

**TUGAS AKHIR**

**PREDIKSI NUMERIK PENURUNAN KONSOLIDASI PADA  
ZONA OPRIT JEMBATAN FLY OVER KOTA MAKASSAR**



**OLEH**

**MASRIFLIN TANDEAN UPPUN**

**D111 07 129**

**JURUSAN SIPIL**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**2013**

## ABSTRAK

Penurunan yang disebabkan oleh Konsolidasi merupakan permasalahan Geoteknik yang sering ditemukan terutama pada kasus timbunan. Penurunan Konsolidasi disebabkan oleh keluarnya air pori dari dalam tanah yang disebabkan oleh peningkatan tegangan pada massa tanah. Dalam penelitian ini dilakukan peninjauan terhadap Zona Oprit timur dan Zona Oprit barat jembatan Fly-Over Makassar dengan menggunakan metode pemetaan kontur dan prediksi numerik dengan menggunakan program Plaxis. Dari hasil observasi lapangan didapatkan penurunan terbesar terjadi pada Zona Oprit Barat yang berlokasi didepan gedung Graha Pena Makassar. Dari hasil pemetaan kontur yang dilakukan dilapangan untuk Zona Oprit Barat dilakukan peninjauan terhadap daerah kritis yang mencakup STA 0+070 (P7), STA 0+090 (P9), dan STA 0+100 (P11) di mana penurunan yang terjadi masing-masing sebesar, 6,60 cm; 8,80 cm; dan 7.30 cm dengan perkiraan masa konstruksi 1100 hari. Sedangkan prediksi numerik dengan menggunakan program Plaxis pada Zona Oprit Barat untuk tiga daerah tinjauan STA 0+070 (P7), STA 0+090 (P9), dan STA 0+100 (P11) didapatkan penurunan sebesar 6,70 cm; 8,3 cm; dan 7,1 cm untuk umur konstruksi 1100.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, penulis persembahkan dengan selesainya tugas akhir ini, karena hanya dengan Rahmat-Nyalah penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tugas akhir dengan judul **“Prediksi Numerik Penurunan Konsolidasi Pada Zona Oprit Jembatan Fly Over Kota Makassar”**.

Tugas akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam rangkaian kegiatan penelitian serta penulisan tugas akhir ini tidak akan terlaksana sebagaimana yang diharapkan tanpa adanya bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini perkenankan penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak, Dr.Paulus Uppun, MA. dan Ibu, Damaris Malta, SE., selaku kedua orang tua yang telah membesarkan, mengajarkan arti sebuah kehidupan, dan atas pengorbanan tiada tara sampai saya mampu menyelesaikan studi sampai ke jenjang perguruan tinggi.
2. Keluargaku, Lili Suhartini Uppun, Dwi Ramstika Uppun, Agus Rukmaga Uppun, Febrianto Paskamaris Uppun, serta segenap keluarga di Mamasa dan Toraja yang telah memberi support kepada saya sampai saat ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Lawalenna Samang, M.S., M. Eng., selaku pembimbing I dan ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, yang telah

meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahannya mulai dari awal hingga selesainya penulisan ini.

4. Ibu Sitti Hijraini Nur, ST.MT, selaku pembimbing II, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahannya.
5. Kak Farid Sitepu S.T., Nealsen JackTjiu, Maria Triselia Guhar, Pandu Perdana Gultom, Mardiansi Pabate, Noris E.Pasomba, Ramin,Rico,Nimrod,Rudika,Rian dan adik angkatan 2010 dan teman-teman di Korps Asisten yang bersama-sama mengerjakan dan menyelesaikan penelitian di laboratorium.
6. Bapak Hasrullah, selaku Laboran Laboratorium Mekanika Tanah dan Bapak Sudirman,selaku Laboran Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan dan arahnya.
7. Para dosen, staff dan pegawai di Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Rekan-rekan Keluarga Mahasiswa Kristen Oikumene (KMKO) FT-UH, yang telah memberikan semangat dan dukungan doa kepada saya.
9. Rekan-rekan mahasiswa di Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya Angkatan 2007, semoga Tuhan membalas budi baik dengan amalan yang setimpal.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam tugas akhir ini, oleh karena itu penulis mengharapkan rekan-rekan sekalian dapat memberikan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan tugas akhir ini. Akhir kata, Penulis mengharapkan tugas akhir ini dapat berguna bagi kita semua, bangsa dan negara. Tuhan memberkati. Amin.

Makassar ,      Oktober 2012

# DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR NOTASI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang Masalah.....	I-1
1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian.....	I-2
1.3. Pokok Bahasan dan Batasan Masalah .....	I-2
1.4. Sistematika Penulisan .....	I-3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Penurunan (Settlement).....	II-1
2.2. Metode Elemen Hingga Geotekniks .....	II-1
2.2.1. Finite Element Method(FEM) Program Plaxis.....	II-1
2.2.2. Masukan Geometri .....	II-2
2.2.3. Fasilitas Keluaran Plaxis 2D.....	II-5
2.2.4 Permodelan Konstitutif Tanah - Plaxis .....	II-6

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1. Diagram Alir Penelitian .....	III-1
3.2. Metode Pengumpulan Data .....	III-3
3.2.1. Data Primer .....	III-3
3.2.2. Data Sekunder .....	III-5
3.3 Teknik Analisis .....	III-6
3.3.1. Pemodelan Tanah dan Parameter yang digunakan .....	III-7
3.3.2. Input Data.....	III-10
3.3.3. Perhitungan ( <i>Calculation</i> ).....	III-15
3.3.4. Output Data.....	III-16

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1. Pola Deformasi Numerik . .....	IV-2
4.1.1. Geometri Model, Beban, dan Parameter Tanah.....	IV-2
4.1.2. Pola Deformasi pada Plaxis .....	IV-6
4.2. Kurva Distribusi Penurunan dan Tekanan Pori .....	IV-9
4.2.1. Kurva Distribusi Penurunan.....	IV-9
4.2.2. Kurva Distribusi Tekanan Pori .....	IV-11

### **BAB. V PENUTUP**

5.1. Kesimpulan.....	V-1
5.2. Saran .....	V-2

### **DAFTAR PUSTAKA**

### **LAMPIRAN**

## DAFTAR NOTASI

Simbol	Penjelasan
Gs	Berat Jenis
c	Kohesi
S	(Sand) Pasir
W	Berat tanah
w	Kadar air volumetrik
	Sudut geser tanah
	Sudut Dilatansi
E	Modulus Elastisitas
G	Modulus Geser
	Tegangan
	Regangan
dry	Berat Volume Tanah Kering
sat	Berat Volume Tanah dibawah muka air tanah
unsat	Berat Volume Tanah di atas muka air tanah.
	Poisson ratio

## DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1. Sistem Koordinat Umum Tiga Dimensi dan Perjanjian Tanda Pada Tegangan .....	II-9
Gambar 2.2. Ruang Tegangan Utama .....	II-10
Gambar 2.3. Ide dasar dari suatu model Elastis Plastis Penuh .....	II-19
Gambar 2.4. Bidang leleh Mohr-Coulomb dalam Ruang Tegangan utama .....	II-20
Gambar 3.1. <i>Flowchart</i> Program <i>Plaxis</i> .....	III-2
Gambar 3.2. Pengukuran Elevasi di Zona Oprit Fly-Over .....	III-4
Gambar 3.3. Pengujian Sondir pada Fly-Over .....	III-4
Gambar 3.4. Segmental Wall System typical Cross Section .....	III-5
Gambar 3.5. Bentuk Pemodelan dalam <i>Plaxis</i> .....	III-10
Gambar 3.6. Jaringan Elemen (Generate Mesh) .....	III-12
Gambar 3.7. Kondisi Awal (Initial Condition).....	III-13
Gambar 3.8. Tekanan Pori Awal (principal directions).....	III-13
Gambar 3.9. Tekanan Pori Awal dalam gradasi warna.....	III-14
Gambar 3.10. Tegangan Awal... ..	III-15
Gambar 3.11. Informasi Perhitungan.....	III-16
Gambar 3.12. Jaring Elemen Terdeformasi .....	III-17
Gambar 3.13. Total Displacement dalam gradasi warna .....	III-17
Gambar 4.1. Pola Keretakan (Penurunan) pada Zona Oprit Barat.....	IV-1
Gambar 4.2 . Potongan Melintang Zona Oprit Fly-Over.....	IV-3
Gambar 4.3 . Salah satu pemodelan tanah pada Zona Oprit Fly-Over .....	IV-5



Gambar 4.4. Pola deformasi jaring elemen pada plaxis dengan skala pembesaran hingga 50 kali. ....	IV-6
Gambar 4.5. Total Displacement dalam Gradasi Warna .....	IV-7
Gambar 4.6. Pola Deformasi untuk beberapa stasiun dengan perbesaran 5 kali ....	IV-8
Gambar 4.7. Grafik <i>Time-Displacement</i> STA 0+070.....	IV-9
Gambar 4.8. Grafik <i>Time-Displacement</i> STA 0+090 .....	IV-10
Gambar 4.9. Grafik <i>Time-Displacement</i> STA 0+100.....	IV-10
Gambar 4.10. Grafik <i>Time-Active PP</i> STA 0+070.....	IV-11
Gambar 4.12. Grafik <i>Time-Active PP</i> STA 0+090.....	IV-11
Gambar 4.13. Grafik <i>Time-Active PP</i> STA 0+100.....	IV-12

## DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 3.1. Harga-harga koefisien Rembesan pada Umumnya.....	III-7
Tabel 3.2a. Korelasi Nilai N-SPT, Berat Isi, Sudut Geser, dan Kepadatan Relatif pada tanah Non-Kohesif. ....	III-8
Tabel 3.2b Korelasi Nilai N-SPT, Berat Isi, Unconfined Compression Test (UCS), dan Kepadatan Relatif pada tanah Kohesif. ....	III-9
Tabel 3.3. Parameter desain yang digunakan .....	IV-12

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	As-Built Drawing
Lampiran A-1	Segmental Wall System Typikal Cross Section (Detail 1)
Lampiran A-2	Segmental Wall System Typikal Cross Section (Detail 2)
Lampiran A-3	Segmental Wall System Typikal Cross Section (Detail 3)
Lampiran A-4	Segmental Wall System Typikal Cross Section (Detail 4)
Lampiran A-5	Layout Oprit Barat Overlay Aspal
Lampiran A-5	Layout Oprit Timur Overlay Aspal
Lampiran B	Hasil Analisis Hubungan <i>Time-Displacement</i>
Lampiran B-1	Tabel Time-Displacement, STA 0+070
Lampiran B-2	Tabel Time-Displacement, STA 0+090
Lampiran B-3	Tabel Time-Displacement, STA 0+100
Lampiran C	Hasil Analisis Hubungan <i>Time-Active Pore Pressure</i>
Lampiran C-1	Tabel Time-Active Pore Pressure, STA 0+070
Lampiran C-2	Tabel Time-Active Pore Pressure, STA 0+090
Lampiran C-3	Tabel Time-Active Pore Pressure, STA 0+100
Lampiran D	Tabel Pengukuran Topografi dan Pemetaan Zona Oprit Barat
Lampiran E	Tabel Pengukuran Topografi dan Pemetaan Zona Oprit Timur
Lampiran F	Long Section-Penurunan Zona Oprit Barat
Lampiran G	Situasi (Plan) – Long Section
Lampiran H	Situasi (Plan) – Cross Section 0+070
Lampiran I	Situasi (Plan) – Cross Section 0+090
Lampiran J	Situasi (Plan) – Cross Section 0+100
Lampiran H	Zona Oprit Timur

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1.LatarBelakangMasalah**

Pesatnya pembangunan fisik sebagai dampak secara bersama dari pertumbuhan penduduk yang cukup tinggi, pertumbuhan ekonomi, dan perkembangan pariwisata yang pesat hal ini juga berdampak pada arus lalu lintas. Tingginya tingkat pemakaian kendaraan bermotor di Kota Makassar, mengakibatkan kenaikan tingkat kemacetan lalu lintas, salah satunya pada Jln. Urip Sumoharjo. Dengan naiknya tingkat kemacetan ini, mengakibatkan Pemerintah Kota Makassar membuat solusi untuk mengurangi tingkat kemacetan ini, salah satunya dengan dengan membangun Jembatan *Fly-Over* pada Jln. Urip Sumoharjo.

Jembatan Fly Over ini memiliki panjang 600 meter dan Lebar 14.10 meter. Jembatan ini terdiri dari *Oprit Barat* dan *Oprit Timur* yang masing-masing memiliki panjang 141.1 meter dengan tinggi maksimum 5.2 meter. Untuk Bagian Oprit sendiri, diberi perkuatan tanah berupa pemasangan Geotextile dan Geogrid. Jenis Geotextile yang digunakan adalah *Geotextile Non Woven Type G-150* dan untuk Geogrid adalah *Uniaxial Geogrid TGDG 50*.

Sehubungan dengan fungsi Jembatan Fly Over sebagai sarana lalu lintas dimana penggunaanya sangat tinggi dengan jenis dan bobot kendaraan yang lewat sangat bervariasi maka diadakan penelitian tentang :

**PREDIKSI NUMERIK PENURUNAN KONSOLIDASI PADA ZONA OPRIT JEMBATAN FLY OVER KOTA MAKASSAR.**

Pada Penelitian ini digunakan software *Plaxis* dimana *Plaxis* merupakan Salah satu software geoteknik yang dimaksudkan sebagai alat bantu untuk menganalisa permasalahan geoteknik dengan menggunakan metode elemen hingga serta mengandalkan keakuratan perhitungan permodelan komputansi.

### **1.2.Maksud dan Tujuan Penelitian**

Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk memprediksi penurunan konsolidasi pada Zona Oprit Jembatan Fly Over dengan hasil analisa numerik menggunakan *Finite Element Method* dari program *Plaxis*.

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Penyelidikan dan Identifikasi Profil Geoteknik pada Zona Oprit Fly-Over Makassar.
2. Pemetaan pada penurunan kritis pada Zona Oprit Fly Over Makassar.
3. Memprediksi penurunan konsolidasi pada Zona Oprit dengan estimasi waktu tertentu.

### **1.3.Pokok Bahasan dan Batasan Masalah**

Sebagai pokok bahasan dalam penelitian ini adalah hasil dari analisa numerik terhadap suatu permodelan tanah yang diberi perkuatan batang bambu.

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Permodelan Numerik dilakukan dengan menggunakan Software *Plaxis*.
2. Tinjauan Pemodelan hanya terbatas pada Zona Oprit Jembatan Fly Over.

#### **1.4.SistematikaPenulisan**

Untuk memudahkan pembahasan dalam penelitian ini, maka sistematika penulisan penelitian disusun dalam lima bab. Adapun sistematika penulisan penelitian adalah sebagai berikut :

##### **BAB I. PENDAHULUAN**

Menguraikan tentang latar belakang masalah, maksud dan tujuan penelitian, pokok bahasan dan batasan masalah serta sistematika penulisan.

##### **BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**

Menyajikan teori-teori yang digunakan sebagai landasan untuk menganalisis dan membahas permasalahan penelitian.

##### **BAB III. METODE PENELITIAN**

Menjelaskan mengenai langkah-langkah atau prosedur pengambilan dan pengolahan data hasil penelitian.

##### **BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

Menyajikan data-data hasil penelitian, analisis data, hasil analisis data dan pembahasannya.

##### **BAB V. PENUTUP**

Berisikan kesimpulan dan saran.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 KONSOLIDASI DAN PENURUNAN (SETTLEMENT)**

Bila lapisan tanah jenuh berpermeabilitas rendah dibebani, maka tekanan air pori dalam tanah tersebut segera bertambah. Perbedaan tekanan air pori pada lapisan tanah, berakibat air mengalir ke lapisan tanah dengan tekanan air pori yang lebih rendah, yang diikuti penurunan tanah. Karena permeabilitas tanah yang rendah, proses ini membutuhkan waktu. *Konsolidasi* adalah proses berkurangnya volume atau rongga pori tanah jenuh berpermeabilitas rendah akibat pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari rongga tanah.

Jika lapisan tanah dibebani, maka tanah akan mengalami regangan atau penurunan (*settlement*). Regangan yang terjadi dalam tanah ini disebabkan oleh berubahnya susunan tanah maupun oleh pengurangan rongga pori/air (konsolidasi) di dalam tanah tersebut. Jumlah dari regangan sepanjang kedalaman lapisan merupakan penurunan total tanah. Penurunan akibat beban adalah jumlah total dari penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Dimana penurunan segera adalah penurunan yang terjadi pada tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus kering atau tanah tidak jenuh terjadi dengan segera sesudah beban bekerja, sedangkan penurunan konsolidasi terjadi pada tanah berbutir halus yang terletak dibawah muka air tanah. Penurunan yang terjadi memerlukan waktu, yang lamanya tergantung pada kondisi lapisan tanah.

## **2.2 METODE ELEMEN HINGGA GEOTEKNIS**

### **2.2.1 *Finite Element Method*(FEM) Program Plaxis**

PLAXIS adalah sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit dapat dilakukan dengan cepat , sedangkan berbagai fasilitas yang tersedia dapat digunakan untuk menghasilkan hasil komputansi secara mendetail. Proses perhitungannya sendiri sepenuhnya berjalan secara otomatis dan didasarkan pada prosedur numerik yang handal. Konsep ini memungkinkan para pemula untuk dapat menggunakan paket program ini hanya dengan mengikuti beberapa jam pelatihan saja.

#### **2.2.2. Masukan Geometri**

- **Pembuatan model geometri secara grafis** :Masukan berupa pelapisan tanah, elemen-elemen struktur, tahapan konstruksi, pembebanan, serta kondisi-kondisi batas dilakukan dengan menggunakan prosedur grafis yang mudah dengan bantuan komputer, yang memungkinkan pembuatan model geometri berupa penampang melintang yang mendetil. Dari model geometri ini jarring elemen hingga dapat dengan mudah dibentuk.
- **Pembentukan jaring elemen secara otomatis** :PLAXIS secara otomatis akan membentuk jaring elemen hingga 2D yang acak dengan pilihan untuk memperhalus jaring elemen secara global maupun local.



- **Elemen ordo tinggi** : Tersedia elemen segitiga kuadratik dengan 6 buah titik nodal dan elemen segitiga ordo keempat dengan 15 buah titik nodal untuk memodelkan deformasi dan kondisi tegangan dalam tanah.
- **Plate/Pelat** : Elemen balok khusus dapat digunakan untuk memodelkan lentur dari dinding penahan, lining terowongan, elemen cangkang, serta struktur-struktur tipis lainnya. Perilaku dari elemen-elemen ini diatur oleh kekakuan lentur, kekakuan arah normal penampang dan momen lentur batas . Sendi plastis dapat digunakan untuk elemen plat yang bersifat elastoplastis saat momen batas termobilisasi. Elemen pelat dengan antarmuka dapat digunakan untuk melakukan analisis yang realistis dari struktur-struktur geoteknik.
- **Antarmuka** : Elemen antarmuka atau elemen penghubung dapat digunakan untuk memodelkan interaksi tanah – struktur. Sebagai contoh, elemen-elemen ini dapat digunakan untuk memodelkan zona tipis di antara lining terowongan dengan tanah disekelilingnya yang mengalami intensitas geser yang tinggi. Nilai sudut geser dan kohesi dari elemen antarmuka umumnya berbeda dengan nilai sudut geser dan kohesi dari tanah disekitarnya.
- **Jangkar** : Elemen pegas elastoplastis digunakan untuk memodelkan penjangkaran dan penopang horizontal. Elemen-elemen ini diatur oleh kekakuan normal
- **Geogrid** : Geogrid ( atau geotekstil ) sering digunakan dalam praktek untuk timbunan yang membutuhkan perkuatan atau untuk struktur penahan

tanah. Elemen-elemen ini dapat di modelkan dalam PLAXIS dengan menggunakan elemen-elemen yang khusus untuk menahan gaya tarik. Elemen ini juga dapat dikombinasikan dengan elemen antarmuka untuk memodelkan interaksi dengan tanah di sekelilingnya.

- **Terowongan** :Dalam program PLAXIS model terowongan dengan penampang lingkaran ataupun bukan lingkaran dapat dengan mudah dibentuk dengan menggunakan komponen lengkung maupun garis. Elemen pelat dan elemen antarmuka juga dapat digunakan untuk memodelkan dinding terowongan serta interaksinya dengan tanah. Elemen isoparametris penuh digunakan memodelkan bidang batas berbentuk lengkung di dalam jaring elemen. Berbagai metode telah diterapkan untuk melakukan analisis terhadap deformasi yang timbul akibat berbagai metode konstruksi terowongan.
- **Model Mohr-Coulomb** :Model yang sederhana namun handal ini didasarkan pada parameter-parameter tanah yang telah dikenal baik dalam praktek rekayasa teknik sipil. Walaupun demikian, tidak semua fitur non-linier tercakup dalam model ini. Model mohr-coulomb dapat digunakan untuk menghitung tegangan pendukung yang realistis pada muka terowongan, beban batas pada pondasi dan lain-lain. Model ini juga dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan dengan menggunakan pendekatan 'Reduksi phi-c'.
- **Model tanah oleh pengguna** :Sebuah fitur khusus dalam PLAXIS versi 8 adalah pilihan untuk membuat suatu model tanah yang didefinisikan oleh

pengguna. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk menerapkan model tanah yang didefinisikan sendiri oleh pengguna dalam perhitungan. Pilihan ini ditujukan terutama untuk para peneliti dan ilmuwan di perguruan-perguruan tinggi dan pusat-pusat penelitian, tetapi tetap dapat berguna juga untuk para praktisi. Dalam tahun-tahun mendatang, model-model tanah yang didefinisikan sendiri oleh para pengguna dan yang telah divalidasi diharapkan dapat tersedia melalui jaringan internet.

- **Tekanan Air Pori Hidrostatik** : Distribusi tekanan air pori yang kompleks dapat dihitung berdasarkan elevasi dari garis freatik atau masukan langsung berupa nilai-nilai tekanan air. Sebagai alternatif, perhitungan aliran air statis dalam tanah dapat dilakukan untuk memperoleh distribusi tekanan air pori pada masalah-masalah aliran statis atau rembesan.
- **Tekanan Air pori berlebih** : Plaxis membedakan antara tanah yang bersifat terdrainase (drained) dan tak terdrainase (undrained) untuk memodelkan tanah pasiran yang permeabel serta tanah lempungan yang hampir bersifat impermeabel. Tekanan air pori akan dihitung dalam proses perhitungan plastis pada saat suatu lapisan tanah yang tak terdrainase menerima pembebanan. Kondisi pembebanan tak terdrainase seringkali menjadi penentu dalam stabilitas struktur-struktur geoteknik.

### 2.2.3. Fasilitas Keluaran Plaxis 2D

- **Peningkatan beban otomatis** :Program Plaxis dapat dipilih dan dijalankan pada modus ukuran rentang beban otomatis maupun pada ukuran rentang waktu otomatis. Hal ini menghindarkan pengguna untuk memilih peningkatan beban yang cocok untuk perhitungan plastis dan menjamin proses perhitungan yang efisien dan handal.
- **Tahapan Konstruksi** :Fitur yang sangat berguna dalam Plaxis ini memungkinkan simulasi yang realistis dari suatu proses konstruksi ataupun penggalian, yaitu dengan cara mengaktifkan atau menonaktifkan elemen klaster atau beban, mengubah elevasi muka air, dan sebagainya. Prosedur ini memungkinkan prediksi tegangan dan deformasi yang terjadi dengan realistis, misalnya pada saat penggalian tanah dalam suatu konstruksi bawah tanah.
- **Kalkulasi** :Faktor pengali untuk beban tersedia untuk meningkatkan sistem pembebanan secara menyeluruh, tetapi prosedur standarnya adalah dengan langsung mengubah nilai beban dalam modus tahapan konstruksi serta dengan menerapkan faktor pengali sebesar satu. Sistem ini memungkinkan penerapan beban-beban yang lebih bervariasi. Selain itu, prosedur perhitungan yang baru dan lebih handal telah digunakan dalam perhitungan aliran air statis dalam tanah. Perhitungan konsolidasi juga telah dikembangkan untuk dapat menerapkan tahapan konstruksi terhadap waktu dan juga untuk efek deformasi yang besar (jaring elemen yang

diperbaharui). Elemen-elemen struktural ditingkatkan dengan Penggunaan formulasi plastisitas yang lebih baik untuk elemen pelat dan jangkar.

- **Tampilan Keluaran** :Program Plaxis memiliki fitur-fitur grafis yang sangat baik untuk menampilkan hasil-hasil dari perhitungan . Nilai-nilai perpindahan, tegangan, regangan, serta gaya-gaya dalam dari elemen struktural dapat diperoleh dari tabel keluaran. Keluaran berbentuk grafis maupun tabel bisa langsung dicetak maupun disimpan ke media penyimpanan.

#### 2.2.4. Permodelan Konstitutif Tanah - Plaxis

Model material merupakan suatu persamaan matematis yang menyatakan hubungan antar tegangan dan regangan. Model material seringkali dinyatakan dalam bentuk dimana suatu peningkatan tegangan tertentu (atau “perubahan tegangan”) dihubungkan dengan suatu peningkatan regangan tertentu (atau “perubahan regangan”). Seluruh model material di dalam program Plaxis didasarkan pada suatu hubungan antara perubahan tegangan efektif ( ), dan perubahan regangan ( ). Hubungan tegangan-regangan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\underline{\sigma}' = \underline{C} \cdot \underline{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Dimana: C = Matrik konstitutif material

$$\underline{\sigma}' = (\sigma'_{xx} \sigma'_{yy} \sigma'_{zz} \sigma'_{xy} \sigma'_{yz} \sigma'_{zx})^T \quad (2.2)$$

$$\underline{\varepsilon} = (\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx})^T \quad (2.3)$$

xx yy zz =Pertambahan tegangan normal efektif arah sumbu X-X, Y-Y, Z-Z

xy yz zx =Pertambahan tegangan normal efektif arah sumbu X-Y, Y-Z, Z-X

$\sigma_{xx}$   $\sigma_{yy}$   $\sigma_{zz}$  =Pertambahan tegangan normal efektif arah sumbu X-X,Y-Y, Z-Z

$\sigma_{xy}$   $\sigma_{yz}$   $\sigma_{zx}$  =Pertambahan tegangan normal efektif arah sumbu X-Y,Y-Z, Z-X

Dari persamaan hubungan tegangan-regangan terlihat jelas bahwa tekanan air pori tidak dimasukkan didalam hubungan tegangan-regangan, sehingga regangan yang terjadi adalah pada material yaitu pada butir tanah (*soil skeleton*). Analisis yang bias dilakukan pada program *Plaxis* yaitu: *Plane strain* dan *axisymetris*.

#### a. Definisi Umum dari Tegangan

Tegangan merupakan suatu tensor yang dapat dinyatakan oleh sebuah matriks dalam koordinat Cartesius:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Dalam teori deformasi standar,tensor tegangan adalah simetris sehingga  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ ,  $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$  dan  $\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$ . Dalam situasi ini, tegangan sering dinyatakan dalam notasi vector, yang melibatkan hanya enam buah komponen saja,yakni :

$$\sigma = (\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx})^T \quad (2.5)$$

Namun dalam kondisi regangan bidang,  $\sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$ . Menurut prinsip dari Terzaghi, tegangan dalam tanah menjadi tegangan efektif,  $\sigma'$  dan tekanan air pori,  $u$  sehingga dapat ditulis menjadi :

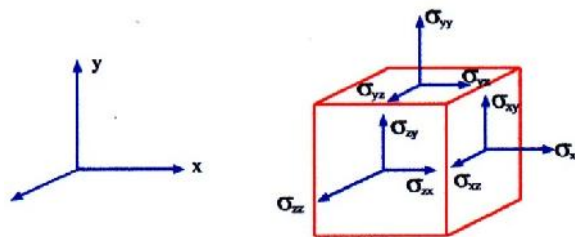
$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.6)$$

Air dianggap tidak dapat menahan gaya geser sama sekali. Karena itu, tegangan geser efektif adalah sama dengan tegangan geser total. Komponen

tegangan normal positif dianggap menyatakan tarik, sedangkan komponen tegangan normal negatif menyatakan tegangan tekan.

Model material untuk tanah dan batu umumnya dinyatakan sebagai hubungan antara peningkatan tegangan efektif tertentu terhadap peningkatan regangan. Dalam hubungan semacam itu, peningkatan tegangan efektif tertentu dinyatakan oleh perubahan tegangan (dinotasikan oleh sebuah titik di atas symbol tegangan)

$$= (\sigma'_{xx} \quad \sigma'_{yy} \quad \sigma'_{zz} \quad \sigma'_{xy} \quad \sigma'_{yz} \quad \sigma'_{zx})^T \quad (2.7)$$



*Gambar 2.1 Sistem koordinat umum tiga dimensi dan perjanjian tanda pada tegangan (Manual Plaxis version 8, 2007)*

Seringkali lebih menguntungkan menggunakan tegangan utama dibandingkan komponen tegangan cartesius dalam formulasi model material. Tegangan utama adalah tegangan di dalam system koordinat dimana seluruh komponen tegangan geser adalah nol. Sebenarnya tegangan utama adalah nilai eigen dari tensor tegangan. Tegangan efektif utama dapat ditentukan dengan cara berikut :

$$\text{Det} (\sigma' - \sigma' I) = 0 \quad (2.8)$$

Dimana I adalah matrik identitas. Persamaan ini menghasilkan tiga buah solusi untuk  $\sigma'$ , yaitu tegangan-tegangan efektif ( $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ ). Dalam Plaxis tegangan efektif utama diatur secara berurutan sebagai berikut :

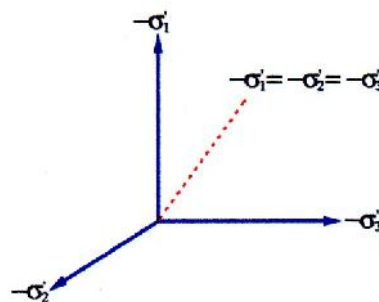
$$\sigma'_1 \quad \sigma'_2 \quad \sigma'_3 \quad (2.9)$$

Dimana  $\sigma'_1$  Merupakan tegangan tekan utama terbesar dan  $\sigma'_3$  merupakan tegangan tekan utama terkecil. Dalam program Plaxis, model sering dinyatakan dengan mengacu pada ruang tegangan utama, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.18. Selain tegangan utama, Umumnya juga berguna untuk mendefinisikan invariant tegangan, yaitu besarnya tegangan yang tidak tergantung dari orientasi sistem koordinat. Dua buah invariant tegangan berguna adalah :

$$p' = -\frac{1}{3}(\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz}) = -\frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (2.10a)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + (\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz})^2 + (\sigma'_{zz} - \sigma'_{xx})^2 + 6.(\sigma^2_{xy} + \sigma^2_{yz} + \sigma^2_{zx}))} \quad (2.10b)$$

Dimana  $p'$  adalah tegangan efektif isotropis, atau tegangan efektif rata-rata, dan  $q$  adalah tegangan deviatorik atau tegangan geser ekuivalen. Perhatikan bahwa perjanjian tanda yang digunakan untuk  $P'$  adalah positif untuk tegangan tekan. Berbeda dengan perjanjian tanda untuk tegangan lainnya. Tegangan geser ekuivalen  $q$ , mempunyai sifat penting dan berubah menjadi  $q = |\sigma'_1 - \sigma'_3|$  untuk kondisi tegangan triaksial dengan  $\sigma'_2 = \sigma'_3$ .



Gambar 2.2 Ruang tegangan utama ( Manual Plaxis version 8, 2007)



Tegangan efektif utama dapat dituliskan sebagai fungsi dari invariant sebagai berikut :

$$-\sigma'_1 = p' + \frac{2}{3}q \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.11a)$$

$$-\sigma'_1 = p' + \frac{2}{3}q \sin(\theta) \quad (2.11b)$$

$$-\sigma'_1 = p' + \frac{2}{3}q \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.11c)$$

$$\text{Dimana, } \theta = \frac{1}{3} \cdot \arcsin\left(\frac{27}{2} \cdot \frac{J_3}{q^3}\right) \quad (2.12)$$

Dengan,

$$J_3 = (\sigma'_{xx} - p')(\sigma'_{yy} - p')(\sigma'_{zz} - p') - (\sigma'_{xx} - p')\sigma'^2_{yz} - \dots \\ \dots (\sigma'_{yy} - p')\sigma'^2_{zx} - (\sigma'_{zz} - p')\sigma'^2_{xy} + 2\sigma'_{xy}\sigma'_{yz}\sigma'_{zx} \quad (2.13)$$

### **b. Definisi Umum dari Regangan**

Regangan merupakan sebuah tensor yang dapat dinyatakan oleh matriks dalam koordinat cartesius :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Sesuai dengan teori deformasi kecil, hanya jumlah dari komponen regangan geser cartesius  $\varepsilon_{ij}$  dan  $\varepsilon_{ji}$  yang saling melengkapi saja yang menghasilkan tegangan geser. Jumlah ini dinotasikan sebagai regangan geser  $\gamma$ . Karena itu bukan  $\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_{yx}$ ,  $\varepsilon_{yz}$ ,  $\varepsilon_{zy}$ ,  $\varepsilon_{zx}$ , dan  $\varepsilon_{xz}$  melainkan komponen regangan geser  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$ ,  $\gamma_{zx}$ , yang digunakan. Di bawah kondisi di atas, regangan seringkali dituliskan dalam notasi vector, yaitu melibatkan hanya enam buah komponen yang berbeda, yaitu :

$$= (\epsilon_{xx} \quad \epsilon_{yy} \quad \epsilon_{zz} \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx})^T \quad (2.15)$$

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (2.16a)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad (2.16b)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.16c)$$

$$\gamma_{xy} = \epsilon_{xy} + \epsilon_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (2.16d)$$

$$\gamma_{yz} = \epsilon_{yz} + \epsilon_{zy} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad (2.16e)$$

$$\gamma_{zx} = \epsilon_{zx} + \epsilon_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \quad (2.16f)$$

Sama dengan tegangan, komponen regangan normal positif menyatakan regangan tarik, sedangkan komponen regangan normal negatif menyatakan tekan.

Dalam formulasi model material, dimana digunakan peningkatan regangan tertentu, peningkatan ini dinyatakan oleh perubahan regangan (dinotasikan dengan sebuah titik di atas simbol regangan).

$$= (\epsilon_{xx} \quad \epsilon_{yy} \quad \epsilon_{zz} \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx})^T \quad (2.17)$$

$$\epsilon_{zz} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (\text{Kondisi regangan bidang/ plane strain})$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{r} \cdot u_x \quad (\text{Kondisi axisimetryris; } r = \text{Jari-jari})$$

Invarian regangan sering digunakan adalah regangan volumetric ( $\epsilon_v$ ) yang didefinisikan sebagai jumlah dari seluruh komponen regangan normal, seperti rumusan berikut :

$$\epsilon_v = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (2.18)$$

Pada program Plaxis untuk model elastoplastik, strain yang terjadi adalah gabungan dari regangan elastic dan plastis yang dirumuskan sebagai berikut :

$$= \epsilon^e + \epsilon^p \quad (2.19)$$

Ada 3 (tiga) jenis material pada program Plaxis yang bias dipilih untuk masing-masing model tanah yang digunakan,yaitu :

1. Jenis material drained

Material drained digunakan untuk mengatur tidak ada kenaikan tekanan air pori (*pore water pressure* ) pada material tersebut. Jenis ini diterapkan untuk kondisi tanah kering, tanah yang mempunyai permeabilitas besar seperti pasir, tanah yang mengalami pembebanan sangat lambat, serta untuk mensimulasikan perilaku tanah dalam jangka panjang.

2. Jenis material undrained

Material Undrained digunakan untuk mengatur timbulnya kenaikan tekanan air pori (*Excess pore water pressure* ) pada material tanah. Jenis ini diterapkan pada kondisi tanah yang mempunyai koefisien permeabilitas (k) kecil seperti tanah lempung, sehingga sewaktu diberikan excess pore water pressure tidak langsung terdisipasi. Besarnya kenaikan tekanan air pori dihitung berdasarkan bulk modulus air :

$$\Delta U_w = \frac{K_w}{n} \Delta \epsilon_v \quad (2.20a)$$

$$\frac{K_w}{n} = 100G \quad (2.20b)$$

$$G = \frac{E'}{2 \cdot (1 + \nu')} \quad (2.20c)$$

Besarnya kenaikan tegangan rata-rata efektif adalah :

$$\Delta P' = K' \Delta \varepsilon_v \quad (2.21a)$$

$$K' = \frac{E'}{2 \cdot (1 - 2\nu')} \quad (2.21b)$$

Dimana :

$K'$  = bulk modulus untuk skeleton

$K_w$  = bulk modulus air

$\varepsilon_v$  = kenaikan regangan volume

$n$  = porositas tanah

$E'$  = Young's modulus efektif

$\nu'$  = poisson ratio efektif, dibatasi maksimum 0,35

### 3. Jenis material non-porous

Digunakan untuk mengatur tidak ada kenaikan tekanan air pori pada material, jenis material non-porous untuk memodelkan material beton, batuan atau perilaku struktur lainnya.

#### **c. Analisis Tak Terdrainase Dengan Parameter Efektif dan Total**

Dalam program Plaxis, perilaku tak terdrainase dapat dilakukan dengan 2 (dua) cara analisis yaitu: analisis dengan menggunakan parameter efektif dan parameter total. Analisis tak terdrainase dengan menggunakan parameter efektif dapat dicapai dengan mengatur jenis perilaku material ( jenis material) dari lapisan tanah menjadi tak terdrainase.

Adanya tekanan air pori dalam massa tanah, umumnya diakibatkan oleh air, ikut menentukan besarnya tegangan total. Menurut prinsip Terzaghi, tegangan total ( $\sigma$ ) dapat dibedakan menjadi tegangan efektif ( $\sigma'$ ) dan tekanan air pori ( $u$ ). Walaupun demikian air dianggap tidak dapat menerima tegangan geser, sehingga tegangan geser efektif akan sama dengan tegangan geser total seperti rumus di bawah ini:

$$\sigma_{xx} = \sigma'_{xx} + u \quad (2.22a)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma'_{yy} + u \quad (2.22b)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma'_{zz} + u \quad (2.22c)$$

$$\tau_{xy} = \tau'_{xy} \quad (2.22d)$$

$$\tau_{yz} = \tau'_{yz} \quad (2.22e)$$

$$\tau_{zx} = \tau'_{zx} \quad (2.22f)$$

Pada program plaxis, analisis tak terdrainase dengan menggunakan parameter efektif seperti *shear modulus* ( $G$ ), *Poisson ratio* ( $\nu$ ), secara otomatis ditransfer kedalam bentuk parameter undrained  $E_u$  dan  $\nu_u$  dengan menggunakan persamaan :

$$E_u = 2G(1 + \nu_u) \quad (2.23a)$$

$$\nu_u = \frac{\nu' + \mu(1 + \nu')}{1 + 2\mu(1 + 2\nu')} \quad (2.23b)$$

$$\mu = \frac{1}{3n} \cdot \frac{K_w}{K'} \quad (2.23c)$$

$$K' = \frac{E'}{3(1 - 2\nu')} \quad (2.23d)$$

Untuk memodelkan perilaku material tak terdrainase yang didasarkan pada parameter efektif dari model ini tersedia untuk seluruh model material dalam

program *Plaxis*. Dengan pilihan ini maka perhitungan tak terdrainase dapat dilakukan dengan menggunakan masukan berupa parameter efektif, dengan perbedaan secara eksplisit antara tegangan efektif dan tekanan air pori berlebih. Analisis seperti ini memerlukan parameter efektif dari tanah sehingga akan sangat baik dan tepat jika parameter efektif tersebut tersedia. Untuk proyek tanah lunak, data berupa parameter efektif yang akurat tidak selalu tersedia, tetapi uji lapangan atau uji laboratorium mungkin telah dilakukan untuk memperoleh parameter tanah yang tak terdrainase. Dalam situasi seperti ini, maka modulus young tak terdrainase yang terukur dapat dengan mudah dikonversikan menjadi modulus young terdrainase dengan cara :

$$E' = \frac{2(1 + v')}{3} \cdot E_u \quad (2.24)$$

Namun demikian, kuat geser tak terdrainase tidak dapat dengan mudah digunakan untuk menentukan kuat geser efektif  $c'$  dan  $\phi'$ . Untuk proyek semacam ini, *Plaxis* menawarkan kemungkinan untuk melakukan analisis tak terdrainase dengan masukan berupa parameter kuat geser tak terdrainase ( $c_u$  atau  $s_u$ ) dan  $\phi_u = 0^\circ$ . Pilihan ini hanya tersedia untuk model Mohr-Coulomb dan model hardening soil, tetapi tidak tersedia untuk model Soft Soil.

Sementara untuk analisis tak terdrainase dengan menggunakan parameter total, dalam program *Plaxis* dapat menggunakan jenis material non-porous dan secara langsung memasukkan parameter-parameter elastis tak terdrainase  $E = E_u$  dan  $\nu = \nu_u = 0,495$  serta parameter kuat geser tak terdrainase  $c=c_u$  dan  $\phi_u = 0^\circ$ . Dalam kasus ini, analisis tegangan total dilakukan tanpa membedakan tegangan efektif dengan tekanan air pori. Karena itu, seluruh keluaran yang dinyatakan

sebagai tegangan efektif harus diinterpretasikan sebagai tegangan total dan seluruh tekanan air pori adalah nol. Dalam keluaran grafis untuk tegangan, tegangan dalam klaster yang non-porous tidak ditampilkan. Jika kondisi tegangan ingin ditampilkan, maka jenis material yang harus dipilih adalah terdrainase dan bukan non-porous, serta pastikan tidak ada tekanan air pori yang terbentuk dalam klaster-klaster ini. Perhatikan bahwa pendekatan ini tidak dapat dilakukan saat menggunakan model Soft Soil Creep. Secara umum, analisis tegangan efektif dengan menggunakan pilihan tak terdrainase di dalam Plaxis untuk memodelkan perilaku tak terdrainase lebih baik dibandingkan dengan analisis tegangan total.

### **Model Mohr - Coulomb**

Ada banyak model material yang bias digunakan untuk analisis tegangan-regangan pada tanah, seperti Model Elastik Linear, Model Mohr-Coulomb, Soil Hardening, dan Soft Soil. Akan tetapi yang akan dijelaskan secara khusus dalam tulisan ini adalah permodelan Mohr-Coulomb yang digunakan pada penelitian ini.

Plastisitas mempunyai hubungan dengan terbentuknya regangan yang tidak dapat kembali seperti semula. Untuk mengevaluasi apakah plastisitas telah terjadi di dalam perhitungan, sebuah fungsi leleh (*yield function f*), digunakan sebagai fungsi dari tegangan dan regangan. Sebuah fungsi leleh umumnya dapat dinyatakan sebagai suatu bidang dalam ruang tegangan utama. Sebuah model plastis sempurna merupakan suatu model model konstitutif dengan bidang leleh tertentu, yaitu bidang leleh yang sepenuhnya didefinisikan oleh parameter model dan tidak terpengaruh oleh peregangan (plastis). Untuk kondisi tegangan yang

dinyatakan oleh titik-titik yang berada di bawah bidang leleh, perilaku dari titik-titik tersebut akan sepenuhnya elastis dan seluruh regangan dapat kembali seperti semula.

Prinsip dasar dari elastoplastis adalah regangan yang terjadi merupakan gabungan dari elastis dan plastis. ( $\underline{\epsilon} = \underline{\epsilon}^e + \underline{\epsilon}^p$ ). Apabila tanah masih dalam kondisi elastis, maka persamaan bisa dituliskan sebagai berikut :

$$\underline{\sigma}' = \underline{C}^e \cdot \underline{\epsilon}^e = \underline{C}^e (\underline{\epsilon} - \underline{\epsilon}^p) \quad (2.25)$$

Berdasarkan teori plastisitas klasik (ill, 1950), bahwa pertambahan regangan plastis adalah turunan dari fungsi leleh terhadap tegangan. Hal ini berarti bahwa perubahan regangan plastis dapat dinyatakan sebagai vektor yang tegak lurus terhadap bidang leleh. Bentuk klasik dari teori plastisitas ini disebut sebagai plastisitas terasosiasi (*associated plasticity*). Namun bila teori tersebut tidak dipakai untuk fungsi leleh model Mohr Coulomb yang diaplikasikan dalam *Plaxis* akan membuat prediksi yang berlebihan terhadap dilatansi. Karena itu, selain fungsi leleh, digunakan juga sebuah fungsi potensial plastis (*plastic potential function (g)*) yang besarnya tidak sama dengan fungsi leleh tersebut ( $f = g$ ), yang dinyatakan sebagai *non-associated plasticity*. Secara umum pertambahan regangan plastis ditulis sebagai berikut:

$$\underline{\epsilon}^p = \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (2.26)$$

Dimana  $\lambda$  adalah faktor pengali plastis.

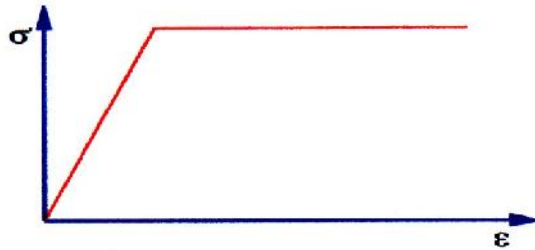
Untuk tanah yang berperilaku elastis murni :

$$\lambda = 0, \text{ untuk } f < 0 \text{ atau } \frac{\partial f^r}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \underline{C}^e \cdot \underline{\epsilon} \leq 0 \quad (2.27a)$$



Sementara untuk tanah yang berperilaku dalam kondisi plastis:

$$\lambda > 0, \text{ untuk } f < 0 \text{ atau } \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \cdot \underline{C}^e \cdot \underline{\varepsilon} > 0 \quad (2.27b)$$



Gambar 2.3 . Ide dasar dari suatu model elastis plastis sempurna ( Manual Plaxis v.8 )

Persamaan-persamaan ini dapat digunakan untuk mendapatkan hubungan antara pertambahan tegangan efektif dan pertambahan regangan pada elastoplastis adalah :

$$\underline{\sigma}' = \underline{C}^{ep} \cdot \underline{\varepsilon} \quad (2.28a)$$

$$\underline{\sigma}' = \left( \underline{C}^e - \frac{\alpha}{d} \cdot \underline{C}^e \cdot \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \underline{C}^e \right) \cdot \underline{\varepsilon} \quad (2.28b)$$

Dimana :

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \underline{C}^e \cdot \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (2.28c)$$

= Parameter pengatur, bila tanah dalam kondisi elastis  $d = 0$  dan dalam kondisi plastis  $d = 1$

Teori plastisitas di atas terbatas untuk bidang leleh yang menerus dan mulus, dan tidak meliputi multi bidang kontur leleh seperti pada model Mohr Coulomb. Untuk bidang leleh seperti ini, teori plastisitas telah dikembangkan oleh

Koiter (1960) dan beberapa peneliti lain untuk memperhitungkan *flow vertices* yang melibatkan dua atau lebih fungsi potensi plastis, yakni:

$$\underline{\varepsilon}^p = \lambda_1 \cdot \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma}'} + \lambda_2 \cdot \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma}'} + \dots \quad (2.29)$$

Sama dengan persamaan di atas, beberapa fungsi leleh yang bersifat *quasi-independent* ( $f_1, f_2, \dots$ ) digunakan untuk menentukan besarnya nilai pengali ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ ).

Kondisi leleh Mohr Coulomb secara penuh terdiri dari enam buah fungsi leleh saat diformulasikan dalam konteks tegangan utama dan dipengaruhi oleh parameter  $c$  dan  $\phi$ . Fungsi-fungsi leleh ini secara bersamaan membentuk kerucut heksagonal dalam ruang tegangan utama seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.11.

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0 \quad (2.30a)$$

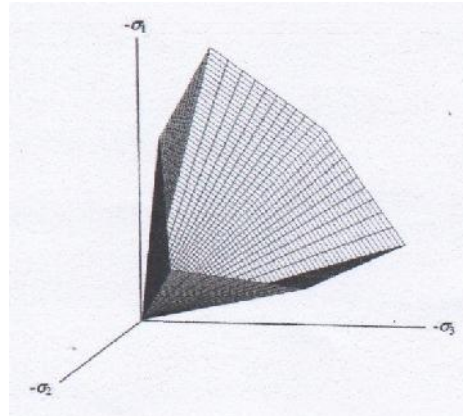
$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0 \quad (2.30b)$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0 \quad (2.30c)$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0 \quad (2.30d)$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0 \quad (2.30e)$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0 \quad (2.30f)$$



Gambar 2.4 . Bidang leleh Mohr-Coulomb dalam ruang tegangan utama  
( $c=0$ ) (Manual Plaxis version 8)

Selain fungsi leleh, didefinisikan enam buah fungsi potensial (g) plastis untuk model Mohr-Coulomb sebagai berikut:

$$g_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \cdot \sin \psi \quad (2.31a)$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \cdot \sin \psi \quad (2.31b)$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \cdot \sin \psi \quad (2.31c)$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \cdot \sin \psi \quad (2.31d)$$

$$g_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \cdot \sin \psi \quad (2.31e)$$

$$g_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \cdot \sin \psi \quad (2.31f)$$

Pada fungsi potensial Plastis Mohr Coulomb dipengaruhi oleh besarnya sudut dilatancy (  $\psi$  ), parameter ini diperlukan untuk memodelkan pertambahan regangan volume plastis (dilatansi) yang terjadi pada tanah padat. Maka secara keseluruhan parameter yang diperlukan untuk model Mohr Coulomb pada program *Plaxis* adalah plastisitas ( $c$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ), modulus elastisitas Young's (E) dan Poisson ratio ( $\nu$ ).