

# Diagram Mohr

*by* Imam Setiaji Ronoatmojo

---

**Submission date:** 16-Aug-2024 06:37AM (UTC+0700)

**Submission ID:** 2432648266

**File name:** BUKU\_AJAR\_\_Diagram\_Mohr.docx (7.6M)

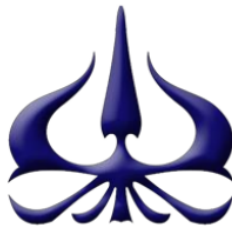
**Word count:** 15239

**Character count:** 92240

# **DIAGRAM MOHR**

## **(TEORI DAN SOAL)**

Oleh :  
**Dr. Ir. Imam Setiaji Ronoatmojo, M.T.**  
**Himmes Fitra Yuda, S.T., M.T.**



**22**  
**PRODI TEKNIK GEOLOGI**  
**FAKULTAS TEKNOLOGI KEBUMIHAN DAN ENERGI**  
**UNIVERSITAS TRISAKTI**  
**2024**

## PRAKATA

Penulisan buku berikut, yang berjudul Diagram Mohr (Teori dan Soal), mempunyai maksud untuk melengkapi buku ajar dari penulis yang telah ada sebelumnya, yakni buku Mekanika Batuan terbitan tahun 2019 dari Penerbit Universitas Trisakti (ISBN: 978-602-075008-8). Buku ini merupakan pengembangan dari Bab IX buku tersebut. Oleh karena, dalam kaitan tersebut, penulis masih merasa ada kekurangan dalam memberikan materi tentang Diagram Mohr, yang hanya terbatas pada satu bab saja. Padahal materi ini sangat penting dalam penggambaran karakteristik sifat mekanika batuan maupun sifat mekanika tanah. Sehingga, dengan bekal pengalaman mengajar mekanika batuan dan mekanika tanah, penulis berupaya menggali kembali pemahaman tentang Diagram Mohr serta mencoba-terapkan pada praktik analisis mekanika batuan dan mekanika tanah. Pada pembahasannya, penulis memilih narasi tentang Diagram Mohr, mulai dari pemaparan tentang gaya dan tegangan, mekanisme keruntuhan pada material tanah serta batuan, serta aplikasinya pada analisis sifat mekanika tanah dan mekanika batuan. Dengan demikian, diharapkan akan terbentuk pemahaman yang cukup komprehensif mengenai Diagram Mohr secara teori dan praktis, serta bisa digunakan untuk kepentingan analisis sifat mekanika tanah dan mekanika batuan.

Penggunaan buku ini akan efektif jika dipergunakan dengan praktik nyata di lapangan maupun di laboratorium, adapun buku lain yang direkomendasikan adalah *Experimental Rock Deformation - the Brittle Field* karya Marvyn S. Peterson dan Teng-fong Wong (2005) terbitan Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Akhirnya, dengan mengucapkan syukur ke hadirat Allah s.w.t, semoga buku ajar ini bisa bermanfaat untuk mendukung kegiatan pembelajaran siswa. Ucapan terimakasih disampaikan kepada Prof. Dr. Astri Rinanti, M.T dan segenap jajarannya dari Lembaga Penelitian Universitas Trisakti yang telah memfasilitasi dana hibah penulisan buku ajar ini, demikian pula kepada Dekan FTKE Dr. Ir. Muhammad Burhannudinnur, M.Sc dan Pimpinan DRPMF Dr. Suryo Prakoso, M.T.

Jakarta, 8 September 2023

Penulis  
Dr.Ir. Imam Setiaji Ronoatmojo, M.T.  
Himmes Fitra Yuda, S.T., M.T.

## DAFTAR ISI

PRAKATA .....	ii
DAFTAR ISI .....	iii
DAFTAR GAMBAR DAN SUMBERNYA .....	iv
DAFTAR TABEL .....	vi
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
A. Pentingnya Belajar Diagram Mohr .....	1
B. Sejarah .....	1
C. Ruang Lingkup .....	3
RANGKUMAN .....	4
UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN .....	4
BAHAN DISKUSI .....	4
BAB II .....	5
KONSEP TEGANGAN .....	5
A. Konsep Tegangan .....	5
B. Tegangan Aksial Sederhana .....	10
C. Tegangan Biaksial .....	13
RANGKUMAN .....	16
UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN .....	16
BAHAN DISKUSI .....	16
BAB III .....	17
LINGKARAN MOHR .....	17
A. Lingkaran Mohr .....	17
B. Sistem Tegangan 2-D .....	17
C. Sistem Tegangan 3-D .....	20
D. <i>Direct Shear</i> dan <i>Simple Shear</i> .....	25
E. Tegangan Triaksial .....	28
F. Titik Kutub .....	30
G. Kriteria Kegagalan .....	32
H. Tegangan Efektif .....	35
RANGKUMAN .....	37
UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN .....	37
BAHAN DISKUSI .....	38
BAB IV .....	39
KERUNTUHAN TANAH .....	39
A. Lingkaran Tegangan Total dan Tegangan Efektif .....	39
B. Uji Triaksial .....	40
C. Uji Kompresi Triaksial .....	44
D. Uji Ekstensi Triaksial .....	49
E. Pengaruh Anisotropi pada Kuat Geser Tanah Liat .....	51
F. Bidang Keruntuhan .....	53
RANGKUMAN .....	55
UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN .....	55
BAHAN DISKUSI .....	55
BAB V .....	56
KERUNTUHAN BATUAN .....	56
A. Teori Rekahan Griffith .....	56
B. Kekuatan Empirik untuk Massa Batuan .....	58
C. Kekuatan Empirik untuk Batuan Utuh .....	62
RANGKUMAN .....	65
UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN .....	65
BAHAN DISKUSI .....	65
DAFTAR PUSTAKA .....	66
BIODATA PENULIS .....	67

## DAFTAR GAMBAR DAN SUMBERNYA

Gambar 1. 1 Diagram Mohr untuk aplikasi geosains.....	3
<b>6</b> Gambar 2. 1 Sembilan komponen tegangan.....	6
Gambar 2. 2 Tegangan aksial sederhana.....	11
Gambar 2. 3 Variasi tegangan normal $\sigma_{\theta}$ dan tegangan geser $\tau_{\theta}$ dengan sudut bidang $\theta$ pada benda uji berbentuk silinder.....	12
Gambar 2. 4 Sistem tegangan biaksial pada pelat persegi panjang: (a) tegangan tepi; (b) tegangan pada elemen ABCD; (c) penentuan tegangan $\sigma_{\theta}$ dan $\tau_{\theta}$ pada bidang miring dengan sudut $\theta$ .....	13
Gambar 2. 5 Bidang kelemahan pada Soal 2.2.....	15
Gambar 3. 1 Sistem tegangan biaksial sederhana: (a) kompresi; (b) tegangan/kompresi/tension; (c) <i>pure shear</i> .....	18
Gambar 3. 2 Plot untuk Soal 3.1.....	19
Gambar 3. 3 Tegangan tiga dimensi pada elemen kubik.....	20
Gambar 3. 4 Elemen kubik dengan tegangan utama yang hanya bekerja pada permukaannya: (a) tegangan; (b) Lingkaran Mohr.....	21
Gambar 3. 5 Elemen kubik dengan tegangan normal pada seluruh permukaannya dan tegangan geser pada dua pasang permukaan yang berhadapan: (a) tegangan; (b) Lingkaran Mohr.....	22
Gambar 3. 6 Skema Soal 3.2.....	23
Gambar 3. 7 Skema pada Soal 3.3.....	24
Gambar 3. 8 Kasus pada Soal 3.4.....	26
Gambar 3. 9 Uji geser laboratorium: (a) geser langsung; (b) Alat geser sederhana Cambridge; (c) distribusi tegangan geser horizontal pada alat geser sederhana; (d) Alat geser sederhana NGI.....	27
Gambar 3. 10 Uji triaksial: (a) tegangan radial $\sigma_r$ dan gaya aksial yang diterapkan F; (b) Lingkaran tegangan Mohr ( $\sigma_a = F/A$ , dimana A adalah luas benda uji).....	29
Gambar 3. 11 Skema pada Soal 3.5.....	29
Gambar 3. 12 Titik kutub $P_s$ untuk arah tegangan dan $P_s$ untuk arah bidang yang terkena tegangan.....	31
Gambar 3. 13 Penggunaan titik kutub P untuk menemukan tegangan ( $\sigma_c, \tau_{ca}$ ) pada sudut $\theta$ terhadap arah tegangan referensi.....	31
Gambar 3. 14 Skema pada Soal 3.6.....	32
Gambar 3. 15 Lingkaran tegangan Mohr dan selubung kekuatan untuk besi tuang.....	33
Gambar 3. 16 Parameter kuat geser $c$ dan $\phi$ .....	34
Gambar 3. 17 Gaya kontak antar partikel dan tekanan air pori dalam suatu massa tanah.....	36
Gambar 3. 18 Konsolidasi normal (AB) dan pembengkakan (BC).....	36
<b>2</b> Gambar 4. 1 Hubungan antara lingkaran tegangan total dan lingkaran tegangan efektif jika: (a) tekanan air pori bernilai positif; (b) tekanan air pori negatif.....	40
Gambar 4. 2 Elemen dasar uji triaksial.....	41
Gambar 4. 3 Tegangan uji triaksial: tegangan aksial $\sigma_a$ , tegangan radial $\sigma_r$ .....	42
Gambar 4. 4 Lingkaran tegangan pada kegagalan untuk pengujian kompresi dan ekstensi triaksial yang dikeringkan.....	43
Gambar 4. 5 Plot tegangan-regangan tipikal untuk uji triaksial (a) UU, (b) CU dan (c) CD pada tanah liat alami yang sedikit terkonsolidasi berlebihan ( $p$ , puncak; $c_s$ , keadaan kritis).....	45
Gambar 4. 6 Lingkaran tegangan dan selubung kekuatan yang khas pada keadaan kritis untuk pengujian UU, CU dan CD pada benda uji yang identik dari tanah liat yang sedikit terkonsolidasi berlebihan.....	47
Gambar 4. 7 Perilaku keadaan kritis dalam tanah.....	47
Gambar 4. 8 Selubung Hvorslev (1937).....	48
Gambar 4. 9 Plot tipikal untuk pengujian (a) UU, (b) CU dan (c) CD pada tanah liat yang sedikit terkonsolidasi berlebihan.....	50
Gambar 4. 10 Perbandingan kekuatan keadaan kritis kompresi dan ekstensi triaksial: (a) diplot dalam ruang qcs positif; (b) plot konvensional.....	50
Gambar 4. 11 Contoh pengaruh orientasi contoh terhadap kekuatan tak terdrainasi yang diukur dari lempung alam: (a) tren 1; (b) tren 2.....	52

Gambar 4. 12 Pengaruh orientasi sampel dan jalur tegangan terhadap kekuatan tegangan efektif selubung tanah liat Fulford lunak: (a) kompresi; (b) ekstensi. ....	52
Gambar 4. 13 Orientasi bidang pecah pada: (a) uji kompresi triaksial; (b) uji ekstensi triaksial. (Catatan: P adalah titik kutub dari bidang).....	54
Gambar 5. 1 Lingkaran pecah yang khas untuk batuan dan 'kurva intrinsik' Jaeger: 1, tegangan uniaksial; 2, kompresi uniaksial; 3, kompresi triaksial. ....	56
Gambar 5. 2 Retakan elips Griffith. (P menunjukkan titik kegagalan) .....	57
Gambar 5. 3 Kekuatan Griffith menyelimuti bidang tekan dalam bentuk: (a) tegangan utama $\sigma_1, \sigma_2$ ; (b) tegangan geser dan tegangan normal, $\tau, \sigma_n$ . ....	58
Gambar 5. 4 Selubung kekuatan Hoek dan Brown. (Hoek, 1983) .....	60
Gambar 5. 5 Selubung kekuatan Bray (Hoek, 1983).....	60
Gambar 5. 6 Pengaruh konstanta m pada: (a) selubung keruntuhan Mohr; (b) sudut geser sesaat $\phi_i'$ , untuk $S = 1$ (Hoek, 1983).....	61
Gambar 5. 7 Pengaruh konstanta S pada: (a) selubung kegagalan Mohr; (b) sudut gesek sesaat $\phi_i'$ , untuk $m = 10$ . (Setelah Hoek, 1983) .....	61
Gambar 5. 8 Lingkaran keruntuhan Mohr untuk lima sampel batu granit (Hoek, 1983). ....	62
Gambar 5. 9 Lingkaran keruntuhan Mohr untuk 11 sampel batugamping (Hoek, 1983).....	63
Gambar 5. 10 Lingkaran kegagalan untuk empat batuan berbeda dengan selubung nilai B dan M 'paling cocok' Johnston (garis padat) dan 'umum' (garis putus-putus) (Johnston, 1985).....	64

**6**  
**DAFTAR TABEL**

Tabel 3. 1 Kriteria OCR .....	37
Tabel 4. 1 Nilai $c'$ dan $\phi'$ dari uji kompresi dan ekstensi triaksial. ....	53
Tabel 4. 2 Nilai $\phi'$ dari uji kompresi dan ekstensi .....	53
Tabel 5. 1 Parameter paling cocok dan umum untuk empat jenis batuan. ....	65

# BAB I

## PENDAHULUAN

**Capaian Pembelajaran :**

Mahasiswa dapat memahami perlunya belajar Diagram Mohr dalam konteks grafis dari tegangan yang bekerja pada balok serta sejarahnya..

**Deskripsi:**

Dalam bab ini mahasiswa akan diajak untuk memahami sejarah munculnya lingkaran tegangan yang kini dikenal dengan Diagram Mohr..

**A. Pentingnya Belajar Diagram Mohr**

Seperti kita ketahui bersama, saat membuka banyak buku teks mengenai mekanika tanah dan mekanika batuan, peran penting lingkaran Mohr dalam merepresentasikan dan menafsirkan data, untuk analisis masalah geoteknik dan untuk memprediksi perilaku tanah dan batuan. Dalam buku ajar ini, lingkaran Mohr akan dijelaskan secara rinci – termasuk hubungan antara lingkaran tegangan Mohr dan kekuatan serta perilaku deformasi tanah dan batuan dilihat dari sudut pandang teknik grafis ini. Berbagai penerapannya digabungkan dalam buku ini untuk memberikan relasi integrasi pada beragam aspek perilaku tanah dan batuan.

Diharapkan dengan memahami lingkaran Mohr, serta keterkaitannya dengan material, baik tanah maupun batuan, kita bisa mengembangkan turunan dari tensor-tensor yang ada di dalam suatu medan tegangan. Penggunaan dari Diagram Mohr tidak terbatas pada masalah Geoteknik saja, yang berada pada lingkup permukaan bumi, namun juga mencakup pada persoalan tegangan pada kasus di bawah permukaan bumi, misalnya untuk mengetahui kestabilan lubang bor migas.

Oleh karena sedemikian pentingnya Diagram Mohr, maka pembahasan pada buku ajar ini, sebagai pelengkap buku ajar sebelumnya, yakni pada mata kuliah Mekanika Batuan dan Mekanika Tanah, maka perlu disusun khusus buku tentang Diagram Mohr.

**B. Sejarah**

Meskipun lingkaran tegangan selalu dikaitkan dengan Mohr, sebenarnya Culmann-lah yang pertama kali memperkenalkan distribusi tegangan secara grafis untuk merepresentasikan tegangan. Kontribusi Mohr terletak pada penelitian yang lebih luas mengenai penggunaannya untuk tegangan dua dimensi dan tiga dimensi, dan dalam mengembangkan kriteria kekuatan berdasarkan lingkaran tegangan, pada saat sebagian besar insinyur menerima teori regangan maksimum Saint-Venant, sebagai kriteria kegagalan yang valid. Siapapun yang ingin mengetahui kontribusi dari Culmann dan Mohr disarankan untuk membaca buku



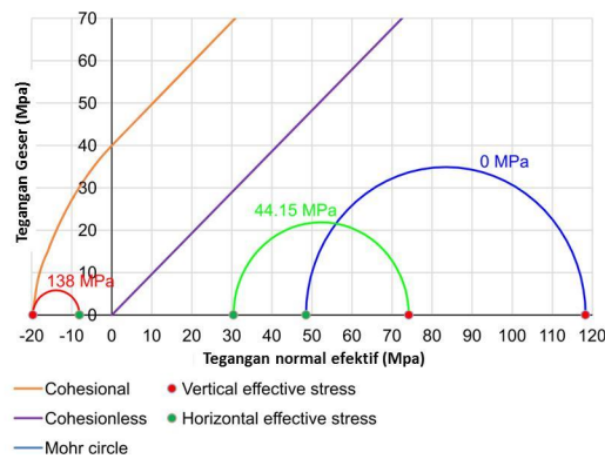
Karl Culmann lahir di Bergzabern, Rheinpfalz, pada tahun 1821, lulus dari Politeknik Karlsruhe pada tahun 1841 dan segera mulai bekerja di Hof di jalur kereta api Bavaria. Pada tahun 1849, Komisi Perkeretaapian mengirimnya ke Inggris dan Amerika Serikat selama dua tahun, untuk mempelajari konstruksi jembatan di negara tersebut. Pendidikan teknik yang sangat baik yang diterimanya, memungkinkan dia untuk melihat, dari sudut pandang teoritis, pekerjaan rekan-rekannya dari Inggris dan Amerika, yang keahliannya sebagian besar didasarkan pada pengalaman. Hasilnya adalah laporan Culmann yang diterbitkan pada tahun 1852, yang sangat memengaruhi teori struktur dan teknik jembatan di Jerman. Pengangkatannya sebagai Profesor Teori Struktur di Politeknik Zurich, pada tahun 1855 memberinya kesempatan untuk mengembangkan dan mengajarkan ide-idenya tentang penggunaan metode analisis grafis untuk struktur teknik, yang berpuncak pada bukunya *Die Graphische Statik*, yang diterbitkan oleh Verlag von Meyer dan Zeller pada tahun 1866. Banyak bidang statika grafis yang dibahas dalam buku ini, termasuk penerapan poligon gaya dan poligon kabel, konstruksi diagram momen lentur, solusi grafis untuk balok kontinu (kemudian disederhanakan oleh Mohr) dan penggunaannya untuk menganalisis rangka. Culmann memperkenalkan lingkaran tegangannya dalam mempertimbangkan tegangan longitudinal dan vertikal pada balok horizontal selama masa kelenturan. Mengisolasi elemen kecil dari balok dan menggunakan koordinat persegi panjang, ia menggambar sebuah lingkaran dengan pusatnya, pada sumbu tegangan geser nol (horizontal), melewati dua titik tegangan yang diwakili oleh tegangan geser normal dan konjugasi pada permukaan vertikal dan horizontal elemen. Dia menganggap tegangan normal pada permukaan horizontal adalah nol. Dalam membuat konstruksi ini, Culmann menetapkan sebuah titik pada lingkaran, yang sekarang dikenal sebagai titik kutub, dan menunjukkan bahwa tegangan pada bidang pada kemiringan tertentu, dapat ditemukan oleh garis yang melalui titik ini yang ditarik sejajar dengan bidang. Garis seperti itu bertemu lagi dengan lingkaran pada titik tegangan yang diperlukan. Penggunaan titik kutub secara ekstensif dalam teks ini. Culmann melanjutkan dengan memplot lintasan tegangan utama pada sebuah balok, yang diperoleh langsung dari lingkaran tegangan.

Christian Otto Mohr lahir pada tahun 1835 di Wesselburen, di pantai Laut Utara Schleswig-Holstein yang tidak ramah. Setelah lulus dari Institut Politeknik Hannover, ia pertama kali bekerja, seperti Culmann, sebagai insinyur kereta api sebelum, pada usia 32 tahun, menjabat sebagai Profesor Mekanika Teknik di Politeknik Stuttgart. Pada tahun 1873 ia pindah ke Politeknik Dresden, di mana ia terus menekuni minatnya pada kekuatan material dan teori struktur. Kontribusi perintis yang ia berikan pada teori struktur mencakup penggunaan garis pengaruh untuk menghitung defleksi balok kontinu, solusi grafis persamaan tiga momen,

dan konsep kerja virtual untuk menghitung perpindahan pada sambungan rangka. Karyanya pada lingkaran tegangan mencakup aplikasi dua dimensi dan tiga dimensi dan, sebagai tambahan, ia merumuskan ekspresi trigonometri untuk bahan elastis, hubungan tegangan dan regangan, serta ekspresi hubungan modulus regangan langsung dan geser. Seperti halnya tegangan, ia menunjukkan bahwa regangan geser dan regangan langsung dapat direpresentasikan secara grafis dengan lingkaran dalam sistem koordinat persegi panjang. Dan, seperti yang dilakukan Coulomb seratus tahun sebelumnya, bahwa tegangan geser bisa berpotensi menyebabkan kegagalan pada material teknik, maka Mohr mengusulkan kriteria kegagalan berdasarkan selubung tangensial terhadap lingkaran tegangan pada patahan tarik dan tekan. Dia kemudian berasumsi bahwa setiap kondisi tegangan yang diwakili oleh lingkaran yang menyentuh selubung ini akan memulai kegagalan. Kriteria kegagalan ini ditemukan memberikan penerimaan yang lebih baik dengan eksperimen dibandingkan teori regangan maksimum Saint-Venant, yang diterima secara luas pada saat itu.

### C. Ruang Lingkup

Meskipun sudah banyak dikenal di lingkungan geoteknik, namun hampir semua mahasiswa geologi juga diajarkan tentang diagram Mohr karena diagram tersebut merupakan cara yang sederhana dan mudah untuk memahami hubungan antara tegangan dan tekanan fluida (tegangan efektif), sifat mekanik batuan, dan hasil rekahan. Sayangnya, sebagian besar ahli geologi tampaknya melupakan pelajaran tersebut dan tidak memahami bagaimana diagram Mohr dapat digunakan untuk memprediksi dalam kondisi apa batuan akan retak dan jenis retakan apa yang akan dihasilkan oleh tegangan efektif tertentu. Kami telah kembali ke prinsip dasar dan menggunakan diagram Mohr untuk membuat prediksi tentang kondisi batuan Variscan di kedalaman reservoir di bawah Göttingen.



**Gambar 1. 1** Diagram Mohr untuk aplikasi geosains.

Pendekatan sederhananya berguna karena membantu ahli geosains mempertimbangkan, memodelkan, dan memprediksi kisaran sifat mekanik batuan, tegangan, tekanan fluida, dan retakan yang diakibatkannya yang mungkin terjadi di bawah permukaan. Dengan demikian, hal ini memberikan hubungan yang penting dan diperlukan antara berbagai pendekatan, termasuk studi analog lapangan, eksperimen deformasi batuan, dan pemodelan jaringan rekahan diskrit. Sebagai contohnya seperti yang tampak pada Gambar 1.1. Pembahasan selanjutnya akan dimulai dari konsep tegangan yang mengacu pada tensor yang merupakan turunan dari vektor gaya yang bekerja pada bidang, baik bidang dua dimensi maupun tiga dimensi, sehingga diharapkan bisa memberikan gambaran filosofis tentang lingkaran tegangan Mohr dan kegunaannya untuk memprediksi keruntuhan tanah dan batuan, termasuk di dalamnya penentuan kuat geser tanah atau pembentukan kekar/rekahan pada batuan.

#### **RANGKUMAN**

1. Meskipun namanya disebut lingkaran tegangan Mohr pada awalnya Culmann yang pertama memperkenalkannya.
2. Lingkaran Mohr tidak hanya mendeskripsikan tegangan tetapi juga menyatakan suatu batas selubung keruntuhan tanah atau batuan.

#### **UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN**

1. Kenapa diagram Mohr disebut sebagai diagram yang menjelaskan hubungan tegangan normal dan tegangan geser?
2. Apakah telaah ini hanya ada di dalam lingkup permukaan saja?
3. Bagaimana dasar filosofinya?

#### **BAHAN DISKUSI**

Diskusikan dalam kelompok tentang penggunaan diagram Mohr itu melingkupi disiplin keilmuan apa saja.

## BAB II KONSEP TEGANGAN

### Capaian Pembelajaran :

Mahasiswa dapat memahami bagaimana tkonsep dasar mengenai tegangan yang melandasi pemikiran tentang diagram Mohr..

### Deskripsi:

Dalam bab ini mahasiswa akan diajak untuk memahami bagaimana konsep dasar tegangan yang akan diaplikasikan di dalam diagram Mohr..

### 2. Konsep Tegangan

Tegangan bekerja secara tiga dimensi terhadap suatu titik. Akan lebih mudah untuk menganggap suatu titik sebagai kubus yang sangat kecil, yang mempunyai sistem koordinat Cartesian  $(x_1, x_2, x_3)$ . Kita gunakan simbol  $\sigma_{ij}$  untuk menunjukkan komponen tegangan yang bertindak pada bidang yang tegak lurus dengan sumbu tertentu untuk  $x_i$  (dengan demikian mengidentifikasi orientasi bidang) dan dalam arah sejajar sumbu tertentu untuk  $x_j$  (dengan demikian mendefinisikan arah traksi). Perwujudannya dalam mengidentifikasi tegangan yang bekerja pada permukaan kubus  $x_1$  adalah:

- $\sigma_{11}$  merupakan komponen tegangan normal, tegak lurus terhadap permukaan bidang kubus  $x_1$  (atau  $x$ ).
- $\tau_{12}$  dan  $\tau_{13}$  merupakan sepasang komponen tegangan geser yang terletak pada permukaan bidang  $x_1$  (atau  $x$ ), masing-masing bekerja sejajar dengan sumbu koordinat  $x_2$  dan  $x_3$  (atau  $y$  dan  $z$ ).

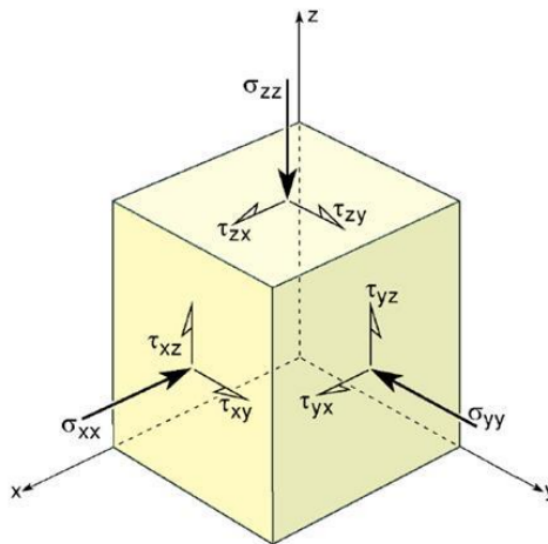
2 Untuk setiap permukaan kubus  $x_1$  (atau  $x$ ) terdapat pasangan permukaan yang mempunyai tegangan normal yang berarah ke dalam, bertanda positif, berlawanan dengan tegangan normal yang bekerja pada permukaan lainnya. Prosedur yang sama berlaku untuk permukaan kubus lainnya  $x_2$  dan  $x_3$  (atau  $y$  dan  $z$ ), sehingga total ada 9 komponen tegangan diperoleh untuk 3 pasangan permukaan kubus (Gambar 2.1) :

Pasangan pada bidang  $x_1$  :  $\sigma_{11} \quad \tau_{12} \quad \tau_{13}$  atau  $\sigma_{xx} \quad \tau_{xy} \quad \tau_{xz}$   
Pasangan pada bidang  $x_2$  :  $\sigma_{21} \quad \tau_{22} \quad \tau_{23}$  atau  $\sigma_{yx} \quad \tau_{yy} \quad \tau_{yz}$   
Pasangan pada bidang  $x_3$  :  $\sigma_{31} \quad \tau_{32} \quad \tau_{33}$  atau  $\sigma_{zx} \quad \tau_{zy} \quad \tau_{zz}$

2 Hal ini biasa dituliskan ke dalam matriks sehingga komponen-komponen dalam satu baris adalah komponen yang bekerja pada suatu permukaan bidang dan komponen dalam kolom adalah komponen yang bekerja pada arah yang sama. Menggunakan simbol  $\sigma$  untuk gaya normal dan  $\tau$  untuk gaya pada permukaan:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Matriks di atas disebut juga sebagai matriks tensor tegangan.



Gambar 2.1 Sembilan komponen teganga

**2**  
**Skalar:** kuantitas dengan besaran saja (yaitu bilangan real, seperti untuk massa, suhu, waktu).

**Vektor:** objek geometris dengan besar dan arah (misalnya gaya, kecepatan, percepatan).

**Tensor:** struktur matematika dengan besar dan arah yang menentukan bidang aksi (misalnya permeabilitas, regangan, tegangan).

Tensor **tegangan**, yang mewakili semua vektor traksi pada suatu titik tanpa ketergantungan pada orientasi bidang (unit vektor normal), sepenuhnya menggambarkan keadaan tegangan yang bekerja. Lebih khusus lagi, tegangan adalah tensor simetris karena 6 komponen di luar diagonal dapat dipertukarkan; atau tensor orde kedua karena terkait dengan **2** arah. Dengan demikian, komponen-komponen tegangan memiliki 2 subskrip, di mana  $i = 1, 2, 3$  dan  $j = 1, 2, 3$ . Subskrip  $i$  dan  $j$  mengacu pada lokasi masing-masing baris dan kolom elemen. Komponen diagonal  $\sigma_{i=j}$  adalah tegangan normal dan komponen di luar diagonal  $\tau_{i \neq j}$  adalah tegangan geser.

Jika elemen kubus tidak berotasi (yaitu kondisi keseimbangan postulasi dan tidak ada gaya tubuh), maka tegangan geser pada bidang yang saling tegak lurus dari kubus adalah sama: tiga komponen geser meniadakan dan menyeimbangkan tiga komponen lainnya, yaitu momen berputar masing-masing sumbu, adalah nol:

$$\tau_{12} = \tau_{21} \quad (2.2)$$

$$\tau_{23} = \tau_{32} \quad (2.3)$$

$$\tau_{13} = \tau_{31} \quad (2.4)$$

Pada akhirnya, representasi dari kubus membantu menekankan perbedaan penting antara tegangan dan gaya. Gaya yang diarahkan mungkin bekerja dalam arah tertentu tetapi pernyataan ini tidak masuk akal ketika diterapkan pada tegangan internal. Komponen tegangan yang bekerja pada satu sisi elemen permukaan hanya ada bersama dengan komponen dengan intensitas yang sama bekerja di sisi lain tetapi berlawanan arah. Hal ini berlaku untuk tegangan normal maupun geser. Oleh karena itu, tegangan mungkin ada dalam arah vertikal, tetapi tidak hanya ke atas atau ke bawah saja.

Oleh karena  $\tau_{ij} = \tau_{ji}$  maka subskrip untuk besaran tegangan geser adalah komutatif. Maka tampak matriks tegangan bersifat simetris seperti pada Persamaan 8.1. Sehingga 12 dari sembilan komponen bisa direduksi menjadi 6 komponen, 3 komponen tegangan normal dan tiga komponen tegangan geser.

Tegangan normal :	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{33}$	atau	$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{zz}$
Tegangan geser :	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	atau	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$

Oleh karena itu, untuk satu set sumbu ortogonal x, y dan z, terdapat 6 komponen tegangan independen yang diperlukan untuk menspesifikasi sepenuhnya keadaan tegangan yang diberikan pada suatu titik (kubus kecil), yaitu elemen terkecil dari suatu materi/batuan.

Jika ada enam besaran tegangan independen untuk mendeskripsikan tensor tegangan dan orientasinya tidak disederhanakan, maka formulasinya agak rumit untuk digunakan. Untungnya, situasi ini masih bisa disederhanakan. Dimana, pada titik dalam medan tegangan yang homogen, maka terdapat 3 bidang yang saling ortogonal yang berpotongan dan berorientasi sedemikian rupa sehingga tegangan geser dianggap nol dalam keadaannya yang setimbang. Sehingga :

$$\tau_{12} = \tau_{23} = \tau_{31} = 0 \quad (2.5)$$

Maka :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Ketiga bidang tanpa tegangan geser ini adalah bidang utama dari tegangan normal dan berpotongan dalam tiga garis yang saling tegak lurus yang dikenal sebagai sumbu utama tegangan pada titik yang dipertimbangkan. Tegangan yang bekerja sepanjang tiga sumbu ini adalah tegangan utama  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  dan  $\sigma_{33}$  yang biasa dinotasikan menjadi  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  dan  $\sigma_3$  untuk menghindari subskrip berulang, dengan konvensi  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , masing-masing tegangan utama maksimum, menengah, dan minimum. Dengan kata lain, tegangan utama adalah tegangan normal yang bekerja pada bidang yang tegangan gesernya sama dengan nol.

Dalam ilmu fisika dan keteknikan, arah tegangan *tensile normal* yang cenderung menarik partikel materi terpisah diberi tanda positif; sedangkan arah tegangan *compressive normal* yang cenderung mendorong partikel material bersama-sama bertanda negatif. Namun dalam geosains, maka sebaliknya karena kebiasaannya untuk menandai kompresi adalah positif dan *tension* adalah negatif. Sebagai contoh, dalam lingkungan non-tektunik, tegangan pada setiap kedalaman di dalam bumi dihasilkan oleh *overburden pressure*. Ini adalah tegangan vertikal yang menginduksi tegangan horisontal kompresi. Bahkan di permukaan bumi, tegangan kompresi maksimum sama dengan tekanan atmosfer. Tegangan geser positif berlawanan dengan arah jarum jam.

Adapun beberapa terminologi yang berkaitan dengan keadaan tegangan adalah:

- *Uniaxial tension* jika  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ;  $\sigma_3 < 0$ .
- *Uniaxial compression* jika  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ;  $\sigma_1 > 0$ .
- *Biaxial plane stress* jika  $\sigma_2 = 0$ .
- *Triaxial stress* jika  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .
- *Hydrostatic stress* jika  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$ .

Jika  $p < 0$  (tarik) keadaan tegangan disebut sebagai tekanan hidrostatik. Tekanan hidrostatik akan menyebabkan perubahan volume tetapi tidak mengubah bentuk material.

Dalam geologi, tekanan lithostatik sering digunakan untuk menggambarkan beban semua material berupa massa batuan di bawah permukaan pada kedalaman  $z$  dengan densitas rata-rata  $\rho$ . Secara alami, ini sama dengan  $\rho g z$  di mana  $g$  adalah percepatan gravitasi. Pernyataan semacam itu, bagaimanapun, memerlukan beberapa kualifikasi karena mengasumsikan bahwa keadaan tegangan pada kedalaman  $z$  telah menjadi benar-benar tekanan hidrostatik karena relaksasi semua tekanan geser oleh beberapa proses *creep*. Jika keadaan tegangan tidak dibiarkan menjadi tekanan hidrostatik, dan seseorang berbicara tentang keadaan

tekanan berupa tumpukan batuan dengan tinggi  $z$ , maka ini biasanya dianggap sebagai:

$$\sigma_1 = \int_0^z \rho g \cdot dz \quad (2.7)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_1 \quad (2.8)$$

Dalam hal ini  $\nu$  adalah *Poisson's ratio*.

Tegangan rata-rata  $\bar{\sigma}$  atau komponen tekanan hidrostatik  $p$  (juga disebut tekanan dinamis) adalah rata-rata aritmatika dari tegangan utama:

$$\bar{\sigma} = p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.9)$$

Tekanan ini tidak bergantung pada sistem koordinat; karena itu memiliki besaran yang sama pada semua arah.

Tegangan rata-rata di Bumi biasanya meningkat secara kedalaman sekitar 30 MPa /km (3 kbar/ 10 km). Dengan demikian, tegangan rata-rata menentukan tingkat rata-rata dari tegangan normal yang bekerja pada semua bidang sesar potensial, yang berpengaruh pada resistansi gesekan pada bidang patahan untuk tergelincir. Jika tidak menghasilkan patahan, maka tegangan rata-rata berpengaruh pada perubahan volume, baik bersifat mengurangi jika tegangan rata-rata bersifat tekan, atau bersifat menambah jika itu bersifat tarikan.

Dari penjelasan di atas maka secara umum kita mempunyai tegangan-tegangan  $\sigma_1, \sigma_2$  dan  $\sigma_3$  serta tekanan hidrostatik  $p$ . Regangan yang dihasilkan dari suatu gangguan deformasi batuan adalah cukup rumit untuk diukur perubahan volumenya. Oleh karena itu, regangan biasanya dikaitkan dengan seberapa jauh tegangan berasal dari keadaan isotropik. *Deviatoric stress* mengungkapkan perubahan tersebut dengan mengurangi tegangan rata-rata dari tensor tegangan. Menimbang bahwa setiap keadaan umum tegangan adalah penjumlahan dari tekanan hidrostatik  $p$  rata-rata dan *deviatoric stress*:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & s_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

di mana  $s_1 + s_2 + s_3 = 0$ . Matriks kedua pada sisi kanan adalah matriks *deviatoric stress*. Komponennya adalah *deviatoric stress*. *Principal deviatoric stress* adalah jumlah total dimana masing-masing selisihnya dari *mean stress*.



Dengan kata lain, jika  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  maka deformasi batuan dipengaruhi oleh 2 komponen yakni *mean stress* dan *deviatoric stress*. Semua tegangan geser bersifat deviatorik. Tekanan utama deviatorik  $s_1$  selalu positif dan yang terkecil  $s_3$  negatif (atau sama dengan nol, dengan kompresi positif); tegangan deviatorik menengah hampir sama dengan *mean stress*. *Deviatoric stress* positif cenderung bekerja untuk memendekkan batuan, sementara pemanjangan relatif paling mudah dalam arah deviator negatif (*tensional*). Perhatikan bahwa tensor tegangan deviatorik selalu mengandung komponen negatif.

Disamping *deviatoric stress*, ada terminologi penting lainnya yakni *differential stress* yang telah sedikit dibahas pada bab sebelumnya. *Differential stress*  $\sigma_d$ :

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.11)$$

Nilainya, bersama-sama dengan karakteristik tensor tegangan deviatorik, mempengaruhi jenis dan besaran deformasi yang dialami oleh batuan. Perhatikan bahwa *differential stress* adalah bersifat skalar. Berbeda dengan *deviatoric stress*, yang merupakan tensor.

## B. Tegangan Aksial Sederhana

Konsep tegangan, yang didefinisikan sebagai gaya per satuan luas, diperkenalkan ke dalam teori elastisitas oleh Cauchy pada sekitar tahun 1822. Konsep ini telah digunakan secara universal sebagai cara dalam desain dan analisis teknik, meskipun faktanya tegangan tersebut tidak dapat diukur secara langsung dan tidak ada indikasi bagaimana gaya ditransmisikan melalui material yang diberi tekanan. Jelaslah bahwa cara perpindahan dalam bahan kristal padat, seperti logam atau batuan keras, berbeda dengan kontak titik-ke-titik dalam bahan partikulat, seperti tanah. Namun demikian, dalam kedua kasus tersebut akan lebih mudah untuk memvisualisasikan dalam bidang imajiner di dalam material dan menghitung tegangan yang melintasinya hanya dengan membagi gaya yang melintasi bidang tersebut dengan luas total bidang tersebut.

Ilustrasi sederhana tegangan diberikan dengan memperhatikan benda uji berbentuk silinder, dengan penampang seragam berjari-jari  $r$ , yang dikenai gaya tekan aksial  $F$  seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2a. Dengan asumsi gaya bekerja secara seragam pada penampang benda uji, tegangan  $\sigma_{n,0}$  pada bidang  $PQ$  yang tegak lurus terhadap arah gaya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2a, diberikan oleh:

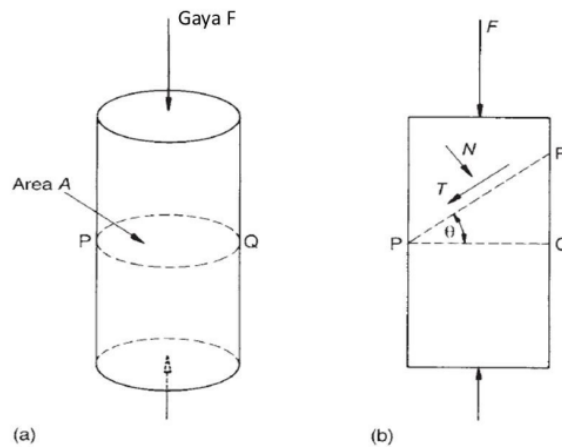
$$\sigma_{n,0} = \frac{F}{A} \quad (2.12)$$

Kini, bayangkan bahwa sebuah bidang seperti  $PR$  pada Gambar 2.2b, yang miring dengan sudut  $\theta$  terhadap bidang radial dimana  $\sigma_{n,0}$  bekerja. Gaya  $F$

mempunyai komponen  $N$  yang bekerja normal (tegak lurus) terhadap bidang dan  $T$  yang bekerja sepanjang bidang, dalam arah kemiringan maksimum  $\theta$ . Dengan demikian:

$$N = F \cos \theta \quad (2.13)$$

$$T = F \sin \theta \quad (2.14)$$



Gambar 2.2 Tegangan aksial sederhana

Oleh karena bidang miring berbentuk elips dengan luas  $A/\cos \theta$ , tegangan langsung  $\sigma_{n\theta}$  normal terhadap bidang dan tegangan geser  $\tau_\theta$  sepanjang bidang, dalam arah kemiringan maksimum, diberikan oleh:

$$\sigma_{n\theta} = \frac{N \cos \theta}{A} = \frac{F}{A} \cos^2 \theta \quad (2.15)$$

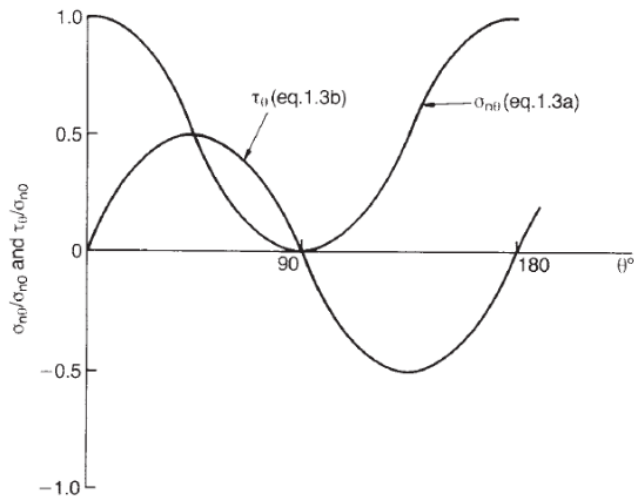
$$\tau_\theta = \frac{T \cos \theta}{A} = \frac{F}{2A} \sin 2\theta \quad (2.16)$$

Tampak dengan jelas bahwa tegangan normal maksimum, sama dengan  $F/A$ , bekerja pada bidang radial. Besaran dan arah nilai maksimum  $\tau_\theta$  dapat dicari dengan membedakan Persamaan 2,16:

$$\frac{d\tau_\theta}{d\theta} = \frac{F}{A} \cos 2\theta \quad (2.17)$$

Nilai maksimum  $\tau_\theta$  dicari dengan memasukkan  $d\tau_\theta / d\theta = 0$ , maka:

$$\cos 2\theta = 0 \rightarrow \theta = 45^\circ$$



**Gambar 2.3** Variasi tegangan normal  $\sigma_{ni}$  dan tegangan geser  $\tau_{ij}$  dengan sudut bidang  $\theta$  pada benda uji berbentuk silinder.

### SOAL 2.1

Sebuah benda uji batuan berbentuk silinder dengan diameter 50 mm dan panjang 100 mm dikenai gaya tekan aksial sebesar 5 kN. Tentukan:

1. Tegangan normal  $\sigma_{n\theta}$  dan tegangan geser  $\tau_{\theta}$  pada bidang miring  $30^\circ$  terhadap arah radial;
2. Nilai tegangan geser maksimum;
3. Kemiringan bidang yang tegangan gesernya  $\tau_{\theta}$  sama dengan setengah  $\tau_{\theta maks}$ .

### SOLUSI

1. Luas area  $= \pi r^2 = 1,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$$\sigma_{n\theta} = \frac{5}{1,96 \times 10^{-3}} \cos^2 30^\circ = 1.913 \text{ kPa}$$

$$\tau_{\theta} = \frac{5}{1,96 \times 10^{-3}} \sin 60^\circ = 1.105 \text{ kPa}$$

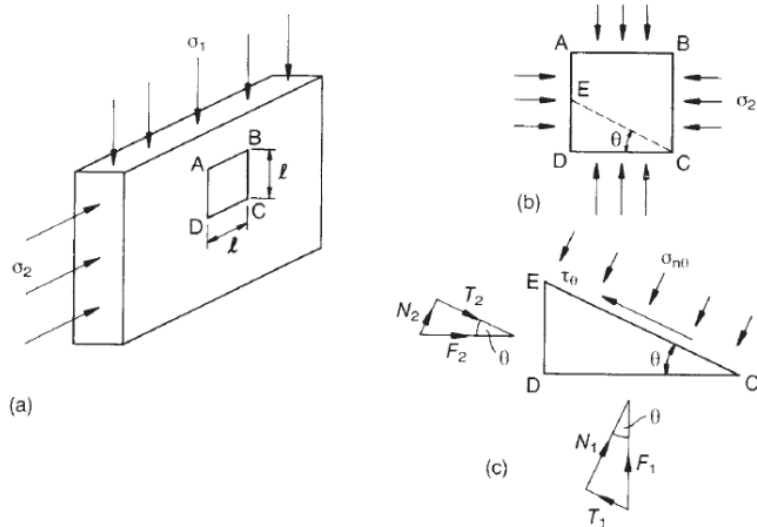
2.  $\tau_{\theta maks} = \frac{F}{2A} = \frac{5}{2 \times 1,96 \times 10^{-3}} = 1.275 \text{ kPa}$

3.  $\frac{1}{2} \tau_{\theta maks} = \tau_{\theta maks} \sin 2\theta$ , sehingga  $\theta = 15^\circ$  atau  $75^\circ$

### C. Tegangan Biaksial

Meskipun pada sebagian besar benda yang diberi tegangan, tegangan bekerja pada suatu titik sepenuhnya bersifat tiga dimensi, namun demi kejelasan, akan berguna untuk mempertimbangkan tegangan dalam dua dimensi sebelum mempertimbangkan keadaan tegangan tiga dimensi secara penuh.

Sistem tegangan biaksial sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.4a, yang mewakili pelat persegi panjang dengan tegangan  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  yang bekerja secara normal pada tepi persegi pelat. Karena tegangan geser sepanjang tepi diasumsikan nol, maka  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  merupakan tegangan utama. Elemen persegi kecil pada pelat ditunjukkan pada diagram dua dimensi pada Gambar 2.4b. Tegangan  $\sigma_{n\theta}$  dan  $\tau_\theta$  yang bekerja pada bidang miring yang membentuk sudut  $\theta$  terhadap arah bidang tempat  $\sigma_1$  bekerja dapat ditentukan dengan mempertimbangkan gaya-gaya yang bekerja pada elemen segitiga pada Gambar 2.4c. Jika panjang  $CD = l$ , maka untuk pelat dengan ketebalan tertentu  $t$ :



**Gambar 2.4** Sistem tegangan biaksial pada pelat persegi panjang: (a) tegangan tepi; (b) tegangan pada elemen ABCD; (c) penentuan tegangan  $\sigma_{n\theta}$  dan  $\tau_\theta$  pada bidang miring dengan sudut  $\theta$ .

$$F_1 = \sigma_1 l \quad (2.18)$$

$$N_1 = \sigma_1 l \cos \theta \quad (2.19)$$

$$T_1 = \sigma_1 l \sin \theta \quad (2.20)$$

$$F_2 = \sigma_2 l \tan \theta \quad (2.21)$$

$$N_2 = \sigma_2 l \tan \theta \sin \theta \quad (2.22)$$

$$T_2 = \sigma_2 l \tan \theta \cos \theta \quad (2.23)$$

Penyelesaian gaya yang searah aksi  $\sigma_{n\theta}$  :

$$N_1 + N_2 = \sigma_{n\theta} l \sec \theta \quad (2.24)$$

Substitusikan Persamaan 2.19 dan Persamaan 2.22 ke dalam Persamaan 2.24:

$$\sigma_{n\theta} = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta \quad (2.25)$$

Penyelesaian gaya searah  $\tau_\theta$  :

$$T_1 + T_2 = \tau_\theta l \sec \theta \quad (2.26)$$

Substitusikan <sup>34</sup> Persamaan 2.20 dan Persamaan 2.23 ke dalam Persamaan 2.26:

$$\tau_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta \quad (2.27)$$

<sup>1</sup> Dengan membandingkan Persamaan 2.27 dengan Persamaan 2.16 <sup>1</sup> terlihat bahwa nilai maksimum  $\tau_\theta$  bekerja pada bidang dengan  $\theta = 45^\circ$ , sehingga:

$$\tau_{\theta max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.28)$$

<sup>1</sup> Meskipun ini bukan nilai tegangan geser maksimum pada pelat, karena tegangan utama ketiga adalah nol, nilai maksimum  $\tau$  dengan keadaan tersebut pada pelat bekerja pada bidang dengan sudut  $45^\circ$  terhadap  $\tau_1$  dan  $\tau_2$  dan mempunyai nilai

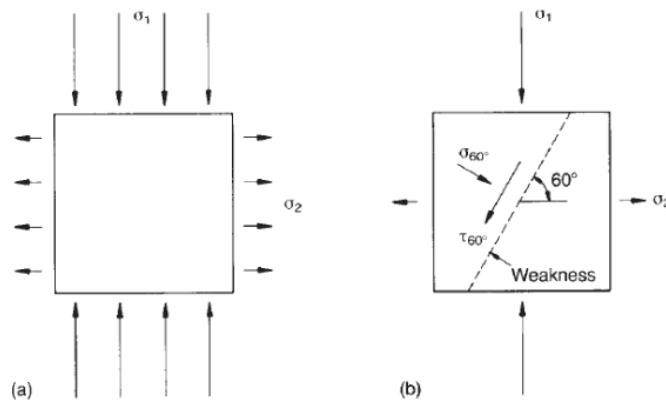
$$\tau_{\theta max} = \frac{\sigma_1}{2} \text{ jika } \sigma_1 > \sigma_2 \quad (2.29)$$

## SOAL 2.2

<sup>1</sup> Sepotong batu sabak datar dengan ketebalan seragam 20 mm dipotong menjadi bentuk persegi, dengan panjang tepi persegi 100 mm. Suatu pengujian dirancang yang memungkinkan tegangan tekan, yang seragam dengan  $\sigma_1$  diterapkan pada dua sisi yang berlawanan dan tegangan tarik dengan  $\sigma_2$  yang seragam pada dua sisi yang berlawanan lainnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 15a. Tegangan  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  bekerja normal pada tepi benda uji. Pengujiannya dilakukan dengan menaikkan besaran  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  secara bersamaan, namun menjaga besaran  $\sigma_1$  selalu

empat kali besaran  $\sigma_2$ . Jika keruntuhan batu tulis terjadi ketika tegangan geser pada suatu bidang melebihi 1 MPa, berapakah nilai dari  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  pada saat kegagalan? Apakah nilai  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  pada saat kegagalan akan berubah jika:

1. batu tersebut mempunyai kuat tarik 0,5 MPa?
2. bidang kelemahan yang terjadi memotong benda uji seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5b, dengan kemiringan  $60^\circ$  terhadap arah  $\sigma_2$ , akankah terjadi jika tegangan gesernya melebihi 0,8 MPa?



Gambar 2.5 Bidang kelemahan pada Soal 2.2.

### 1 SOLUSI

Tegangan geser maksimum  $\tau_{\theta max}$  terjadi pada bidang dengan  $\theta = 45^\circ$ , lihat Persamaan 2.28, dimana  $\tau_{\theta max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ . Oleh karena  $\tau_{\theta max} = 1$  MPa dan  $\sigma_1 = -4\sigma_2$ , maka pada saat kegagalan  $\sigma_1 = 1,6$  MPa dan  $\sigma_2 = -0,4$  MPa.

1. karena  $\sigma_2$  pada saat keruntuhan besarnya kurang dari 0,5 MPa, kekuatan tarik batuan tersebut tidak memengaruhi keruntuhan.
2. karena bidang kelemahan terjadi pada  $30^\circ$  terhadap arah  $\sigma_1$ , tegangan normal pada bidang kelemahan ini  $\sigma_{n\theta}$  bekerja dalam arah  $60^\circ$  terhadap  $\sigma_1$ . Jadi tegangan  $\tau_\theta$  pada bidang lemah ditentukan dengan menempatkan  $\theta = 60^\circ$ .

Jika  $\tau_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta$  (Persamaan 2.27), dengan  $\theta = 60^\circ$ , maka  $\tau_\theta = 0,866$  MPa.

Oleh karena keruntuhan terjadi pada bidang kelemahan ketika  $\tau_\theta = 0,8$  MPa, maka bidang kelemahan tersebut akan memengaruhi kegagalan. Tegangan saat batuan pecah ditentukan dengan memasukkan  $\tau = 0,8$  MPa

dan  $\sigma_1 = -4\sigma_2$  ke dalam Persamaan 2.27, sehingga diperoleh  $\sigma_1 = 1,48$  MPa dan  $\sigma_2 = -0,37$  MPa.

### RANGKUMAN

1. Tegangan bekerja secara tiga dimensi terhadap suatu titik. Akan lebih mudah untuk menganggap suatu titik sebagai kubus yang sangat kecil, yang mempunyai sistem koordinat Cartesian  $(x_1, x_2, x_3)$ .
2. Meskipun pada sebagian besar benda yang diberi tegangan, tegangan bekerja pada suatu titik sepenuhnya bersifat tiga dimensi, namun demi kejelasan, akan berguna untuk mempertimbangkan tegangan dalam dua dimensi sebelum mempertimbangkan keadaan tegangan tiga dimensi secara penuh.

### UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN

1. Uraikan gaya normal dan gaya geser pada suatu kasus tegangan satu dimensi dan dua dimensi.
2. Apa yang mempengaruhi terjadinya suatu bidang kelemahan?

### BAHAN DISKUSI

Diskusikan dalam kelompok bagaimana suatu bidang kelemahan terjadi pada suatu kasus dalam suatu sistem tegangan secara dua dimensi.

## BAB III

### LINGKARAN MOHR

#### Capaian Pembelajaran :

Mahasiswa dapat memahami konsep dasar lingkaran Mohr sebagai visualisasi grafis dari sistem tegangan, yang memengaruhi adanya keruntuhan atau kegagalan dari batuan maupun tanah.

#### Deskripsi:

Dalam bab ini mahasiswa akan diajak untuk memahami konsep dasar lingkaran Mohr sebagai visualisasi grafis dari sistem tegangan, yang memengaruhi adanya keruntuhan atau kegagalan dari batuan maupun tanah.

#### A. Lingkaran Mohr

Pada bab sebelumnya telah dibahas tentang sistem koordinat tegangan secara tiga dimensi, serta suatu pembahasan tentang sistem tegangan aksial sederhana serta sistem tegangan biaksial, sebagai awal untuk pembahasan lanjut mengenai sistem grafis yang bisa untuk menjelaskan adanya fungsi ritmik geometri hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada suatu material tertentu. Pada dasarnya lingkaran Mohr merupakan gambaran peruraian suatu tegangan utama  $\sigma_1$  menjadi  $\sigma_{n\theta}$  dan  $\tau_{\theta}$ , dimana salah satu uraian tersebut akan menjadi suatu bidang kelemahan saat menjelang pecah. Berikut akan dibahas masing-masing tentang penggambaran dari hal tersebut, yang akan dimulai dari sistem tegangan dua dimensi, sistem tegangan tiga dimensi, serta beberapa pengujian terkait. Terakhir adalah tentang lingkaran regangan Mohr. Setelah bab ini diselesaikan, maka akan dilanjutkan pada bab berikutnya, uraian tentang keruntuhan tanah dan keruntuhan batuan.

#### B. Sistem Tegangan 2-D

Contoh lingkaran Mohr untuk sistem tegangan dua dimensi sederhana ditunjukkan pada Gambar 3.1, karena tegangan dalam dua dimensi saja yang dipertimbangkan, maka diagramnya tidak lengkap. Diagram tegangan tiga dimensi yang lengkap akan dibahas pada bagian selanjutnya, namun akan bermanfaat jika kita terlebih dahulu mempertimbangkan tegangan dalam dua dimensi saja.

Dalam sistem tegangan 2-D terdapat tiga jenis sistem sebagaimana tampak masing-masing dalam Gambar 3.1 :

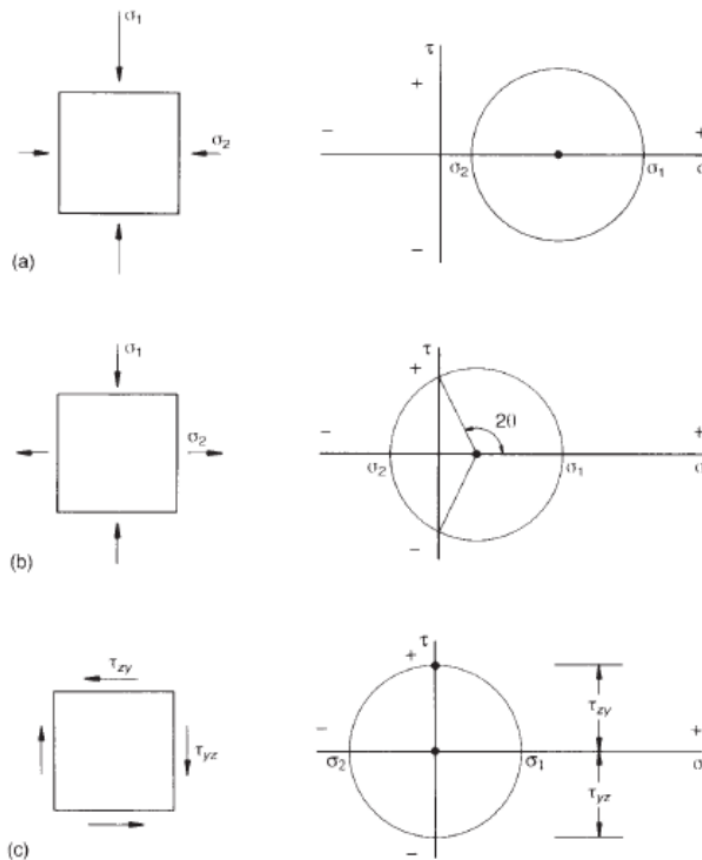
1. **Sistem kompresi biaksial:** Tegangan biaksial diwakili oleh lingkaran yang diplot dalam ruang  $\sigma$  positif, melewati titik-titik tegangan  $\sigma_1$  dan  $\sigma_1$ , pada sumbu  $\tau = 0$ . Pusat lingkaran terletak pada sumbu  $\tau = 0$  pada titik tegangan  $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_1)$ . Jari-jari lingkaran mempunyai besaran  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_1)$ , yaitu sama dengan  $\tau_{max}$ .



2. **Sistem kompresi/tension: biaksial:** Dalam hal ini lingkaran tegangan meluas ke ruang  $\sigma$  positif dan  $\sigma$  negatif. Pusat lingkaran terletak pada sumbu  $\tau = 0$  pada titik tegangan  $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$  dan berjari-jari  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ . Nilai tegangan geser maksimum terjadi pada arah  $45^\circ$  terhadap  $\sigma_1$ . Tegangan normal adalah nol pada arah  $\pm \theta$  ke arah  $\sigma_1$ , dimana:

$$\cos 2\theta = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_2} \quad (3.1)$$

3. **Sistem tegangan pure shear biaxial:** Dalam hal ini lingkaran mempunyai jari-jari  $\tau_{zy}$ , yang besarnya sama dengan magnitudo  $\tau_{yz}$ , tetapi berlawanan tanda. Pusat lingkaran berada di  $\sigma = 0, \tau = 0$ . Tegangan-tegangan utama  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  sama besarnya, tetapi bertanda berlawanan, dan besarnya sama dengan  $\tau_{zy}$ . Arah  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  berada pada  $45^\circ$  terhadap arah  $\tau_{zy}, \tau_{yz}$ .



**Gambar 3. 1** Sistem tegangan biaksial sederhana: (a) kompresi; (b) tegangan/kompresi/tension; (c) pure shear.

### SOAL 3.1

Gambarkan lingkaran Mohr untuk tegangan pada keruntuhan benda uji pada contoh Soal 2.2 dengan asumsi benda uji mempunyai kuat geser seragam sebesar 1 MPa. Tentukan arah tegangan normal nol dan besarnya tegangan geser yang bekerja sepanjang bidang kelemahan pada  $30^\circ$  terhadap arah  $\sigma_1$ .

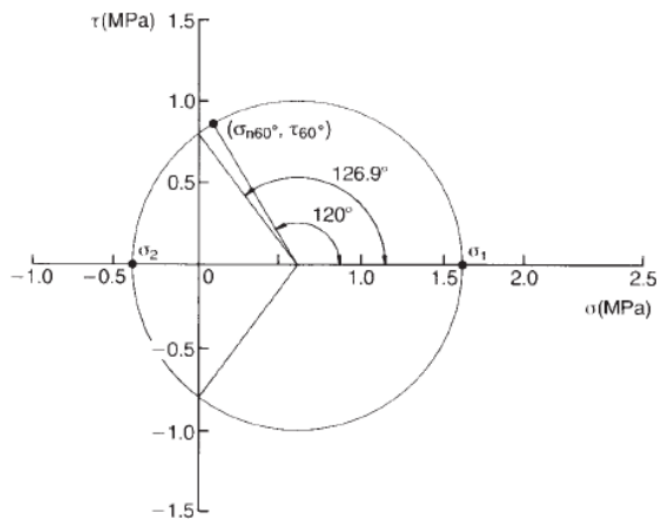
### SOLUSI

Saat mengalami kegagalan/keruntuhan,  $\sigma_1=1,6$  MPa dan  $\sigma_2=-0,4$  MPa. Nilai-nilai tersebut memberikan plot, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Tegangan normal nol bekerja dalam arah  $\pm\theta$  terhadap arah  $\sigma_1$ , dimana  $2\theta$  diberikan oleh Persamaan 3.1. Dengan demikian:

$$\cos 2\theta = \frac{1 + (-0,4)}{1 - (-0,4)} = -0,6$$

$$2\theta = 126,9^\circ$$

$$\theta = 63,5^\circ$$



Gambar 3.2 Plot untuk Soal 3.1.

Oleh karena bidang kelemahan terjadi pada sudut  $30^\circ$  terhadap arah  $\sigma_1$ , maka tegangan normal  $\sigma_{n\theta}$  pada bidang ini bekerja pada sudut  $60^\circ$  terhadap arah  $\sigma_1$ . Jadi, tegangan  $\sigma_{n60}$  dan  $\tau_{60}$  yang bekerja pada bidang ini diperoleh dengan memutar  $2\theta = 120^\circ$  dari titik tegangan  $\sigma_1$ , seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Tegangan geser pada bidang ini dapat diketahui dari Gambar 3.2 dengan pengukuran langsung, atau dengan melalui persamaan:

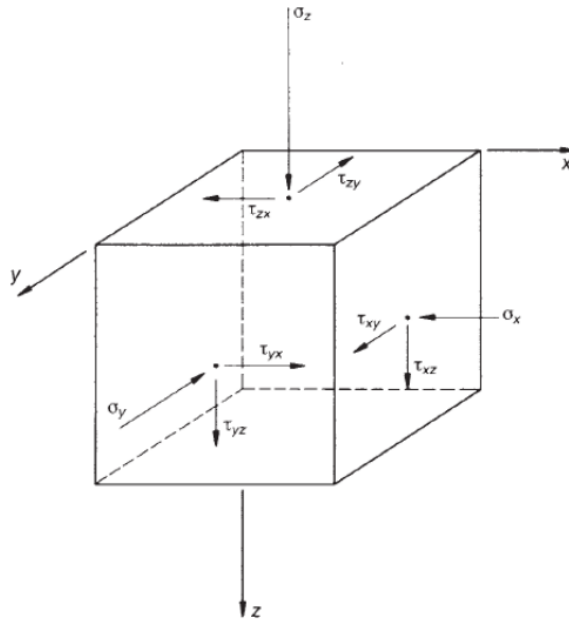
$$\tau_{60} = \frac{1}{2} \sin 120^\circ = 0,866 \text{ MPa}$$

### C. Sistem Tegangan 3-D

Pada benda yang mengalami tegangan tiga dimensi pada suatu titik, dapat direpresentasikan seolah-olah bekerja pada elemen kubus kecil, dari bahan tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Kesembilan tegangan yang ditunjukkan dapat disajikan dalam susunan teratur (matriks) yang disebut tensor tegangan:

$$\sigma_{i,j} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

dimana suku  $\sigma$  adalah tegangan normal dan suku  $\tau$  adalah tegangan geser yang bekerja pada permukaan elemen.



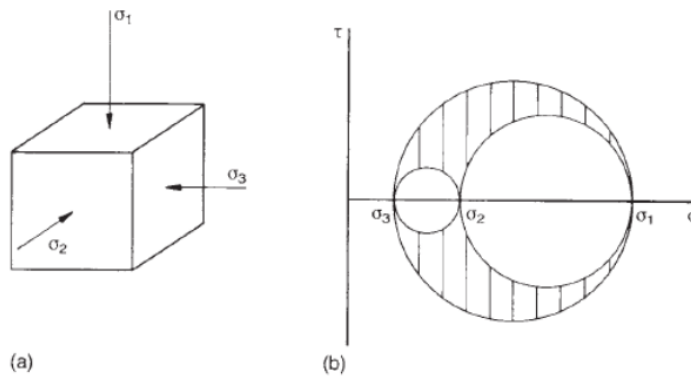
Gambar 3.3 Tegangan tiga dimensi pada elemen kubik.

Terlihat bahwa  $\tau_{zy} = -\tau_{yz}$  dan dengan alasan yang sama, hanya enam suku dalam Persamaan 3.2 yang bebas. Suku-suku tersebut adalah  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  dan matriksnya simetris terhadap diagonal bila tegangan utama memuat tegangan normal.

$$\sigma_{i,j} = \begin{bmatrix} \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_x \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Dengan mengadopsi pendekatan yang ada dan menerapkannya pada tiga arah dari 'dua dimensi' pada Gambar 3.3, yaitu  $z-y, y-x, x-z$ . Tidak ada metode sederhana untuk menggambar lingkaran Mohr untuk mewakili kasus umum, di mana tegangan normal dan tegangan geser bekerja pada keenam permukaan elemen kubus pada Gambar 3.3. Namun ada dua kasus sederhana yang dapat diwakili oleh tiga lingkaran Mohr:

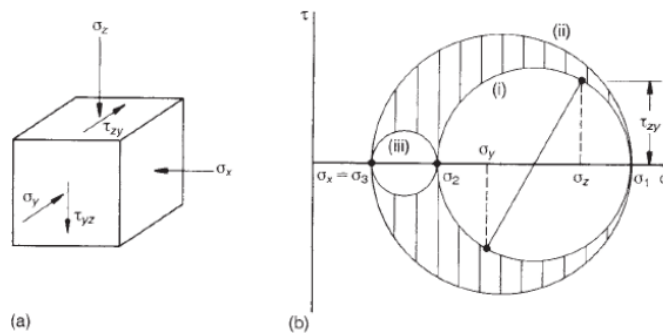
1. Elemen kubus yang hanya mempunyai tegangan normal (yaitu tegangan utama) yang bekerja pada keenam bidang permukaannya.
2. Sebuah elemen kubus yang hanya mempunyai tegangan normal (tegangan utama) yang bekerja pada sepasang permukaan sejajar yang berlawanan, namun mempunyai tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada kedua pasangan permukaan yang tersisa.



**Gambar 3.4** Elemen kubik dengan tegangan utama yang hanya bekerja pada permukaannya: (a) tegangan; (b) Lingkaran Mohr.

Contoh kasus 1 ditunjukkan pada Gambar 3.4a, yang menggambarkan sebuah elemen kubus dengan tegangan utama kompresi yang bekerja pada keenam permukaannya. Tiga diagram tegangan Mohr yang bersesuaian ditunjukkan pada Gambar 3.4b. Dapat dibuktikan bahwa kondisi tegangan pada setiap bidang di

dalam elemen pasti berada dalam batas area yang diarsir, tetapi biasanya cukup untuk dapat menentukan tegangan pada bidang yang tegak lurus, terhadap paling sedikit satu pasang permukaan batas elemen yang berlawanan. Tegangan pada bidang ini terletak pada lingkaran yang membatasi daerah yang diarsir.



**Gambar 3.5** Elemen kubik dengan tegangan normal pada seluruh permukaannya dan tegangan geser pada dua pasang permukaan yang berhadapan: (a) tegangan; (b) Lingkaran Mohr.

Contoh kasus ditunjukkan pada Gambar 3.5, yang menggambarkan sebuah elemen kubik dengan tegangan normal kompresi, yang bekerja pada keenam permukaannya dan tegangan geser pada dua pasang permukaan yang berlawanan. Sekali lagi, dalam kasus ini, tegangan-tegangan pada semua bidang di dalam elemen terletak di dalam area yang diarsir, dengan tegangan-tegangan pada semua bidang yang tegak lurus terhadap setidaknya sepasang permukaan elemen terletak pada salah satu batas lingkaran. Urutan menggambar lingkaran-lingkaran ini pertama-tama, terdiri dari mencari titik-titik tegangan  $\sigma_z, \tau_{zy}$  dan  $\sigma_y, \tau_{yz}$ , kemudian menggambar lingkaran (i) melalui titik-titik tersebut dengan pusatnya pada sumbu  $\tau = 0$ . Ini menempatkan tegangan utama  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$ . Setelah tegangan utama ketiga diketahui, lingkaran (ii) dan (iii) sekarang dapat digambar. Dalam kasus yang ditunjukkan  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Dalam geoteknik, terminologi ini lazim digunakan karena menghubungkan tiga tegangan utama;  $\sigma_1$  adalah tegangan utama mayor,  $\sigma_2$  adalah tegangan utama antara, serta  $\sigma_3$  adalah tegangan utama minor.

### SOAL 3.2

Sepotong batupasir dipotong berbentuk kubus dengan panjang rusuk 100 mm. Gaya masing-masing sebesar 5 kN, 10 kN, dan 20 kN bekerja secara seragam pada tiga pasang permukaan kubus dan normal terhadap tiga pasang permukaan kubus. Evaluasi tegangan utama mayor, menengah, dan minor pada batuan dan

gambarkan lingkaran tegangan Mohr. Berapakah tegangan geser maksimum pada batuan dan orientasi bidang yang terkena dampaknya?

**SOLUSI**

Oleh karena luas setiap sisi kubus sama dengan  $0,01 \text{ m}^2$ , maka tiga tegangan utama adalah:

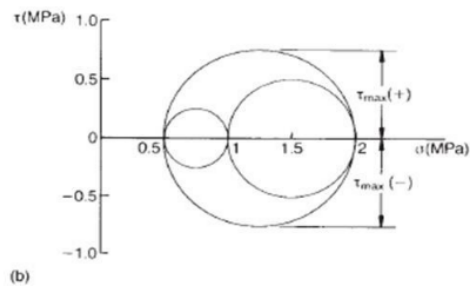
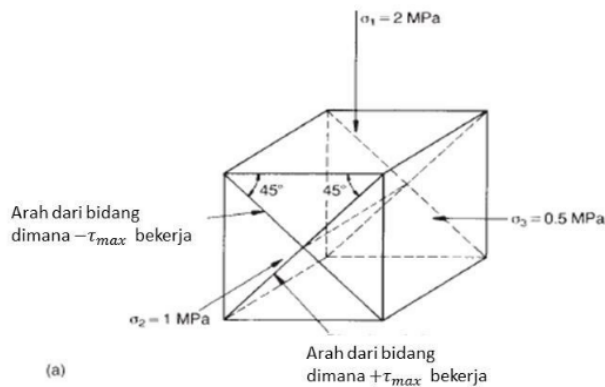
Tegangan utama mayor,  $\sigma_1 = \frac{20}{0,01} \times 10^{-3} = 2 \text{ MPa}$

Tegangan utama antara  $\sigma_2 = \frac{10}{0,01} \times 10^{-3} = 1 \text{ MPa}$

Tegangan utama minor  $\sigma_3 = \frac{5}{0,01} \times 10^{-3} = 0,5 \text{ MPa}$

Arah tegangan-tegangan ini ditunjukkan pada Gambar 3.6a dan lingkaran tegangan Mohr yang dihasilkan pada Gambar 3.6b. Tegangan geser maksimum pada batuan sama dengan jari-jari lingkaran Mohr terbesar, yaitu.

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) = 0,75 \text{ MPa}$$

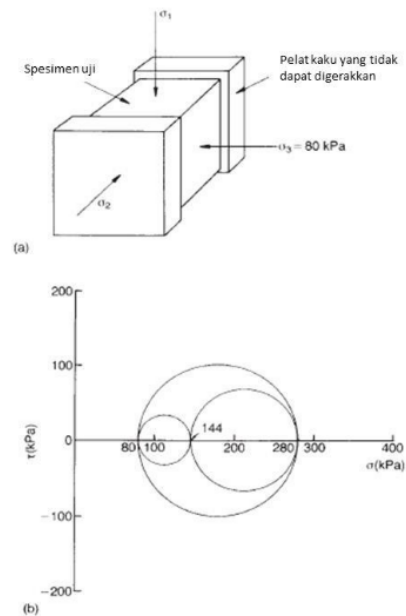


Gambar 3.6 Skema Soal 3.2.

Oleh karena titik tegangan geser maksimum dicapai pada Gambar 3.6b dengan memutar  $90^\circ$  berlawanan arah jarum jam dari  $\sigma_1$  atau  $90^\circ$  searah jarum jam dari  $\sigma_3$ , maka bidang di mana  $+\tau_{max}$  bekerja memiliki kemiringan  $45^\circ$  terhadap permukaan batas dimana  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$  beraksi dan tegak lurus terhadap permukaan tempat  $\sigma_2$  beraksi, seperti terlihat pada Gambar 3.6a. Tegangan geser yang besarnya sama, namun negatif menurut konvensi tanda yang digunakan dalam geoteknik, bekerja pada bidang ortogonal terhadap bidang tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6b.

### SOAL 3.3

Suatu obyek uji dari tanah lempung kaku, dipotong berbentuk kubus, dibatasi pada satu arah oleh pelat licin (tanpa gesekan) yang tidak dapat digerakkan dan bekerja pada permukaan vertikal berlawanan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7a. Tegangan utama  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$  bekerja pada pasangan permukaan yang berbeda. Jika kuat geser tanah liat adalah  $100 \text{ kPa}$  dan benda uji mengalami kompresi dengan kenaikan  $\sigma_1$ , dengan menjaga  $\sigma_3$  konstan pada  $80 \text{ kPa}$ , tentukan  $\sigma_1$  pada saat keruntuhan. Gambarkan lingkaran Mohr pada titik kegagalan, dengan asumsi  $\sigma_2 = 0,4 (\sigma_1 + \sigma_3)$ .



Gambar 3.7 Skema pada Soal 3.3.

## SOLUSI

Pada saat kegagalan,

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)$$
$$100 = \frac{1}{2} (\sigma_1 - 80) \quad \rightarrow \sigma_1 = 280 \text{ kPa}$$

$$\sigma_2 = 0,4 (\sigma_1 + \sigma_3)$$
$$\sigma_2 = 0,4 (280 + 80) \quad \rightarrow \sigma_2 = 144 \text{ kPa}$$

Plot diagram Mohr sebagaimana Gambar 3.7b

### D. Direct Shear dan Simple Shear

Suatu benda uji tanah dapat mengalami deformasi dan kegagalan hanya dengan menerapkan tegangan geser, atau kombinasi tegangan geser dan tegangan normal. Sejumlah perangkat pengujian tanah laboratorium telah dikembangkan untuk tujuan ini. Sebelum mempertimbangkan hal ini ada gunanya untuk mempertimbangkan benda uji pada Gambar 3.7a, yang mengalami keruntuhan karena penerapan tegangan geser daripada tegangan normal.

### SOAL 3.4

Suatu benda uji dari tanah liat yang serupa dengan Contoh Soal 3.3 diikat di antara pelat-pelat halus sejajar dalam satu arah dan diberi tegangan konstan yang seragam  $\sigma_z = 150 \text{ kPa}$  pada permukaan horizontal dan  $\sigma_x = 90 \text{ kPa}$  pada permukaan vertikal tak dibatasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8a. Benda uji kemudian mengalami keruntuhan dengan menerapkan tegangan geser  $\tau_{zx}, \tau_{xz}$  pada permukaan yang tidak dibatasi. Gambarkan lingkaran Mohr untuk tegangan pada benda uji pada saat keruntuhan, dengan asumsi tegangan normal pada pelat halus diberikan oleh  $\sigma_y = \sigma_2 = 0,4(\sigma_z + \sigma_x) = 0,4(\sigma_1 + \sigma_3)$ , kemudian tentukan nilai  $\sigma_1, \sigma_3$  dan  $\tau_{zx}$  pada saat keruntuhan, dan kemiringan bidang horizontal tempat tegangan utama bekerja.

## SOLUSI

Plot  $\sigma_z = 150 \text{ kPa}$  dan  $\sigma_x = 90 \text{ kPa}$  pada sumbu  $\tau = 0$ , seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8b. Pusat lingkaran tegangan Mohr untuk tegangan  $z-x$  terletak di tengah-tengah antara  $\sigma_z$  dan  $\sigma_x$  pada  $s = 120 \text{ kPa}$ , dan lingkaran tersebut mempunyai jari-jari  $100 \text{ kPa}$ , sama dengan kuat geser tanah liat. Titik tegangan  $(\sigma_z, \tau_{zx})$  dan  $(\sigma_x, \tau_{xz})$  dapat dicari dengan memproyeksikan secara vertikal dari  $\sigma_z$  dan  $\sigma_x$  untuk memotong lingkaran tegangan, dengan memperhatikan pada



Gambar 3.8a bahwa  $\tau_{zx}$  adalah positif dan  $\tau_{xz}$  adalah negatif. Dapat dilihat dari Gambar 3.8b bahwa:

$$s = \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) = 120 \text{ kPa}$$

$$\sigma_1 = 120 + 100 = 220 \text{ kPa}$$

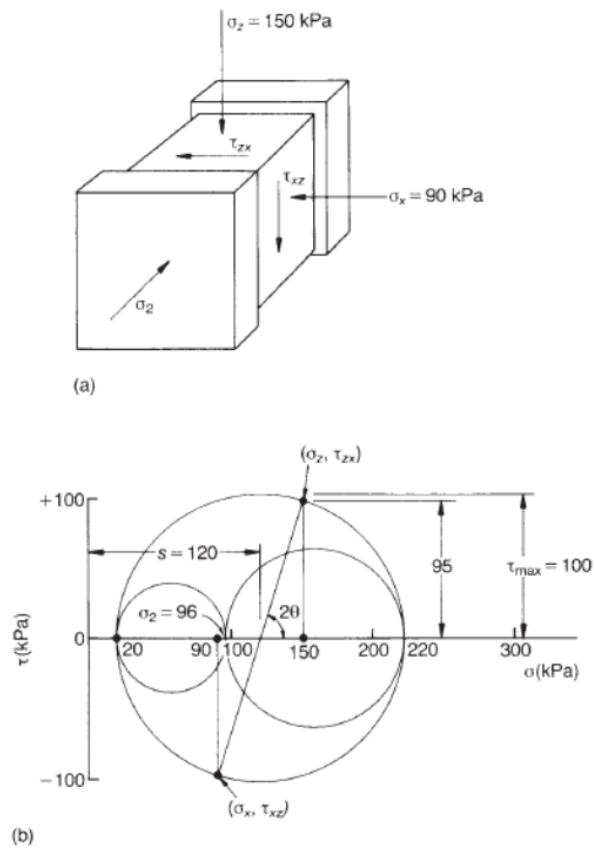
$$\sigma_3 = 120 - 100 = 20 \text{ kPa}$$

$$\cos 2\theta = 0,3 \rightarrow 2\theta = 72,5^\circ$$

$$\tau_{zx} = 100 \sin 2\theta = 95 \text{ kPa}$$

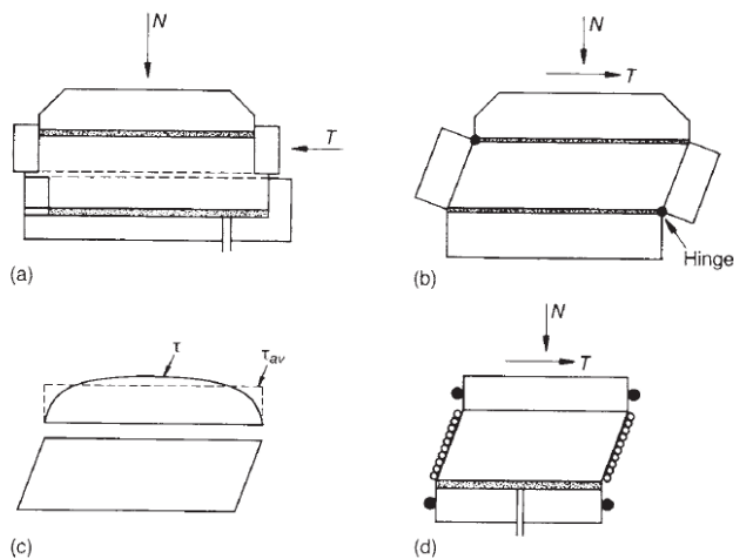
Jadi  $\sigma_1$  bekerja pada bidang miring  $36,3^\circ$  terhadap horizontal dan  $\sigma_3$  pada bidang ortogonal terhadap bidang tersebut. Lingkaran tegangan yang tersisa dapat digambarkan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8b, dengan menentukan  $\sigma_2$ :

$$\sigma_2 = 0,4(220 + 20) = 96 \text{ kPa}$$



Gambar 3. 8 Kasus pada Soal 3.4.

1 Alat yang digunakan di laboratorium untuk menerapkan kombinasi tegangan langsung dan tegangan geser adalah uji geser langsung, atau kotak geser, dan uji geser sederhana. Dalam uji geser langsung, contoh tanah, biasanya berukuran 60 mm persegi dan tebal 20 mm, dimasukkan ke dalam kotak kaku, terbuka atas dan bawah, dan dibelah secara horizontal pada ketinggian tengah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9a. Pengujian dilakukan dengan mempertahankan beban vertikal konstan pada benda uji dan menggesernya pada ketinggian pertengahan dengan menggeser kedua bagian kotak relatif satu sama lain. Dengan menguji suatu benda uji, atau serangkaian benda uji yang identik, pada beban vertikal yang berbeda, hubungan antara kekuatan geser dan tekanan normal (vertikal) dapat ditentukan. Meskipun ini merupakan pengujian rutin yang berguna, untuk menentukan parameter kekuatan tanah, tegangan dalam spesimen tanah tidaklah seragam. Hanya satu titik yang dapat diplot pada diagram  $\tau-\sigma$ , yang mewakili rata-rata tegangan searah dan tegangan geser, dan akibatnya lingkaran tegangan Mohr tidak dapat digambarkan.



1 **Gambar 3.9** Uji geser laboratorium: (a) geser langsung; (b) Alat geser sederhana Cambridge; (c) distribusi tegangan geser horizontal pada alat geser sederhana; (d) Alat geser sederhana NGI.

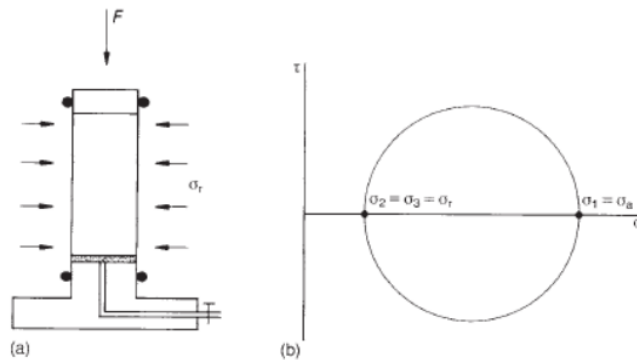
1 Sejumlah peralatan telah dikembangkan, terutama di Universitas Cambridge, untuk menerapkan geser sederhana pada spesimen tanah, seperti yang diilustrasikan pada contoh soal di atas. Perangkat Cambridge menggunakan benda uji berbentuk persegi panjang, dua permukaan vertikal berlawanan dibatasi oleh pelat kaku yang tidak dapat digerakkan untuk memberikan kondisi regangan

bidang (yaitu regangan nol) dalam satu arah. Dua permukaan vertikal lainnya ditahan pada pelat kaku, yang berputar selama geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9b. Tegangan normal dan tegangan geser diterapkan pada permukaan horizontal. Tegangan geser pada seluruh benda uji tidak seragam, cenderung menuju nilai maksimum pada nilai tengah dan nilai rendah pada ujung-ujungnya, seperti terlihat pada Gambar 3.9c, karena sulitnya memenuhi persamaan tegangan konjugasi horizontal dan vertikal pada batas-batasnya dari benda uji. Sel beban yang terpasang pada perangkat ini, untuk mengukur gaya geser dan gaya normal, telah menunjukkan bahwa sepertiga bagian tengah spesimen mengalami deformasi yang cukup baik pada geser murni (Roscoe, 1970). Pengukuran ini juga memungkinkan untuk menggambar lingkaran tegangan Mohr. Meskipun beberapa data penelitian yang berguna telah diperoleh dari alat geser sederhana ini (Stroud, 1971), namun alat tersebut tidak cocok untuk pengujian laboratorium rutin.

Perangkat yang dikembangkan di Institut Geoteknik Norwegia menggunakan benda uji melingkar yang dikurung dalam selongsong karet yang diperkuat dengan kawat spiral, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9d. Gaya normal  $N$  dan gaya geser  $T$  diterapkan pada permukaan atas benda uji seperti yang ditunjukkan. Oleh karena tegangan geser pada permukaan vertikal dapat diabaikan, maka tegangan geser konjugasi pada permukaan horizontal dekat tepi juga harus dapat diabaikan. Satu titik tegangan pada diagram  $\tau$ - $\sigma$  dapat diplot, dengan asumsi nilai rata-rata  $\sigma_z$  dan  $\tau_{zx}$ , namun lingkaran tegangan tidak dapat diselesaikan karena tidak ada tegangan lain yang diketahui. Meskipun demikian pengujian ini berguna dari sudut pandang praktis karena memberikan ukuran kekuatan geser, dan kesederhanaannya memungkinkan pengujian ini digunakan sebagai pengujian laboratorium rutin.

### E. Tegangan Triaksial

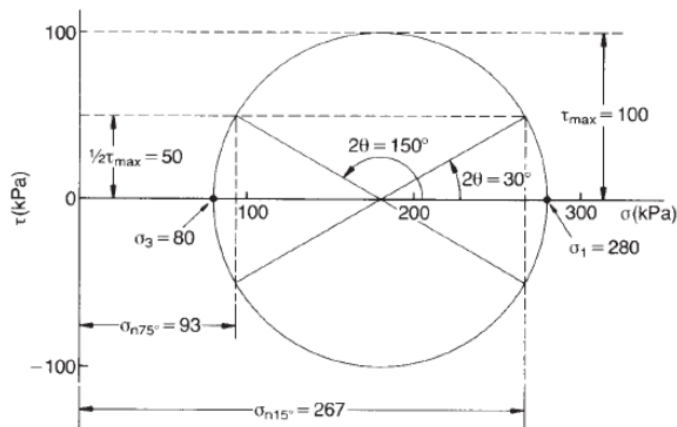
Uji triaksial merupakan uji laboratorium yang paling umum digunakan untuk menentukan parameter kekuatan tanah dan batuan. Keuntungannya adalah digunakan benda uji berbentuk silinder yang mudah dipangkas biasanya dengan rasio panjang dan diameter sama dengan 2. Diameter benda uji umumnya berkisar antara 38 mm hingga 100 mm. Seperti diilustrasikan pada Gambar 3.10a, pengujian biasanya dilakukan dengan mempertahankan tegangan radial konstan  $\sigma_r$ , sekaligus meningkatkan gaya aksial  $F$  agar spesimen gagal dalam kompresi. Dengan demikian, tegangan aksial  $\sigma_a$  adalah tegangan utama utama  $\sigma_1$ , dan tegangan utama menengah dan kecil  $\sigma_2$  dan  $\sigma_3$ , keduanya sama dengan tegangan radial  $\sigma_r$ . Semua tegangan pada benda uji diketahui,  $\sigma_2 = \sigma_3$ , semuanya diwakili oleh lingkaran tegangan tunggal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10b.



**Gambar 3. 10** Uji triaksial: (a) tegangan radial  $\sigma_r$  dan gaya aksial yang diterapkan  $F$ ; (b) Lingkaran tegangan Mohr ( $\sigma_a = F/A$ , dimana  $A$  adalah luas benda uji).

**SOAL 3.5**

Gambarkan lingkaran tegangan Mohr pada saat keruntuhan untuk uji tekan triaksial pada benda uji tanah liat kaku dengan kuat geser 100 kPa, jika tegangan radial dipertahankan konstan pada 80 kPa. Tentukan kemiringan  $\theta$  terhadap arah radial bidang yang tegangan gesernya, sama dengan setengah tegangan geser maksimum, dan tentukan tegangan normal yang bekerja pada bidang tersebut.



**Gambar 3. 11** Skema pada Soal 3.5.

**SOLUSI**

$\sigma_2 = \sigma_3 = 80 \text{ kPa}$

Karena  $\tau_{max} = 100$  kPa, diameter lingkaran tegangan pada saat keruntuhan, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.11, adalah 200 kPa. Dengan demikian,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 200 = 280 \text{ kPa}$$

Sudut  $2\theta$  diberikan oleh,

$$\sin 2\theta = \frac{\tau_{max}}{2\tau_{max}} = 0,5$$

$$\theta = 15^\circ \text{ atau } 75^\circ$$

Tegangan normal  $\sigma_{n15}$  dan  $\sigma_{n75}$  yang bekerja pada bidang-bidang ini dapat diketahui dengan mudah dari Gambar 3.11.

$$\sigma_{n15} = 180 + 100 \cos 2\theta = 267 \text{ kPa}$$

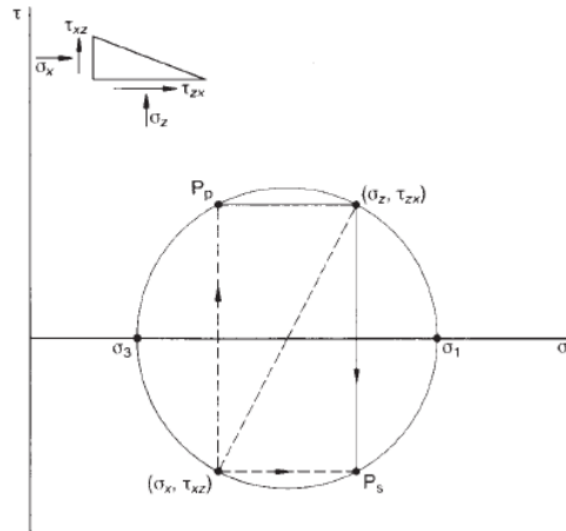
$$\sigma_{n75} = 180 - 100 \cos 2\theta = 93 \text{ kPa}$$

Dalam mempertimbangkan orientasi tegangan relatif, dimungkinkan untuk bekerja dengan arah tegangan itu sendiri atau arah bidang tempat tegangan bekerja. Pada Gambar 3.11, sudut antara bidang radial (horizontal) tempat  $\sigma_1$  bekerja dan bidang tempat  $\sigma_{n15}$  bekerja adalah  $15^\circ$ , yang juga merupakan sudut antara arah  $\sigma_1$  dan  $\sigma_{n15}$ . Demikian pula  $\sigma_{n75}$  bekerja pada bidang miring  $75^\circ$  terhadap bidang radial, yang juga merupakan sudut antara arah  $\sigma_1$  dan  $\sigma_{n75}$ .

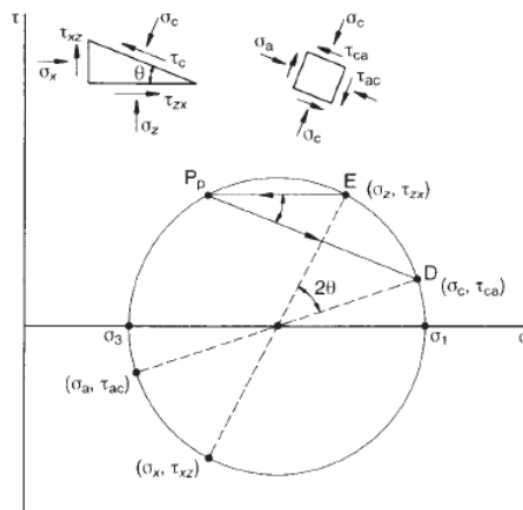
## F. Titik Kutub

Jika tegangan  $(\sigma_z, \tau_{zx})$ ,  $(\sigma_x, \tau_{xz})$  pada bidang ortogonal diketahui, maka tegangan  $(\sigma_{n\theta}, \tau_{\theta})$  pada bidang lain yang membentuk sudut  $\theta$  dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 2.15 dan 2.16 atau, secara grafis, dengan memutar titik tegangan pada lingkaran Mohr sebesar  $2\theta$ . Metode alternatif sederhana juga dapat digunakan, dengan menetapkan titik kutub pada lingkaran tegangan Mohr. Dua titik kutub dapat ditentukan, yang satu berkaitan dengan arah kerja tegangan dan yang lainnya berkaitan dengan arah bidang tempat tegangan bekerja. Mengacu pada Gambar 3.12, titik kutub  $P_s$  untuk tegangan ditemukan dengan memproyeksikan garis dari titik tegangan  $(\sigma_z, \tau_{zx})$  ke arah kerja  $\sigma_z$ , yaitu secara vertikal, hingga memotong lingkaran tegangan; atau dengan memproyeksikan garis dari titik tegangan  $(\sigma_x, \tau_{xz})$  ke arah aksi  $\sigma_x$ , yaitu secara horizontal, hingga memotong lingkaran tegangan. Proyeksi mana pun akan memberikan titik kutub unik  $P_s$ . Titik kutub  $P_p$  untuk bidang diperoleh dengan memproyeksikan garis dari titik tegangan  $(\sigma_z, \tau_{zx})$  ke arah bidang di mana tegangan-tegangan tersebut bekerja, yaitu secara horizontal; atau dengan memproyeksikan secara vertikal dari titik tegangan  $(\sigma_x, \tau_{xz})$ . Meskipun salah satu titik kutub dapat digunakan dengan fasilitas yang sama, titik kutub biasanya digunakan untuk bidang  $P_p$ . Titik kutub

inilah yang digunakan di seluruh teks ini. Penggunaan titik kutub  $P_p$  untuk mencari tegangan  $(\sigma_c, \tau_{ca})$  pada sudut  $\theta$  terhadap tegangan referensi  $(\sigma_z, \tau_{zx})$  ditunjukkan pada Gambar 3.13. Titik tegangan pada lingkaran Mohr dicari hanya dengan memproyeksikan garis dari  $P_p$  sejajar dengan bidang tempat  $(\sigma_c, \tau_{ca})$  bekerja hingga memotong lingkaran di titik D.



**Gambar 3. 12** Titik kutub  $P_s$  untuk arah tegangan dan  $P_p$  untuk arah bidang yang terkena tegangan.

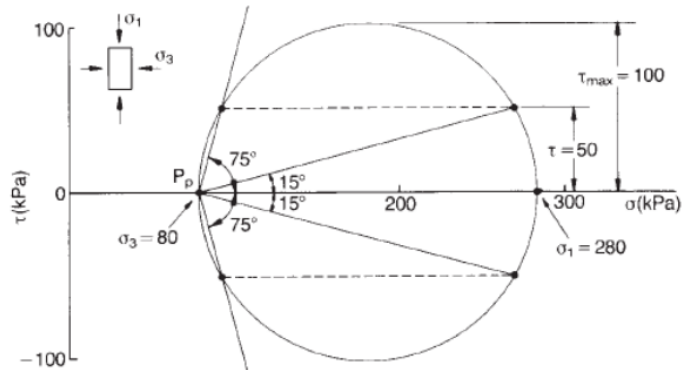


**Gambar 3. 13** Penggunaan titik kutub P untuk menemukan tegangan  $(\sigma_c, \tau_{ca})$  pada sudut  $\theta$  terhadap arah tegangan referensi.

### SOAL 3.6

Temukan sudut  $\theta$  antara bidang radial dan bidang dimana  $\tau = 1/2\tau_{max}$ , dengan menggunakan metode titik kutub.

### SOLUSI



Gambar 3. 14 Skema pada Soal 3.6.

Solusinya ditunjukkan pada Gambar 3.14, yang dapat dilihat bahwa  $\theta = 15^\circ$  atau  $75^\circ$ . Nilai  $\sigma_{n15}$  dan  $\sigma_{n75}$  dapat dengan mudah dievaluasi menggunakan diagram di atas.

### G. Kriteria Kegagalan

Pada tahun 1773, Coulomb membacakan makalahnya kepada Akademi Ilmu Pengetahuan Perancis, yang membahas berbagai hal mulai dari kekuatan balok dan stabilitas lengkungan, hingga tekanan tanah dan kekuatan geser pasangan bata dan tanah. Setelah dibimbing oleh rekan-rekannya, makalah tersebut diterbitkan oleh institusi tersebut pada tahun 1776. Coulomb memperkenalkan istilah ketahanan geser untuk pasangan bata dan tanah dalam bentuk:

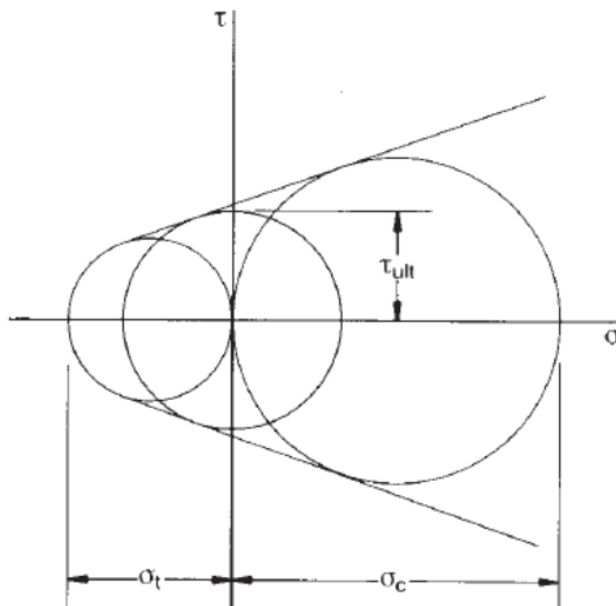
$$s = ca + \frac{1}{n}N \quad (3.3)$$

dimana  $c$  adalah kohesi (non-arah) per satuan luas;  $a$  adalah luas bidang geser;  $N$  adalah gaya normal pada bidang geser;  $1/n$  adalah koefisien gesekan internal. Suku  $n = \cot \varphi$ , maka Persamaan 3.3 bisa dituliskan jadi:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (3.4)$$

dimana  $\tau_f$  adalah kuat geser per satuan luas;  $c$  adalah kohesi satuan;  $\sigma_n$  adalah tegangan normal pada bidang geser;  $\phi$  adalah sudut tahanan geser.

Setidaknya untuk semua tujuan praktis, validitas Persamaan 3.4 untuk tanah kini diterima secara universal, namun parameter  $c$  dan  $\phi$  mungkin mempunyai banyak nilai yang berbeda untuk tanah yang sama, tergantung pada jalur tegangan, tingkat tegangan dan kondisi drainase. Persamaan 3.4 juga dapat diterapkan dalam mekanika batuan untuk geser sepanjang kekar dan diskontinuitas dan dalam beberapa kasus pada batuan utuh itu sendiri. Pada saat Mohr sedang mengerjakan representasi grafis dari tegangan pada suatu titik, sebagian besar insinyur yang peduli dengan analisis tegangan menyukai teori regangan maksimum Saint-Venant sebagai kriteria kegagalan mereka. Menyadari fakta bahwa kriteria ini tidak sesuai dengan percobaan pada spesimen baja, Mohr mempromosikan penggunaan kriteria kegagalan berdasarkan batasan ketahanan geser, dan selanjutnya mengusulkan agar lingkaran tegangan harus digambar untuk memberikan pemahaman penuh tentang kondisi tegangan pada kegagalan material.



**Gambar 3. 15** Lingkaran tegangan Mohr dan selubung kekuatan untuk besi tuang.

Sebagai ilustrasi kriteria tegangan geser, Mohr menggunakan contoh besi tuang yang diuji mengalami keruntuhan tekan (tegangan gagal  $\sigma_c$ ), tarik (tegangan gagal

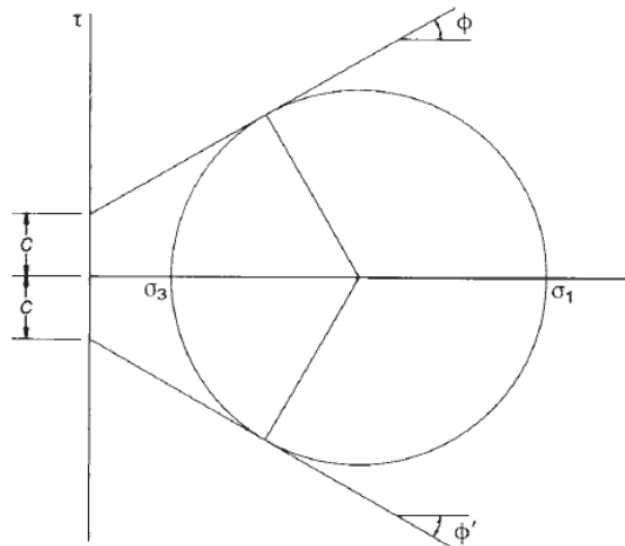


$\sigma_t$ ) dan geser murni (tegangan gagal  $\tau_{ult}$ ). Kemudian ia menggambar selubung kegagalan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.15, hanya menyentuh lingkaran kompresi dan tegangan, dan menunjukkannya bahwa keruntuhan pada tegangan geser, dan dapat disimpulkan dengan menggambar sebuah lingkaran dengan pusatnya di titik asal tegangan dan dengan jari-jari  $\tau_{ult}$  sedemikian rupa sehingga lingkaran tersebut menyentuh kedua selubungnya. Dari konstruksi ini:

$$\tau_{ult} = \frac{\sigma_c \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (3.5)$$

yang sesuai dengan eksperimen secara memuaskan.

Meskipun motivasi Coulomb dan Mohr, dalam mengembangkan kriteria keruntuhan sangat berbeda, dan pada material yang berbeda, titik akhirnya hampir sama: kriteria yang bergantung pada tegangan berdasarkan ketahanan geser, yang dikenal oleh para insinyur geoteknik sebagai kriteria 'Mohr-Coulomb'. Kombinasi lingkaran tegangan Mohr dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb tidak hanya memberikan pemahaman yang berharga mengenai kondisi tegangan pada saat keruntuhan, namun juga memberikan alat yang sangat berguna dalam analisis geoteknik.



**Gambar 3.16** Parameter kuat geser  $c$  dan  $\phi$ .

1 Mengacu pada Gambar 3.16 yang menunjukkan lingkaran tegangan Mohr untuk kasus tipikal spesimen triaksial silinder yang diuji hingga mengalami kegagalan, dalam kompresi aksial, menunjukkan karakteristik kekuatan  $c$ ,  $\varphi$ , sehingga:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2c \cos \varphi}{\sigma_3 \sin \varphi} + \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3.6)$$

Dalam kasus khusus dimana  $c = 0$ :

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3.7)$$

atau

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.8)$$

Dalam kasus khusus dimana  $\varphi = 0$ :

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2c \quad (3.9)$$

1 Dalam memplot hasil uji triaksial laboratorium konvensional, yang mana benda uji dikompresi secara aksial, biasanya hanya memplot setengah lingkaran dan selubung di atas sumbu  $\tau = 0$  pada Gambar 3.16. Sebuah metode untuk menyimpulkan selubung yang paling cocok dari data eksperimen dengan menggunakan metode kuadrat terkecil telah dijelaskan oleh Balmer (1952).

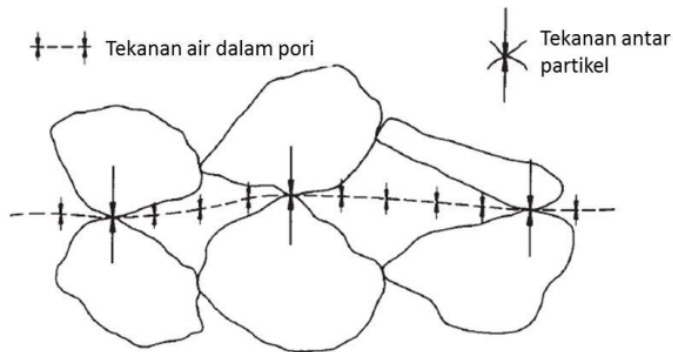
## H. Tegangan Efektif

1 Penetapan prinsip tegangan efektif oleh Terzaghi (1936) yang menempatkan mekanika tanah pada dasar ilmiah yang kuat. Karakteristik kekuatan dan deformasi suatu tanah terutama ditentukan oleh besarnya tegangan efektif dan riwayat tegangan yang pernah dialami oleh tanah tersebut. Tegangan efektif dalam tanah adalah tegangan yang dibawa oleh kerangka tanah melalui gaya kontak antar partikel. Mengacu pada Gambar 3.17, jika rongga tanah terisi air, maka tegangan normal total  $\sigma$  yang melintasi setiap antarmuka dalam massa tanah adalah jumlah dari tekanan  $u$  dalam air pori dan tegangan efektif  $\sigma'$  yang dibawa oleh kontak antar partikel.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (3.10)$$

1 Ekspresi ini mewujudkan asumsi titik kontak antar partikel (dan karenanya area kontak 'nol'), sehingga tekanan air pori bekerja pada seluruh area antarmuka yang melewati titik kontak partikel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.17. Selama pengendapan tanah di bawah air di lapangan, tegangan efektif vertikal di setiap titik massa tanah meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman tanah

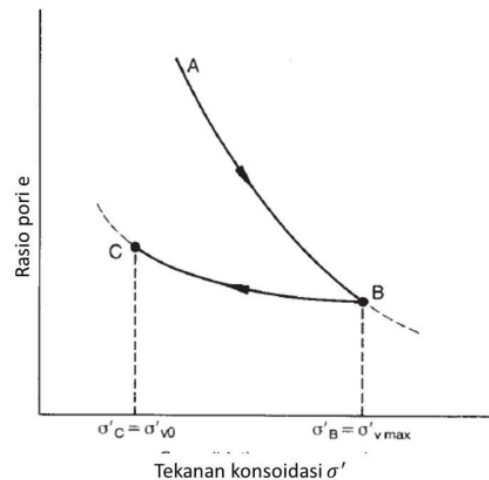
di atasnya. Hal ini menyebabkan tanah terkonsolidasi menjadi suatu pengepakan yang lebih rapat, mengikuti kurva rasio rongga  $e$  terhadap tekanan konsolidasi  $\sigma'$  seperti AB pada Gambar 3.18. Rasio rongga merupakan perbandingan antara volume rongga tanah dengan volume partikel tanah. Merupakan praktik umum untuk memplot  $e$  terhadap  $\log \sigma'$ , dalam hal ini AB sering kali mendekati garis lurus.



**Gambar 3.17** Gaya kontak antar partikel dan tekanan air pori dalam suatu massa tanah.

Jika setelah mencapai titik B pada Gambar 3.18 sebagian lapisan penutup hilang, misalnya karena erosi, maka tanah akan mengikuti kurva seperti BC pada Gambar 3.24. Di titik B tanah terkonsolidasi normal dan di titik C tanah terkonsolidasi berlebihan. Rasio konsolidasi berlebihan (OCR) dinyatakan dalam persamaan:

$$OCR = \frac{\sigma'_B}{\sigma'_C} \quad (3.11)$$



**Gambar 3.18** Konsolidasi normal (AB) dan pembengkakan (BC).

Artinya, OCR adalah rasio tegangan efektif vertikal maksimum yang pernah dialami tanah di masa lalu  $\sigma'_{vmax}$  terhadap tegangan efektif vertikal yang ada  $\sigma'_{v0}$  dan dengan demikian dapat dinyatakan sebagai:

$$OCR = \frac{\sigma'_{vmax}}{\sigma'_{v0}} \quad (3.12)$$

Tanah sering kali disebut sebagai tanah yang 'sedikit terkonsolidasi berlebihan' atau 'sangat terkonsolidasi berlebihan'. Perkiraan nilai OCR yang sesuai dengan deskripsi kualitatif tersebut ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 3. 1** Kriteria OCR

Deskripsi	Nilai
Terkonsolidasi normal	1
Konsolidasi berlebihan ringan	1 - 3
Konsolidasi berlebihan menengah	3 - 9
Konsolidasi berlebihan berat	> 9

Untuk tujuan penelitian, OCR yang telah ditentukan sering kali dicapai di laboratorium dengan mensimulasikan kembali tanah dengan kandungan air tinggi dan kemudian memasukkannya ke dalam siklus konsolidasi-pembengkakan yang sesuai.

## RANGKUMAN

1. Lingkaran Mohr merupakan gambaran peruraian suatu tegangan utama  $\sigma_1$  menjadi  $\sigma_{n\theta}$  dan  $\tau_\theta$ , dimana salah satu uraian tersebut akan menjadi suatu bidang kelemahan saat menjelang pecah.
2. Lingkaran Mohr atau sering disebut Diagram Mohr dinyatakan dalam dua dimensi atau tiga dimensi, dimana dinyatakan dalam merepresentasikan  $\sigma_2$  atau tidak.
3. Batas antara keadaan material yang stabil dan tidak stabil disebut selubung kegagalan, dalam hal ini merupakan fungsi kohesi  $c$  dan sudut tahanan geser  $\varphi$ .

## UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN

1. Apakah perbedaan antara tegangan normal pada sudut  $\theta = 0^\circ$  dan saat sudut  $\theta \neq 0^\circ$ ?
2. Secara praktik, kapan terjadinya suatu sudut  $\theta \neq 0^\circ$ ?
3. Apakah perbedaan pengujian *direct shear* dan *pure shear*?

**BAHAN DISKUSI**

Coba buat kelompok untuk mendiskusikan tentang material, apakah lebih cepat gagal saat ditekan atau ditarik, serta elaborasikan penyebabnya.

## BAB IV

### KERUNTUHAN TANAH

#### Capaian Pembelajaran :

Mahasiswa dapat memahami karakteristik tanah saat mengalami tegangan serta batas keruntuhannya yang digambarkan di dalam Diagram Mohr.

#### Deskripsi:

Dalam bab ini mahasiswa akan diajak untuk memahami karakteristik tanah saat mengalami tegangan serta batas keruntuhannya yang digambarkan di dalam Diagram Mohr.

#### A. Lingkaran Tegangan Total dan Tegangan Efektif

Sebagaimana dinyatakan dalam bab sebelumnya, dan diilustrasikan dalam Gambar 3.17, tegangan total pada setiap antarmuka melalui titik kontak partikel dalam suatu massa tanah terdiri dari tekanan air pori dalam rongga tanah dan tegangan efektif, yang sama dengan penjumlahan gaya antar partikel. pada satu satuan luas. Hal ini mengarah pada persamaan tegangan efektif yang diberikan oleh Persamaan 3.10. Karena tekanan air pori bekerja dengan intensitas yang sama ke segala arah, maka dari Persamaan 3.10 dapat disimpulkan bahwa:

$$\sigma_1 = \sigma'_1 + u \quad (4.1a)$$

$$\sigma_3 = \sigma'_3 + u \quad (4.1b)$$

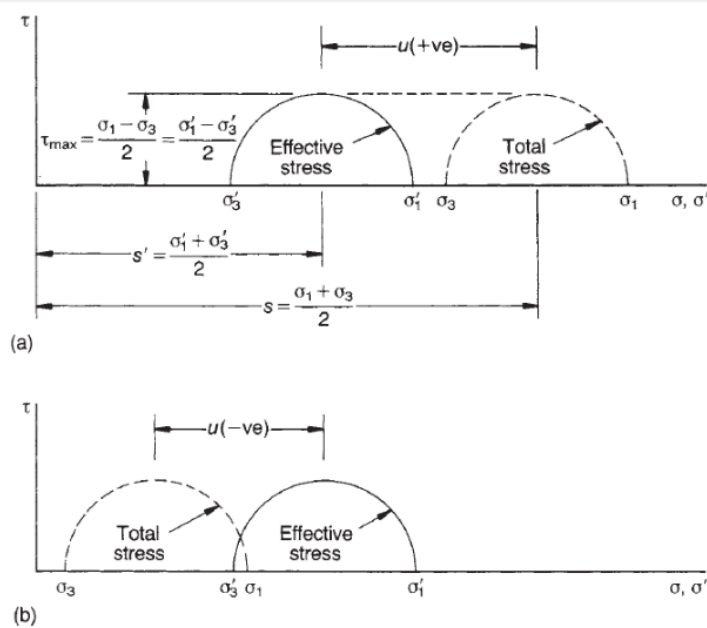
dimana  $\sigma_1, \sigma_3$  adalah tegangan utama total mayor dan minor;  $\sigma'_1, \sigma'_3$  adalah tegangan utama efektif mayor dan minor, dari Persamaan 4.1a dan 4.1b,

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - u \quad (4.2a)$$

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4.2b)$$

Berdasarkan atas Persamaan 4.2a dan 4.2b, tegangan total dan tegangan efektif Lingkaran Mohr mempunyai jari-jari yang sama, tetapi dipisahkan sepanjang sumbu  $\sigma$  dengan besaran yang sama dengan tekanan air pori. Hal ini ditunjukkan untuk tekanan pori positif (kompresi)  $+u$  pada Gambar 4.1a dan untuk tekanan pori negatif (tegangan)  $-u$  pada Gambar 4.1b. Hal ini juga dapat dilihat dari Persamaan 4.2b, dan Gambar 4.1a dan 4.1b, bahwa tegangan geser tidak dipengaruhi oleh tekanan air pori; artinya, nilainya sama baik dinyatakan dalam

tegangan total maupun tegangan efektif. Penjelasan fisika mengenai hal ini adalah adanya ketidakmampuan air pori dalam menahan tegangan geser, sehingga tegangan geser ditahan seluruhnya oleh gaya kontak antar butiran tanah.

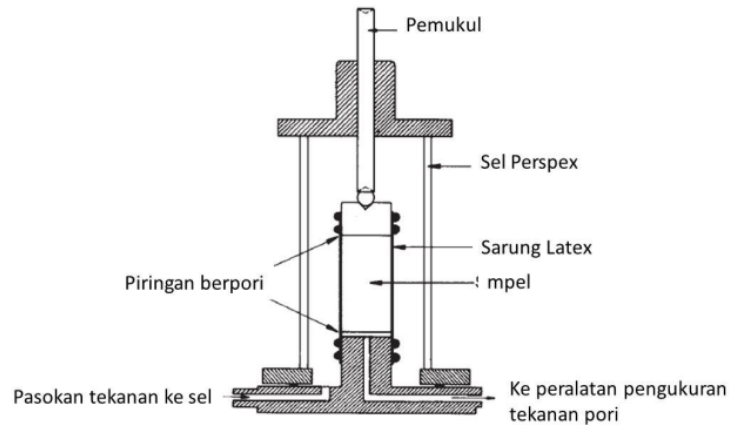


**Gambar 4. 1** Hubungan antara lingkaran tegangan total dan lingkaran tegangan efektif jika: (a) tekanan air pori bernilai positif; (b) tekanan air pori negatif.

## B. Uji Triaksial

Kriteria Mohr–Coulomb biasanya sangat cocok dengan keadaan keruntuhan tanah yang ditentukan secara eksperimental. Namun parameter  $c$  dan  $\phi$  pada Persamaan 3.4 sangat besar dipengaruhi oleh kondisi pengujian dan pembebanan. Akan lebih mudah untuk mempertimbangkan pengaruh beberapa faktor ini terhadap keadaan kegagalan sebagaimana diukur dalam uji triaksial di laboratorium. Keuntungan pengujian ini, untuk tujuan ini, terletak pada kenyataan bahwa semua tegangan pada benda uji diketahui dan tegangan utama antara  $\sigma_2$  harus sama dengan tegangan utama minor  $\sigma_3$  atau tegangan utama mayor  $\sigma_1$ ; dan dengan demikian kondisi tegangan pada benda uji dapat diwakili sepenuhnya oleh lingkaran tegangan Mohr dua dimensi. Keuntungan lain dari pengujian ini adalah uji kekuatan mekanika tanah yang paling umum dilakukan di laboratorium. Untuk penjelasan lengkap mengenai uji triaksial, pembaca dapat merujuk pada Bishop dan Henkel (1962). Elemen dasar uji triaksial ditunjukkan pada Gambar 4.2. Benda uji berbentuk silinder ditempatkan pada alas di dalam sel perspex yang diisi air. Selubung lateks mengelilingi benda uji dan disegel pada alas dasar dan tutup atas, tempat sampel dimuat secara aksial, dengan menggunakan seekor

domba jantan yang melewati selongsong di bagian atas sel. Saluran yang melewati alas dasar memungkinkan air mengalir dari rongga sampel, yang volumenya dapat diukur; atau, sebagai alternatif, tekanan air pori diukur tanpa drainase yang diperbolehkan.



**Gambar 4. 2** Elemen dasar uji triaksial.

Saat benda uji pertama kali ditempatkan dalam sel triaksial, benda uji tersebut akan berada di bawah tekanan sel nol, namun dalam kasus tanah jenuh berbutir halus, air dalam rongga tanah akan berada di bawah tekanan negatif, yang akan menahan benda uji tetap utuh dan memberinya kekuatan. Oleh karena tekanan pori negatif bergantung pada perkembangan tegangan permukaan pada batas udara-tanah sebelum dimasukkan ke dalam sel, maka tanah berbutir kasar, yang tidak dapat menahan tekanan pori negatif ini, harus ditempatkan dalam cetakan pendukung hingga tekanan pori negatif tercapai. dapat diterapkan melalui saluran drainase di dasar. Awalnya, kemudian:

$$u = u_c \text{ (negatif)} \quad (4.3a)$$

$$\sigma_a = \sigma_r = 0 \quad (4.3b)$$

$$\sigma'_a = \sigma'_r = -u_c \quad (4.3c)$$

dimana  $\sigma_a$  adalah tegangan aksial;  $\sigma_r$  adalah tegangan radial (Gambar 4.3). Jika katup drainase tetap tertutup dan tekanan sel ditingkatkan menjadi  $\sigma_{cp}$ , tekanan isotropik yang diterapkan ini diambil seluruhnya oleh air pori, yang relatif tidak dapat dimampatkan dibandingkan dengan struktur tanah. Dengan demikian,

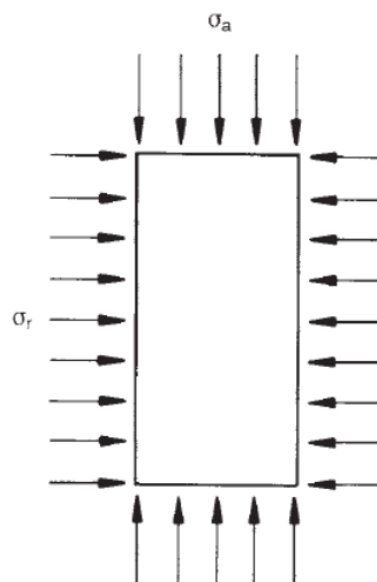


tekanan pori meningkat dari  $u_e$  ke  $u_i$ , namun tidak ada perubahan tegangan efektif. Dengan demikian:

$$u_i = \sigma_{cp} + u_e \quad (4.4a)$$

$$\sigma_a = \sigma_r = \sigma_{cp} \quad (4.4b)$$

$$\sigma'_a = \sigma'_r = u_c \quad (4.4c)$$



**Gambar 4.3** Tegangan uji triaksial: tegangan aksial  $\sigma_a$ , tegangan radial  $\sigma_r$ .

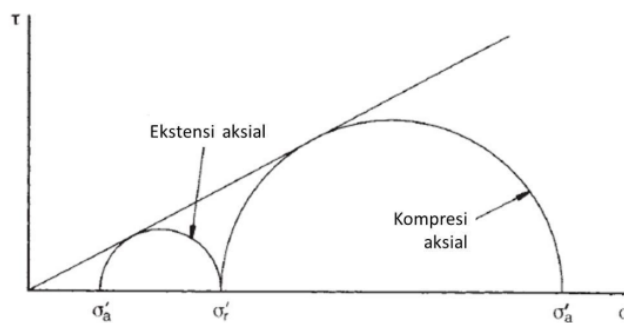
Persamaan 4.4a berlaku untuk setiap perubahan  $\sigma_{cp}$  pada tekanan sel. Dengan demikian:

$$u - u_c = \Delta\sigma_{cp} \quad (4.5)$$

Uji triaksial memberikan fleksibilitas yang besar sehubungan dengan kemungkinan perubahan tegangan, dan kondisi drainase air pori, dalam membuat benda uji mengalami kegagalan. Sehubungan dengan kondisi drainase, salah satu dari tiga prosedur berikut biasanya dilakukan.

1. Uji *unconsolidated undrained* (UU): benda uji diambil hingga rusak tanpa drainase yang diizinkan.

2. Uji tak terdrainasi terkonsolidasi (CU): katup pengurasan mula-mula dibuka agar tekanan air pori dapat hilang sampai nol, dan kemudian ditutup sehingga benda uji mengalami kegagalan tanpa adanya pengurasan lebih lanjut. Biasanya diterapkan 'tekanan balik', yaitu tekanan pori positif, pada spesimen pada awalnya, diimbangi dengan kenaikan tekanan sel yang sama untuk menghindari perubahan tegangan efektif. Hal ini untuk memastikan bahwa setiap udara di rongga tanah atau di saluran yang menghubungkan ke alat pengukur tekanan pori didorong ke dalam larutan di dalam air. Hal ini juga mengurangi kemungkinan terjadinya kavitasi, yaitu pembentukan uap air, atau keluarnya udara dari larutan dalam air, jika terjadi perubahan negatif yang besar pada tekanan air pori selama pengujian.
3. Uji terkuras (CD): katup pengurasan awalnya dibuka untuk memungkinkan tekanan air pori menghilang hingga nol, dan tetap terbuka selama benda uji mengalami kegagalan pada laju yang cukup lambat untuk memungkinkan tekanan air pori berlebih menghilang.



**Gambar 4. 4** Lingkaran tegangan pada kegagalan untuk pengujian kompresi dan ekstensi triaksial yang dikeringkan.

Dimungkinkan untuk mengambil spesimen dalam sel triaksial hingga mengalami kegagalan, baik dalam kompresi aksial atau ekstensi aksial. Spesimen dapat dikompresi secara aksial dengan meningkatkan tegangan tekan aksial atau menurunkan tegangan radial (yaitu tekanan sel), atau kombinasi keduanya. Ekstensi aksial dapat dicapai dengan menurunkan tegangan aksial atau meningkatkan tegangan radial, atau kombinasi keduanya. Perlu dicatat bahwa semua tegangan biasanya tetap bersifat tekan selama pengujian ekstensi, bahkan ketika keruntuhan disebabkan oleh pengurangan tegangan aksial. Spesimen tanah dapat menahan tegangan tarik total yang didapat dari tekanan air pori negatif yang sesuai, namun sulit untuk mempengaruhi tempat duduk antara alat uji dan tanah, yang akan memungkinkan terjadinya tegangan tarik. Sebagai alternatif, spesimen berbentuk khusus dapat digunakan (Bishop dan Garga, 1969). Biasanya

diasumsikan bahwa tanah tidak mampu menahan tekanan efektif negatif apa pun, meskipun pada kenyataannya beberapa tanah alami yang utuh dapat mempertahankan nilai yang sangat kecil, yang sekali lagi, sangat sulit diukur (Parry dan Nadarajah, 1974b, Bishop dan Garga, 1969). Gambar 4.4 menunjukkan lingkaran Mohr pada kegagalan untuk pengujian kompresi dan ekstensi terdrainase pada benda uji identik di bawah tegangan isotropik awal yang sama dan mengalami kegagalan dengan masing-masing menaikkan dan menurunkan tegangan aksial, menjaga tegangan radial  $\sigma_r$  konstan. Diagram ini mengasumsikan  $c' = 0$  dan  $\phi'$  sama untuk dua pengujian yang berbeda, namun hal ini tidak berlaku pada banyak tanah.

#### SOAL 4.1

Suatu sampel tanah liat jenuh berbentuk silinder yang tidak terganggu, diameter 38 mm kali tinggi 76 mm, ditempatkan dalam sel triaksial dan diletakkan di bawah tekanan sel keliling 80 kPa, dengan katup drainase tertutup.

1. Jika tekanan pori yang diukur adalah 50 kPa, berapakah nilai tekanan pori sebelum menerapkan tekanan sel?
2. Jika pengurasan air pori dari sampel sekarang diperbolehkan sampai tekanan pori turun menjadi nol, berapa banyak air yang akan dikeluarkan jika sampel berubah volume sebesar 0,01% untuk setiap kenaikan tegangan efektif sebesar 1 kPa?
3. Jika katup pembuangan sekarang tertutup dan tekanan sel turun menjadi nol, berapakah tekanan air pori akhir dalam sampel?

#### SOLUSI

1.  $\sigma_{cp} = 80$  kPa.  $u_i = 50$  kPa, dari Persamaan 4.4a  $50 = 80 + u_e \rightarrow u_e = 30$  kPa.
2. Volume sampel =  $\pi \times 19^2 \times 76 \text{ mm}^3 = 86.193 \text{ mm}^3$   
Perubahan tekanan pori  $\Delta u = -50$  kPa  
Perubahan tegangan efektif  $-\Delta u = 50$  kPa  
Volume air yang dikeluarkan =  $86.193 \times 50 \times \frac{0,01}{100} = 431 \text{ mm}^3$
3.  $\Delta\sigma_{cp} = -80$  kPa. Dari Persamaan 4.5  $\Delta u = -80$  kPa

Oleh karena tekanan pori awal adalah nol, maka tekanan pori setelah tekanan sel dihilangkan adalah  $u = -80$  kPa.

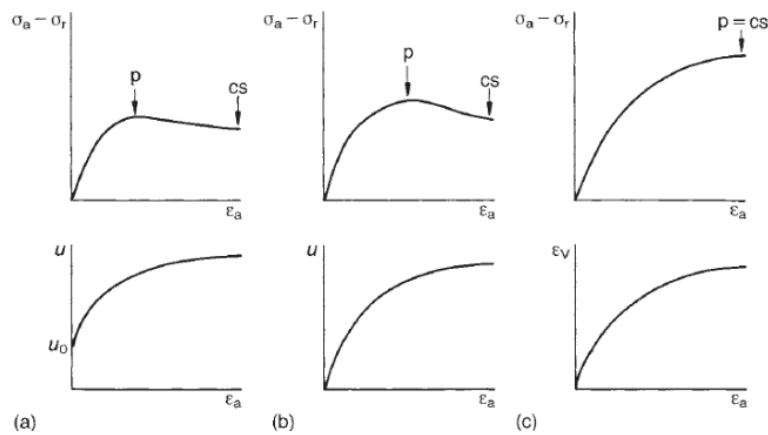
#### C. Uji Kompresi Triaksial

Kecuali dinyatakan lain, referensi uji triaksial dalam literatur geoteknik selalu berarti uji kompresi triaksial – dilakukan dengan menjaga tekanan sel tetap konstan dan meningkatkan tegangan aksial. Spesifikasi pengujian yang lengkap memerlukan pernyataan mengenai kondisi tegangan awal yang diterapkan dan apakah terdrainase atau tidak terdrainase selama geser. Dalam beberapa penerapan

praktis, seperti menyelidiki stabilitas lereng yang dipotong, akan lebih logis jika spesimen mengalami kegagalan tekan dengan mengurangi tegangan radial; tetapi tingkat keserbagunaan yang tinggi yang ditawarkan oleh uji triaksial ini jarang dimanfaatkan dalam praktiknya. Pembebanan aksial dalam uji triaksial biasanya diterapkan pada laju regangan konstan, namun kadang-kadang metode pengendalian beban juga digunakan. Dalam kompresi triaksial:

$$\sigma_1 = \sigma_a \quad (4.6a)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r \quad (4.6b)$$



**Gambar 4.5** Plot tegangan-regangan tipikal untuk uji triaksial (a) UU, (b) CU dan (c) CD pada tanah liat alami yang sedikit terkonsolidasi berlebihan ( $p$ , puncak;  $cs$ , keadaan kritis).

dan CD pada lempung alam yang sensitif rendah hingga sedang, terkonsolidasi berlebih ringan, diplot sebagai tegangan deviator ( $\sigma_a - \sigma_r$ ) dan tekanan pori  $u$ , atau regangan volumetrik  $\epsilon_v$ , terhadap regangan aksial  $\epsilon_a$ . Tergantung pada sejumlah faktor seperti struktur tanah, riwayat tegangan, jalur tegangan yang diterapkan, dan kondisi drainase, kurva yang diplot mungkin menunjukkan puncak keruntuhan yang nyata, dengan penurunan kekuatan yang nyata akibat tegangan yang terus-menerus, atau puncak yang cukup datar ( $p$  pada Gambar 4.5a, b), atau sekadar mencapai titik stabil tanpa pengurangan kekuatan dengan terus mengejan. Spesimen yang menunjukkan puncak tertentu pada kondisi tidak terdrainase mungkin menunjukkan peningkatan tekanan air pori secara terus-menerus, yang mungkin seluruhnya atau sebagian bertanggung jawab atas penurunan kekuatan pasca puncak. Pada akhirnya, kondisi geser yang stabil harus

dicapai dengan kekuatan geser dan tekanan pori yang konstan di bawah tekanan yang terus menerus. Dalam keadaan ideal, terutama regangan yang seragam pada seluruh benda uji, keadaan akhir ini adalah keadaan kritis (Schofield dan Wroth, 1968).

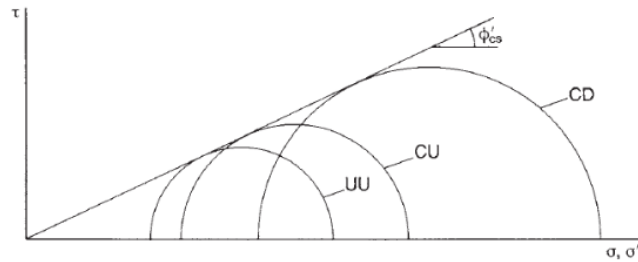
Dalam pengujian pada tanah liat yang dikeringkan, yang sedikit terkonsolidasi berlebihan, kondisi kurva plateau dan bukan kondisi keruntuhan puncak dapat dicapai, karena penurunan volume secara progresif melalui pengujian memberikan peningkatan kekuatan secara progresif. Idealnya, kondisi tersebut sesuai dengan keadaan kritis. Dalam kondisi konsolidasi yang sangat berlebih, tanah yang sama mungkin menunjukkan kekuatan puncak yang nyata pada pengujian yang dikeringkan, karena benda uji dapat melebar, dan dengan demikian melemah seiring dengan berlangsungnya pengujian.

Selain itu, bidang keruntuhan yang nyata kemungkinan besar akan terbentuk, dan spesimen akhirnya mendekati kondisi sisa (Skempton, 1964) daripada kondisi kritis. Perpindahan terbatas yang dapat dicapai dalam uji triaksial tidak memungkinkan tercapainya keadaan sisa penuh. Pada pengujian tak terdrainase, kemungkinan besar terjadi penurunan tekanan air pori secara progresif, disertai dengan peningkatan kekuatan secara progresif, dan oleh karena itu kemungkinan akan terjadi keruntuhan pada saat plateau; namun pada tanah liat alam seringkali terdapat cacat atau retakan yang menyebabkan tanah liat yang sangat terkonsolidasi secara berlebihan menunjukkan puncak yang berbeda pada pengujian UU dan CU.

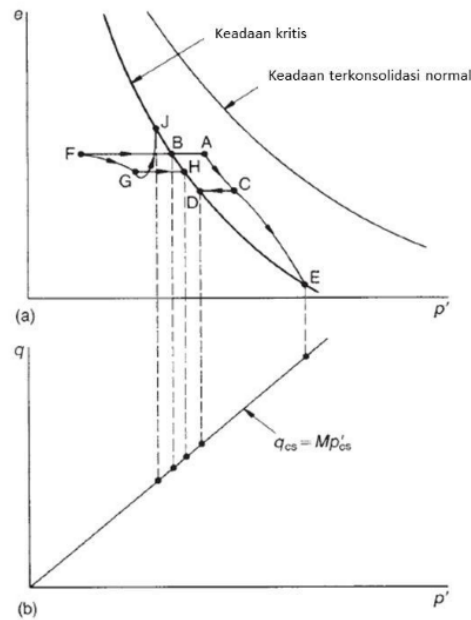
Dengan mempertimbangkan kembali hasil tipikal untuk tanah liat yang sedikit terkonsolidasi berlebihan yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, ketiga lingkaran tegangan efektif puncak dapat direproduksi dalam satu diagram, namun selubung yang bersinggungan dengan ketiga lingkaran ini tidak akan ada artinya, karena kekuatan puncak merupakan kondisi sementara dan tidak ada faktor persekutuan yang menghubungkan ketiga lingkaran tersebut selain tanah. Dengan mengabaikan pengaruh pengujian tertentu, seperti laju regangan, selubung yang sangat penting dapat diperoleh dengan bersinggungan dengan tiga lingkaran keadaan kritis yang digambar dalam satu diagram, seperti pada Gambar 4.6. Biasanya ditemukan, dan selalu diasumsikan, bahwa titik potong kohesi keadaan kritis  $c'_{cs}$  adalah nol. Kemiringan selubung adalah dilambangkan dengan  $c'_{cs}$ .

Dasar dari konsep keadaan kritis adalah bahwa dengan kuat geser seragam yang berkelanjutan, spesimen tanah tertentu mencapai hubungan  $e$  vs  $p'_6$  dan  $q_{cs}$  vs  $p'_{cs}$  yang unik, terlepas dari jenis pengujian dan kondisi tanah awal. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.7a, A adalah kondisi awal untuk tanah dengan konsolidasi berlebih ringan dengan karakteristik seperti

digambarkan pada Gambar 4.5. Berdasarkan jenis pengujian, garis keadaan kritis dicapai pada titik B (uji UU), D (uji CU – AC adalah fase konsolidasi) dan E (uji CD). Pada semua titik pada garis keadaan kritis, seperti B, D dan E, ketahanan geser, tekanan air pori dan rasio rongga tetap konstan pada geseran lanjutan. Suatu sampel yang sangat terkonsolidasi berlebihan dengan kondisi awal diwakili oleh titik F pada Gambar 4.7a, yang mempunyai rasio rongga yang sama dengan sampel di A, mencapai garis keadaan kritis di titik B (uji UU), H (uji CU) dan J (tes CD).



**Gambar 4. 6** Lingkaran tegangan dan selubung kekuatan yang khas pada keadaan kritis untuk pengujian UU, CU dan CD pada benda uji yang identik dari tanah liat yang sedikit terkonsolidasi berlebihan.



**Gambar 4. 7** Perilaku keadaan kritis dalam tanah.

Persamaan kekuatan keadaan kritis biasanya dituliskan:

$$q_{cs} = (\sigma'_1 - \sigma'_3)_{cs} = Mp'_{cs} \quad (4.7)$$

dimana M adalah konstanta untuk tanah tertentu. Bila;

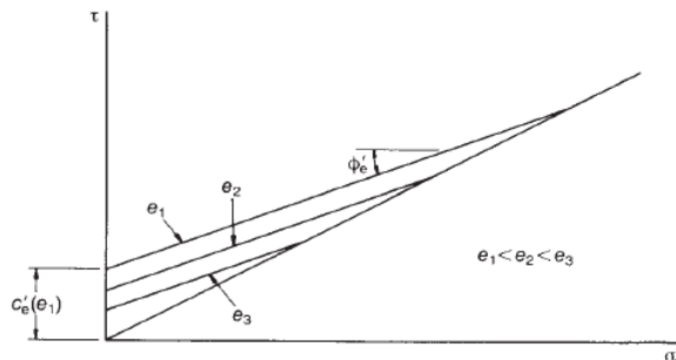
$$p'_{cs} = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)_{cs} \quad (4.8)$$

Persamaan 4.7 menjadi:

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{cs} = \frac{1}{3}M(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)_{cs} \quad (4.9)$$

tetapi, untuk kompresi triaxial,  $\sigma'_2 = \sigma'_3$  dan Persamaan 4.9 direduksi menjadi:

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{cs} = \frac{1}{3}M(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)_{cs} \quad (4.10)$$



Gambar 4.8 Selubung Hvorslev (1937).

Dua kriteria kekuatan lain yang penting untuk keruntuhan tanah adalah konsep Hvorslev (1937) dan kekuatan sisa (Skempton, 1964). Konsep Hvorslev adalah suatu selubung yang menyentuh lingkaran kekuatan puncak tegangan efektif untuk spesimen tanah yang sama yang diuji pada kondisi terdrainase, mempunyai rasio rongga  $e$  yang sama pada saat keruntuhan tetapi kondisi tegangan berbeda. Serangkaian pengujian dengan rasio rongga berbeda pada saat kegagalan menghasilkan rangkaian selubung paralel seperti yang ditunjukkan pada Gambar

4.8 dengan konstanta  $\varphi'_e$ , dan titik potong  $c'_e$  semakin berkurang seiring bertambahnya  $e$ . Konsep ini sebagian mempunyai sedikit kegunaan praktis karena sulitnya melakukan uji laboratorium untuk mencapai rasio rongga tertentu pada saat terjadi keruntuhan dan juga karena, di lapangan, berbagai kemungkinan pembebanan menghasilkan rasio rongga yang berbeda.

Kekuatan geser sisa biasanya dianggap paling penting pada tanah liat, yang sangat terkonsolidasi, dimana bidang keruntuhan atau diskontinuitas yang jelas biasanya terlihat. Pada perpindahan yang besar, keselarasan partikel tanah liat yang kuat terjadi di sepanjang bidang keruntuhan atau di dalam zona keruntuhan tipis, sehingga menghasilkan nilai  $c'_r, \varphi'_r$  yang rendah. Parameter-parameter ini tidak dapat ditentukan dalam sel triaksial karena perpindahan yang cukup besar tidak dapat dicapai untuk menghasilkan kondisi sisa. Untuk tujuan praktis, selubung kegagalan ditentukan dari serangkaian pengujian terkait. Pada sel triaksial pengujian yang paling umum adalah UU, CU dan CD seperti yang dijelaskan di atas. Sejauh mungkin tiga sampel identik diperoleh dan diuji pada tekanan sel yang berbeda, menghasilkan tiga lingkaran tegangan kegagalan, dan selubung kegagalan digambarkan menyentuh ketiga lingkaran tersebut. Jika tiga benda uji tidak dapat diperoleh, teknik pengujian multistap pada satu sampel dapat digunakan (misalnya Kenney dan Watson, 1961; Parry dan Nadarajah, 1973).

#### D. Uji Ekstensi Triaksial

Meskipun dalam beberapa aplikasi praktis, seperti penyelidikan kekuatan tanah di dasar penggalian dalam, uji ekstensi triaksial lebih tepat daripada kompresi triaksial, namun dalam praktiknya jarang dilakukan. Uji ini sedikit lebih sulit untuk dilakukan dibandingkan uji kompresi dan, seiring dengan mengecilnya area sampel, uji ini dapat menunjukkan ketidakstabilan saat mendekati kegagalan. Dalam ekstensi triaksial:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r \quad (4.11)$$

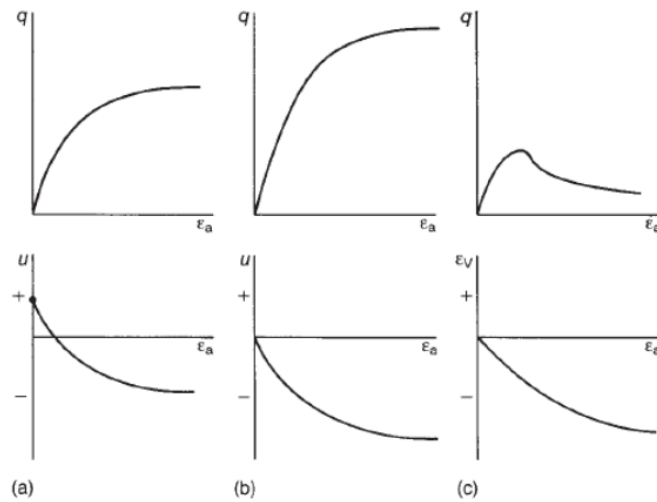
$$\sigma_3 = \sigma_a \quad (4.12)$$

Pada Gambar 4.9 hasil tipikal yang diharapkan dari uji ekstensi UU, CU dan CD (dengan penurunan tegangan aksial) pada tanah liat alami yang sensitif rendah hingga sedang, sedikit terkonsolidasi berlebihan, diplot secara kualitatif, sebagai tegangan deviator ( $\sigma_r - \sigma_a$ ) dan tekanan air pori atau regangan volumetrik terhadap regangan aksial. Ciri-ciri penting adalah berkembangnya tekanan air pori negatif yang kuat dalam pengujian UU dan CU, yang menyebabkan kegagalan tipe plateau, kecuali jika cacat sampel berperan besar dalam kegagalan tersebut. Pada pengujian CD, terjadi pelebaran kuat yang mengarah ke kondisi keruntuhan yang memuncak tajam, yang mungkin disertai dengan *necking* pada spesimen

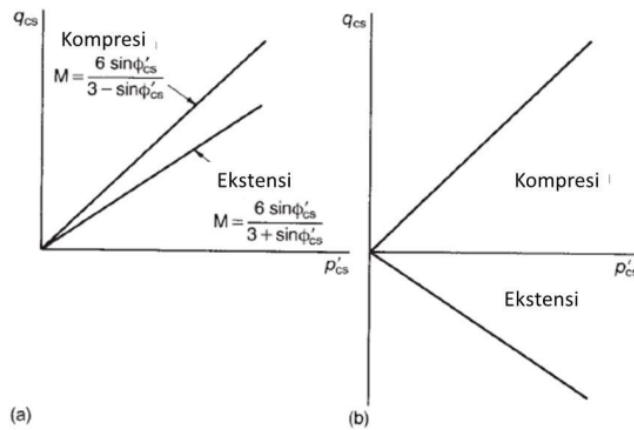


keruntuhan, atau berkembangnya bidang keruntuhan atau zona keruntuhan yang jelas. Karakteristik ini menjadi lebih jelas pada tanah liat yang sangat terkonsolidasi secara berlebihan, dan retakan juga dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap perilaku tersebut. Dengan asumsi keadaan kritis berlaku, Persamaan 4.7, 4.8 dan 4.9 berlaku sama pada uji ekstensi seperti pada uji kompresi, namun pada uji ekstensi  $\sigma'_2 = \sigma'_1$ , dan Persamaan 4.10 menjadi:

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{cs} = \frac{1}{3}M(2\sigma'_1 + \sigma'_3)_{cs} \quad (4.13)$$



**Gambar 4. 9** Plot tipikal untuk pengujian (a) UU, (b) CU dan (c) CD pada tanah liat yang sedikit terkonsolidasi berlebihan.



**Gambar 4. 10** Perbandingan kekuatan keadaan kritis kompresi dan ekstensi triaksial: (a) diplot dalam ruang  $q_{cs}$  positif; (b) plot konvensional.

Jadi, pada plot  $p'_{cs}$  vs  $p'_{cs}$ , selubung keadaan kritis memiliki kemiringan kompresi dan ekstensi yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10a. Sudah menjadi kebiasaan untuk memplot kompresi di atas sumbu  $q = 0$  dan uji ekstensi di bawahnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10b, meskipun tentu saja terdapat tegangan geser positif dan negatif yang bekerja pada benda uji pada kedua jenis pengujian.

#### E. Pengaruh Anisotropi pada Kuat Geser Tanah Liat

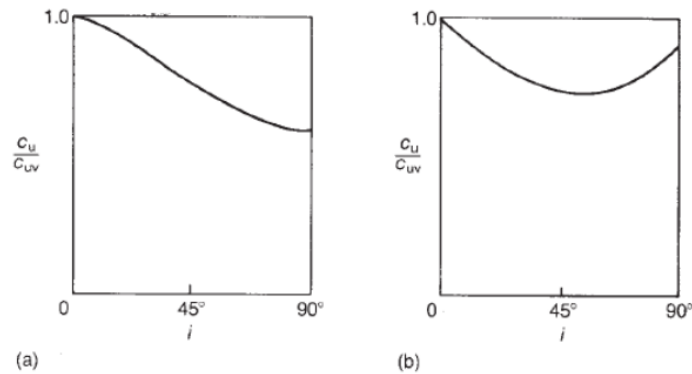
Segara setelah pengendapan endapan tanah sedimen, tegangan efektif vertikal (biasanya diasumsikan sebagai tegangan utama)  $\sigma'_{v0}$  pada kedalaman berapa pun lebih besar daripada tegangan efektif horizontal  $\sigma'_{h0}$  pada kedalaman yang sama. Rasionya adalah:

$$K_0 = \frac{\sigma'_{h0}}{\sigma'_{v0}} \quad (4.14)$$

Dengan demikian, suatu elemen tanah pada kedalaman berapa pun akan mengalami tekanan anisotropik dan hal ini, bersama dengan orientasi partikel yang terjadi selama proses pengendapan, menghasilkan anisotropi struktural dalam tanah. Sulit untuk memisahkan tegangan dan anisotropi struktural sepenuhnya, karena setiap perubahan tegangan efektif menghasilkan perubahan struktural serta perubahan tegangan. Pengangkatan lapisan penutup selanjutnya menyebabkan tanah menjadi terkonsolidasi berlebih, menyebabkan peningkatan  $K_0$  yang, pada tanah yang mengalami konsolidasi berlebih, dapat menghasilkan tegangan efektif horizontal yang jauh lebih tinggi dibandingkan tegangan efektif vertikal. Proses konsolidasi berlebihan akan mengubah struktur partikulat kerangka tanah sampai tingkat tertentu dan juga dapat menyebabkan retakan yang nyata pada tanah liat. Celah-celah ini, yang biasanya orientasinya cukup acak, dapat menimbulkan kelemahan yang nyata ke dalam tanah

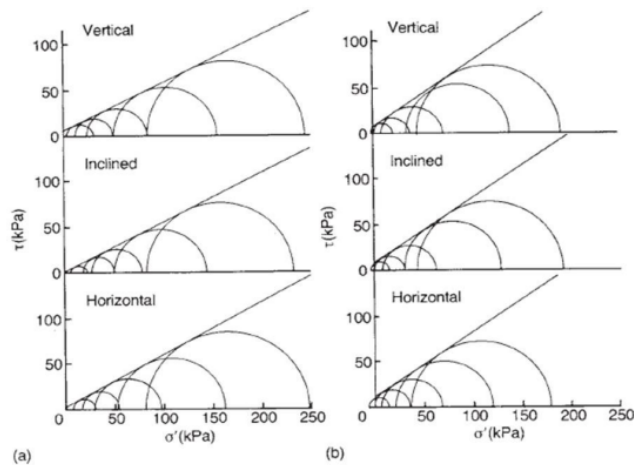
Spesimen uji triaksial yang dipotong dengan kemiringan berbeda dari endapan tanah liat lunak alami, yang biasanya terkonsolidasi atau sedikit terkonsolidasi berlebihan, biasanya menunjukkan perbedaan kuat geser tak terdrainase dalam uji tekan. Dua tren berbeda yang diperoleh:

1. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11a, terjadi penurunan kekuatan secara progresif seiring bertambahnya sudut  $i$  antara sumbu vertikal dan sumbu sampel;
2. Seperti terlihat pada Gambar 4.11b, terjadi penurunan kekuatan dari vertikal seiring bertambahnya  $i$ , namun mencapai titik minimum pada  $0 < i < 90^\circ$ , kemudian meningkat kekuatannya seiring bertambahnya  $i$ , namun sampel horizontal menunjukkan kekuatan yang lebih kecil dibandingkan sampel vertikal.



**Gambar 4. 11** Contoh pengaruh orientasi contoh terhadap kekuatan tak terdrainasi yang diukur dari lempung alam: (a) tren 1; (b) tren 2.

Tren (1) dapat dijelaskan dalam bentuk jalur tegangan anisotropik, sedangkan tren (2) kemungkinan disebabkan oleh orientasi partikel atau lapisan tipis horizontal lemah pada lempung yang terletak dekat dengan arah bidang keruntuhan potensial dalam tanah. Terdapat bukti yang bertentangan mengenai pengaruh tegangan awal dan anisotropi struktural pada  $\phi'$  pada saat keruntuhan, namun sebagian besar bukti yang tersedia saat ini menunjukkan bahwa anisotropi memiliki pengaruh yang sangat kecil terhadap  $\phi'$  yang diukur dalam uji kompresi triaksial.



**Gambar 4. 12** Pengaruh orientasi sampel dan jalur tegangan terhadap kekuatan tegangan efektif selubung tanah liat Fulford lunak: (a) kompresi; (b) ekstensi.

Pada Gambar 4.12 ditunjukkan lingkaran tegangan dan selubung keruntuhan pada keruntuhan untuk lempung Fulford lunak (Parry dan Nadarajah, 1974). Sampel yang diambil secara vertikal, miring ( $45^\circ$  terhadap vertikal) dan horizontal

diserahkan untuk uji tak terdrainasi terkonsolidasi dalam kompresi dan ekstensi triaksial. Nilai  $c'$ ,  $\varphi'$  tercantum pada Tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Nilai  $c'$  dan  $\varphi'$  dari uji kompresi dan ekstensi triaksial.

Orientasi Sampel	Kompresi		Ekstensi	
	$c'$ (kPa)	$\varphi'$	$c'$ (kPa)	$\varphi'$
Vertikal	8	26 <sup>0</sup>	9	34 <sup>0</sup>
Miring	3	27 <sup>0</sup>	8	34 <sup>0</sup>
Horisontal	4	29 <sup>0</sup>	11	35 <sup>0</sup>

Perbedaan  $\varphi'$  antara uji kompresi dan ekstensi rata-rata sekitar 7°, tetapi orientasi sampel yang berbeda memberikan perbedaan maksimum hanya 3° pada kompresi dan 1° pada ekstensi, menunjukkan pengaruh anisotropi awal jauh lebih kecil dibandingkan pengaruh arah tegangan. dalam menghasilkan kegagalan. Perbedaan nilai  $c'$  mungkin tidak terlalu signifikan, karena parameter ini sangat sensitif terhadap sedikit perubahan pada data pengujian. Salah satu efek nyata dari anisotropi awal adalah meningkatkan perbedaan antara nilai  $\varphi'$  dalam kompresi dan ekstensi, sebuah efek yang diilustrasikan dengan baik oleh perbedaan besar sebesar 7° pada Tabel 4.2. Hal ini sekali lagi terbukti ketika membandingkan nilai  $\varphi'$  untuk kaolin yang dikonsolidasi secara isotropik dan konsolidasi  $K_0$ , yang dibuat di laboratorium (Parry dan Nadarajah, 1974a) seperti yang ditunjukkan di bawah ini:

**Tabel 4. 2** Nilai  $\varphi'$  dari uji kompresi dan ekstensi

	$\varphi'$	
	Kompresi	Ekstensi
Isotropik	23 <sup>0</sup>	21 <sup>0</sup>
$K_0$	21 <sup>0</sup>	28 <sup>0</sup>

Nilai ekstensi yang lebih rendah daripada kompresi untuk spesimen yang dikonsolidasi secara isotropik merupakan hal yang tidak biasa, namun ciri yang paling menonjol adalah penyebaran nilai yang kecil untuk uji kompresi dan  $\varphi'$ (E) yang jauh lebih tinggi untuk spesimen yang dikonsolidasi secara anisotropic (Atkinson et al., 1987).

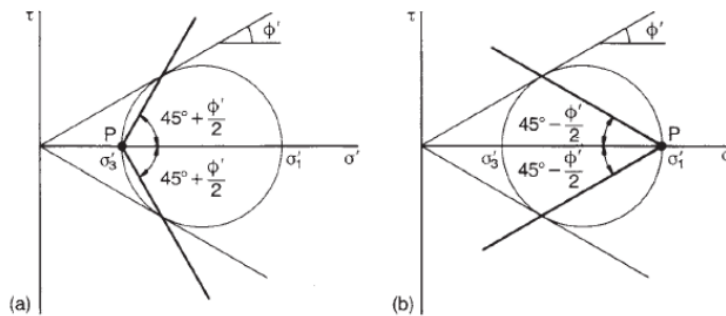
#### F. Bidang Keruntuhan

Untuk tanah, konsep keruntuhan Mohr–Coloumb menyatakan bahwa suatu unsur tanah akan mengalami keruntuhan, apabila tegangan efektif lingkaran Mohr menyentuh selubung kekuatan tegangan efektif. Jika digambarkan lingkaran tegangan penuh, maka lingkaran tersebut akan menyentuh selubung pada dua titik dengan perbandingan  $\tau/\sigma'$  yang identik. Dua bidang yang melalui elemen yang menjadi bidang runtuh, adalah bidang yang menjadi tempat bekerjanya rasio tegangan  $\tau/\sigma'$ . Konsep ini dikemukakan oleh Terzaghi (1936) dan ditunjukkan pada Gambar 4.13 untuk benda uji triaksial yang diuji tekan dan ekstensi. Dengan

menggunakan metode titik kutub, dapat dengan mudah ditunjukkan bahwa arah bidang pecah  $\alpha$ , relatif terhadap bidang tempat tegangan efektif utama  $\sigma'_1$  bekerja, adalah:

$$\alpha(C) = 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \quad (4.15a)$$

$$\alpha(E) = 45^\circ - \frac{\phi'}{2} \quad (4.15b)$$



**Gambar 4. 13** Orientasi bidang pecah pada: (a) uji kompresi triaksial; (b) uji ekstensi triaksial. (Catatan: P adalah titik kutub dari bidang).

Terzaghi berpendapat bahwa sudut  $\phi'$  pada Persamaan 4.15a dan 4.15b haruslah sudut Hvorslev  $\phi'_e$  yaitu sudut selubung tegangan efektif terhadap lingkaran dengan kondisi tegangan berbeda tetapi kandungan air pada saat keruntuhan sama. Gibson (1953) menunjukkan bahwa  $\phi'_e$ , adalah jumlah resistensi yang timbul dari interaksi gesekan antara butiran dan kekuatan yang berhubungan dengan laju perubahan volume benda uji pada saat kegagalan. Ia mengusulkan ekspresi Hvorslev yang dimodifikasi untuk uji kotak geser:

$$\tau_1 = c_R + \sigma'_n \tan \phi'_R + \sigma'_n g_f \quad (4.16)$$

dimana  $\sigma'_n g_f$  adalah usaha yang dikeluarkan ketika benda uji gagal mengembang terhadap tegangan yang diberikan  $\sigma'_n$ . Ini menentukan  $\phi'_R$  dari uji *drained shear box* pada sejumlah tanah liat dengan  $\phi'_R$  berkisar antara  $3^\circ$  hingga  $26^\circ$ , dan juga pasir mika dengan  $\phi'_R = 30^\circ$ . Benda uji berbentuk silinder dari masing-masing tanah, dengan tinggi 76 mm dan diameter 38 mm, disiapkan dan dimasukkan ke dalam kompresi aksial bebas pada laju regangan konstan. Pengamatan yang cermat dilakukan terhadap kemiringan bidang keruntuhan seiring dengan pengembangannya. Oleh karena tanah dalam keadaan jenuh dan pengujian dilakukan dalam keadaan tidak terdrainase, kemiringan bidang keruntuhan diasumsikan mencerminkan sudut gesek sebenarnya (sama dengan  $\phi'_e$  untuk

kondisi tidak terdrainase). Kesesuaian yang baik diperoleh, antara  $\phi'_R$  dari pengujian kotak geser terdrainase dan nilai yang disimpulkan dengan menerapkan Persamaan 4.15a pada kemiringan bidang keruntuhan yang diamati.

#### **RANGKUMAN**

1. Karakteristik tanah memberikan suatu tanggapan khas pada saat mengalami tegangan, yakni adanya tegangan efektif yang sifatnya dinamis, tergantung dari nilai rasio pori-pori dan keberadaan fluida.
2. Keadaan saat terjadi konsolidasi tanah memberikan hubungan antara nilai kohesi awal dan saat kritis, demikian pula dengan sudut geser dalam.
3. Kekuatan geser tanah pada saat mengalami kegagalan sangat tergantung pada parameter fisik kohesi dan sudut geser dalam.

#### **UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN**

1. Apa penyebab dari dinamika karakteristik tanah pada saat mengalami tegangan?
2. Perubahan apa saja yang terjadi saat uji kompresi dan ekstensi terhadap tanah?
3. Manakah yang lebih tepat untuk melakukan uji kompresi dan ekstensi di lapangan dan laboratorium?

#### **BAHAN DISKUSI**

Diskusikan dalam kelompok, faktor-faktor yang mengakibatkan kegagalan pada tanah serta implikasinya terhadap kuat geser tanah..

## BAB V

### KERUNTUHAN BATUAN

**Capaian Pembelajaran :**

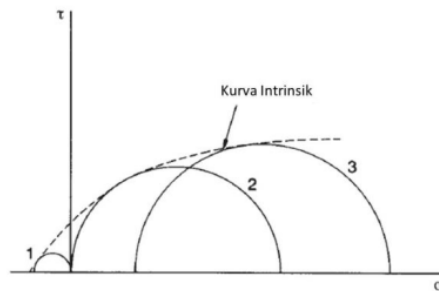
Mahasiswa dapat memahami karakteristik batuan saat mengalami tegangan serta batas keruntuhannya yang digambarkan di dalam Diagram Mohr.

**Deskripsi:**

Dalam bab ini mahasiswa akan diajak untuk memahami karakteristik batuan saat mengalami tegangan serta batas keruntuhannya yang digambarkan di dalam Diagram Mohr.

**A. Teori Rekahan Griffith**

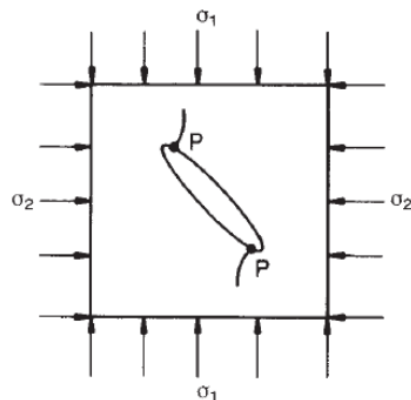
Istilah 'batuan' yang digunakan oleh para insinyur geoteknik mencakup berbagai material, mulai dari batuan beku polimineral keras dan batuan metamorf, seperti granit dan dolerit, di satu sisi, hingga batuan berlempung lunak yang mengalami litifikasi, seperti batulumpur dan serpih. Tingkat oksidasi atau pelapukan juga dapat mempunyai pengaruh besar terhadap karakteristik batuan. Batuan beku atau metamorf utuh yang tidak mengalami pelapukan umumnya dicirikan oleh kontak dekat sepanjang batas kristal dan mengandung, paling banyak, makropori yang tidak terhubung sehingga memiliki pengaruh yang kecil terhadap perilakunya. Namun secara massa, perilaku rekayasa batuan tersebut kemungkinan besar didominasi oleh adanya kekar, retakan, dan cacat lainnya. Pada beberapa batuan beku, seperti basalt yang mengalir ke air, mungkin terdapat vesikel yang dapat mempengaruhi perilakunya. Batuan arenit (pasir) dan batuan berlempung terdiri dari mineral pembentuk batuan primer atau mineral lempung sekunder, yang disemen pada tingkat yang lebih besar atau lebih kecil pada kontakannya, tetapi dipisahkan oleh rongga yang saling berhubungan. Cairan dalam rongga mempengaruhi perilaku batuan utuh, seperti halnya pada tanah.



**Gambar 5. 1** Lingkaran pecah yang khas untuk batuan dan 'kurva intrinsik' Jaeger: 1, tegangan uniaksial; 2, kompresi uniaksial; 3, kompresi triaksial.

Pecahnya spesimen batuan silinder utuh dapat disebabkan oleh tegangan uniaksial, kompresi aksial bebas, atau kompresi terbatas seperti pada sel triaksial. Contoh umum lingkaran tegangan efektif saat pecah untuk ketiga jenis pengujian diilustrasikan pada Gambar 5.1. Jaeger (1972) mengistilahkan envelope pada lingkaran tegangan yang pecah sebagai 'kurva intrinsik'. Dalam kebanyakan kasus ditemukan mendekati bentuk parabola. Hal ini dipostulasikan oleh Griffith (1921, 1924) bahwa pada bahan rapuh seperti kaca, patah dimulai ketika kekuatan tarik terlampaui oleh tegangan yang dihasilkan pada ujung cacat mikroskopis bahan tersebut. Cacat mikroskopis pada batuan utuh dapat berupa retakan kecil, retakan, atau batas butir. Seperti yang didiskusikan oleh Hoek (1968), teori ini memperkirakan selubung keruntuhan parabola dan dengan demikian menghasilkan selubung dengan bentuk umum yang sama seperti yang diamati pada batuan utuh. Griffith awalnya menerapkan teorinya pada pelat dengan ketebalan seragam yang mengalami tegangan tarik uniaksial, yang memiliki retakan elips di dalam pelat pada sudut kanan terhadap arah pembebanan. Selanjutnya ia memperluas teorinya ke perluasan retakan pada pelat yang terkena tegangan tekan  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  (Gambar 5.2). Dengan asumsi kompresi bidang, diperoleh ekspresi (Griffith, 1924):

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 8T_0(\sigma_1 + \sigma_2) = 0 \quad (5.1)$$



**Gambar 5.2** Retakan elips Griffith. (P menunjukkan titik kegagalan)

dimana  $T_0$  adalah kuat tarik uniaksial material tidak retak (dinyatakan sebagai bilangan positif). Hal ini memberikan kekuatan yang ditunjukkan pada Gambar 5.3a.

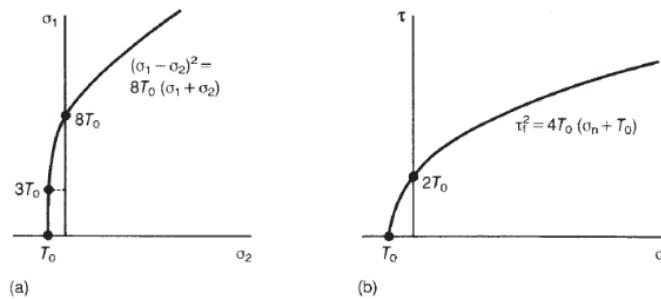
Terlihat bahwa teori ini memperkirakan tegangan tekan uniaksial pada perluasan retak sama dengan delapan kali kuat tarik uniaksial tidak retak. Dinyatakan dalam



kekuatan geser  $\tau_f$  dan tegangan normal  $\sigma_n$  yang bekerja pada bidang yang memuat sumbu utama retakan, kriterianya menjadi:

$$\tau_f^2 = 4 T_0 (\sigma_n + T_0) \quad (5.2)$$

memberikan selubung kekuatan yang ditunjukkan pada Gambar 5.3b.



**Gambar 5. 3** Kekuatan Griffith menyelimuti bidang tekan dalam bentuk: (a) tegangan utama  $\sigma_1, \sigma_2$  ; (b) tegangan geser dan tegangan normal,  $\tau, \sigma_n$ .

Meskipun kriteria Griffith memberikan selubung kekuatan dari bentuk umum yang diamati untuk pengujian spesimen batuan, kriteria ini tidak memberikan model yang baik, sebagian karena mengabaikan gaya gesekan pada retakan tertutup. Modifikasi pada kriteria Griffith yang memperhitungkan gesekan pada retakan tertutup dan pengaruh tegangan utama antara (lihat presentasi dalam Jaeger dan Cook, 1976) belum menghasilkan kesesuaian yang memuaskan dengan hasil eksperimen.

## B. Kekuatan Empirik untuk Massa Batuan

Oleh karena upaya untuk mencocokkan berbagai data kekuatan batuan dengan ekspresi yang dimodifikasi berdasarkan teori retakan Griffith belum berhasil, maka para pekerja di lapangan telah menggunakan ekspresi empiris yang menggunakan teori Griffith hanya sebagai titik awal konseptual. Hoek dan Brown (1980) menemukan bahwa kekuatan puncak triaksial dari berbagai material batuan dapat direpresentasikan dengan persamaan:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + (m\sigma_c\sigma'_3 + S\sigma_c^2)^{1/2} \quad (5.3)$$

Dimana  $\sigma_c$  adalah kuat tekan uniaksial tak terbatas dari batuan utuh penyusun massa batuan. Persamaan ini bisa juga ditulis sebagai:

$$\sigma'_{1N} = \sigma'_{3N} + (m\sigma'_{3N} + S)^{1/2} \quad (5.4)$$

Nilai  $m$  berkisar dari sekitar 0,001 untuk massa batuan yang sangat terganggu hingga sekitar 25 untuk batuan keras yang utuh. Nilai  $S$  berkisar dari 0 untuk massa batuan bersendi hingga 1,0 untuk batuan utuh. Kasus khusus kuat tekan bebas  $\sigma_{cm}$  dan kuat tarik uniaksial  $\sigma_{cm}$  untuk suatu massa batuan dapat dicari dengan memasukkan  $\sigma'_3 = 0$  dan  $\sigma'_3 = 0$  berturut-turut ke dalam Persamaan 5.3. Dengan demikian:

$$\sigma_{cm} = (S\sigma_c^2)^{1/2} \quad (5.5)$$

$$\sigma_{tm} = \frac{1}{2}\sigma_c[m - (m^2 + 4S)^{1/2}] \quad (5.6)$$

Kasus umum Persamaan 5.4 dan kasus khusus yang diberikan oleh Persamaan 5.5 dan Persamaan 5.6 digambarkan pada Gambar 5.4. Meskipun Persamaan 5.4, yang dinyatakan dalam tegangan efektif utama, berguna dalam perancangan situasi terbatas pada batuan, seperti penggalian bawah tanah, persamaan ini bukanlah bentuk yang tepat untuk merancang lereng batuan, dimana kuat geser suatu permukaan keruntuhan berada pada batas efektif tertentu. tegangan normal diperlukan. Bentuk Persamaan 5.4 yang lebih mudah, yang dapat dinyatakan dalam bentuk selubung kegagalan Mohr, telah diturunkan oleh Bray (Hoek, 1983):

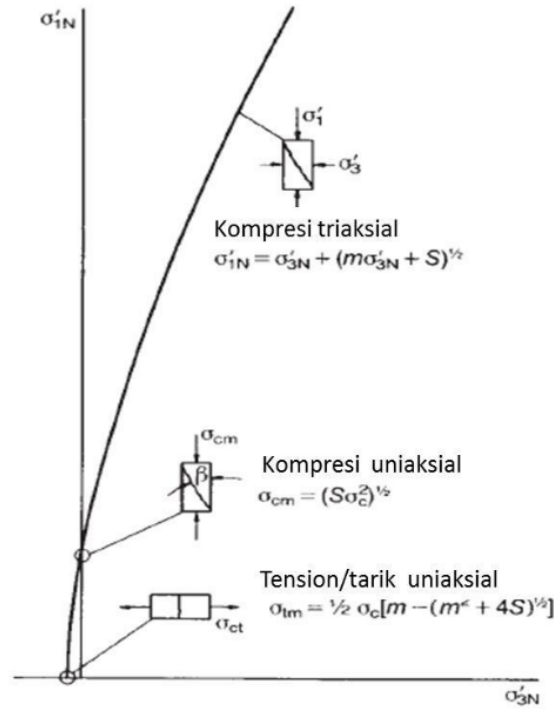
$$\tau_{fN} = (\cot \varphi'_i - \cos \varphi'_i) \frac{m}{8} \quad (5.7)$$

dimana  $\tau_{fN}$  adalah tegangan geser ternormalisasi pada saat keruntuhan ( $= \tau_f / \sigma_c$ ) dan  $\varphi'_i$ , adalah sudut gesek sesaat yang diberikan, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5, dengan kemiringan garis singgung terhadap selubung keruntuhan Mohr untuk nilai spesifik  $\tau_{fN}$  dan tegangan normal ternormalisasi efektif  $\sigma'_{nN}$  ( $= \sigma'_n / \sigma_c$ ). Sudut gesekan sesaat  $\varphi'$  diberikan oleh:

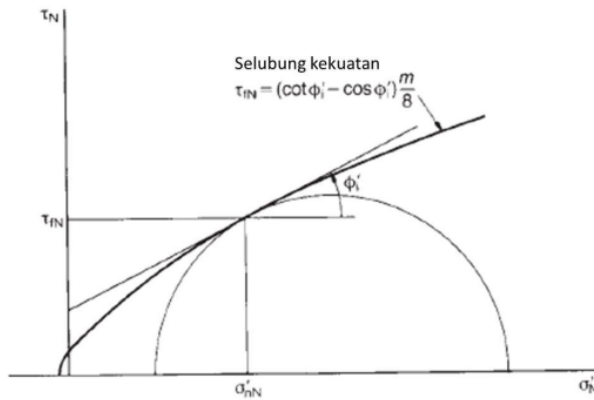
$$\varphi' = \tan^{-1} \left[ 4h \cos^2 \left( 30^\circ + \frac{1}{3} \sin^{-1} h^{-\frac{3}{2}} \right) \right]^{1/2} \quad (5.8)$$

dimana,

$$h = 1 + \frac{16(m\sigma'_{nN} + S)}{3m^2} \quad (5.9)$$

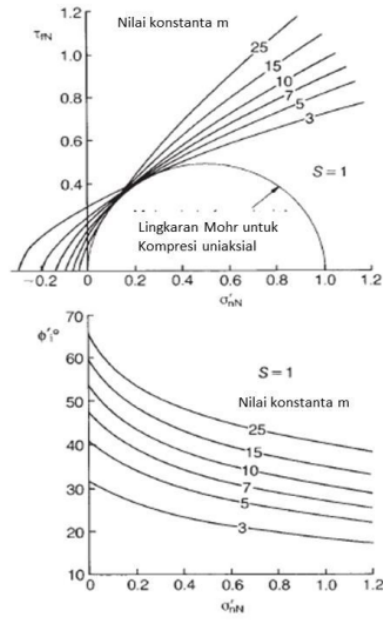


Gambar 5. 4 Selubung kekuatan Hoek dan Brown. (Hoek,1983).

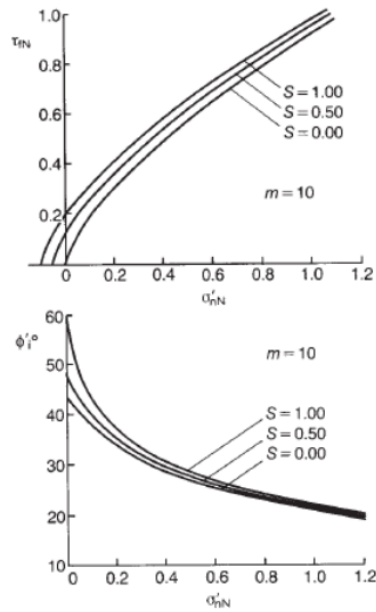


Gambar 5. 5 Selubung kekuatan Bray (Hoek, 1983).

Pengaruh konstanta  $m$  dan  $S$  pada selubung keruntuhan Mohr dan sudut gesek sesaat masing-masing ditunjukkan pada Gambar 5.6 dan Gambar 5.7. Hoek (1983) kira-kira menyamakan  $m$  dengan sudut gesekan  $\phi'$  dan  $S$  dengan intersepsi kekuatan kohesif  $c'$ .



**Gambar 5. 6** Pengaruh konstanta m pada: (a) selubung keruntuhan Mohr; (b) sudut gesek sesaat  $\phi'_i$ , untuk  $S = 1$  (Hoek, 1983).



**Gambar 5. 7** Pengaruh konstanta S pada: (a) selubung kegagalan Mohr; (b) sudut gesek sesaat  $\phi'_i$ , untuk  $m = 10$ . (Setelah Hoek, 1983).

### C. Kekuatan Empirik untuk Batuan Utuh

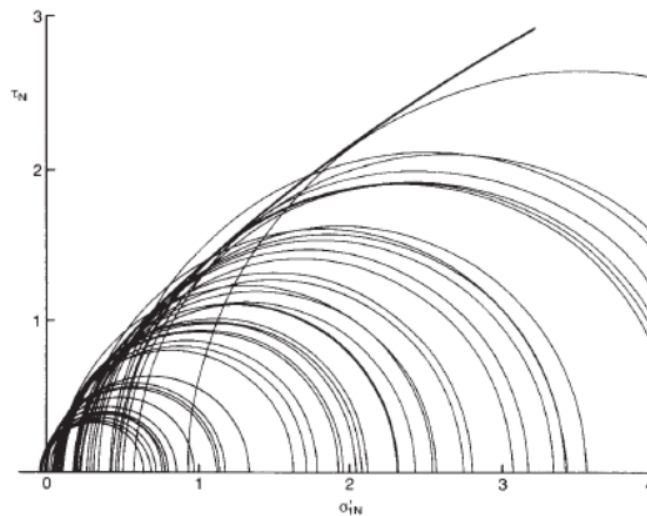
Untuk batuan utuh  $S = 1$ , dan Persamaan 5.4 menjadi:

$$\sigma'_{1N} = \sigma'_{3N} + (m\sigma'_{3N} + 1)^{1/2} \quad (5.10)$$

Data kekuatan yang dipublikasikan dan diperiksa oleh Hoek dan Brown (1980) menunjukkan bahwa nilai  $m$  meningkat seiring dengan kualitas batuan. Nilai-nilai representatif untuk jenis batuan yang berbeda diberikan di bawah ini:

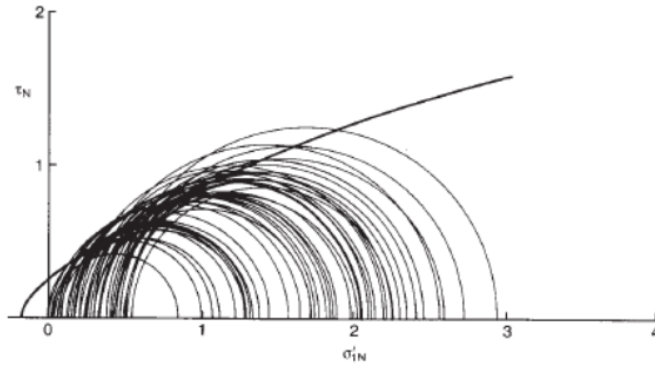
1. Kelompok a  $m \approx 7$  untuk batuan karbonat dengan belahan kristal yang berkembang baik (dolomit, batugamping, marmer);
2. Kelompok b  $m \approx 10$  untuk batuan berlempung yang mengalami litifikasi (batulumpur, batulanau, serpih, serpih);
3. Kelompok c  $m \approx 15$  untuk batuan arena dengan kristal kuat dan pembelahan kristal kurang berkembang (batupasir, kuarsit);
4. Kelompok d  $m \approx 17$  untuk batuan kristal beku polimineralis berbutir halus (andesit, dolerit, diabas, riolit);
5. Kelompok e  $m \approx 25$  untuk batuan beku polimineral berbutir kasar dan batuan metamorf (amfibolit, gabbro, gneiss, granit, norit, kuarsa-diorit).

Pada Gambar 5.8 Lingkaran tegangan Mohr pada kondisi kegagalan puncak ditunjukkan untuk lima granit utuh berbeda yang diuji di AS dan Inggris. Hal ini menunjukkan konsistensi yang sangat baik, diwakili dengan baik oleh selubung kegagalan yang diberikan oleh Persamaan 5.7, 5.8 dan 5.9, dengan nilai substitusi  $\sigma_c = 1$ ,  $m = 29.2$ ,  $S = 1$ , memberikan korelasi sebesar 0.99.



**Gambar 5.8** Lingkaran keruntuhan Mohr untuk lima sampel batu granit (Hoek, 1983).

Plot lainnya yang terkait untuk 11 batu gamping seperti pada Gambar 5.9 menunjukkan konsistensi yang jauh lebih sedikit, yang oleh Hoek (1983) dikaitkan dengan fakta bahwa istilah 'batu gamping' terlalu umum mencakup serangkaian batuan karbonat, baik organik maupun anorganik.



**Gambar 5.9** Lingkaran keruntuhan Mohr untuk 11 sampel batugamping (Hoek, 1983).

$$\sigma'_{1N} = \left( \frac{M}{B} \sigma'_{3N} + 1 \right)^B \quad (5.11)$$

dimana M dan B adalah 'konstanta' batuan, tren umumnya adalah penurunan B dengan meningkatnya kekuatan geser dan peningkatan M dengan peningkatan kekuatan. M juga tergantung pada jenis batuan. Menempatkan  $\sigma'_{3N} = 0$  menghasilkan kuat tekan uniaksial  $\sigma_c = \sigma'_{1N}$ . Rasio kuat tekan uniaksial  $\sigma_c$  terhadap kuat tarik uniaksial  $\sigma_t$  diperoleh dengan memasukkan  $\sigma'_1 = 0$ ,  $\sigma'_3 = \sigma_t$ , yang menghasilkan:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = -\frac{M}{B} \quad (5.12)$$

Kelebihan dari Persamaan 5.11 dibandingkan Persamaan 5.10 adalah bahwa persamaan tersebut dapat dipasang pada berbagai macam bentuk selubung kekuatan dengan mengubah indeks daya B. Menempatkan B = 1 menghasilkan selubung linier:

$$\sigma'_{1N} = M\sigma'_{3N} + 1 \quad (5.13)$$

untuk yang mana,

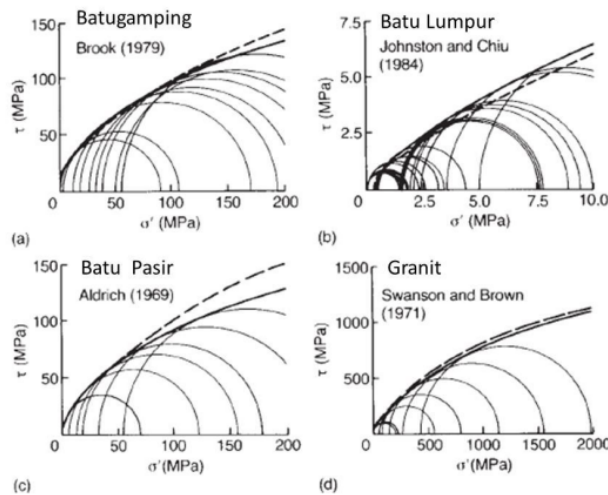
$$M = \frac{1 + \sin \phi^1}{1 - \sin \phi^1} \quad (5.14)$$

sesuai dengan kriteria Mohr – Coulomb linier yang dinormalisasi. Dengan menyesuaikan Persamaan 5.11 dengan data kekuatan tegangan efektif dari berbagai jenis tanah liat dan batuan, Johnston (1985) menemukan bahwa data tersebut cukup terwakili oleh:

$$B = 1 - 0,0172(\log \sigma_c)^2 \quad (5.15)$$

$$M = 2,065 + 0,276(\log \sigma_c)^2 \quad (5.16)$$

dimana  $\sigma_c$  dalam kPa.



**Gambar 5. 10** Lingkaran kegagalan untuk empat batuan berbeda dengan selubung nilai B dan M paling cocok' Johnston (garis padat) dan 'umum' (garis putus-putus) (Johnston, 1985).

Sebagai  $\sigma_c \rightarrow 0$ ,  $B \rightarrow 1$  dan  $M \rightarrow 2.065$ , menyiratkan selubung yang hampir linier dengan  $\varphi' = 20^\circ$  untuk tanah liat lunak yang terkonsolidasi secara normal. Pada lempung kaku yang sangat terkonsolidasi berlebihan, biasanya  $\sigma_c = 200$  kPa, menghasilkan  $B = 0,9$  dan dengan demikian selubungnya sedikit melengkung; sedangkan pada batuan keras, biasanya  $\sigma_c = 250$  MPa dan  $B = 0,5$ , yang merupakan bentuk parabola yang umum. Persamaan 5 yang tersebut sebelumnya, .16 diperoleh dengan mengasumsikan hubungan parabola antara M dan  $\log \sigma_c$ , kemudian menyesuaikannya dengan data yang tersebar luas. Ditemukan oleh Johnston (1985) bervariasi menurut jenis batuan. Untuk pengelompokan batuan yang sama seperti yang dikategorikan oleh Hoek (1983), kurva parabola yang paling sesuai menurut Johnston adalah:

Kelompok a  $M = 2,065 + 0,170(\log \sigma_c)^2 \quad (5.17a)$

Kelompok b  $M = 2,065 + 0,231(\log \sigma_c)^2 \quad (5.17b)$

$$\text{Kelompok c} \quad M = 2,065 + 0,270(\log \sigma_c)^2 \quad (5.17c)$$

$$\text{Kelompok e} \quad M = 2,065 + 0,659(\log \sigma_c)^2 \quad (5.17e)$$

Gambar 5.10 menunjukkan lingkaran tegangan Mohr yang dipublikasikan pada puncak keruntuhan untuk empat jenis batuan berbeda: batugamping, batu lumpur, batu pasir dan granit. Dalam setiap kasus, selubung garis padat yang ditunjukkan diberikan oleh Persamaan 5.11, menggunakan nilai B dan M yang paling sesuai, sedangkan selubung garis putus-putus diberikan oleh Persamaan 5.11 menggunakan nilai B dan M yang digeneralisasikan dari persamaan 5.15 hingga 5.17. Kriteria ini memprediksi variasi yang diamati secara umum dalam kekuatan tekan dan tarik uniaksial dan juga menghubungkan tanah, batuan lunak dan batuan keras. Parameter sebenarnya yang diadopsi diberikan pada Tabel 5.1.

**Tabel 5.1** Parameter paling cocok dan umum untuk empat jenis batuan.

Jenis	Kelompok	$\sigma_c$ (MPa) paling cocok	Parameter tercocok		Parameter umum	
			M	B	M	B
Batugamping	a	96	0,481	7,43	0,573	6,29
Batulumpur	b	1,3	0,75	6,16	0,833	4,3
Batupasir	c	68	0,444	11,4	0,598	8,37
Granit	e	230	0,538	15,6	0,505	21,02

### RANGKUMAN

1. Model keruntuhan batuan merupakan pengembangan dari teori rekahan Griffith.
2. Pengembangan tersebut memberikan gambaran paling cocok untuk parameter M dan B serta gambaran umum.

### UJI CAPAIAN PEMBELAJARAN

1. Untuk batuan apa yang disebut dengan selubung keruntuhan?
2. Adakah hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik?
3. Kenapa kuat geser tidak dijadikan pertimbangan utama?

### BAHAN DISKUSI

Buat dalam diskusi kelompok bahwa kuat tekan dan kuat tarik merupakan parameter yang menentukan kuat batuan, kenapa demikian?



## DAFTAR PUSTAKA

- Atkinson, J.H., 1981, Foundations and Slopes, McGraw-Hill, Maidenhead.
- Atkinson, J.H., 2000, Non-linear soil stiffness in routine design. *Géotechnique*, 50(5), 487–507.
- Balmer, G. , 1952, A general analytical solution for Mohr's envelope. *Proc. Am. Soc. Test. Mater.*, 52, 1260–71.
- Bishop, A.W. and Henkel, D.J. , 1962, The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 2nd edn, Edward Arnold, London.
- Gibson, R.E., 1953, Experimental determination of the true cohesion and angle of internal friction in clays, in *Proceedings 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 126–30.
- Hoek, E., 1968, Brittle fracture of rock, in *Rock Mechanics in Engineering Practice* (eds G. Stagg and O.C. Zienkiewicz), John Wiley and Sons, New York, pp. 99–124.
- Hoek, E., 1983, Twenty-third Rankine Lecture – Strength of jointed rock masses. *Géotechnique*, 33(3), 185–224.
- Hvorslev, M.J., 1937, *Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Boden.* (On the physical properties of undisturbed cohesive soils.) *Ingeniorvidenskabelige Skrifter*, A., No. 45, Copenhagen. English translation (1969) US Waterways Experiment Station.
- Johnston, I.W., 1985, Strength of intact geomechanical materials. *ASCE J. Geotech. Engg.*, 111(GT6), 730–49.
- Parry, R.H.G. and Nadarajah, V., 1974b, Anisotropy in a natural soft clayey silt. *Engng Geol.* 8(3), 287–309.
- Ronoatmojo, I.S., 2019, *Mekanika Batuan*, Penerbit Universitas Trisakti, ISBN 978-602-0750-08-8, 246 pp
- Ronoatmojo, I.S., dan Assegaff, A., 2023, *Pengantar Mekanika Tanah*, Penerbit Universitas Trisakti; ISBN : 978-602-0750-51-4, 183 pp.
- Roscoe, K.H., 1970, The influence of strains in soil mechanics. *Géotechnique*, 20(2), 129–70.
- Skempton, A.W., 1964, Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique*, 14(2), 77–102.
- Stroud, M.A., 1971, The behaviour of sand at low stress levels in the simple shear apparatus. PhD dissertation, Cambridge University.
- Terzaghi, K., 1936, The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. *Proceedings 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 54–6.

## BIODATA PENULIS



<sup>4</sup> Dr. Ir. Imam Setiaji Ronoatmojo, M.T. lahir di Cilacap, 1 Juli 1960. Meraih gelar Doktor dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2011 dengan disertasi “Estimasi Tetapan Anisotropi Medium Isotrop Transversal Tegak dari Difraksi Gelombang Seismik-P dengan Pendekatan Polinomial Orde-3”, mempunyai kebaruan berupa penurunan persamaan anisotropi dari fungsi difraksi, sebelumnya berupa penurunan persamaan dari fungsi refleksi. Beliau juga aktif sebagai instruktur di bidang Desain Parameter Seismik 3-D dan Geomekanika. Selama hampir 3 dekade mengabdikan diri pada sebuah perusahaan jasa minyak PT. Elnusa Tbk dengan jabatan akhir sebagai *Principal of Elnusa Petroleum School*. Setelah pensiun dari PT.Elnusa Tbk pada tahun 2015, penulis menjadi tenaga pengajar tetap di Universitas Trisakti dengan mata kuliah Geofisika Hidrokarbon, Geofisika Reservoir, Pemodelan Geostatistik, Mekanika Batuan dan Mekanika Tanah. Disamping itu sebagai pengajar tidak tetap pada Program Magister F-MIPA Universitas Indonesia pada mata kuliah Seismologi Eksplorasi dan Produksi serta Geofisika Instrumentasi. Terlibat dalam bimbingan Magister di bidang Geofisika Reservoir (UI) dan Geologi<sup>8</sup> (Universitas Trisakti). Penelitian yang pernah dilakukan penulis antara lain “Relasi Empirik Tekanan Pori dan Kecepatan Gelombang Seismik pada Lapangan Produksi di Indonesia” (2018), “Pemerian Tanggapan Modulus Elastik Medium dari Momen Tensor untuk Menentukan Implikasi Pengaruh Mekanisme 2 Koponen Tegangan di Nangroe Aceh Darussalam” (2020), “Karakteristik Poro-elastik Batuan pada Saat Terjadi Dinamika Fluida pada Lingkungan Tektonik di Nangroe Aceh Darussalam” (2021), “Pengaruh *Side Swept* pada Data Seismik dan Solusinya” (2022) dan Penelitian Hibah Dikti *multi-years* “Studi *Multivariate Analysis* untuk Solusi Problem Ketidakpastian Relasi Parameter Identifikasi Hidrokarbon pada Kasus Reservoir Karbonat” (2022-2024). Disamping itu penulis juga berprofesi sebagai konsultan di bidang Migas antara lain membantu proyek-proyek di Pertamina Hulu Energi dan KPS lainnya. Karya penulis dalam bentuk buku antara lain Mekanika Batuan (Penerbit Universitas Trisakti, 2019), Pengantar Mekanika Tanah (Penerbit Universitas Trisakti, 2023), Pemodelan Geostatistik (Penerbit Universitas Trisakti, 2020), Pengantar Seismologi Eksplorasi (Penerbit Salemba

Teknika, 2021), Geomekanika Reservoir (Penerbit Universitas Trisakti, 2022), Analisis Multivariate untuk Variabel Geospasial (Penerbit Salemba Teknik, 2022), Pemodelan Seismik (Penerbit Universitas Trisakti, 2022), Tetapan Anisotropi Seismik (Penerbit Salemba Teknik, 2023) dan penemuan metode baru berupa penurunan persamaan tetapan anisotropi berdasarkan fungsi difraksi Gelombang Seismik-P serta memperoleh Hak Cipta pada tahun 2019 HAKI No:EC0020191775, 29 Mei 2019. Sisi lain dari penulis, beliau telah lama dikenal sebagai penyair dengan puisi-puisinya “*God Punishes Me with a Quiet and Love*” serta Sajak-sajak Meditasi.



Himmes Fitra Yuda, S.T., M.T lahir di Rumbai pada tanggal 17 Mei 1989. Setelah meraih gelar S-1 di Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi, Universitas Trisakti pada tahun 2013, melanjutkan gelar S-2 di Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran dan lulus pada tahun 2017. Saat ini merupakan Dosen pada Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi, Universitas Trisakti dengan bidang keahlian Geologi Teknik dan Tata Lingkungan. Kini sedang menyelesaikan studi doktoralnya pada Bidang Geologi Teknik dan Hidrogeologi di Universitas Padjadjaran Bandung.

# Diagram Mohr

## ORIGINALITY REPORT

24%

SIMILARITY INDEX

24%

INTERNET SOURCES

3%

PUBLICATIONS

2%

STUDENT PAPERS

## PRIMARY SOURCES

1	<a href="http://pdfcoffee.com">pdfcoffee.com</a> Internet Source	17%
2	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Internet Source	3%
3	<a href="http://epdf.pub">epdf.pub</a> Internet Source	2%
4	<a href="http://www.myedisi.com">www.myedisi.com</a> Internet Source	<1%
5	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a> Internet Source	<1%
6	<a href="http://repository.its.ac.id">repository.its.ac.id</a> Internet Source	<1%
7	R. H. G. Parry. "Triaxial Compression and Extension Tests on Remoulded Saturated Clay", Géotechnique, 1960 Publication	<1%
8	<a href="http://geologi.ftke.trisakti.ac.id">geologi.ftke.trisakti.ac.id</a> Internet Source	<1%

[e-journal.trisakti.ac.id](http://e-journal.trisakti.ac.id)

9	Internet Source	<1 %
10	text-id.123dok.com Internet Source	<1 %
11	www.karyailmiah.trisakti.ac.id Internet Source	<1 %
12	fr.scribd.com Internet Source	<1 %
13	Richard H.G. Parry. "Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics", CRC Press, 2019 Publication	<1 %
14	repo.unhi.ac.id Internet Source	<1 %
15	documents.mx Internet Source	<1 %
16	vdocuments.site Internet Source	<1 %
17	Submitted to Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi Universitas Trisakti Student Paper	<1 %
18	Felipe Schaefer Santos. "Modelagem numérica de maciço rochoso cristalino escavado por túnel: respostas às variações no campo de tensões in-situ, na complexidade geológica e nos modelos constitutivos",	<1 %

# Universidade de São Paulo. Agência de Bibliotecas e Coleções Digitais, 2024

Publication

---

19	<a href="http://geoestahban.ir">geoestahban.ir</a> Internet Source	<1 %
20	<a href="http://link.springer.com">link.springer.com</a> Internet Source	<1 %
21	<a href="http://docplayer.info">docplayer.info</a> Internet Source	<1 %
22	<a href="http://repository.trisakti.ac.id">repository.trisakti.ac.id</a> Internet Source	<1 %
23	<a href="http://123dok.com">123dok.com</a> Internet Source	<1 %
24	<a href="http://lib.ui.ac.id">lib.ui.ac.id</a> Internet Source	<1 %
25	<a href="http://repository.upstegal.ac.id">repository.upstegal.ac.id</a> Internet Source	<1 %
26	<a href="http://forms.asm.apeejay.edu">forms.asm.apeejay.edu</a> Internet Source	<1 %
27	<a href="http://id.peopleperproject.com">id.peopleperproject.com</a> Internet Source	<1 %
28	Ryuji ENOSHITA, Mitsuo NOTOMI. "SWOSC-Vのばね加工により生成される集合組織", The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan, 2022	<1 %

29

[adoc.pub](http://adoc.pub)

Internet Source

<1 %

30

[archive.org](http://archive.org)

Internet Source

<1 %

31

[cvinspireconsulting.com](http://cvinspireconsulting.com)

Internet Source

<1 %

32

[muhamad-efendi.blogspot.com](http://muhamad-efendi.blogspot.com)

Internet Source

<1 %

33

[repositorio.unb.br](http://repositorio.unb.br)

Internet Source

<1 %

34

[repository.uma.ac.id](http://repository.uma.ac.id)

Internet Source

<1 %

35

[zombiedoc.com](http://zombiedoc.com)

Internet Source

<1 %

Exclude quotes Off

Exclude matches Off

Exclude bibliography Off

# Diagram Mohr

GRADEMARK REPORT

FINAL GRADE

GENERAL COMMENTS

**/100**

PAGE 1

PAGE 2

PAGE 3

PAGE 4

PAGE 5

PAGE 6

PAGE 7

PAGE 8

PAGE 9

PAGE 10

PAGE 11

PAGE 12

PAGE 13

PAGE 14

PAGE 15

PAGE 16

PAGE 17

PAGE 18

PAGE 19

PAGE 20

PAGE 21



PAGE 22

---

PAGE 23

---

PAGE 24

---

PAGE 25

---

PAGE 26

---

PAGE 27

---

PAGE 28

---

PAGE 29

---

PAGE 30

---

PAGE 31

---

PAGE 32

---

PAGE 33

---

PAGE 34

---

PAGE 35

---

PAGE 36

---

PAGE 37

---

PAGE 38

---

PAGE 39

---

PAGE 40

---

PAGE 41

---

PAGE 42

---

PAGE 43

---

PAGE 44

---

PAGE 45

---

PAGE 46

---

PAGE 47

---

PAGE 48

---

PAGE 49

---

PAGE 50

---

PAGE 51

---

PAGE 52

---

PAGE 53

---

PAGE 54

---

PAGE 55

---

PAGE 56

---

PAGE 57

---

PAGE 58

---

PAGE 59

---

PAGE 60

---

PAGE 61

---

PAGE 62

---

PAGE 63

---

PAGE 64

---

PAGE 65

---

PAGE 66

---

PAGE 67

---

PAGE 68

---

PAGE 69

---

PAGE 70

---

PAGE 71

---

PAGE 72

---

PAGE 73

---

