

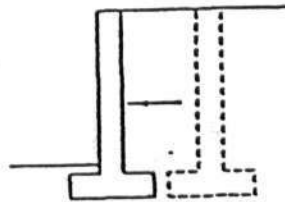
BAB II

LANDASAN TEORI

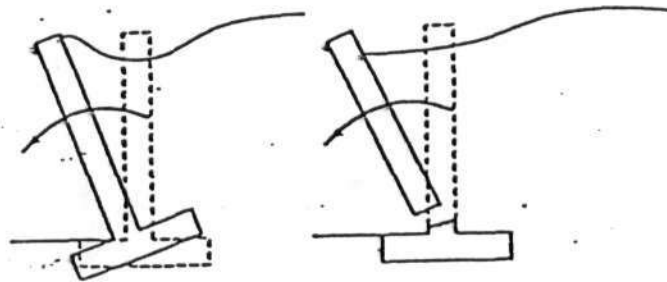
2.1 JENIS-JENIS KERUSAKAN GEOTEKNIK ABUTMENT

Macam-macam jenis kerusakan yang mungkin terjadi pada abutment dapat dilihat pada gambar berikut :

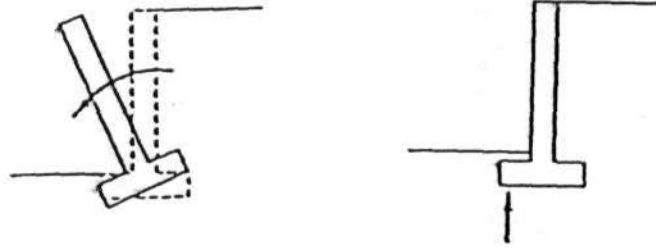
a) Kerusakan akibat *slide horizontal* (bergeser)



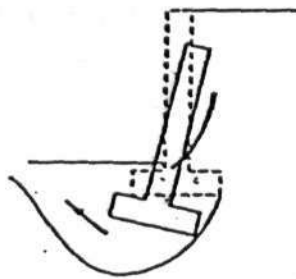
b) Kerusakan akibat *overturning* (terjungkal)



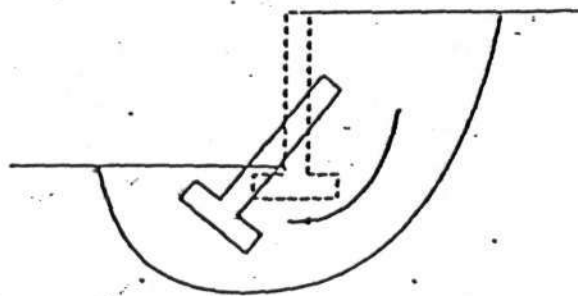
c) Kerusakan akibat *bearing capacity failure*



d) Kerusakan akibat terjadinya *deep seated shear failure*



e) Kerusakan berdasarkan *sliding circle*



2.2 KRITERIA KERUNTUHAN MENURUT MOHR-COULOMB

Mohr (1980) menyuguhkan sebuah teori tentang keruntuhan pada material yang menyatakan bahwa keruntuhan terjadi pada suatu material akibat

kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser, dan bukan hanya akibat tegangan normal maksimum atau tegangan geser maksimum saja. Jadi, hubungan antara tegangan normal dan geser pada sebuah bidang keruntuhan dapat dinyatakan dalam bentuk berikut (gambar 2.1a) :

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (2.1)$$

Garis keruntuhan (failure envelope) yang dinyatakan oleh persamaan 2.1 di atas sebenarnya berbentuk garis lengkung seperti terlihat pada gambar 2.1b. Untuk sebagian besar masalah-masalah mekanika tanah, garis tersebut cukup didekati dengan sebuah garis lurus yang menunjukkan hubungan linear antara tegangan normal dan geser (Coulomb, 1776). Persamaan itu dapat kita tulis sebagai berikut :

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2.2)$$

dimana :

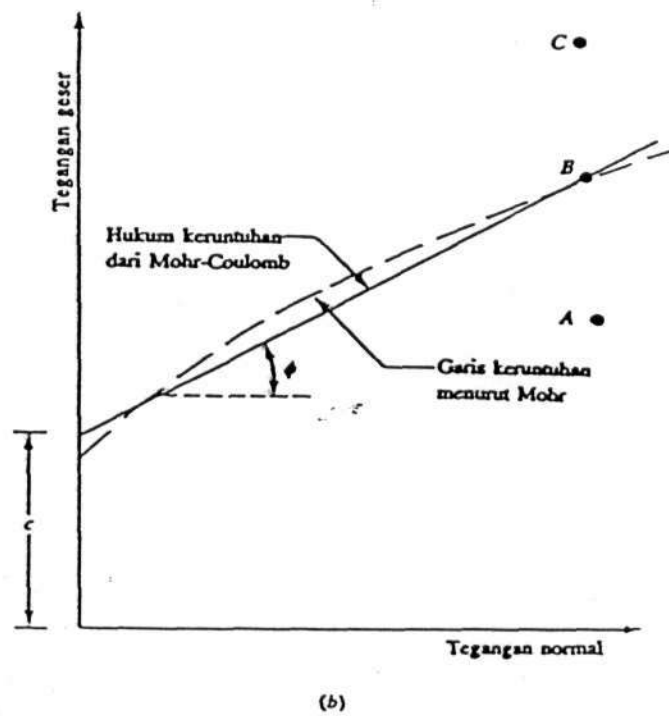
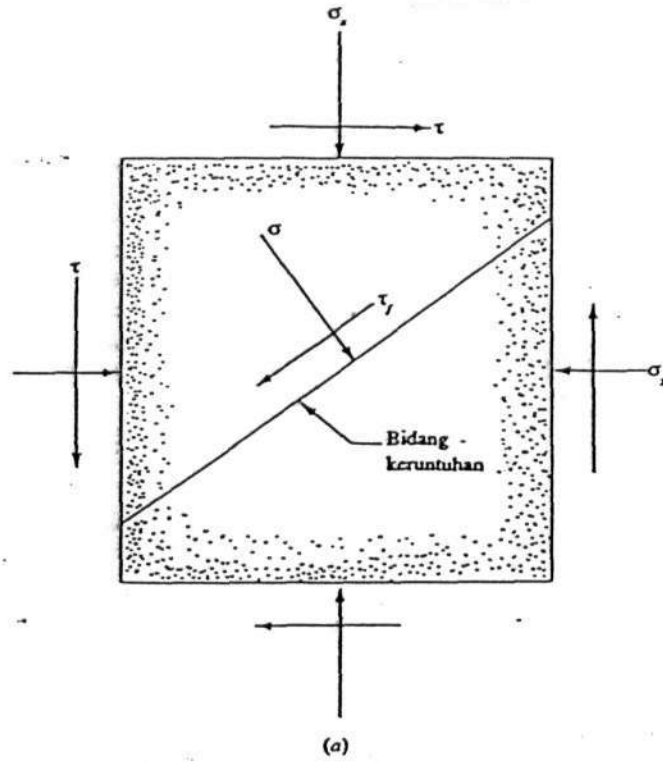
c = kohesi

φ = sudut geser internal

Hubungan di atas disebut juga sebagai “kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb”

Makna garis keruntuhan dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Bila tegangan normal dan geser pada sebuah bidang dalam suatu massa tanah sedemikian rupa sehingga tegangan-tegangan tersebut dapat digambarkan sebagai titik A dalam gambar 2.1b, maka keruntuhan geser tidak akan terjadi pada bidang tersebut. Tetapi bila tegangan normal dan geser yang bekerja pada suatu bidang lain dapat digambarkan sebagai titik B (yang tepat berada pada garis keruntuhan), maka keruntuhan geser akan terjadi pada bidang tersebut. Suatu keadaan kombinasi tegangan yang berwujud titik C tidaklah mungkin terjadi karena bila titik tersebut tergambar di atas garis keruntuhan, keruntuhan geser pasti sudah terjadi sebelumnya.



Gambar 2.1 Garis keruntuhan menurut Mohr dan hukum keruntuhan dari Mohr-Coulomb

2.3 DEFINISI UMUM MENGENAI TEGANGAN DAN REGANGAN

Sebuah model material dirumuskan dalam persamaan matematis yang mendeskripsikan hubungan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Model-model material seringkali dinyatakan dalam bentuk pertambahan yang sangat kecil dari tegangan (disebut "*stress rates*") yang dihubungkan dengan pertambahan yang sangat kecil dari regangan (disebut "*strain rates*"). Semua model material yang digunakan dalam PLAXIS didasarkan pada hubungan antara kecepatan tegangan efektif (dilambangkan : $\underline{\dot{\sigma}}$) dan kecepatan regangan (dilambangkan : $\underline{\dot{\epsilon}}$).

Hubungan antara kecepatan tegangan efektif dan kecepatan regangan dinyatakan dalam :

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{M} \underline{\dot{\epsilon}} \quad (2.3)$$

dimana :

$\underline{\dot{\sigma}}'$ = kecepatan tegangan efektif

$\underline{\dot{\epsilon}}$ = kecepatan regangan

\underline{M} = matrix kekakuan material

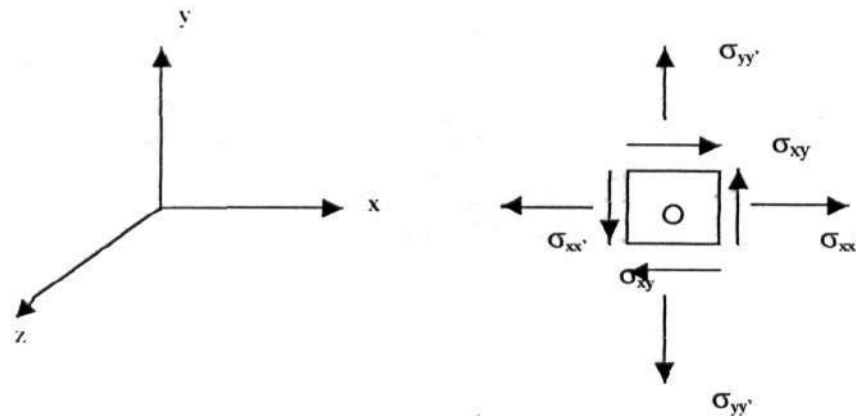
Dalam persamaan 2.3, kecepatan tegangan dan regangan dituliskan dalam notasi vektor yang secara umum terdiri dari enam komponen Cartesian yaitu :

$$\underline{\dot{\sigma}}' = (\dot{\sigma}'_{xx}, \dot{\sigma}'_{yy}, \dot{\sigma}'_{zz}, \dot{\sigma}'_{xy}, \dot{\sigma}'_{yz}, \dot{\sigma}'_{zx})^T \quad (2.4a)$$

$$\underline{\dot{\epsilon}} = (\dot{\epsilon}_{xx}, \dot{\epsilon}_{yy}, \dot{\epsilon}_{zz}, \dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{yz}, \dot{\gamma}_{zx})^T \quad (2.4b)$$

Walaupun demikian, untuk kondisi "*plane strain*" dan "*axisymmetric*" seperti yang dimodelkan dalam PLAXIS, hanya empat komponen yang diperlukan, karena γ_{yz} , γ_{zx} , σ_{yz} , σ_{zx} bernilai nol. Komponen tegangan normal

positif dianggap mewakili tarikan (*tension*), sedangkan komponen tegangan normal negatif mewakili tekanan (*compression / pressure*). Demikian pula halnya, dengan komponen regangan normal positif yang menunjukkan tarikan (*extension*) dan komponen regangan normal negatif menunjukkan tekanan (*compression*).



Gambar 2.2 Sistem koordinat tiga dimensi secara umum beserta perjanjian tanda

Dengan mempertimbangkan analisa regangan yang kecil, regangan-regangan diperoleh dari penurunan secara garis besar terhadap komponen-komponen perpindahan (*displacement components*) yaitu U_x dan U_y , yang dinyatakan dalam rumus-rumus berikut :

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (2.5a)$$

$$\epsilon_{zz} = 0 \quad (\text{Plane strain}) \quad (2.5b)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{r} U_x \quad (\text{Axisymmetry ; } r = \text{radius}) \quad (2.5c)$$

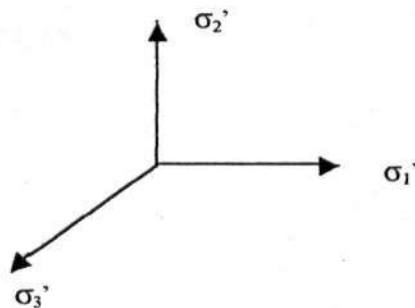
Penggunaan tegangan dasar seringkali lebih berguna daripada komponen tegangan Cartesian pada saat merumuskan model material.

Dalam kondisi “*plane strain*” atau “*axisymmetry*”, tegangan dasar dapat dihitung dari tegangan Cartesian dengan :

$$\sigma_1' = \frac{1}{2}(\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}) - \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + \sigma_{xy}'^2} \quad (2.6a)$$

$$\sigma_2' = \sigma'_{zz} \quad (2.6b)$$

$$\sigma_3' = \frac{1}{2}(\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}) + \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + \sigma_{xy}'^2} \quad (2.6c)$$



Gambar 2.3 Ruang (*space*) dari tegangan dasar

Pendefinisian tegangan invarian sebaiknya dilakukan, yang mana ukuran dari tegangan tidak saling tergantung pada orientasi dan sistim koordinat.

Tegangan invarian yang diperlukan ada dua yaitu :

$$p' = -\frac{1}{3}(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') \quad (2.7a)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2]} \quad (2.7b)$$

dimana :

p' = tegangan isotropik/tegangan efektif rata - rata

q = tegangan geser ekuivalen

Dengan analogi dari tegangan rata-rata (p'), maka regangan volumetrik (ϵ_v) didefinisikan sebagai jumlah dari semua komponen regangan dasar :

$$\epsilon_v = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \quad (2.8)$$

Regangan volumetrik diartikan negatif bila dalam kondisi padat (*compaction*) dan positif bila dalam kondisi renggang/tidak padat (*dilatancy*).

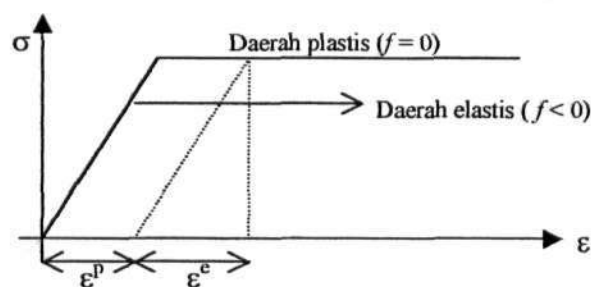
Untuk model yang bersifat elastoplastis, yang dipakai dalam PLAXIS, regangan / *strain* diuraikan menjadi dua komponen yaitu komponen elastis dan plastis :

$$\underline{\epsilon} = \underline{\epsilon}^e + \underline{\epsilon}^p \quad (2.9)$$

dimana :

$\underline{\epsilon}^e$ = regangan elastis

$\underline{\epsilon}^p$ = regangan plastis



Gambar 2.4 Hubungan antara *stress* dan *strain*

2.4 MODEL MOHR-COULOMB

Plastisitas diasumsikan dengan peningkatan dari regangan yang bersifat konstan. Untuk mengevaluasi dalam perhitungan apakah keadaan plastis itu terjadi atau tidak, maka dipakai fungsi pembatas yang merupakan fungsi dari

tegangan dan regangan, dimana fungsi ini dilambangkan dengan “ f ”. Fungsi pembatas seringkali ditampilkan sebagai pendahuluan dalam lingkup tegangan dasar. Sebuah model yang benar-benar bersifat plastis merupakan model dasar dengan permukaan runtuh (*yield surface*) yang sudah ditentukan, misalnya : suatu permukaan runtuh yang didefinisikan oleh parameter-parameter model dan tidak dipengaruhi tegangan yang bersifat plastis. Untuk keadaan tegangan yang diwakili oleh titik-titik yang berada diluar daerah keruntuhan, akan memiliki perilaku yang elastis dan semua regangan bersifat reversible.

2.4.1 Perilaku Elastoplastis (Elastic Perfectly-Plastic)

Prinsip dasar dari elastoplastis adalah bahwa tegangan dan kecepatan tegangan (*strain rates*) dibagi menjadi dua bagian yaitu : bagian elastis dan bagian plastis, seperti ditunjukkan dalam rumus :

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^p \qquad \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p \qquad (2.10)$$

Hukum Hooke digunakan untuk menghubungkan antara kecepatan tegangan dengan kecepatan regangan elastis.

Rumus:

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}} = \underline{\underline{D}} \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e$$

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e$$

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{D}^e (\underline{\dot{\epsilon}} - \underline{\dot{\epsilon}}^p) \quad (2.11)$$

dimana :

$\underline{\dot{\sigma}}'$ = kecepatan tegangan efektif

$\underline{\dot{\epsilon}}$ = kecepatan regangan

$\underline{\dot{\epsilon}}^e$ = kecepatan regangan elastis

$\underline{\dot{\epsilon}}^p$ = kecepatan regangan plastis

\underline{D}^e = matrix kekakuan material elastis

Disamping menggunakan fungsi pembatas (" f "), model Mohr-Coulomb juga memakai fungsi potensial plastis (dilambangkan " g "). Pada umumnya, kecepatan tegangan plastis ditulis sebagai :

$$\underline{\dot{\epsilon}}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (2.12)$$

dimana :

$\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'}$ = derivatif fungsi potensial plastis terhadap tegangan

λ = faktor pengali plastis

Untuk perilaku yang bersifat elastis murni, λ bernilai nol, sedangkan untuk perilaku yang bersifat plastis, λ bernilai positif :

$$\lambda = 0 \text{ untuk } f < 0 \text{ dan } \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \underline{\dot{\epsilon}} \leq 0 \quad (\text{elastis}) \quad (2.13a)$$

$$\lambda > 0 \text{ untuk } f = 0 \text{ dan } \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \underline{\dot{\epsilon}} > 0 \quad (\text{plastis}) \quad (2.13b)$$

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk memperoleh hubungan antara kecepatan tegangan efektif dan kecepatan regangan dalam keadaan

elastoplastis (oleh Smith & Griffith, 1982; Vermer & de Borst, 1984)

adalah :

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \left(\underline{D}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \right) \underline{\dot{\varepsilon}} \quad (2.14a)$$

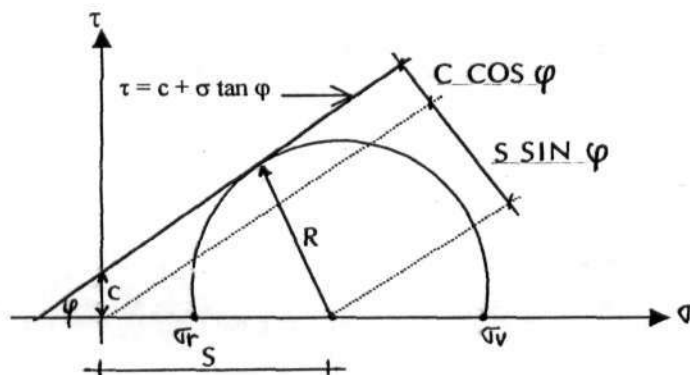
dimana :

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (2.14b)$$

Parameter α dipakai sebagai perubah (*switch*) dimana jika perilaku material bersifat elastis maka $\alpha=0$, sedangkan jika perilaku material bersifat plastis maka $\alpha>0$.

2.4.2 Perumusan Model Mohr – Coulomb

Kondisi keruntuhan pada Mohr – Coulomb merupakan perluasan dari hukum pergeseran dari Coulomb (*Coulomb's friction law*) untuk berbagai kondisi tegangan pada umumnya. Pada model Mohr-Coulomb diperlukan fungsi pembatas (lambang : f) dimana fungsi ini didasarkan pada lingkaran Mohr yang ditunjukkan pada gambar berikut :



Berdasarkan gambar diatas fungsi pembatas pada kondisi keruntuhan Mohr-Coulomb secara umum didefinisikan sebagai berikut :

$$f = \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_r) - \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_r)\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0$$

Kondisi keruntuhan pada Mohr - Coulomb dapat didefinisikan oleh tiga fungsi pembatas yang dirumuskan dalam tegangan-tegangan dasar :

$$f_1 = \frac{1}{2}|\sigma_2' - \sigma_3'| + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (2.15a)$$

$$f_2 = \frac{1}{2}|\sigma_3' - \sigma_1'| + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_1')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (2.15b)$$

$$f_3 = \frac{1}{2}|\sigma_1' - \sigma_2'| + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (2.15c)$$

Disamping fungsi-fungsi pembatas, model Mohr-Coulomb juga mendefinisikan tiga fungsi potensial plastis :

$$g_1 = \frac{1}{2}|\sigma_2' - \sigma_3'| + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3')\sin \psi \quad (2.16a)$$

$$g_2 = \frac{1}{2}|\sigma_3' - \sigma_1'| + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_1')\sin \psi \quad (2.16b)$$

$$g_3 = \frac{1}{2}|\sigma_1' - \sigma_2'| + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2')\sin \psi \quad (2.16c)$$

Bila kohesi tanah lebih besar dari nol ($C > 0$), kriteria standart dari Mohr - Coulomb mengijinkan terjadinya gaya tarik. Dalam kenyataannya, tegangan tarik yang diijinkan meningkat seiring dengan bertambahnya kohesi tanah. Dalam realita, tanah hanya dapat menahan tegangan tarik yang sangat kecil. Perilaku tanah ini dianalisa oleh Program PLAXIS dengan memakai kriteria tarik batas (*tension cut - off*).

Kriteria tarik batas terdiri atas tiga tambahan fungsi pembatas yaitu :

$$f_4 = \sigma_1' - \sigma_t \leq 0 \quad (2.17a)$$

$$f_5 = \sigma_2' - \sigma_t \leq 0 \quad (2.17b)$$

$$f_6 = \sigma_3' - \sigma_t \leq 0 \quad (2.17c)$$

Bila prosedur kriteria tarik batas dipergunakan maka tegangan tarik yang diijinkan (σ_t) bernilai nol.

2.4.3 Parameter – parameter dasar Model Mohr Coulomb

Model Mohr – Coulomb membutuhkan lima parameter, yang umumnya dikenal oleh praktisi geoteknik dan dapat diperoleh dari pengujian-pengujian dasar pada contoh-contoh tanah.

Parameter-parameter yang dibutuhkan adalah :

- E = Modulus Young [kN/m²]
- v = Poisson's ratio [-]
- φ = sudut geser [°]
- c = kohesi [kN/m²]
- ψ = sudut dilatasi [°]