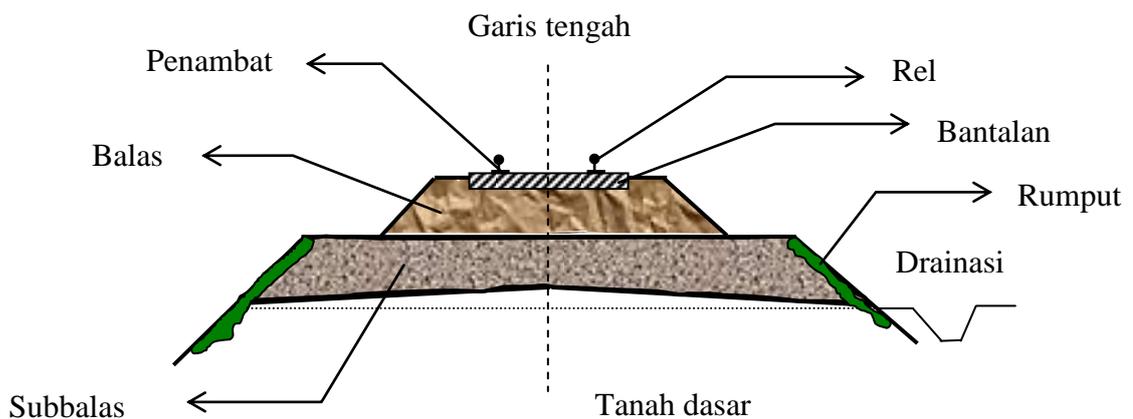
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Struktur Jalan Kereta Api

Struktur jalan kereta api adalah suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana infrastruktur dalam perjalanan kereta api. Konsep struktur jalan rel merupakan rangkaian superstruktur dan substruktur menjadi suatu 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*) terdiri dari komponen rel (*rail*) termasuk plat penyambung didalamnya, penambat (*fastening*) dan bantalan (*sleeper, tie, crosstie*). Superstruktur menerima langsung beban dari lokomotif dan gerbong yang kemudian mendistribusikan beban yang diterima secara merata 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 Konstruksi jalan rel

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

1. Rel (*Rail*)

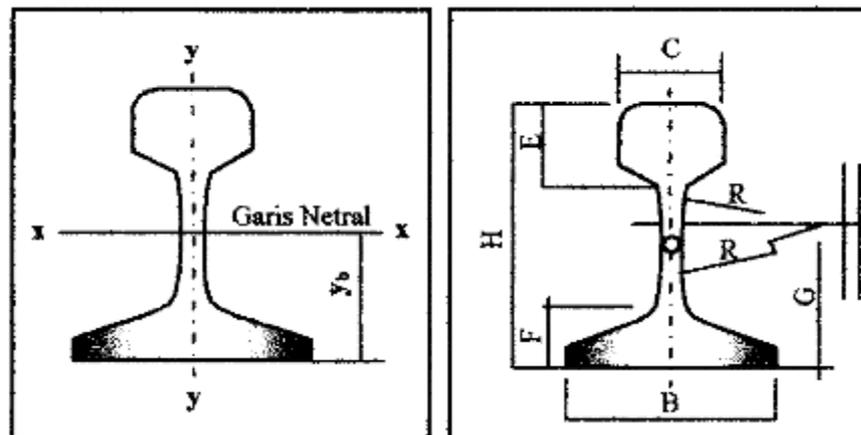
Batang baja longitudinal yang disebut rel dipasang berhubungan secara langsung dan memadu serta memberikan tumpuan terhadap pergerakan roda kereta api secara berterusan. Nilai kekuatan yang dimiliki rel berguna untuk menerima dan mendistribusikan beban dari kereta api dengan baik. Tipe rel untuk masing-masing 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 Penampang rel (PM No. 60, 2012)

Tabel 2.2 Karakteristik Penampang

Besaran Geometrik Rel	Tipe Rel			
	R.42	R.50	R.54	R.60
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 berfungsi menerima beban dari rel dan menyalurkannya ke lapisan balas dengan tingkat tekanan (tegangan) yang lebih kecil dan merata. Bantalan juga berguna mempertahankan sistem penambat tetap mengikat rel padaudukannya dan menahan pergerakan rel pada arah longitudinal, lateral dan vertikal. Bantalan dapat dibagi menurut bahan konstruksinya, seperti bantalan besi, kayu maupun beton. Perancangan bantalan yang baik sangat diperlukan supaya fungsi bantalan dapat optimal.

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.

b. Dimensi bantalan beton

- 1). Panjang : 2.000 mm
- 2). Lebar maksimum : 260 mm
- 3). Tinggi maksimum : 220 mm

3. Balas (*Ballast*)

Konstruksi lapisan balas terdiri dari material granular/butiran dan diletakan sebagai lapisan permukaan atas dari konstruksi substruktur. Material balas yang baik berasal dari batuan yang bersudut, pecah, keras, bergradasi yang sama, bebas dari debu dan kotoran serta bentuknya tidak pipih. Lapisan balas berfungsi untuk menahan gaya vertikal, lateral, dan longitudinal yang dibebankan kepada bantalan sehingga bantalan dapat mempertahankan jalan rel pada posisi yang disyaratkan.

4. Lapisan fondasi bawah atau lapisan subbalas (*subballast*)

Subbalas berada diantara lapisan balas dan lapisan tanah dasar. Subbalas berfungsi sebagaimana lapisan balas, diantaranya mengurangi tekanan di bawah balas sehingga dapat mendistribusikan beban ke lapisan tanah dasar dengan tingkat tekanan (tegangan) yang lebih kecil. Material yang biasa digunakan untuk konstruksi subbalas merupakan material yang biasa juga digunakan untuk konstruksi base dan sub-base jalan raya (Rosyidi, 2015).

5. Lapisan tanah dasar (*subgrade*)

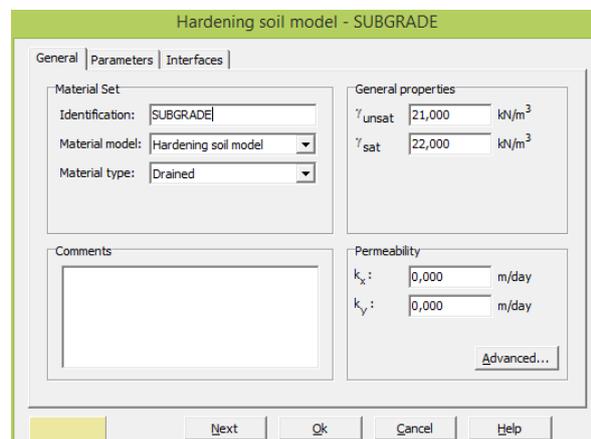
Lapisan tanah dasar merupakan lapisan dasar pada struktur jalan rel yang harus dibangun terlebih dahulu. Lapisan *subgrade* merupakan lapisan yang memiliki fungsi sebagai penerima beban terakhir dari kereta api, sehingga *subgrade* perlu dirancang dan dipersiapkan untuk mampu menerima beban secara optimum tanpa terjadideformasi 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 lapisan subbalas dan lapisan balas dari struktur jalan rel. Sementara, untuk bantalan menggunakan *plates* dan subgrade menggunakan *hardening soil*.

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* dan *hardening soil*. 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.

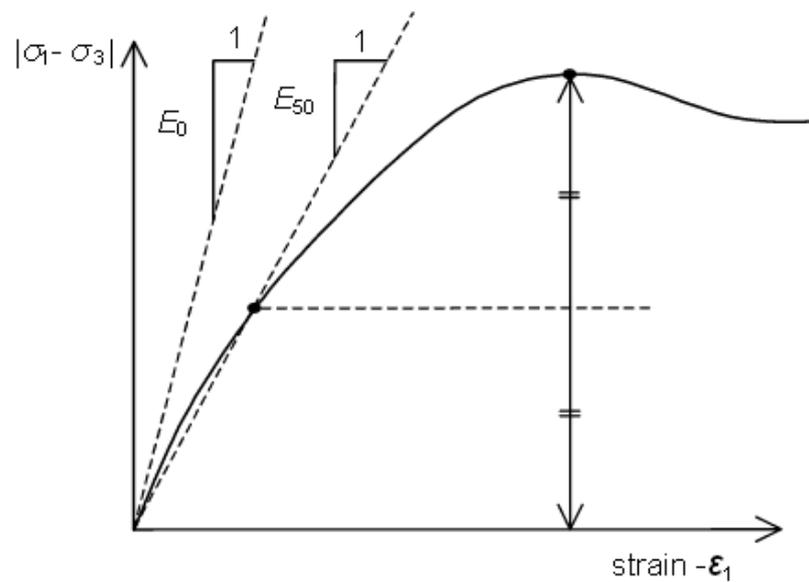


Gambar 2.3 Jendela parameter *Hardening Soil* (*HS-Model*)

Tabel 2.3 Nilai perkiraan modulus elastisitas tanah(Bowles, 1977)

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

Sumber: Mekanika Tanah II, Hary C. Hardiyatmo, 1994



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. Nilai *poisson ratio* dapat ditentukan berdasar jenis tanah seperti yang terlihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Hubungan antara jenis tanah dan *poisson ratio* (Bowles, 1977)

Jenis Tanah	Poisson 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 Padat	0,2 – 0,4
Pasir kasar ($e = 0,4 - 0,7$)	0,15
Pasir halus ($e = 0,4 - 0,7$)	0,25
Batuan	0,1 – 0,4
Loess	0,1 – 0,3
Umum dipakai untuk tanah	0,3 – 0,4

Sumber: Mekanika Tanah II, Hary C. Hardiyatmo, 1994

3. Berat volume tanah (γ)

Berat volume tanah (γ) dalam keadaan utuh, dinyatakan dalam kN/m^3 . Jenis 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 pada Gambar 2.5.

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

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

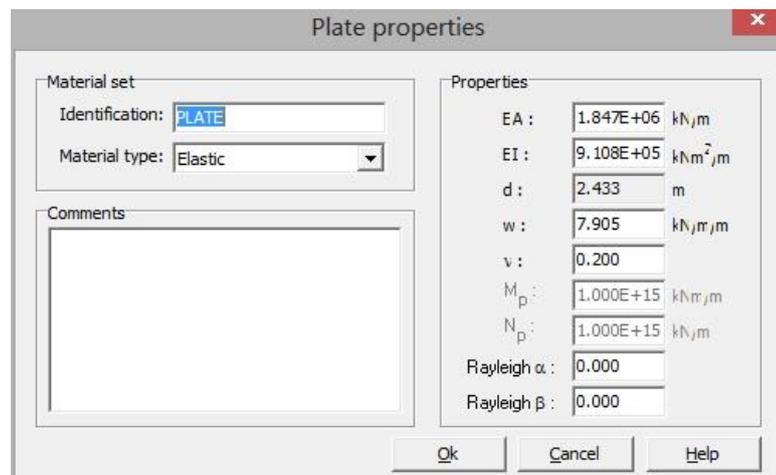
$$EI = E \times I \quad (2.2)$$

dimana,

EI = Kekakuan lentur untuk bantalan *plane strain* (kN/m²/m)

E = Modulus elastisitas (kN/m²)

I = Momen inersial (m)



Gambar 2.5 Jendela parameter *Plate*

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

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

$$EA = E_s \times A \quad (2.3)$$

dimana,

EA = Kekakuan normal untuk bantalan *plane strain* (kN/m²/m)

E_s = Modulus elastik (kN/m²)

A = Luasan penampang bantalan (m²)

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

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

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

W_p = Berat untuk satu bantalan (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 maksimum kereta api. Ukuran, jumlah dan jarak gerbong kereta api berpengaruh terhadap pendistribusian beban kereta api ke 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 2.3). Selanjutnya, beban vertikal dari bantalan disalurkan ke lapisan balas dan subbalas menjadi lebih kecil dan merata. Pola distribusi beban yang merata akan menghasilkan tekanan yang lebih kecil yang dapat diterima oleh

lapisan tanah dasar. Gaya vertikal yang dihasilkan beban gandar oleh lokomotif, kereta dan gerbong merupakan beban statis, sedangkan pada kenyataannya, beban yang terjadi pada struktur jalan rel merupakan beban dinamis yang dipengaruhi oleh faktor aerodinamik (hambatan udara dan beban angin), kondisi geometrik dan kecepatan pergerakan rangkaian kereta api. Oleh karena itu, diperlukan transformasi gaya statis ke gaya dinamis untuk merencanakan beban yang lebih realistis. Persamaan TALBOT (1918) merupakan transformasi gaya berupa pengkali faktor dinamis sebagai berikut:

$$I_p = 1 + 0,01 \left(\frac{V}{1,609} - 5 \right) \quad (2.5)$$

dimana,

I_p = Faktor dinamis

V = 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 didesain menggunakan konsep “*Beam on Elastic Foundation model*” dengan mengasumsikan bahwa setiap rel akan berperilaku sebagai balok menerus (*infinite beam*) yang diletakkan di atas tumpuan *elastic linier* (Rosyidi, 2015). Teori BoEF digunakan untuk menghitung pembebanan dalam komponen struktur jalan rel. Ketika beban eksternal (beban dari roda kendaraan) disalurkan di atas balok (rel) yang diletakkan di atas fondasi *elastic 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:

$$Q_1 = 0,786 \times \frac{P_d \times S}{x_1} \quad (2.6)$$

dimana, Q_1 = Distribusi beban ke bantalan (kg)

P_d = Beban roda dinamik rencana (kN/kg)

S = Jarak bantalan (cm)

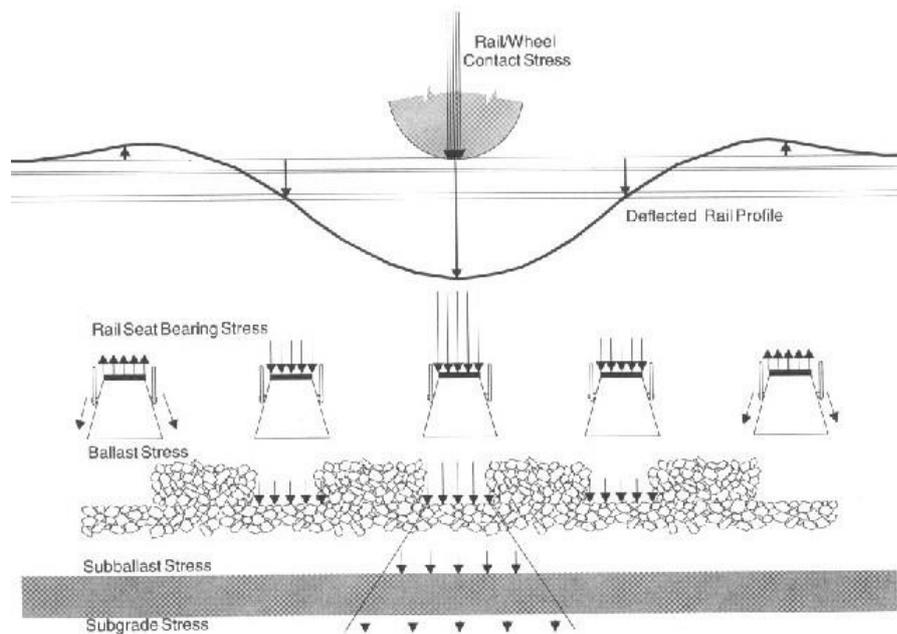
x_1 = Jarak momen 0 ke momen maksimal (cm)

$$\text{maka, } X_1 = \frac{\pi}{4\lambda} \text{ dengan } \lambda = \left[\frac{k}{4EI} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.7)$$

dimana, E = Modulus elastisitas jalan rel (kg/cm²)

I = Momen Inersia (cm⁴)

k = Modulus jalan rel (Mpa)



Gambar 2.6 Pola distribusi beban kereta api pada struktur jalan rel (Rosyidi, 2015)

D. Metode Elemen Hingga

Prinsip dasar dari metode elemen hingga atau *finite element method* adalah diskretisasi yaitu prosedur dimana masalah kompleks yang besar dibagi-bagi menjadi satu ekuivalen yang lebih kecil atau komponen. Berikut disajikan beberapa tahapan metode elemen hingga, yaitu (Razaq, 2011):

1. Diskretisasi

Yaitu pembagian suatu *continuum* menjadi sistem yang lebih kecil yang disebut sebagai *finite element*. Pada metode elemen hingga, masing-masing elemen dianalisis secara tersendiri menggunakan persamaan konstitutif sehingga persamaan sifat dan kekakuan masing-masing elemen diformulasi.

2. Pemilihan fungsi aproksimasi

Langkah ini digunakan untuk menentukan perpindahan setiap elemen menggunakan polinomial berderajat n . Semakin tinggi n , semakin tinggi ketelitiannya. Perpindahan satu node ditulis sebagai $\{u\} = [N] \{q\}$, dimana : $[N]$ = matrik fungsi interpolasi, $\{q\}$ = vektor besaran yang tidak diketahui di simpul-simpul elemen

3. Penurunan persamaan elemen

Menggunakan metode variational atau residual (misal metode Galerkin). Persamaan elemen dapat ditulis sebagai:

$[k] \{q\} = \{Q\}$, dimana : k = matrik properti elemen, $\{Q\}$ = vektor gaya node

4. Assembling properti elemen ke persamaan global

Persamaan-persamaan elemen pada langkah 3 dikombinasikan sehingga menghasilkan *stiffness relation* untuk seluruh elemen. Langkah ini dibuat untuk mendapatkan kompatibilitas *displacement* setiap node.

Stiffness relation ditulis:

$[K] \{r\} = \{R\}$, dimana : $[K]$ = *global stiffness matriks*, $\{r\}$ = *global nodal displacement vector*, dan $\{R\}$ = *global nodal force vector*

5. Komputasi *strain* dan *stress*

Persamaan yang telah ada diselesaikan atau dipecahkan untuk mendapatkan besaran-besaran yang tidak diketahui, baik primer (perpindahan) maupun sekunder (regangan, tegangan, momen dan geser).

Secara umum, ada beberapa langkah dalam penerapan metode elemen hingga. Langkah pertama adalah melakukan diskritisasi dari elemen asli. Elemen asli yang umumnya memiliki kompleksitas yang tinggi, berbentuk asimetris, memiliki karakteristik material non linier, atau kondisi pembebanan yang rumit harus dimodelkan ke dalam elemen – elemen kecil yang lebih detail sehingga karakteristik elemen asli dapat digambarkan dengan lebih baik. Langkah kedua adalah merumuskan material yang dimiliki oleh setiap lapisan. Setelah material lapisan dirumuskan, strukturpun siap dimodelkan. Langkah selanjutnya adalah melakukan analisis model elemen dengan kondisi batas dan peralihan noda yang ditetapkan. Hasil dari analisis tersebut adalah nilai – nilai yang ingin diperoleh.

Setiap elemen terdiri atas beberapa noda. Setiap noda ini memiliki sejumlah derajat kebebasan yang berhubungan satu sama lain untuk membagi variabel yang tidak diketahui di dalam batasan masalah yang ingin dipecahkan. Dalam kasus ini, derajat kebebasan tersebut berhubungan dengan deformasi ataupun perpindahan yang terjadi. Oleh karena itu, derajat kebebasan ini, dapat diketahui pula bagaimana detail profil penurunan yang terjadi pada tanah akibat menerima beban.

Dalam hal pemodelan, ada beberapa model material yang dapat digunakan dalam material tanah dan batuan, seperti *Isotropic Elasticity (Hooke's Law)*, *Mohr-Coulomb* atau *Elastic Plastic (MC)*, *Hardening-Soil (HS)*, *Soft-Soil-Creep (SSC)*, *Cam Clay (CC)*, *Modified Cam Clay (MCC)*, *Nonlinier Elasticity (Hiperbolic)*, *Strain Softening*, *Slip Surface*, *Soft Soil (SS)* dan *Jointed Rock (JR)*.

Masing – masing model di atas memiliki parameter sendiri serta memiliki kelebihan dan kekurangan. Keakuratan pemodelan menggunakan metode elemen hingga sangat bergantung pada:

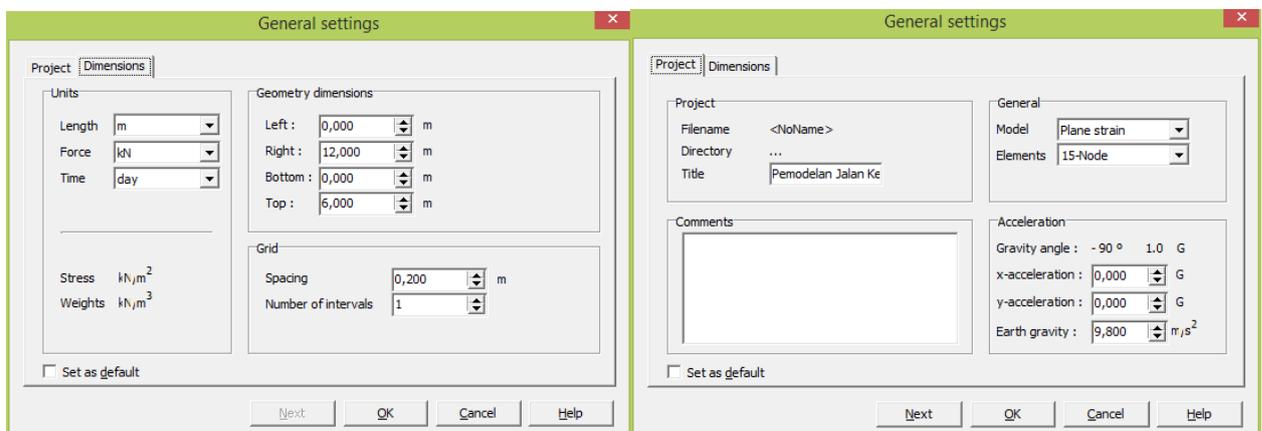
1. Keahlian memodelkan
2. Pemahaman terhadap model serta keterbatasannya
3. Pemilihan parameter dan model material tanah
4. Kemampuan menilai hasil komputasi

E. Pemodelan Numerik PLAXIS 2D

PLAXIS (*Finite Element Code For Soil and Rock Analysis*) adalah suatu program yang dikembangkan untuk menganalisa deformasi dan stabilitas tanah dengan menggunakan pendekatan metode elemen hingga. Melalui input yang sederhana, 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.

1. General setting

Langkah pertama dalam pengerjaan adalah menentukan nama file, model, jumlah *node* elemen, dimensi area PLAXIS untuk nantinya digunakan dalam pemodelan (Gambar 2.7).

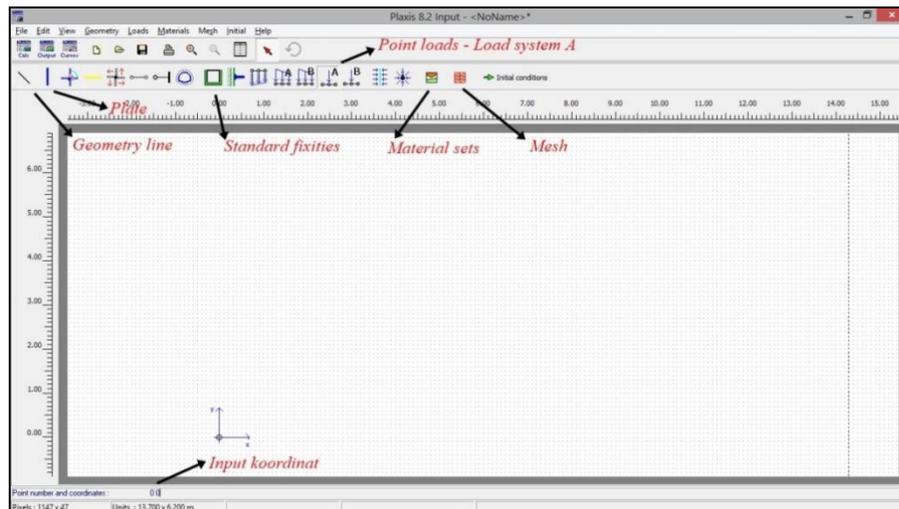


Gambar 2.7 General setting PLAXIS

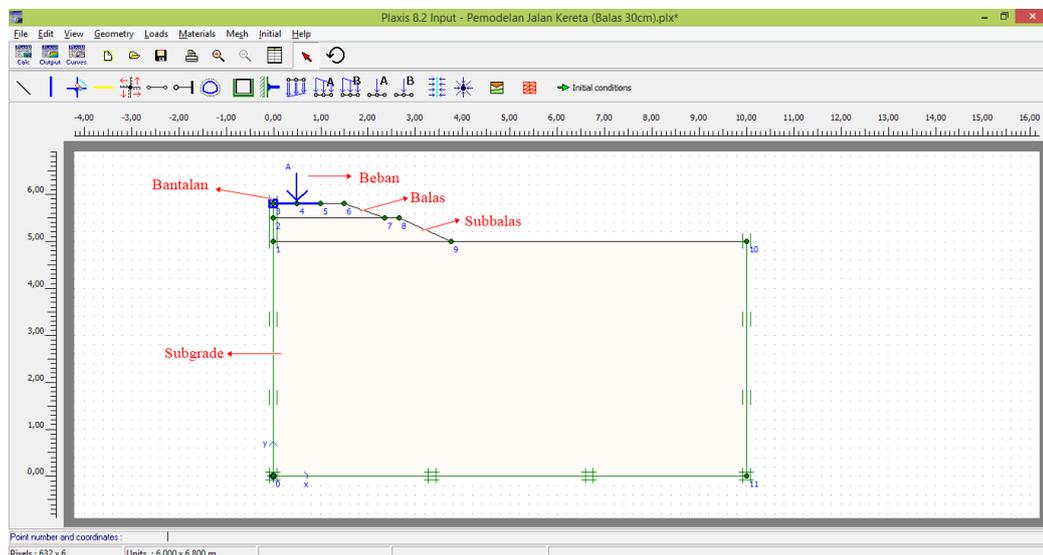
2. Geometri model dan loading

Selanjutnya, masukkan geometri sesuai model yang dibutuhkan dalam contoh ini adalah setengah potongan melintang jalan rel dimulai dari subgrade sampai bantalan menggunakan *geometry line*  (Gambar 2.8). Membuat geometri dengan cara menarik garis pada *grid* yang tersedia atau dengan menginput koordinat yang dibutuhkan (cara ini lebih akurat). Setiap lapisan struktur yang dibutuhkan, dimodelkan

pada tahap ini. Jika geometri sudah selesai, berikan batasan dengan menggunakan *standard fixities*  Kemudian, input beban titik yang akan bekerja pada lapisan jalan rel sampai tanah menggunakan *Point Loads – Load system A* 



(a)

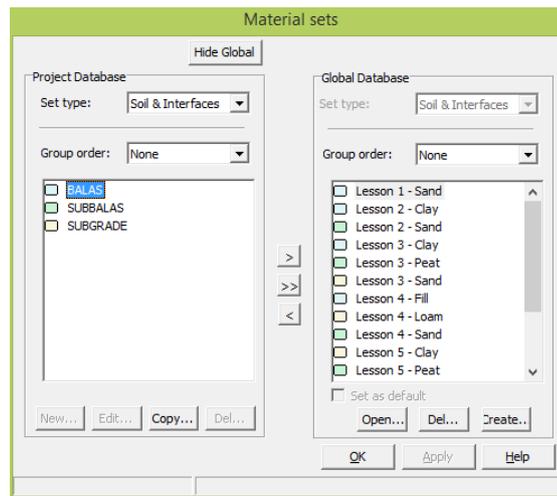


(b)

Gambar 2.8 Jendela utama PLAXIS (a) dan pemodelan setengah potongan melintang struktur jalan rel (b)

3. Material

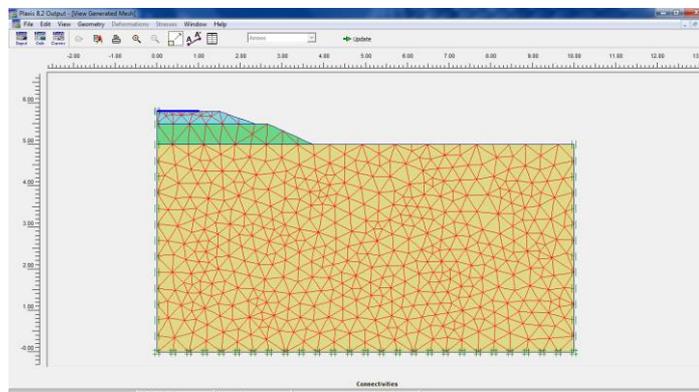
Tentukan parameter material untuk setiap lapisan struktur jalan rel pada tahap ini. Mulai dari model material, tipe material, parameter teknis, dsb. sesuai kebutuhan untuk nantinya digunakan pada perhitungan. Pilih *material sets*  untuk mulai mengatur. Nilai bisa diperoleh dari data primer dan/atau data sekunder (Gambar 2.9)



Gambar 2.9 Jendela *material sets*

4. Mesh

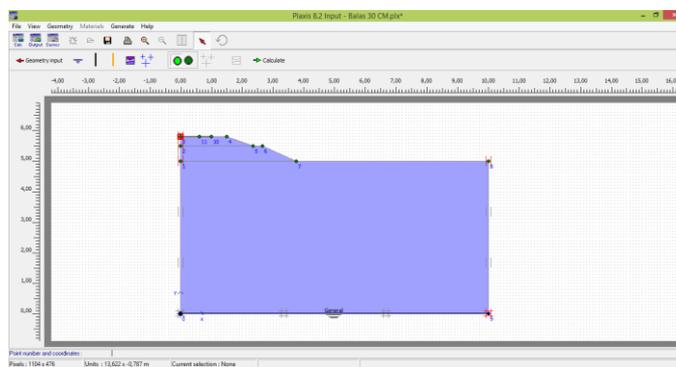
Mesh dilakukan untuk membagi elemen menjadi bagian yang lebih kecil berbentuk jaring – jaring segitiga (Gambar 2.10). Tujuannya untuk mempermudah perhitungan dengan metode elemen hingga dan memperoleh hasil yang akurat. *Mesh* dilakukan setelah tahapan pemodelan geometri dan input material selesai.



Gambar 2.10 *Mesh generate* pada pemodelan PLAXIS

5. *Initial Condition*

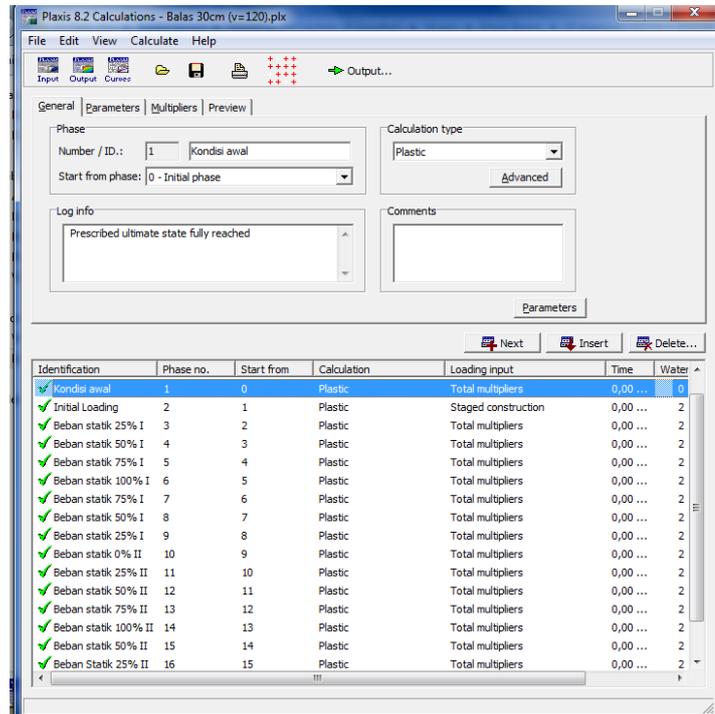
Diperlukan untuk memberikan kondisi awal pada tanah sesuai keadaan aslinya. Terdapat dua kondisi awal (*initial stress*) dan tekanan air pori (*water pressure*). *Initial water pressure* digunakan untuk menentukan kondisi struktur dalam kondisi kering atau basah. *Initial stress* digunakan pada pemodelan dengan struktur yang memiliki bentuk rata dan tidak memiliki kemiringan. (Gambar 2.11).



Gambar 2.11 Jendela *initial condition*

6. *Calculation*

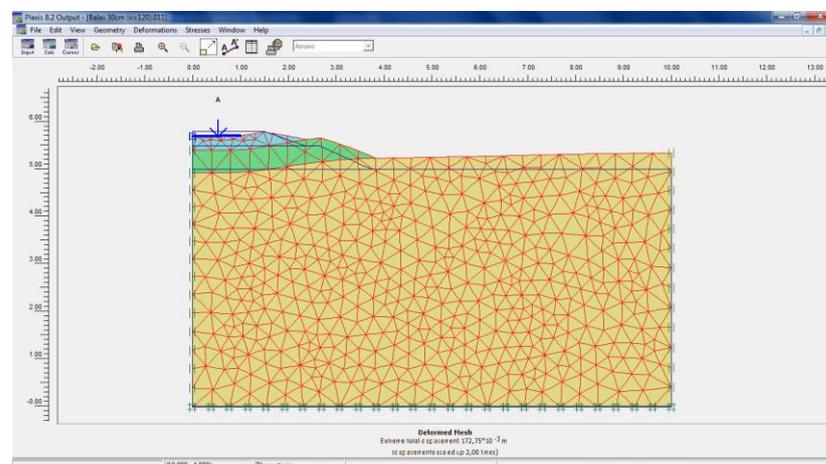
Dalam penelitian ini menggunakan pembebanan siklik yang mana beban diberikan bertahap pada struktur dan terdiri dari beberapa siklus. *Loading input* yang digunakan dalam perhitungan adalah *staged construction* dan *total multipliers*. Setiap proses urutan pekerjaan dapat dikondisikan secara individu dan saling terkait secara berurutan. Pembebanan siklik juga mengharuskan peneliti untuk melakukan *manual setting* pada tab *parameters*.



Gambar 2.12 Calculations

7. Output

Tahap terakhir pemodelan, dimana hasil dari perhitungan dengan menggunakan metode elemen hingga dilakukan untuk model dan material yang telah didefinisikan pada tahap-tahapan sebelumnya. Output PLAXIS dapat menyajikan tampilan dalam bentuk visual untuk memberikan gambaran secara aktual sehingga deformasi yang terjadi bisa diamati (Gambar 2.13).



Gambar 2.13 Jendela output PLAXIS