

— BUKU AJAR —

MEKANIKA BATUAN

Dr. Supandi S.T., M.T.



MEKANIKA BATUAN

MEKANIKA BATUAN

Dr. Supandi, S.T., M.T.



MEKANIKA BATUAN

Copyright © 2022

Penulis:

Dr. Supandi, S.T., M.T

Editor:

Riana Kusumawati

Setting Layout:

Riana Kusumawati

Desain Sampul:

Supandi

Reno Favian

ISBN: 978-623-8221-94-3

IKAPI: 435/JBA/2022

Ukuran: 15.5 cm x 23 cm; xii + 133 hlm

Cetakan Pertama, Mei 2022

Hak cipta dilindungi Undang-Undang dilarang menduplikasi, memfotokopi, dan memperbanyak sebagian atau seluruh bagian buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit dan penulis.

Penerbit:

CV. Mega Press Nusantara

Alamat Redaksi:

Komplek Perumahan Janatipark III, Cluster Copernicus Blok D-07, Cibeusi, Jatinangor,
Kabupaten Sumedang, Jawa Barat 45363

0812-1208-8836

www.megapress.co.id

penerbitmegapress@gmail.com

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Kata Pengantar

Bismillahir Rahmanir Rahim.

Saya dengan senang hati mempersembahkan buku ini kepada pembaca yang ingin memahami dan mengenal lebih dalam tentang mekanika tanah batuan. Buku ini dirancang untuk memberikan pemahaman tentang definisi batuan, karakteristik batuan serta sifat fisik dan mekanik batuan.

Buku ini juga membahas tentang pola tegangan dan regangan yang bekerja pada batuan. Pola keruntuhan batuan juga menjadi salah satu bahasan selain klasifikasi batuan. Buku mekanika batuan ini memberikan ilmu dasar tentang batuan. Dengan membaca buku ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam kegiatan engineering desain untuk berbagai kegiatan konstruksi yg melibatkan batuan.

Saya berharap buku ini dapat menjadi referensi yang berguna bagi mahasiswa, akademisi, praktisi, dan masyarakat luas yang tertarik pada bidang mekanika batuan. Saya ingin berterima kasih kepada semua pihak dan penerbit yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku dan menerbitkan buku ini, serta kepada pembaca yang telah memberikan dukungan dan masukan selama proses penulisan buku.

Selamat membaca dan semoga buku ini dapat memberikan wawasan baru dan inspirasi bagi Anda semua.

Penulis

Daftar Isi

Kata Pengantar	iii
Daftar Isi	iv
Bab 1 Batuan dan Mekanika Batuan	1
1. Definisi Batuan	1
2. Batuan dan Riwayat Pembentukannya.....	2
3. Komposisi Batuan	4
4. Definisi Mekanika Batuan	4
5. Sifat Batuan.....	6
6. Beberapa Ciri dari Mekanika Batuan	8
7. Beberapa Persoalan dalam Mekanika Batuan.....	8
8. Ruang Lingkup Mekanika Batuan.....	11
9. Sejarah Perkembangan Mekanika Batuan	12
Bab 2 Tegangan (<i>Stress</i>) dan Regangan (<i>Strain</i>)	19
1. Tegangan (<i>Stress</i>) dan Regangan (<i>Strain</i>).....	19
2. Analisis Tegangan pada Bidang	22
3. Lingkaran Mohr dari Tegangan.....	25
4. Analisis Regangan.....	26
Bab 3 Penentuan Sifat Fisik Batuan di Laboratorium	29
1. Pembuatan Contoh	29
2. Penimbangan Berat Contoh.....	29
3. Sifat Fisik Batuan.....	30
4. Penentuan Sifat Mekanik Batuan di Laboratorium	30
5. Uji Kuat Tarik Tak Langsung (<i>Indirect Tensile Strength Test</i>).....	36
6. Uji Point Load	36
7. Uji Triaksial	37
8. Uji Punch Shear	39
9. Uji Geser Langsung.....	39
10. Uji Kecepatan Rambut Gelombang Ultra Sonik	40
11. Penggunaan Sifat Mekanik Batuan Hasil Uji Laboratorium	42

12. Penentuan Sifat Mekanik Batuan In-Situ	42
13. Uji Beban Batuan	43
14. Uji Geser Blok	44
15. Uji Triaksial In-Situ	47
16. Penggunaan Sifat Mekanik Batuan Hasil Uji In-Situ	49
17. Penentuan Jumlah Contoh.....	50
Bab 4 Perilaku Batuan	53
1. Perilaku Batuan	53
2. Elastik dan Elasto-Plastik.....	53
3. Creep dan Relaksasi Batuan.....	56
4. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Perilaku Batuan Elastik Linier dan Isotrop	57
5. Hubungan Tegangan dan Regangan pada Bidang untuk Perilaku Batuan Elastik Linier dan Isotrop.....	59
Bab 5 Kriteria Failure Batuan.....	61
1. Kriteria Failure.....	61
2. Teori Mohr	62
3. Kriteria Mohr-Coulomb	63
4. Kriteria Tegangan Tarik Maksimum.....	66
5. Kriteria Tegangan Geser Maksimum.....	66
Bab 6 Distribusi Tegangan di Sekitar Terowongan	67
1. Distribusi Tegangan Sebelum dibuat Terowongan.....	67
2. Distribusi Tegangan di Sekitar Terowongan untuk Keadaan yang Paling Ideal	68
3. Distribusi Tegangan di Sekitar Terowongan untuk Tegangan Mula-Mula Tidak Hidrostatik	71
4. Distribusi Tegangan di Sekitar Terowongan untuk Batuan yang Tidak Isotrop (Orthotrop)	75
5. Distribusi Tegangan di Sekitar Terowongan untuk Batuan yang Mempunyai Perilaku Plastik Sempurna di Sekeliling Terowongan	78
6. Distribusi Tegangan di Sekitar Terowongan yang Berbentuk Tidak Bulat untuk Keadaan yang Paling Ideal	80

Bab 7 Pengukuran Tegangan <i>In-Situ</i> di dalam Massa Batuan	83
1. Pendahuluan	83
2. Metode Rosette Deformasi	85
3. Metode <i>Flat Jack</i>	86
4. Metode <i>Overcoring</i>	93
5. Metode Hydraulic Fracturing	98
Bab 8 Pengukuran Tegangan <i>In-Situ</i> di dalam Massa Batuan.....	105
1. Klasifikasi Batuan.....	105
2. Metode <i>Rock Load Classification</i>	108
3. Klasifikasi <i>Stand-Up Time</i>	109
4. Indeks <i>Rock Quality Designation</i> (Rqd).....	112
5. Konsep <i>Rock Structure Rating</i> (Rsr)	114
6. Klasifikasi Geomekanika (Sistem Rmr)	118
7. Klasifikasi Sistem Q	124

Daftar Tabel

Tabel 3.1.	Jenis uji sifat mekanik di laboratorium dan penggunaan parameter hasil ujinya	42
Tabel 3.2.	Hasil uji triaksial in-situ	49
Tabel 3.3.	Jenis uji sifat mekanik in-situ dan penggunaan parameter hasil ujinya	49
Tabel 6.1.	Tegangan ekstrim pada sumbu lubang bukaan berbentuk elips (Duffaut, 1981)	74
Tabel 6.2.	Perbandingan tegangan yang bekerja pada tiap titik garis keliling terowongan	81
Tabel 8.1.	Klasifikasi massa batuan yang saat ini banyak digunakan.....	107
Tabel 8.2.	Original Terzaghi's Rock Load Classification (1946)	110
Tabel 8.3.	Klasifikasi Rock Load Terzaghi yang umum digunakan	111
Tabel 8.4.	Perbandingan dari RQD dan kebutuhan penyangga untuk terowongan dengan lebar 6 m	113
Tabel 8.5.	Rock Structure Rating, Parameter A : Daerah Geologi Umum	115
Tabel 8.6.	Rock Structure Rating, Parameter B : Pola Kekar, Arah Penggalian	116
Tabel 8.7.	<i>Rock Structure Rating</i> , Parameter C : Air Tanah, Kondisi Kekar ...	116
Tabel 8.8.	Parameter Klasifikasi dan Rating-nya	119
Tabel 8.9.	Efek orientasi jurus dan kemiringan diskontinuitas di dalam penerowongan	120
Tabel 8.10.	Penyesuaian rating untuk orientasi bidang-bidang diskontinuitas	120
Tabel 8.11.	Kelas massa batuan yang ditentukan dari rating total	121
Tabel 8.12.	Arti dari kelas massa batuan	121
Tabel 8.13.	Petunjuk untuk penggalian dan penyangga terowongan batuan dengan sistem RMR	123

Tabel 8.14. Deskripsi Sistem Q dan Rating-nya : Parameter RQD, Jn, Jr, Ja, SRF, Jw	126
Tabel 8.15. Harga ESR	128
Tabel 8.16. Sistem Q : Ukuran penyangga	130
Tabel 8.17. Sistem Q : Ukuran penyangga untuk kisar Q dari 1 sampai 10	131
Tabel 8.18. Sistem Q : Ukuran penyangga untuk kisar Q dari 0,1 sampai 1,0	132
Tabel 8.19. Sistem Q : Ukuran penyangga untuk kisar Q dari 0,001 sampai 0,1	132

Daftar Gambar

Gambar 1.1.	Proses pembentukan batuan	2
Gambar 1.2.	Matriks interaksi mekanika batuan dan rekayasa batuan yang menunjukkan subyek-subyek utama dan interaksinya (Hudson dan Harrison, 1990).....	7
Gambar 1.3.	Asumsi batuan ekuivalen untuk mempermudah perhitungan di dalam mekanika batuan.....	8
Gambar 1.4.	Sistem batuan <i>single body</i> dan <i>multiple body</i> (Jumikis, 1983)	9
Gambar 1.5.	Beberapa aktifitas manusia pada batuan	10
Gambar 2.1.	Batang prisma mengalami tarikan	19
Gambar 2.2.	Komponen-komponen tegangan di sebuah empat persegi panjang	20
Gambar 2.3.	Diagram tegangan pada bidang	22
Gambar 2.4.	Lingkaran Mohr dari tegangan.....	24
Gambar 2.5.	Hubungan antara regangan dan <i>displacement</i>	27
Gambar 3.1.	Penyebaran tegangan di dalam contoh batu dan bentuk pecahannya pada uji kuat tekan	31
Gambar 3.2.	Kondisi tegangan di dalam contoh untuk berbeda.....	32
Gambar 3.3.	Regangan yang dihasilkan dari uji kuat tekan batuan	32
Gambar 3.4.	Pengukuran perpindahan menggunakan <i>dial gauge</i> (a) dan <i>electric strain gauge</i> (b).....	33
Gambar 3.5.	Kurva tegangan-regangan hasil uji kuat tekan	33
Gambar 3.6.	Beberapa definisi modulus Young	34
Gambar 3.7.	Definisi modulus Young menurut Hawkes.....	35
Gambar 3.8.	Kurva tegangan-regangan contoh batu kapur	35
Gambar 3.9.	Uji kuat tarik.....	36
Gambar 3.10.	Bentuk contoh batu untuk point load test	36
Gambar 3.11.	Peralatan untuk point load test.....	37
Gambar 3.12.	Uji triaksial.....	37
Gambar 3.13.	Lingkaran Mohr dan kurva intrinsic dari hasil uji triaksial....	28
Gambar 3.14.	Pengaruh besarnya tekanan pemampatan (σ_3) terhadap kekuatan batuan (Von Karman, 1911)	38
Gambar 3.15.	Uji punch shear	39

Gambar 3.16. Uji geser langsung dan garis <i>Coulomb's shear strength</i>	40
Gambar 3.17. Bertambahnya jumlah kekar dengan bertambah besarnya ukuran contoh (Hoek & Brown, 1980).....	43
Gambar 3.18. Peralatan untuk uji beban batuan.....	45
Gambar 3.19. Diagram tekanan-perpindahan dari jacking test.....	45
Gambar 3.20. Diagram regangan-kedalaman dari jacking test.....	46
Gambar 3.21. Peralatan uji geser blok.....	47
Gambar 3.22. Peralatan uji triaksial in-situ	48
Gambar 3.23. Kurva jumlah contoh terhadap ketelitian relatif untuk $t = 2$ dan $q = 0,5$	51
Gambar 4.1. Kurva tegangan-regangan dan regangan-waktu untuk perilaku batuan elastik linier dan elastik non linier.....	53
Gambar 4.2. Kurva tegangan-regangan dan regangan-waktu untuk perilaku batuan elasto-plastik.....	54
Gambar 4.3. Kurva tegangan-regangan untuk perilaku batuan elasto-plastik sempurna	54
Gambar 4.4. Kurva tegangan-regangan untuk perilaku batuan <i>elastik fragile</i>	54
Gambar 4.5. Tahap utama perilaku dari sebuah batu (Bieniawski, 1984)....	55
Gambar 4.6. Pengaruh waktu uji terhadap kekuatan dan bentuk kurva tegangan-regangan batuan (Bieniawski, 1984)	55
Gambar 4.7. Daerah terjadinya creep pada kurva tegangan-regangan dan regangan-waktu	56
Gambar 4.8. Daerah terjadinya relaksasi pada kurva tegangan-regangan dan regangan-waktu	56
Gambar 4.9. Tegangan uniaksial dan triaksial pada batuan.....	57
Gambar 4.10. Regangan bidang.....	59
Gambar 4.11. Tegangan bidang	60
Gambar 4.12. Symmetrical revolution.....	60
Gambar 5.1. Ruang dari tegangan-tegangan hasil uji klasik di dalam mekanika batuan	62
Gambar 5.2. Kriteria Mohr : $\tau = f(\sigma)$	62
Gambar 5.3. Kurva Mohr sebagai envelope dari lingkaran-lingkaran Mohr pada saat <i>failure</i>	63
Gambar 5.4. Kekuatan geser pada patahan.....	63
Gambar 5.5. Kriteria Mohr-Coulomb	63

Gambar 5.6.	Kriteria Mohr-Coulomb (kasus umum)	65
Gambar 5.7.	Kriteria Mohr-Coulomb jika $C = 0$	65
Gambar 5.8.	Kriteria Mohr-Coulomb jika $\phi = 0$ (pure cohesive material) ...	65
Gambar 5.9.	Penentuan faktor keamanan.....	66
Gambar 6.1.	Koordinat silindrik	68
Gambar 6.2.	Perhitungan distribusi tegangan di sekitar terowongan.....	68
Gambar 6.3.	Keadaan tegangan sebelum dan sesudah penggalian.....	70
Gambar 6.4.	Distribusi tegangan di sekitar terowongan	71
Gambar 6.5.	Kondisi tegangan awal uniaksial.....	71
Gambar 6.6.	Tegangan tangensial pada kontur sebuah terowongan berbentuk lingkaran dengan tegangan mula-mula yang <i>uniaksial</i> (Bonvallet, 1976).....	72
Gambar 6.7.	Distribusi tegangan pada sumbu simetri untuk tegangan mula-mula yang uniaksial (Duffaut, 1981)	72
Gambar 6.8.	Kondisi tegangan awal biaksial	73
Gambar 6.9.	Kuat tekan dari sebuah batuan berlapis yang merupakan fungsi dari sudut perlapisan	75
Gambar 6.10.	Evolusi sebuah lubang bukaan berbentuk lingkaran di dalam massa batuan berlapis (Duffaut, 1981)	76
Gambar 6.11.	Daerah tarikan pada massa batuan berlapis (Duffaut,1981) ...	76
Gambar 6.12.	Kuat tekan batuan schist pada terowongan di PLTA Lanoux – L’Hospitalet Perancis (Duffaut, 1981)	77
Gambar 6.13.	Terowongan di PLTA Lanoux - L’Hospitalet Perancis (Duffaut, 1981).....	77
Gambar 6.14.	Tegangan di sekitar lubang bukaan bulat untuk batuan elastik dengan tegangan mula-mula hidrostatis	78
Gambar 6.15.	Tegangan di sekitar lubang bukaan bulat dengan perilaku batuan plastik sempurna di sekelilingnya	79
Gambar 7.1.	Metode rosette deformasi	86
Gambar 7.2.	Kurva tegangan-regangan pada uji flat jack.....	88
Gambar 7.3.	Prinsip uji flat jack	89
Gambar 7.4.	Pemasangan flat jack dan titik-titik ukur pada dinding terowongan.....	91
Gambar 7.5.	Metode flat jack pada kedalaman tertentu	92
Gambar 7.6.	Peralatan untuk melakukan pengukuran tegangan in-situ dengan metode <i>flat jack</i>	93

Gambar 7.7.	Contoh uji <i>flat jack</i> di terowongan Rove (Perancis)	93
Gambar 7.8.	Sistem tegangan yang ada di dalam massa batuan.....	95
Gambar 7.9.	Penempatan dispositif pengukuran perpindahan (Sel University of Liege).....	97
Gambar 7.10.	Deformasi radial dan deformasi longitudinal pada saat <i>overcoring</i>	98
Gambar 7.11.	Contoh peralatan yang digunakan untuk uji <i>hydraulic fracturing</i> skala kecil	100
Gambar 7.12.	Sistem <i>double packer</i> untuk uji <i>hydraulic fracturing</i> di dalam lubang bor.....	100
Gambar 7.13.	Skema dari dua tipe perilaku batuan pada saat <i>hydraulic fracturing</i>	101
Gambar 7.14.	Interpretasi dari uji <i>hydraulic fracturing</i>	102
Gambar 7.15.	Kurva <i>hydraulic fracturing</i> di dalam <i>bituminous schist</i>	103
Gambar 7.16.	Kurva <i>hydraulic fracturing</i> , uji dilakukan pada batu pasir <i>schisteux</i> , tegangan minimal 9 MPa, pada bidang perlapisan tegangan yang diukur adalah 20 MPa	104
Gambar 7.17.	Orientasi rekahan yang diambil dengan suatu alat (sistem Pajari)	104
Gambar 8.1.	Konsep beban batuan terowongan oleh Terzaghi (1946)	108
Gambar 8.2.	Prosedur untuk pengukuran dan perhitungan RQD (Deere, 1989)	112
Gambar 8.3.	Konsep RSR : Kurva penyangga untuk terowongan berdiameter 7,3 m.....	118
Gambar 8.4.	Hubungan antara <i>stand-up time</i> dengan <i>span</i> untuk berbagai kelas massa batuan.....	122
Gambar 8.5.	Formulir data masukan untuk klasifikasi massa batuan	124
Gambar 8.6.	Hubungan antara dimensi ekuivalen dengan kualitas massa batuan (Barton dkk, 1974)	130

BATUAN dan MEKANIKA BATUAN

1. DEFINISI BATUAN

Berbagai definisi dari batuan sebagai objek dari mekanika batuan telah diberikan oleh para ahli dari berbagai disiplin ilmu yang saling berhubungan.

1.1. Menurut Para Geologian

- a. Batuan adalah susunan mineral dan bahan organik yang bersatu membentuk kulit bumi.
- b. Batuan adalah semua material yang membentuk kulit bumi yang dibagi atas:
 - batuan yang terkonsolidasi (*consolidated rock*),
 - batuan yang tidak terkonsolidasi (*unconsolidated rock*).

1.2. Menurut Para Ahli Teknik Sipil Khususnya Ahli Geoteknik

- a. Istilah batuan hanya untuk formasi yang keras dan padat dari kulit bumi.
- b. Batuan adalah suatu bahan yang keras dan koheren atau yang telah terkonsolidasi dan tidak dapat digali dengan

cara biasa, misalnya dengan cangkul dan belincong.

1.3. Menurut Talobre

Menurut Talobre, orang yang pertama kali memperkenalkan Mekanika Batuan di Perancis pada tahun 1948, batuan adalah material yang membentuk kulit bumi termasuk fluida yang berada didalamnya (seperti air, minyak dan lain-lain).

1.4. Menurut ASTM

Batuan adalah suatu bahan yang terdiri dari mineral padat (*solid*) berupa massa yang berukuran besar ataupun berupa fragmen-fragmen.

1.5. Secara Umum

Batuan adalah campuran dari satu atau lebih mineral yang berbeda, tidak mempunyai komposisi kimia tetap.

.....
 Dari definisi diatas dapat disimpulkan bahwa batuan tidak sama dengan tanah.

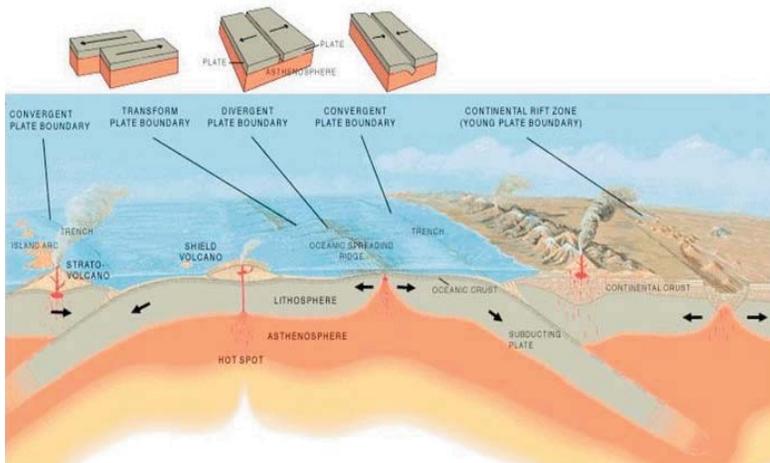
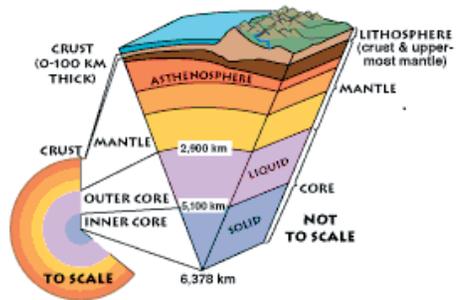
Tanah dikenal sebagai material yang "mobile", rapuh dan letaknya dekat dengan permukaan bumi.

2.1. Batuan Beku

Batuan beku adalah batuan yang terbentuk akibat membekunya magma pada waktu perjalanannya ke permukaan bumi. Magma adalah cairan silikat yang panas dan pijar yang terdiri dari unsur O, Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K dan sebagainya. Hasil dari rekristalisasi magma tersebut membentuk berbagai macam jenis mineral dan mengikuti aturan tingkat kristalisasi dari

2. BATUAN DAN RIWAYAT PEMBENTUKANYA

Menurut teori Tektonik Lempeng, bagian luar dari kulit Bumi atau litosfera terpecah menjadi beberapa lempeng besar terdiri dari 10 lempeng utama yang bergerak satu sama lain dengan kecepatan berkisar antara 1 - 10 cm/tahun Konvergen, Divergen dan Berpapasan. (Gambar 1)



Gambar 1.1. Proses pembentukan batuan

magma. Bowen menyusun urutan kristalisasi dari mineral-mineral utama pembentuk batuan beku yang dikenal sebagai *Seri Reaksi Bowen*:

Batuan beku berdasarkan genesa atau tempat terbentuknya dapat dibedakan menjadi 2 kelompok:

- a. Batuan beku intrusi; batuan beku yang membeku di dalam bumi, yang menghasilkan 2 jenis batuan beku yaitu:
 - i. **Batuan hypabisal**
batuan beku yang membeku di dalam bumi pada kedalaman menengah-dangkal.
 - ii. **Batuan plutonik**
batuan beku yang membeku jauh di dalam bumi.
- b. Batuan beku ekstrusi: batuan beku yang membeku di permukaan/di dekat permukaan bumi, yang menghasilkan batuan beku vulkanik

2.2. Batuan Sedimen

Hasil pengendapan dari proses mekanis, kimiawi atau organik yang kemudian menjadi kompak, keras dan berlapis. Dua tipe sedimen yaitu: detritus dan kimiawi. Detritus terdiri dari partikel-partikel padat hasil dari pelapukan mekanis. Sedimen kimiawi terdiri dari mineral sebagai hasil kristalisasi larutan dengan proses inorganik atau aktivitas organisme. Partikel sedimen diklasifikasikan menurut ukuran

butir, *gravel* (termasuk *bolder*, *cobble* dan *pebble*), pasir, lanau, dan lempung.

2.3. Batuan Metamorf

Batuan sebelumnya (beku, sedimen) mengalami perubahan komposisi kimia (isokimia) tanpa melalui fasa cair (dalam keadaan padat) & terbentuk mineral baru akibat proses perubahan tekanan (P), temperatur (T) atau keduanya. Batuan metamorfik umumnya terjadi dibawah permukaan akibat panas (T), tekanan (P) dan aktivitas fluida; Panas dari intrusi magma adalah sumber utama yang menyebabkan metamorfosa. Tekanan terjadi diakibatkan oleh beban perlapisan diatas (*lithostatic pressure*) atau tekanan diferensial sebagai hasil berbagai stress misalnya tektonik stress (*differential stress*). Fluida yang berasal dari batuan sedimen dan magma dapat mempercepat reaksi kimia yang berlangsung pada saat proses metamorfosa yang dapat menyebabkan pembentukan mineral baru. Pada prinsipnya batuan metamorfosa diklasifikasikan berdasarkan tekstur.

Tekstur foliasi terjadi akibat orientasi dari mineral, sedangkan non-foliasi yang tidak memperlihatkan orientasi mineral. Batuan metamorfik umumnya terjadi didalam zona metamorfosa sebagai akibat perubahan kondisi tekanan (P) dan temperatur (T) Fasies metamorfosa dicirikan

oleh mineral atau himpunan mineral yang mencirikan sebaran T dan P tertentu.

- a) Metamorfosa dapat terjadi disetiap kondisi tektonik, tetapi yang paling umum dijumpai pada daerah *kovergeni lempeng*
- b) Batuan metamorfik berfoliasi membentuk urutan berdasarkan besar butir dan/atau perkembangan foliasi, dari slate yang berbutir halus ke filit dan skeis yang berbutir kasar, gneis dengan lapisan-2 mineral yang terpisah.
- c) *Amphibolit* adalah batuan metamorfik yang berfoliasi dan berbutir kasar dimana batuan asalnya adalah batuan berkomposisi mafik
- d) Marmor, kwarsit, batu sabak dan *hornfels* adalah batuan metamorfik non-foliasi.
- e) Marmer, *slate*, grafit, *talk* dan asbes adalah batuan metamorfik yang juga merupakan mineral industri.

3. KOMPOSISI BATUAN

Kulit bumi, 99 % dari beratnya terdiri dari 8 unsur: O, Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg, dan H.

Komposisi dominan dari kulit bumi tersebut adalah:

SiO ₂ = 59,8 %	FeO = 3,39 %
Al ₂ O = 14,9 %	Na ₂ O = 3,25 %
CaO = 4,9 %	K ₂ O = 2,98 %
MgO = 3,7 %	Fe ₂ O ₃ = 2,69 %
	H ₂ O = 2,02 %

Batuan terdiri dari bagian yang padat baik berupa kristal maupun yang tidak mempunyai bentuk tertentu dan bagian kosong seperti pori-pori, *fissure*, *crack*, *joint*, dll.

4. DEFINISI MEKANIKA BATUAN

Definisi Mekanika Batuan telah diberikan oleh beberapa ahli atau komisi-komisi yang bergerak di bidang ilmu-ilmu tersebut.

4.1. Menurut Talobre

Mekanika batuan adalah sebuah teknik dan juga sains yang tujuannya adalah mempelajari perilaku (*behavior*) batuan di tempat asalnya untuk dapat mengendalikan pekerjaan-pekerjaan yang dibuat pada batuan tersebut (seperti penggalian dibawah tanah dan lain-lainnya).

Untuk mencapai tujuan tersebut, Mekanika Batuan merupakan gabungan dari:

Teori
+
pengalaman
+
pekerjaan/pengujian di
laboratorium
+
pengujian *in-situ*

Sehingga mekanika batuan tidak sama dengan ilmu geologi yang didefinisikan

oleh Talobre sebagai sains deskriptif yang mengidentifikasi batuan dan mempelajari sejarah dari batuan.

Demikian juga mekanika batuan tidak sama dengan ilmu geologi terapan. Ilmu geologi terapan banyak mengemukakan problem-problem yang paling sering dihadapi oleh para geologiwan di proyek-proyek seperti proyek bendungan, terowongan. Dengan mencari analogi-analogi, terutama dari proyek-proyek yang sudah dikerjakan dapat menyelesaikan kesulitan-kesulitan yang dihadapi pada proyek yang sedang dikerjakan. Meskipun penyelesaian ini masih secara empiris dan kualitatif.

4.2. Menurut Coates

Menurut Coates, seorang ahli mekanika batuan dari Kanada:

- a. Mekanika adalah ilmu yang mempelajari efek dari gaya atau tekanan pada sebuah benda. Efek ini bermacam-macam, misalnya percepatan, kecepatan, perpindahan.
- b. Mekanika batuan adalah ilmu yang mempelajari efek dari gaya terhadap batuan. Efek utama yang menarik bagi para geologiwan adalah perubahan bentuk.

Para ahli geofisika tertarik pada aspek dinamis dari pada perubahan volume dan bentuk yaitu gelombang seismik.

Bagi para insinyur, mekanika batuan adalah:

- analisis dari pada beban atau gaya yang dikenakan pada batuan,
- analisis dari dampak dalam yang dinyatakan dalam tegangan (*stress*), regangan (*strain*) atau energi yang disimpan,
- analisis akibat dari dampak dalam tersebut, yaitu rekahan (*fracture*), aliran atau deformasi dari batuan.

4.3. Menurut US National Committee On Rock Mechanics (1984)

Mekanika batuan adalah ilmu pengetahuan yang mempelajari tentang perilaku (*behavior*) batuan baik secara teoretis maupun terapan, merupakan cabang dari ilmu mekanika yang berkenaan dengan sikap batuan terhadap medan-medan gaya pada lingkungannya.

4.4. Menurut Budavari

Mekanika batuan adalah ilmu yang mempelajari mekanika perpindahan padatan untuk menentukan distribusi gaya-gaya dalam dan deformasi akibat gaya luar pada suatu benda padat.

Hampir semua mekanika perpindahan benda padat didasarkan atas teori kontinum. Konsep kontinum adalah fiksi mate-

matik yang tergantung pada struktur molekul material yang digantikan oleh suatu bidang kontinum yang perilaku matematikanya identik dengan media aslinya.

Material ekivalennya dianggap homogen, mempunyai sifat-sifat mekanik yang sama pada semua titik. Penyederhanaannya adalah bahwa semua sifat mekaniknya sama ke semua arah pada suatu titik di dalam suatu batuan.

4.5. Menurut Hudson dan Harrison

Mekanika batuan adalah ilmu yang mempelajari reaksi batuan yang apabila padanya dikenai suatu gangguan. Dalam hal material alam, ilmu ini berlaku untuk masalah deformasi suatu struktur geologi, seperti bagaimana lipatan, patahan, dan rekahan berkembang begitu tegangan terjadi pada batuan selama proses geologi.

Beberapa tipe rekayasa yang melibatkan mekanika batuan adalah pekerjaan sipil, tambang, dan perminyakan.

Topik utama mekanika batuan adalah batuan utuh, struktur batuan, tegangan, aliran air, dan rekayasa, yang ditulis secara diagonal dari kiri atas ke kanan bawah pada Gambar 2. Garis ini sering disebut sebagai diagonal utama. Semua kotak lainnya menunjukkan interaksi antara satu dengan lainnya.

4.6. Secara Umum

.....
Mekanika batuan adalah ilmu yang mempelajari sifat dan perilaku batuan bila terhadapnya dikenakan gaya atau tekanan.
.....

5. SIFAT BATUAN

Sifat batuan yang sebenarnya di alam adalah:

5.1. Heterogen

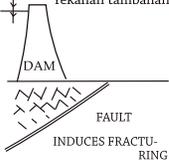
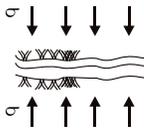
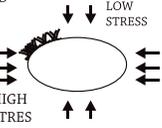
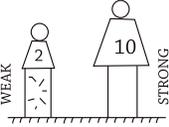
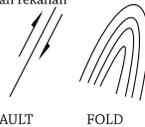
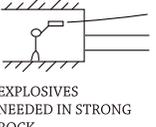
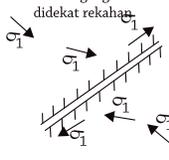
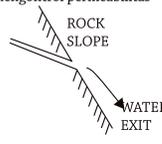
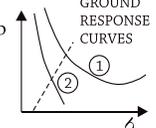
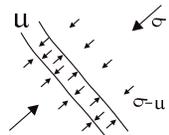
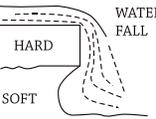
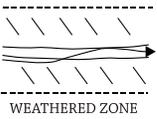
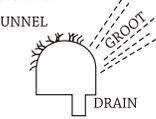
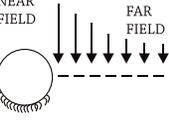
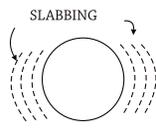
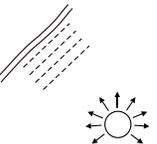
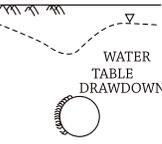
- Jenis mineral pembentuk batuan yang berbeda.
- Ukuran dan bentuk partikel/butir berbeda di dalam batuan.
- Ukuran, bentuk, dan penyebaran *void* berbeda di dalam batuan.

5.2. Diskontinu

Massa batuan di alam tidak kontinu (*discontinue*) karena adanya bidang-bidang lemah (*crack, joint, fault, fissure*) di mana kekekrapan, perluasan dan orientasi dari bidang-bidang lemah tersebut tidak kontinu.

5.3. Anisotrop

Karena sifat batuan yang heterogen, *discontinue*, anisotrope maka untuk dapat menghitung secara matematis misalnya sebuah lubang bukaan yang disekitarnya

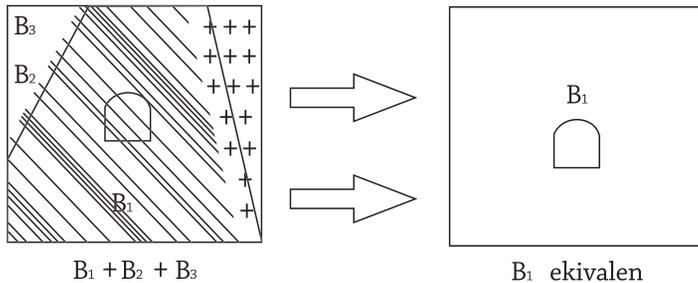
<p>TEGANGAN & REGANGAN</p>	<p>Rekahan terbentuk jika kekuatan batuan dilampau</p>  <p>TUNNEL</p>	<p>Tegangan menyebabkan rekahan tambahan</p>  <p>DAM FAULT INDUCES FRACTURING</p>	<p>Medan tegangan mengubah permeabilitas kekar</p> 	<p>Rancangan lubang bukan memperhitungkan tegangan <i>in-situ</i></p>  <p>LOW STRESS HIGH STRESS</p>
<p>Batuan kuat dapat menahan tegangan tinggi</p>  <p>WEAK 2 STRONG 10</p>	<p>BATUAN "INTACT"</p>	<p>Kekuatan & kegetasan mempengaruhi pembentukan rekahan</p>  <p>FAULT FOLD</p>	<p>Fabric batuan mencegah aliran air</p>  <p>STONE ROOF</p>	<p>Kekuatan mempengaruhi metoda penggalian</p>  <p>EXPLOSIVES NEEDED IN STRONG ROCK</p>
<p>Perubahan tegangan utama didekat rekahan</p> 	<p>Kontinu menjadi tidak kontinu</p>  <p>CONTINUUM DISCONTINUUM</p>	<p>STRUKTUR BATUAN</p>	<p>Bidang diskontinu biasanya mengontrol permeabilitas</p>  <p>ROCK SLOPE WATER EXIT</p>	<p>Struktur batuan menentukan metode penyanggaan</p>  <p>GROUND RESPONSE CURVES 1 2</p>
<p>Penurunan tegangan oleh tekanan air</p> 	<p>Pelemahan dan disintegrasi batuan</p>  <p>WATER FALL HARD SOFT</p>	<p>Erosi pada bidang diskontinu</p>  <p>WEATHERED ZONE</p>	<p>ALIRAN AIR</p>	<p>Apakah dibutuhkan penyaliran selama konstruksi ?</p>  <p>TUNNEL DRAIN GROOT</p>
<p>Perubahan kondisi tegangan disekitar lubang bukaan NEAR FIELD FAR FIELD</p> 	<p>Kerusakan batuan <i>intact</i> disektor lubang bukaan</p>  <p>SLABBING</p>	<p>Kerusakan disekitar bidang diskontinu</p> 	<p>Lubang bukaan menurunkan muka air tanah</p>  <p>WATER TABLE DRAWDOWN</p>	<p>REKAYASA</p>

Gambar 1.2. Matriks interaksi mekanika batuan dan rekayasa batuan yang menunjukkan subyek-subyek utama dan interaksinya (Hudson dan Harrison, 1990)

terdiri dari batuan B1, B2, B3, diasumsikan batuan ekuivalen B' sebagai pengganti batuan B1, B2, B3 yang mempunyai sifat homogen, kontinu dan isotrop (Gambar 3).

6. BEBERAPA CIRI DARI MEKANIKA BATUAN

- a. Dalam ukuran besar, solid dan massa batuan yang kuat/keras, maka batuan dapat dianggap kontinu.



Gambar 1.3. Asumsi batuan ekuivalen untuk mempermudah perhitungan di dalam mekanika batuan

- b. Bagaimanapun juga karena keadaan alamiah dan lingkungan geologi, maka batuan tidak kontinu (diskontinu) karena adanya kekar, *fissure*, *schistosity*, *crack*, *cavities* dan diskontinuitas lainnya. Untuk kondisi tertentu, dapat dikatakan bahwa mekanika batuan adalah mekanika diskontinu atau mekanika dari struktur batuan.
- c. Secara mekanika, batuan adalah sistem "*multiple body*" (Gambar 4).
- d. Analisis mekanika tanah dilakukan pada bidang, sedang analisis meka-

nika batuan dilakukan pada bidang dan ruang.

- e. Mekanika batuan dikembangkan secara terpisah dari mekanika tanah, tetapi ada beberapa yang tumpang tindih.
- f. Mekanika batuan banyak menggunakan:
 - teori elastisitas,
 - teori plastisitas,

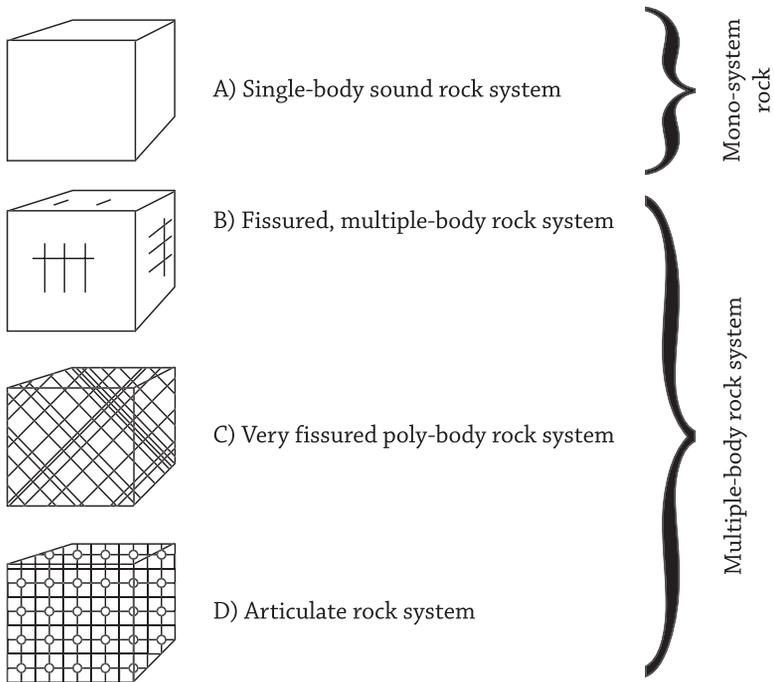
- mempelajari batuan, sistem struktur batuan secara eksperimen.

7. BEBERAPA PERSOALAN DALAM MEKANIKA BATUAN

Beberapa persoalan di dalam mekanika batuan akan timbul dan erat hubungannya dengan aktifitas yang dilakukan oleh manusia pada batuan (Gambar 4) seperti persoalan fondasi pada batuan, penggalian batuan di bawah permukaan tanah baik untuk pekerjaan teknik sipil maupun pertambangan, pemakaian batu sebagai bahan bangunan dan sebagainya.

Adapun persoalan di dalam mekanika batuan antara lain:

- a. Bagaimana reaksi dari batuan ketika diambil untuk dipergunakan?
- b. Berapa dan bagaimana besarnya daya dukung (*bearing capacity*) dari batuan dipermukaan dan pada berbagai kedalaman untuk menerima berbagai beban?
- c. Bagaimana kekuatan geser batuan?
- d. Bagaimana sikap batuan di bawah beban dinamis?
- e. Bagaimana pengaruh gempa pada sistem fondasi di dalam batuan?
- f. Bagaimana nilai modulus elastisitas dan Poisson's ratio dari batuan?
- g. Bagaimana pengaruh dari bidang-bidang lemah (kekar, bidang pelapisan, *schistosity*, retakan, rongga dan



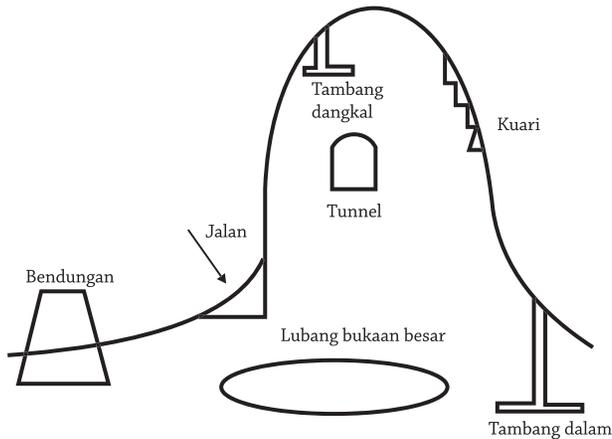
Gambar 1.4. Sistem batuan *single body* dan *multiple body* (Jumikis, 1983)

diskontinuitas lainnya) pada batuan terhadap kekuatannya?

- h. Metoda pengujian laboratorium apa saja yang paling mendekati kenyataan untuk mengetahui kekuatan fondasi atau sifat batuan dalam mendukung massa batuan?

telah dilakukan di lapangan dan di laboratorium dalam menyiapkan percontohan batuan?

- n. Bagaimana metoda pengujian yang akan dilaksanakan yang sesuai dengan kondisi lapangan terhadap sifat-sifat batuannya?



Gambar 1.5. Beberapa aktifitas manusia pada batuan

- i. Bagaimana memperhitungkan kekar dan sesar dalam perencanaan pekerjaan di dalam batuan?
- j. Bagaimana menanggulangi deformasi yang diakibatkan oleh perbedaan yang bersifat perlahan-lahan (*creep*) pada batuan?
- k. Hukum apa saja yang menyangkut aliran plastik (*plastic flow*) dari batuan?
- l. Bagaimana pengaruh "*anisotrope*" terhadap distribusi tegangan dalam batuan?
- m. Bagaimana korelasi dari hasil-hasil pengujian kekuatan batuan yang
- o. Bagaimana mekanisme keruntuhan/kehancuran dari batuan (*failure of rock*)?
- p. Dapatkah keadaan tegangan di dalam massa batuan dihitung secara tepat, atau bahkan dapat diukur?
- q. Faktor-faktor apa saja yang menyangkut perencanaan kemiringan lereng dari suatu massa batuan?
- r. Apakah *roof bolting* pada atap sebuah lubang bukaan di bawah tanah sudah aman sehingga lubang tersebut dapat digunakan sebagai instalasi yang permanen?

8. RUANG LINGKUP MEKANIKA BATUAN

Secara luas sasaran dari mekanika batuan adalah aplikasinya pada pemecahan persoalan-persoalan geoteknik, yang antara lain adalah:

- a. Menyelenggarakan penyelidikan yang bersifat teknik pada batuan.
- b. Mengembangkan cara pengambilan percontoh batuan secara rasional dan metoda identifikasi serta klasifikasi batuan.
- c. Mengembangkan peralatan uji batuan yang baik dan metoda standar pengujian untuk kuat tekan serta kuat geser batuan.
- d. Mengumpulkan dan mengklasifikasikan informasi batuan dan sifat-sifat fisiknya dalam dasar ilmu mekanika batuan, teknik fondasi dan teknik bangunan air.
- e. Berdasarkan hasil-hasil pengujian yang dilakukan pada batuan, dapat dipelajari sifat fisik, sifat mekanik (statik dan dinamik), elastisitas, plastisitas, perilaku batuan, dan bentuk kerusakan (failure) di bawah beban statik dan dinamik dari batuan tersebut.
- f. Mempelajari sifat batuan di bawah kondisi thermal dan sistem keairan (*water regimen*).
- g. Menyangkut struktur statik dan dinamik dari batuan.
- h. Mengembangkan metoda pengukuran di lapangan (*in-situ*) dari sifat deformasi statik dan dinamik batuan serta tegangan sisa di dalam batuan di bawah kondisi lingkungan yang bermacam-macam seperti pelapukan, "*leaching*", seismik dan tektonik.
- i. Menyelenggarakan penelitian terhadap mekanisme kerusakan/kehancuran batuan. Mengorganisir penelitian tentang perkuatan batuan dan pengukuran tegangan *in-situ*.
- j. Mengganti dengan metoda ilmiah dari perencanaan teknik pada batuan yang banyak menggunakan metoda empiris sebelumnya, sehingga turut memberikan kontribusi terhadap kemajuan disiplin ilmu mekanika batuan.
- k. Merangsang dan menyebarkan ilmu pengetahuan tentang batuan dan mekanika batuan.
- l. Mempelgunakan mekanika batuan untuk memecahkan persoalan-persoalan teknik secara praktis.
- m. Mempelajari sikap massa batuan asli di bawah kondisi beban dan kondisi lingkungannya.
- n. Menyangkut struktur statik batuan dan kestabilan batuan sangat penting ditinjau dari sudut keamanan (*safety*) dan ekonomi.
- o. Mempelajari stabilitas struktur rekayasa yang material utamanya adalah batuan.
- p. Mempelajari proses pengurangan ukuran batuan dengan menggunakan gaya-gaya luar seperti pemboran,

- peledakan, pemotongan, dan pengasahan.
- q. Mempelajari pengaruh gaya-gaya pada batuan dan yang utama adalah berkaitan dengan fenomena yang mempengaruhi pendugaan rekahan dan deformasi.
 - r. Mempelajari beban atau gaya yang bekerja pada batuan, analisis dari efek dalam, maksudnya tegangan dan regangan, energi dalam, dan akhirnya analisis dari gaya-gaya dalam seperti rekahan, aliran, atau deformasi batuan.

9. SEJARAH PERKEMBANGAN MEKANIKA BATUAN

Sejarah perkembangan pengetahuan mekanika batuan berjalan sangat lambat sejak zaman prasejarah sampai awal abad ke 19. Selama itu pembangunan dilaksanakan secara naluri kemudian berangsur-angsur maju setapak demi setapak sesuai dengan perkembangan tingkat kemajuan berpikir manusia. Tingkat kemajuan berpikir tersebut adalah dengan cara membandingkan tempat-tempat yang sudah di bangun dan berdasarkan pengalaman turun temurun. Mulai menginjak awal abad ke 19 usaha menggali dan mengembangkan sudah mulai ada titik terang sesuai dengan tuntutan pembangunan yang berkembang cepat. Secara kronologis perkembangan tersebut dapat di bagi dalam tiga periode yaitu:

- **Periode I**
sejak zaman pra sejarah sampai awal abad ke 19
- **Periode II**
sejak awal abad ke 19 sampai awal abad ke 20
- **Periode III**
abad ke 20

a. Periode I

Selama priode ini beberapa kegiatan yang berhubungan dengan pengetahuan mekanika batuan yang tercatat adalah sebagai berikut ;

1. Zaman Prasejarah.

Pada zaman ini orang-orang primitif telah mengenal sifat kekuatan batu misalnya orang-orang gua (*caveman*) dapat mengetahui kestabilan atap gua untuk tempat tinggalnya. Kemudian orang-orang zaman batu dapat memilih bahan yang keras untuk pembuatan bahan peralatan kehidupan sehari-hari dan berbagai macam senjata. Pada zaman itu mereka sudah mengenali bahan batuan yang cocok untuk setiap kebutuhan.

2. 15.0000 tahun yang lalu.

Orang-orang zaman itu telah mengenal bagaimana seni membuat penggalian bawah tanah, pengembangan bawah tanah penggalian sumur dalam dan terowongan-terowongan bawah tanah.

3. 3.500 tahun sebelum Masehi.

Selama zaman perunggu orang-orang sudah mulai melakukan kegiatan penambangan bijih metal untuk mendukung kegiatan mereka. Mereka mulai menggali bijih tembaga dengan cara membuat terowongan-terowongan eksploitasi pada lereng-lereng gunung di pegunungan Sinai.

4. 2000 tahun sebelum Masehi.

Orang-orang Mesir menambang batu gamping untuk kegiatan pembangunan. Untuk mencapai lokasi batu gamping tersebut mereka membuat sumuran vertikal menembus batuan konglomerat dan lapisan batu pasir.

5. 36 tahun sebelum Masehi.

Banyak dibuat terowongan-terowongan untuk pengairan, jalan pintas mendirikan candi monumen dan fasilitas militer. Sebagai contohnya yaitu terowongan untuk jalan raya dekat Nepal, Italia yang ukurannya panjang 1220m lebar 7.60m dan tinggi 9.15m.

b. Periode II

Dalam periode ini mulai banyak pembangunan terowongan sebagai berikut:

1. 1818 – 1870.

Pada zaman ini banyak dibangun terowongan di Amerika. Peng-

galian-penggalian bawah tanah tersebut masih berdasarkan institusi belaka yaitu dengan cara perbandingan-perbandingan empiris dari sifat-sifat batuan. Cara penerapan ilmu teknis secara teoretis belum di temukan. Terowongan-terowongan tersebut antara lain: terowongan irigasi Auburn, terowongan kereta api di Allegheny (Pensylvania), terowongan di Month Cenis (Pegunungan Alphens) dan pembangunan terowongan Mont Blanc.

2. 1874

Rziha seorang ahli terowongan Jerman adalah yang pertama yang memperhatikan gaya horisontal yang bekerja dalam terowongan-terowongan.

Kemudian Heim seorang profesor pada universitas Zurich dan Institut Teknologi Federal dalam tulisannya mengatakan bahwa komponen-komponen gaya horizontal adalah orde besaran yang sama seperti komponen vertikal.

c. Periode ke III

Dalam dekade ini banyak sekali kemajuan perkembangan pengetahuan tentang mekanika batuan baik secara praktis maupun teoritis yang digali oleh para ahli baik di Eropa maupun di Amerika. Secara kronologis adalah sebagai berikut.

1. 1920.

Pada terowongan Ritur yang di bangun oleh Jawatan Kereta Api Federal Swiss banyak atapnya yang runtuh. Hal ini disebabkan banyak retakan dimana letak perlapisan mengarah ke lembah dan sebagai jalan rembesan air sehingga memudahkan longsornya batuan. Pada masa itu juga dilakukan percobaan di lapangan untuk mengetahui deformasi elastisitas batuan di terowongan Amsteg di pegunungan Alphens.

2. 1926.

H Schmidt menerbitkan tesisnya yang berupa kombinasi antara kepadaannya dengan ide dari Heim tentang tegangan residu (*residual stress*) dalam batuan. Hal ini merupakan ide formula baru dari teori elastisitas batuan yang merupakan permulaan pada teori mekanika batuan. Para ahli mekanika batuan mulai menggunakan teori ini untuk melakukan kajian lebih lanjut.

3. 1933.

Pada saat ini diperkenalkan pelapisan (*lining*) dinding terowongan dengan sumuran konstruksi baja dan beberapa penulis seperti Jaeger (Amerika) menerbitkan tulisannya yang menduga tegangan

dalam pelapisan (*lining*) sebagai sebuah fungsi dari elastisitas relatif dari baja dengan batuan.

4. 1938.

Fenner Geologiawan Chili menerbitkan tesisnya yang dalam beberapa hal serupa dengan ide Schmidt. Kedua pioner tersebut masih diabaikan oleh kebanyakan para ahli mekanika batuan sampai beberapa tahun kemudian beberapa teorinya diperjelas oleh Terzaghi dan Richert pada tahun 1952.

5. 1946.

Young & Stock menerbitkan tulisannya tentang masalah pertambangan terutama mekanika batuan terban (*subsidence*) pada ladang tambang batubara. Disini kelompok pertambangan dan biro pertambangan Amerika serikat sangat aktif meneliti dan kondisi ini juga terjadi di Eropa. Mereka sangat tertarik pada persoalan teoritis dari tekanan sekeliling atap ruang bawah tanah (*cavities*) yang juga di tinjau secara praktis. Dengan demikian banyak di capai kemajuan teknik dalam pengukuran regangan (*stress*) dan alihan (*deformasi*) batuan, elastisitas dan konvergensi dinding terowongan dan ruang bawah tanah.

6. 1950.

Banyak para ahli mekanika batuan Amerika utara melakukan penelitian sistematis dalam bidang mekanika batuan.

- a) USBR di Denver mulai memimpin penelitian yang lebih luas sampai di seluruh dunia terutama untuk mengetahui sifat-sifat batuan sebagai bahan bangunan (*rock material*) dan masa batuan (*rock mass*).
- b) Masyarakat geologi Teknik Amerika (*American Society of Engineering Geology*) dibentuk dengan salah satu tujuannya adalah pengembangan dalam bidang mekanika batuan dan beberapa tahun kemudian menjadi perhatian juga dari masyarakat Geofisika Amerika dan ASTM.
- c) Dalam beberapa perguruan tinggi di Amerika metode pelajaran dalam bidang geologi teknik dimodernisasikan sesuai dengan kepentingan industri banyak dan pertambangan.

7. 1950-1960.

Di Eropa yang menonjol adalah Stini dari kelompok pertambangan di Universitas Wina membentuk masyarakat Geofisika dan Geologi Teknik Austria. Perkembangan sangat cepat sehingga menjadi sangat terkenal terutama dalam menelaah masalah patahan dan rekahan dalam batuan jauh lebih efektif dari

kebiasaan ahli geologi teknik saat itu. Para ahli dari berbagai penjuru Eropa bergabung dan mengadakan kongres tahunannya di Salzburg. Setelah memutuskan hubungannya dengan *International Convergence of Soil Mechanics*, kelompok Salzburg berkembang sendirian yang kemudian menjadi inti dari *Independent International Society of Rock Mechanics* yang menyelenggarakan kongres pertamanya di Lisabon pada tahun 1966 (*International Congress of Rock Mechanics*) di Beograd, Yugoslavia 1970, Denver, Colorado.

8. 1951.

Para insinyur bendungan (*Dam engineer*) membentuk sebuah komite dalam bidang mekanika batuan sesuai dengan sebuah gagasan yang diajukan pada pertemuan komite Internasional untuk bendungan besar (ICOLD).

Mulai saat ini para geologiawan mulai berhati-hati dalam memutuskan dimana membangun bendungan. Persoalan yang dijumpai adalah mengenai stabilitas batuan bukit tumpuan (*abutment*), kemungkinan runtuh akibat gaya "up lift" atau oleh runtuhnya kekuatan geser dari batuan (*shear strength*).

Hal ini memberikan inisiatif dalam pengembangan dari teknik pondasi bendungan. Dari kebutuhan yang meningkat dalam pengadaan tenaga listrik cenderung untuk membuat bendungan besar berupa bendungan lengkung (*arch dump*) dengan demikian persoalan kekuatan batuan bukit tumpuan menjadi perhatian yang lebih kompleks lagi sehingga di pandang perlu untuk memasukkan sifat elastisitas dan plastisitas dari batuan bukit tumpuan dalam analisa matematika pada bendungan lengkung dan perlu memperhatikan distribusi regangan (*strain*) dan tegangan (*stress*) di dalam masa tubuh batuan. Teknik pengujian batuan di tempat (*in-situ*) mulai berkembang pesat dalam kurun waktu ini dan hasil analisa pengujian dan penyelidikan lapangan pada lokasi bukit tumpuan akan memberikan tingkat ketelitian yang lebih tepat.

9. 1957.

G. Westenberg (Stockholm) menjadi pemimpin dalam membuat laporan yang menyarankan untuk membentuk komisi pekerja bawah tanah dari ICOLD yang tujuannya untuk memecahkan beberapa masalah yang sangat mendesak dan

penting tentang batuan pondasi bendungan. Pertemuan pertama dari komisi baru tersebut adalah pada kongress ke VI ICOLD di New York tahun 1958.

10. 3 Desember 1959.

Bendungan Malpaseet pecah dan membunuh sekitar 450 orang. Bencana Vajont terjadi waktu malam tanggal 9 Oktober 1963. Anggota ICOLD kongress 1961 dan kongress Edinburg 1964 merasa kaget oleh bencana tersebut. Disini orang mulai menganggap bahwa pengetahuan mekanika batuan mekanika batuan menjadi lebih penting bagi semua parencana bendungan.

11. 1962

Prof. Bjerum (Norwegia) pada kongres tahunan masyarakat mekanika batuan di Salzburg sebagai wakil pimpinan *International Conference of Soil Mechanics* secara brilian menjelaskan bagaimana mekanika batuan dapat berintegrasi ke dalam mekanika tanah sebagai bagian yang lebih luas dan menjadi ilmu teknik lanjut.

Kongres selanjutnya memutuskan untuk memperluas usaha dan membentuk inti dari *International Society of Rock Mechanics*.

Sebagai contoh dari hasil integrasi adalah Hukum Coulomb yang menghubungkan antara tegangan geser (*shear strength*) dan elastisitas, faktor gesekan dan tegangan normal. Tetapi ternyata sifat batuan lebih kompleks daripada mekanika tanah. Dalam beberapa hal banyak mekanika batuan mempergunakan teknik yang khusus yang tidak dikenal dalam mekanika tanah.

12. Masa sekarang.

Dari kongres Lisbon 1966, dikemukakan pentingnya peningkatan dalam pengetahuan mengenai sifat fisik dan mekanika batuan. Kecenderungan tersebut disimpulkan sebagai berikut:

a) Penelitian pada struktur dan mikro struktur batuan yang menyebabkan perlemahan batuan dan pecah. Penelitian ini umumnya berhubungan dengan perguruan tinggi.

- b) Pengujian material material batuan di laboratorium; metode pengujian; standarisasi pengujian, klasifikasi material batuan untuk penggunaan secara teknik.
- c) Pengujian pada masa batuan (*in-situ*). Sifat fisik dan mekanik batuan.
- d. Pengembangan metode baru dalam pengukuran regangan dan tegangan deformasi dan tegangan. Teori matematika dari regangan dan tegangan batuan homogen dan heterogen atau pada batuan dengan kekar intensif.
- e. Pengenalan metode baru dan penggunaan komputer.

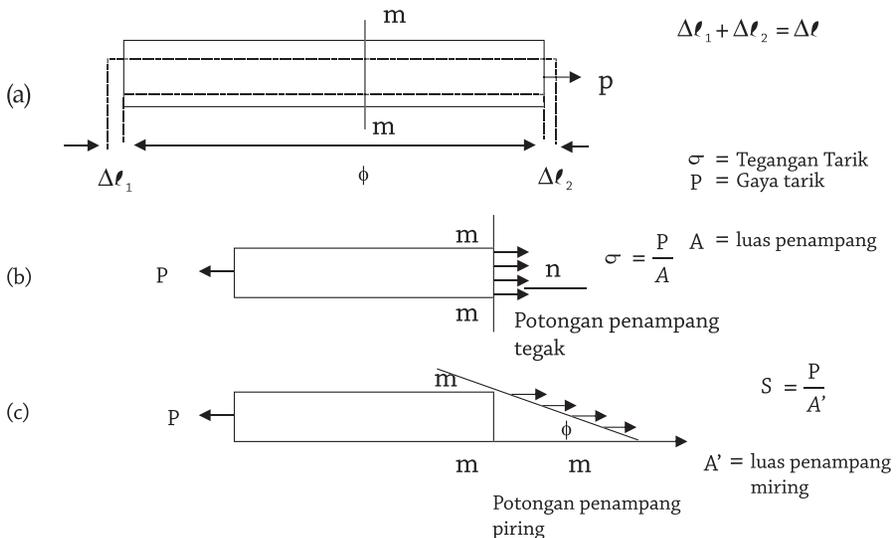
Kemiringan lereng batuan (*rock slope*) stabilitas dan pengaman struktur dalam batuan; perencanaan terowongan dan ruang bawah tanah, perencanaan bukit tumpuan bendungan, konsolidasi masa batuan.

TEGANGAN (*STRESS*) dan REGANGAN (*STRAIN*)

1. TEGANGAN (*STRESS*) dan REGANGAN (*STRAIN*)

Jika sebuah batang prisma diberi tarikan dengan gaya yang terbagi rata di sepanjang ujungnya (Gambar 1.a), gaya dalam

juga terbagi merata di sepanjang potongan penampang sembarang mm. Tegangan (*stress*) pada potongan penampang mm tersebut adalah gaya P dibagi dengan luas potongan penampang A (Gambar 1.b).



Gambar 1.1. Batang prisma mengalami tarikan

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Regangan (*strain*) dari batang prisma tersebut adalah pertambahan panjang dari batang prisma tersebut dibagi dengan panjang mula-mula (Gambar 2.1.a).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Tegangan pada potongan penampang miring dengan luas penampang

$$A' = \frac{A}{\cos \Theta}$$

ada 2 buah yaitu tegangan normal (*normal stress*) σ_n yang tegak lurus pada bidang potongan dan tegangan geser (*shear stress*) τ_{nt} yang sejajar dengan bidang potongan.

$$S = \frac{P}{A'} = \frac{P}{A} \cos \theta = \sigma \cos \theta$$

$$\sigma_n = S \cos \theta = \sigma \cos^2 \theta = \sigma \left(\frac{1 + \cos 2\theta}{2} \right)$$

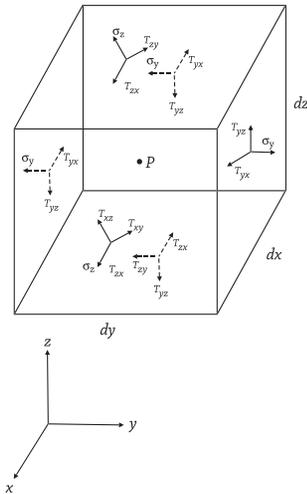
$$\tau_{nt} = S \sin \theta = \sigma \cos \theta \sin \theta = \frac{1}{2} \sigma \sin 2\theta$$

σ_n maksimum pada $\theta = 0$
yang besarnya $\sigma_n = \sigma$

τ_{nt} maksimum pada $\theta = 45^\circ$
yang besarnya $\tau_{nt} = \frac{1}{2} \sigma$

Tegangan tergantung pada :

- Titik dimana ia dikenakan.
- Orientasi dari luas permukaan dimana ia dikenakan.
- Sistem dari gaya-gaya luar yang dikenakan pada sebuah benda.



Gambar 2.

Komponen-komponen tegangan di sebuah empat persegi panjang

Misalkan titik P berada ditengah-tengah sebuah empat persegi panjang kecil di mana bidang yang berhadapan sejajar menurut koordinat kartesian x, y, z . Konversi untuk menggambarkan tegangan normal dan tegangan geser seperti terlihat pada Gambar 2.

Tegangan normal yang bekerja pada bidang normal terhadap sumbu x diberi simbol σ_x .

Tegangan geser yang bekerja searah dengan sumbu y pada bidang normal terhadap sumbu x diberi simbol τ_{xy} .

Tegangan geser yang bekerja searah dengan sumbu z pada bidang normal terhadap sumbu x disebut τ_{xz} .

Demikianlah definisi yang sama untuk σ_y , σ_z , τ_{yz} , τ_{yx} , τ_{zx} dan τ_{zy} .

Tegangan normal σ_x , σ_y dan σ_z positif jika arahnya keluar dari permukaan, menggambarkan tegangan tarik.

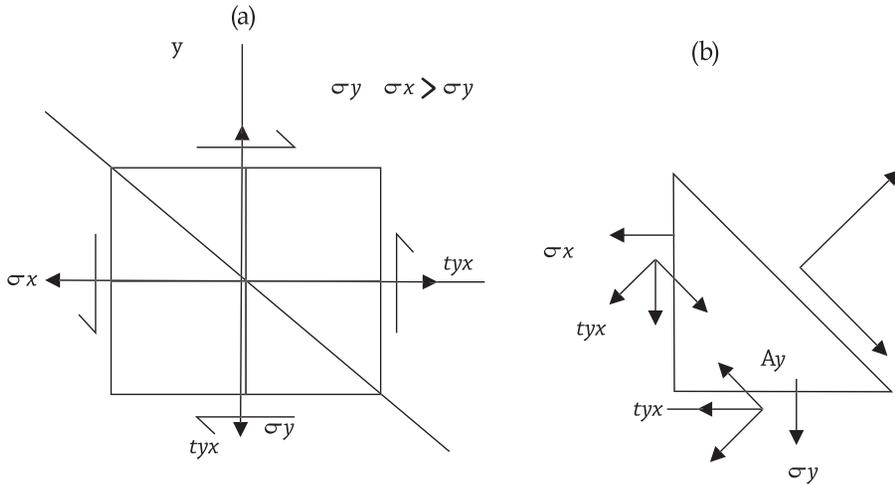
Tegangan normal negatif adalah tegangan tekan dimana arahnya menuju ke permukaan elemen.

Tegangan geser τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zy} , τ_{xz} dan τ_{zx} adalah positif jika arahnya searah dengan arah kartesian positif.

Akan diperlihatkan selanjutnya bahwa dari enam komponen kartesian dari tegangan geser hanya tiga yang bebas. Titik P terletak ditengah-tengah empat persegi panjang. Dalam keadaan setimbang, momen gaya-gaya ke titik P pada arah sumbu x sama dengan nol.

$$\Sigma M_x = \frac{\tau_{yz} dx dz dy}{2} + \frac{\tau_{yz} dx dz dy}{2} - \frac{\tau_{zy} dx dy dz}{2} - \frac{\tau_{zy} dx dy dz}{2} = 0$$

Persamaan yang sama diperoleh untuk ΣM_y dan ΣM_z dengan masing-masing pada arah sumbu y dan z .



Gambar 3. Diagram tegangan pada bidang

Setiap persamaan dibagi dengan $dx \, dy \, dz$, maka didapat :

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz}$$

Ini memperlihatkan bahwa sepasang tegangan geser mempunyai nilai dan tanda yang sama.

2. ANALISIS TEGANGAN PADA BIDANG

Gambar 3.a memperlihatkan diagram tegangan yang bekerja pada sebuah benda berbentuk segi empat dalam dua dimensi (bidang) dengan sumbu x dan y . Pada bidang miring di mana normalnya membuat sudut θ terhadap sumbu x bekerja tegangan normal σ_n dan tegangan geser τ_{nt} yang nilainya merupakan fungsi dari σ_x , σ_y dan τ_{xy} yang bekerja pada bidang-bidang yang tegak lurus sumbu x dan y (Gambar 3.b).

$$A_x = A_n \cos \theta$$

$$A_y = A_n \sin \theta$$

dengan

A_x = luas penampang bidang yang 1 sumbu x

A_y = luas penampang bidang yang 1 sumbu y

A_n = luas penampang bidang miring.

Dalam keadaan setimbang :

$$\Sigma F_{\sigma_n} = 0$$

$$\sigma_n \cdot A_n = \sigma_x \cos \theta \cdot A_x + \sigma_y \sin \theta \cdot A_y + \tau_{xy} \sin \theta \cdot A_x - \tau_{yx} \cos \theta \cdot A_y$$

$$\sigma_n \cdot A_n = \sigma_x \cos \theta \cdot A_n \cos \theta + \sigma_y \sin \theta \cdot A_n \sin \theta + \tau_{xy} \sin \theta \cdot A_n \cdot \cos \theta + \tau_{yx} \cos \theta \cdot A_n \sin \theta$$

$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cdot \cos \theta$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \dots (1)$$

$$\Sigma F_{\tau_{nt}} = 0$$

$$\tau_{nt} \cdot A_n = \sigma_x \sin \theta \cdot A_x - \sigma_y \cos \theta \cdot A_y - \tau_{xy} \cos \theta \cdot A_x + \tau_{yx} \sin \theta \cdot A_y$$

$$\tau_{nt} \cdot A_n = \sigma_x \sin \theta \cdot A_n \cos \theta - \sigma_y \cos \theta \cdot A_n \sin \theta - \tau_{xy} \cos \theta \cdot A_n \cos \theta + \tau_{yx} \sin \theta \cdot A_n \sin \theta$$

$$\tau_{nt} = \sigma_x \sin \theta \cdot \cos \theta - \sigma_y \cos \theta \cdot \sin \theta - \tau_{xy} \cos^2 \theta + \tau_{yx} \sin^2 \theta$$

$$\tau_{nt} = (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cdot \cos \theta - \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$\tau_{nt} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \dots (2)$$

Persamaan 1 dan 2 memberikan besar dan tanda dari σ_n dan τ_{nt} yang bekerja pada bidang miring yang normalnya membuat sudut θ terhadap sumbu x. Perioda dari tegangan-tegangan ini adalah π karena persamaannya merupakan fungsi dari $\sin 2\theta$ dan $\cos 2\theta$. Sehingga tegangan-tegangan tersebut mempunyai nilai maksimum dan minimum atau konstan.

Turunan tegangan normal σ_n terhadap θ sama dengan nol memberikan :

$$\frac{d\sigma_n}{d\theta} = -(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta_1 + 2\tau_{xy} \cos 2\theta_1 = 0$$

dimana θ_1 digunakan untuk menggantikan θ yang menyatakan sudut spesifik. Besarnya θ_1 adalah :

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Dari persamaan ini didapat dua nilai yaitu θ_1 dan $\theta_1 + 90^\circ$. Satu sudut akan memberikan arah dari tegangan normal maksimum dan sudut lainnya akan memberikan arah dari tegangan normal minimum.

Jika $\theta_1 = 0$, maka dari persamaan 1 didapat :

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$$

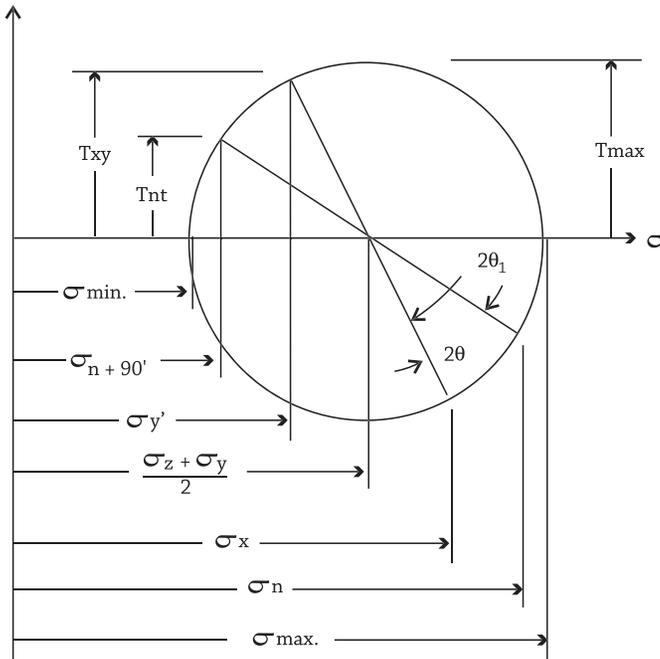
Arah ini disebut arah prinsipal atau utama (*principal direction*) dan tegangan normal yang bersangkutan adalah tegangan prinsipal (*principal stress*) dimana σ_{\max} disebut *major principal stress* dan σ_{\min} disebut *minor principal stress*. Bidang di

mana bekerja tegangan prinsipal disebut bidang prinsipal (*principal plane*). Tidak ada tegangan geser yang bekerja pada bidang dimana tegangan normal maksimum atau minimum.

Apabila arah prinsipal diambil sebagai sumbu x dan y, $\tau_{xy} = 0$ dan persamaan 1 dan 2 disederhanakan menjadi :

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau_{nt} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \sin 2\theta$$



Gambar 4. Lingkaran Mohr dari tegangan

Variasi komponen tegangan σ_n dan τ_{nt} sesuai dengan variasi θ .

3. LINGKARAN MOHR DARI TEGANGAN

Pemecahan geometri untuk tegangan-tegangan dengan arah yang berbeda beda didapat dengan lingkaran Mohr.

Untuk diagram tegangan seperti pada Gambar 3.a, maka urutan-urutan untuk membuat lingkaran Mohr adalah:

- Dibuat sumbu tegak untuk τ dan sumbu horisontal untuk σ . Kedua sumbu ini saling tegak lurus dan skala kedua sumbu ini harus sama.
- Plot tegangan normal σ_x dan σ_y pada sumbu tegangan normal σ .
- Plot tegangan geser τ_{xy} yang bekerja dibagian kanan dari benda langsung di bawah atau di atas titik yang menggambarkan σ_x pada sumbu tegangan normal.
Jika arah tegangan geser berlawanan dengan arah jarum jam relatif terhadap titik pusat benda, plot τ_{xy} dibawah sumbu tegangan normal. Jika arah tegangan geser searah dengan arah jarum jam relatif terhadap titik pusat benda, plot τ_{xy} di atas sumbu tegangan normal.
- Plot tegangan geser τ_{xy} yang bekerja pada bidang yang sama dengan σ_y

di atas titik yang menggambarkan σ_y pada sumbu tegangan normal jika searah dengan arah jarum jam dan di bawah titik tersebut jika berlawanan dengan arah jarum jam.

- Hubungkan kedua titik tegangan geser dengan sebuah garis lurus. Garis ini akan memotong sumbu tegangan normal pada titik $\frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)$.
- Gambarkan sebuah lingkaran dengan titik pusatnya pada sumbu tegangan normal di $\frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)$ dan diameternya sama dengan panjang garis yang menghubungkan kedua titik tegangan geser.

Dari Gambar 4. terlihat bawah proyeksi dari jari-jari lingkaran pada sumbu tegangan geser τ akan memberikan tegangan geser pada sudut tertentu, dan proyeksi dari ujung-ujung diameter lingkaran pada sumbu tegangan normal σ akan memberikan tegangan-tegangan normal pada sudut tertentu.

Jari-jari lingkaran adalah tegangan geser maksimum dan perpotongan antara lingkaran Mohr dan sumbu tegangan normal adalah tegangan prinsipal. Sudut θ_1 adalah sudut yang dibentuk antara sumbu x dengan arah dari tegangan prinsipal.

Dapat dilihat pada Gambar 4 bahwa tegangan geser sama dengan nol jika tegangan normal maksimum dan mini-

mum. Demikian juga jika tegangan geser maksimum maka tegangan-tegangan normal sama dengan setengah dari jumlah tegangan-tegangan normal asal (*original normal stresses*).

Sebagai titik pusat lingkaran selalu pada titik :

$$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \frac{\sigma_n + \sigma_n + 90^\circ}{2}$$

4. ANALISIS REGANGAN

Ada dua jenis deformasi yang dapat terjadi pada sebuah benda jika mengalami tegangan :

- a. Perubahan panjang dari sebuah garis lurus.

Perubahan panjang persatuan unit panjang mula-mula disebut regangan longitudinal (*longitudinal strain*) yang didefinisikan sebagai

$$\epsilon = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta L}{L}$$

dengan ∂L = perubahan panjang
 ΔL = panjang mula-mula

Regangan longitudinal positif jika terjadi penambahan panjang dan negatif jika terjadi pengurangan panjang.

- b. Perubahan sudut dari sudut yang dibentuk oleh perpotongan dua buah garis lurus disebut regangan geser (*shear strain*).

Gambar 2. 5 memperlihatkan satu sudut dari segi empat yang mengalami tegangan.

A O B = sudut sebelum mengalami tegangan.
 A' O' B' = sudut sesudah mengalami tegangan.

Titik O pindah ke O', titik A pindah ke A' dan titik B pindah ke B' sesudah mengalami tegangan.

Displacement dari titik dinyatakan dengan u, v dan w yang masing-masing sejajar dengan x, y dan z, diasumsikan sebagai fungsi kontinu dari koordinat (x,y,z). Jadi jika u adalah *displacement* dari titik O pada arah x, *displacement* dari titik A yang berada di dekatnya pada arah x adalah :

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x.$$

$$O'A'' = \Delta x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x - u = \Delta x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x$$

$$\begin{aligned} A'A'' &= v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x - v = \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \\ &= \sqrt{\left(\Delta x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x\right)^2} \\ &= \Delta x \sqrt{1 + 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \end{aligned}$$

$$O'A' = \Delta x \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)$$

Perubahan panjang pada segmen OA :

$$\Delta x = O'A' - OA = \Delta x \left(1 + \Delta x \frac{\partial u}{\partial x}\right)$$

$$\rightarrow -\Delta x = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x$$

menurut definisi regangan :

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta x} = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x \rightarrow \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

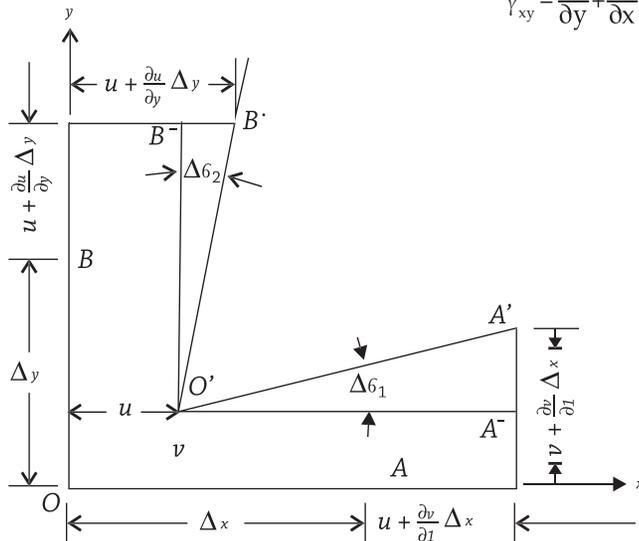
Melihat Gambar 5. dan mengingat bahwa sudut-sudut $\Delta\theta_1$ dan $\Delta\theta_2$ adalah kecil serta tegangan juga kecil terhadap unitnya, maka dapat ditulis persamaan sebagai berikut :

$$\tan \Delta\theta_1 = \Delta\theta_1 = \frac{A'A''}{O'A''} = \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \Delta x}{\Delta x + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \Delta x} = \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\tan \Delta\theta_2 = \Delta\theta_2 = \frac{B'B''}{O'B''} = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \Delta y}{\Delta y + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \Delta y} = \frac{\partial u}{\partial y}$$

Per definisi, regangan geser (*shear strain*) γ_{xy} , dalam sudut A O B adalah $\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2$:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$



Gambar 5. Hubungan antara regangan dan *displacement*

Dengan cara yang sama untuk bidang yz dan zx, 6 komponen dari regangan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

regangan normal

regangan geser

Jika u, v dan w adalah fungsi kontinu dari koordinat ruang x, y dan z dari sebuah benda, maka keenam persamaan di atas adalah keadaan (*state*) dari regangan sebuah titik di dalam benda.

PENENTUAN SIFAT FISIK BATUAN DI LABORATORIUM

1. PEMBUATAN CONTOH

1.1. Di laboratorium

Pembuatan contoh dilaboratorium dilakukan dari blok batu yang diambil di lapangan yang dibor dengan penginti laboratorium. Contoh yang didapat berbentuk silinder dengan diameter pada umumnya antara 50 - 70 mm dan tingginya dua kali diameter tersebut. Ukuran contoh dapat lebih kecil maupun lebih besar dari ukuran yang disebut di atas tergantung dari maksud uji.

1.2. Di lapangan

Hasil pemboran inti ke dalam massa batuan yang akan berupa contoh inti batuan dapat digunakan untuk uji dilaboratorium dengan syarat tinggi contoh dua kali diameternya.

Setiap contoh yang diperoleh kemudian diukur diameter dan tingginya, dihitung luas permukaan dan volumenya.

2. PENIMBANGAN BERAT CONTOH

- Berat contoh asli (natural) : W_n .
- Berat contoh kering (sesudah dimasukkan ke dalam oven selama 24 jam dengan temperatur kurang lebih 90°C) : W_o .
- Berat contoh jenuh (sesudah dijenuhkan dengan air selama 24 jam) : W_w .
- Berat contoh jenuh didalam air : W_s .
- Volume contoh tanpa pori-pori : $W_o - W_s$.
- Volume contoh total : $W_w - W_s$.

3. SIFAT FISIK BATUAN

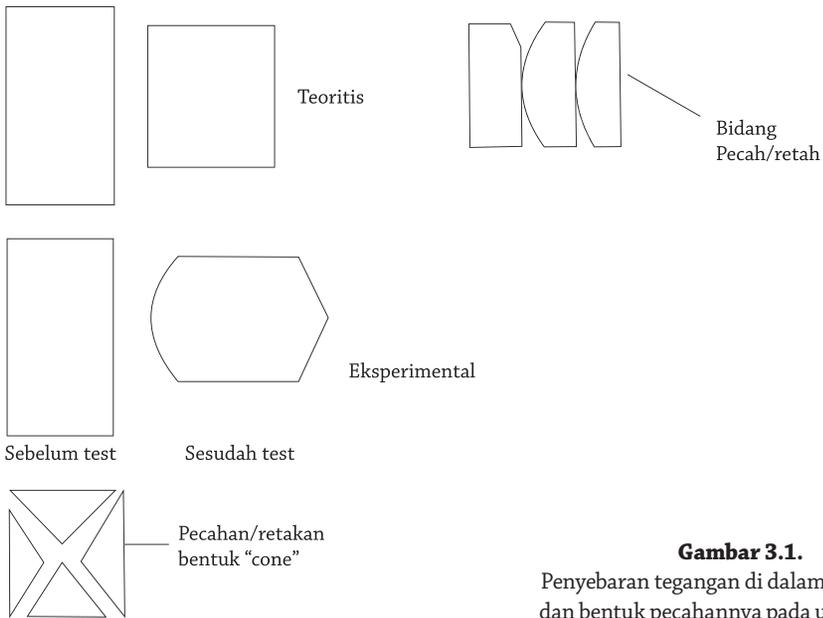
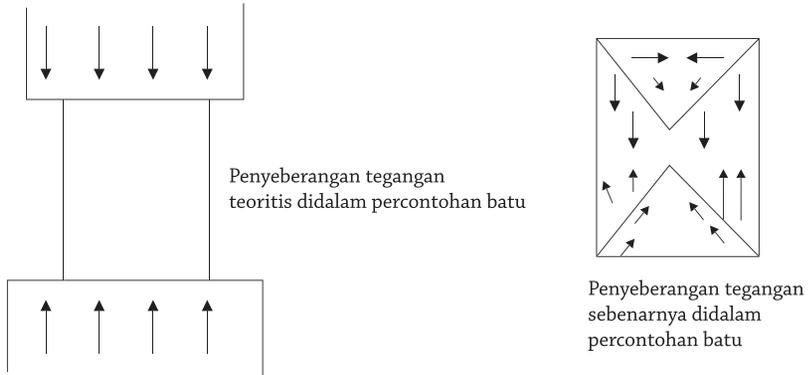
- a. Bobot isi asli (*natural density*)
$$= \frac{W_n}{W_w - W_s}$$
- b. Bobot isi kering (*dry density*)
$$= \frac{W_o}{W_w - W_s}$$
- c. Bobot isi jenuh (*saturated density*)
$$= \frac{W_s}{W_w - W_s}$$
- d. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*)
$$= \frac{W_s}{W_w - W_s} / \text{bobot isi air}$$
- e. Berat jenis sejati (*true specific gravity*)
$$= \frac{W_o}{W_o - W_s} / \text{bobot isi air}$$
- f. Kadar air asli (*natural water content*)
$$= \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100 \%$$
- g. *Saturated water content (absorption)*
$$= \frac{W_w - W_o}{W_o} \times 100 \%$$
- h. Derajat kejenuhan
$$= \frac{W_n - W_o}{W_w - W_o} \times 100 \%$$
- i. Porositas,
$$n = \frac{W_w - W_o}{W_w - W_s} \times 100 \%$$
- j. Void ratio,
$$e = \frac{n}{1 - n}$$

4. PENENTUAN SIFAT MEKANIK BATUAN DI LABORATORIUM

4.1 Uji Kuat Tekan (*Unconfined Compressive Strength Test*)

Uji ini menggunakan mesin tekan (*compression machine*) untuk menekan contoh batu yang berbentuk silinder, balok atau prisma dari satu arah (*uniaxial*). Penyebaran tegangan di dalam contoh batu se-

cara teoritis adalah searah dengan gaya yang dikenakan pada contoh tersebut. Tetapi dalam kenyataannya arah tegangan tidak searah dengan gaya yang dikenakan pada contoh tersebut karena ada pengaruh dari plat penekan mesin tekan yang menghimpit contoh. Sehingga bentuk pecahan tidak berbentuk bidang pecah yang searah dengan gaya melainkan berbentuk kerucut (Gambar 3.1.).



Gambar 3.1.

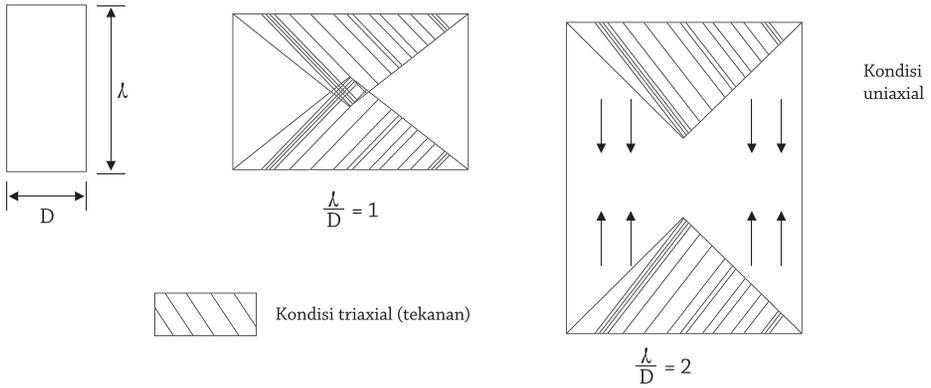
Penyebaran tegangan di dalam contoh batu dan bentuk pecahannya pada uji kuat tekan

Perbandingan antara tinggi dan diameter contoh ($\frac{l}{D}$) mempengaruhi nilai kuat tekan batuan. Untuk perbandingan $\frac{l}{D} = 1$, kondisi tegangan triaksial saling bertemu

(Gambar 3.2.) sehingga akan memperbesar nilai kuat tekan batuan. Untuk uji kuat tekan digunakan $2 < \frac{l}{D} < 2,5$.

Ukuran percontohan

$$2 \leq \frac{l}{D} \leq 2,5$$



Gambar 3.2. Kondisi tegangan di dalam contoh untuk $\frac{l}{D}$ berbeda

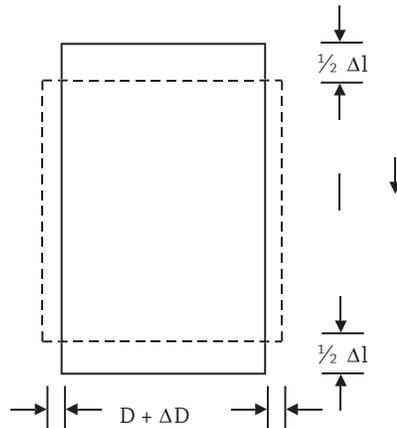
Makin besar $\frac{l}{D}$ maka kuat tekannya akan bertambah kecil seperti ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini :

- Menurut ASTM :

$$s_{c(l=D)} = \frac{s_c}{0,778 + \frac{0,222}{1/D}}$$
- Menurut Protodiakonov :

$$s_{c(l=2D)} = \frac{8 s_c}{7 + \frac{2}{1/D}}$$

dengan σ_c = kuat tekan batuan



Gambar 3.3. Regangan yang dihasilkan dari uji kuat tekan batuan

4. Poisson's ratio : $\nu = \frac{\epsilon_{l1}}{\epsilon_{a1}}$
pada tegangan σ_1

Beberapa definisi modulus Young

1. Modulus Young Tangen
(*Tangent Young's Modulus*)
 E_t (Gambar 3.6.a). Diukur pada tingkat tegangan = 50% σ_c .

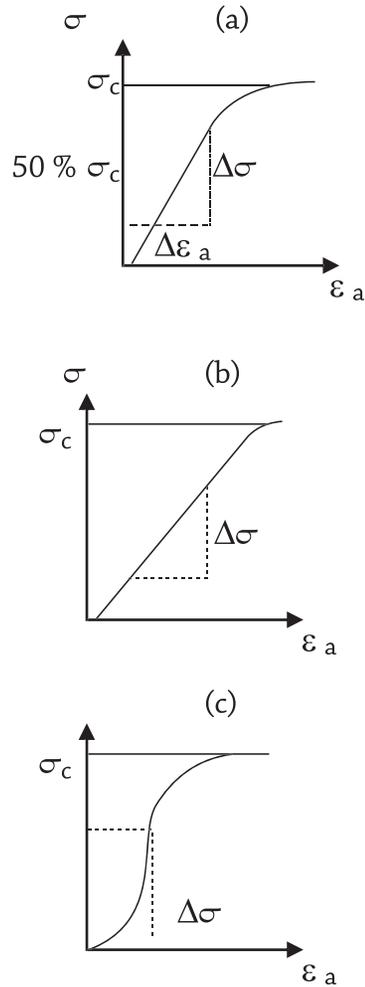
$$E_t = \frac{\epsilon_{l1}}{\epsilon_{a1}}$$

2. Modulus Young Rata-rata
(*Average Young's Modulus*)
 E_{av} (Gambar 3.6.b). Diukur dari rata-rata kemiringan kurva atau bagian linier yang terbesar dari kurva.

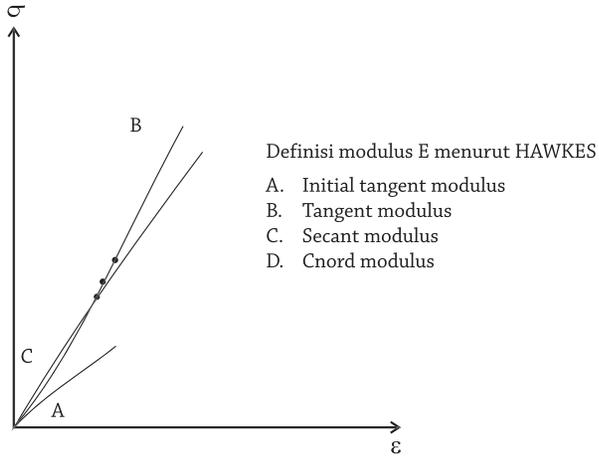
$$E_{av} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_a}$$

3. Modulus Young Sekan
(*Secant Young's Modulus*)
 E_s (Gambar 3.6.c). Diukur dari tegangan = 0 sampai nilai tegangan tertentu, yang biasanya 50% σ_c .

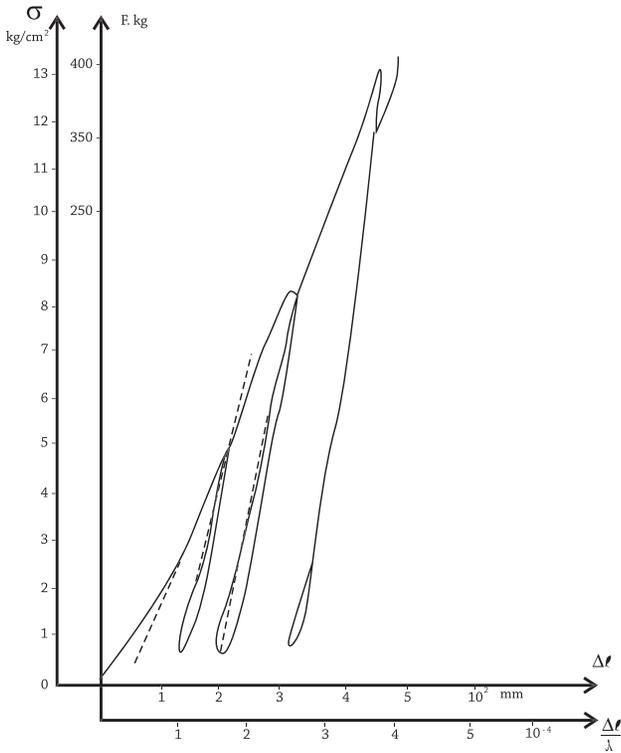
$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_a}$$



Gambar 3.6. Beberapa definisi modulus Young



Gambar 3.7. Definisi modulus Young menurut Hawkes



Gambar 3.8. Kurva tegangan-regangan contoh batu kapur

**5. UJI KUAT TARIK TAK LANGSUNG
(Indirect Tensile Strength Test)**

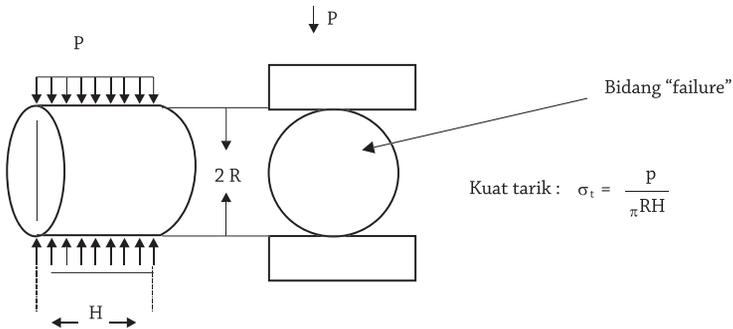
Uji ini dilakukan untuk mengetahui kuat tarik (*tensile strength*) dari contoh batu berbentuk silinder secara tak langsung. Uji cara ini dikenal sebagai uji tarik Brazil. Alat yang digunakan adalah mesin tekan seperti pada uji kuat tekan.

6. UJI POINT LOAD

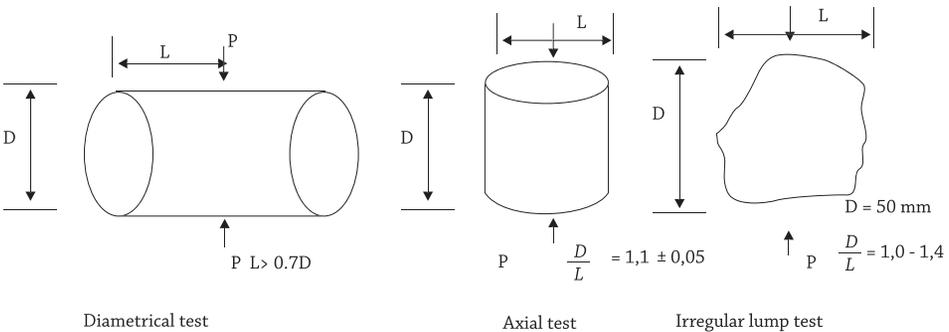
Uji ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan (*strength*) dari contoh batu secara tak langsung di lapangan. Contoh batu

dapat berbentuk silinder atau tidak beraturan (Gambar 10). Peralatan yang digunakan mudah dibawa-bawa, tidak begitu besar dan cukup ringan (Gambar 11). Uji cepat, sehingga kekuatan batuan dapat segera diketahui di lapangan, sebelum uji di laboratorium dilakukan.

Contoh yang disarankan untuk uji ini adalah yang berbentuk silinder dengan diameter = 50 mm (NX = 54 mm).



Gambar 3.9. Uji kuat tarik



Gambar 3.10. Bentuk contoh batu untuk *point load test*.



Gambar 3.11. Peralatan untuk *point load test*

Dari uji ini didapat :

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$

Dengan:

I_s = *Point load strength index*
(indeks Franklin)

P = Beban maksimum sampai sampel pecah

D = Jarak antara dua konus penekan.

Hubungan antara indeks Franklin (I_s) dengan kuat tekan (σ_c) menurut Bieniawski adalah sebagai berikut :

$$\sigma_c = 23 I_s$$

untuk diameter sampel = 50 mm.

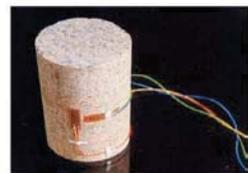
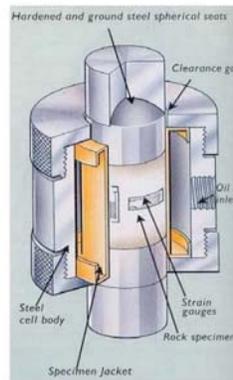
Jika $I_s = 1$ MPa maka indeks tersebut tidak lagi mempunyai arti sehingga disarankan untuk menggunakan uji lain dalam penentuan kekuatan (*strength*) batuan.

7. UJI TRIAKSIAL

Salah satu uji yang terpenting di dalam mekanika batuan untuk menentukan kekuatan batuan di bawah tiga komponen tegangan adalah uji triaksial. Contoh yang digunakan berbentuk silinder dengan syarat-syarat sama pada uji kuat tekan.

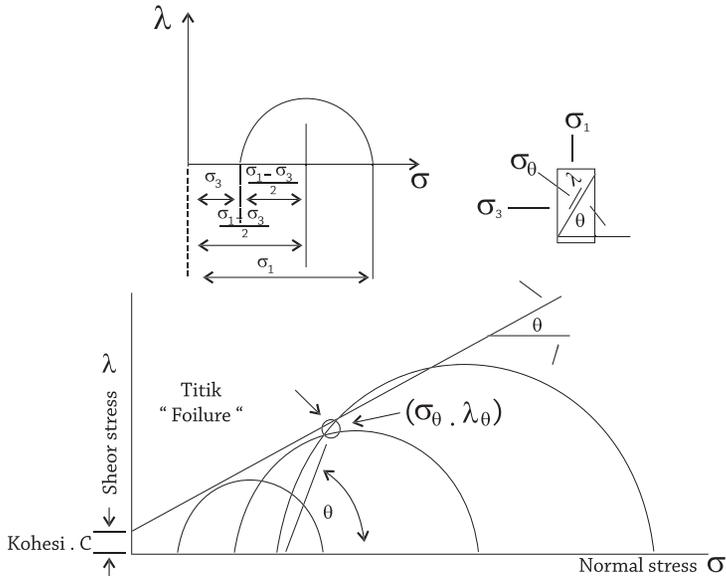
Dari hasil uji triaksial dapat ditentukan :

- *strength envelope* (kurva *intrinsic*),
- kuat geser (*shear strength*),
- sudut geser dalam (ϕ),
- kohesi (C).



(Hoek and Franklin, 1976)

Gambar 3.12. Uji triaksial

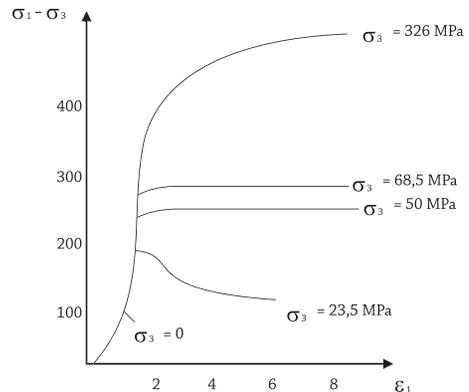


Gambar 3.13. Lingkaran Mohr dan kurva *intrinsic* dari hasil uji triaksial

Gambar 3.14. memperlihatkan kurva tegangan-regangan dari hasil uji di laboratorium terhadap contoh batu marmer dengan berbagai nilai tekanan pemampatan (σ_3). Naiknya σ_3 akan memperbesar kekuatan batuan, tetapi modulus deformasi konstan.

8. UJI PUNCH SHEAR

Uji ini untuk mengetahui kuat geser (*shear strength*) dari sampel batu secara langsung. Sampel berbentuk silinder tipis yang ukurannya sesuai dengan alat uji *punch* dengan tebal t cm dan diameter d cm (Gambar 3.15).



Gambar 3. 14.

Pengaruh besarnya tekanan pemampatan (σ_3) terhadap kekuatan batuan (Von Karman, 1911)

Sesudah contoh dimasukkan ke dalam alat uji *punch* kemudian ditekan dengan mesin tekan sampai sampel pecah (P kg).

$$\text{Kuat geser (shear strength)} = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot t} \text{ kg/cm}^2$$

9. UJI GESER LANGSUNG

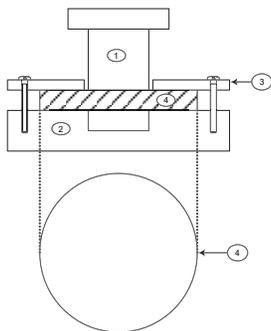
Uji ini untuk mengetahui kuat geser batuan pada tegangan normal tertentu. Dari hasil uji dapat ditentukan (Gambar 16) :

- garis *Coulomb's shear strength*,
- kuat geser (*shear strength*),
- sudut geser dalam (ϕ),
- kohesi (C).

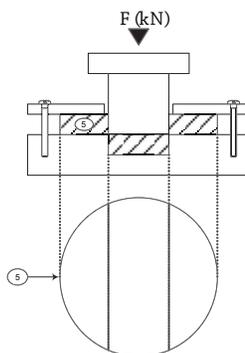
10. UJI KECEPATAN RAMBAT GELOMBANG ULTRA SONIK

Modulus Young (E) dan nisbah Poisson (ν) dapat juga ditentukan secara tidak langsung (dinamis) dengan uji kecepatan rambat gelombang ultra sonik yaitu mengukur kecepatan rambat gelombang ultra sonik pada contoh batu.

Dari hasil uji ini akan didapat nilai-nilai cepat rambat gelombang primer (v_p) dan cepat rambat gelombang sekunder (v_s). Kemudian dapat dihitung modulus Young dan nisbah Poisson dari batuan yang diuji.



a. Contoh Sebelum Runtuh



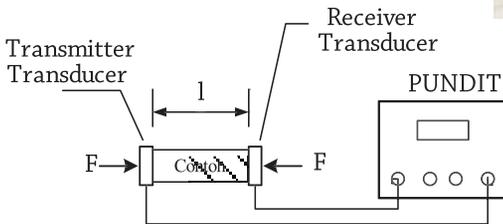
b. Contoh Setelah Runtuh

Keterangan

1. Punch Block
2. Rangka Bawah
3. Penjepit
4. Contoh batuan sebelum runtuh
5. Contoh batuan setelah runtuh

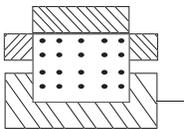
Gambar 15. Uji *punch shear*

Perhitungan hasil uji kecepatan rambat gelombang ultra sonik :



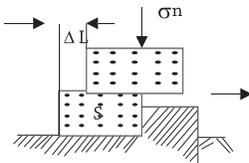
Gambar 3.16. Uji geser langsung dan garis *Coulomb's shear strength*

N = beban normal T = horizontal sheat test

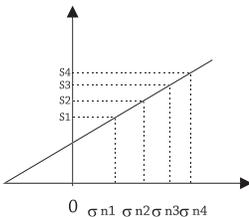


$$\sigma^n = \frac{N}{A} = \text{normal stress} \qquad \pi = \frac{T}{A} = \text{shear test}$$

- Percontohan di dalam shear test



Δ Longitudinal shear displacement L



$$T = N \cdot \tan \Phi + C \cdot A$$

atau

$$\pi = S = \sigma^n \cdot \tan \Phi + C$$

- Garis "Coulomb b's shear strength"

$\tan \Phi$ = koefisien gesek pada permukaan gesek
 Φ = sudut gesek
 C = kohesi

- a. Cepat rambat gelombang primer (v_p)

$$v_p = \frac{L}{t_p} \text{ m/detik}$$

dengan:

L = panjang contoh (m)

t_p = waktu yang dibutuhkan gelombang primer merambat sepanjang contoh (detik)

- b. Cepat rambat gelombang primer (v_s)

$$v_s = \frac{L}{t_s} \text{ m/detik}$$

dengan:

L = panjang contoh (m)

t_s = waktu yang dibutuhkan gelombang sekunder merambat sepanjang contoh (detik)

- c. Modulus kekakuan dinamik (modulus geser), G

$$G = \rho \cdot v_s^2$$

dengan:

ρ = massa per satuan volume

- d. Nisbah Poisson (ν)

$$\nu = \frac{\left\{ 1 - 2 \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \right\}}{2 \left\{ 1 - \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \right\}}$$

- e. Modulus Young dinamik

$$E = 2(1+\nu) G \text{ kg/cm}^2$$

- f. Konstanta Lamé

$$\lambda = \rho (v_p^2 - 2 v_s^2)$$

- g. Modulus ruah

$$K = \frac{r}{3} (3 v_p^2 - 4 v_s^2) \text{ kg/cm}^2$$

11. PENGGUNAAN SIFAT MEKANIK BATUAN HASIL UJI LABORATORIUM

Dalam Tabel 3.1. diberikan ringkasan mengenai jenis uji laboratorium untuk mendapatkan parameter mekanik batuan dan penggunaan parameter tersebut.

12. PENENTUAN SIFAT MEKANIK BATUAN IN-SITU

Dilakukannya uji in-situ untuk menentukan sifat mekanik batuan lebih menguntungkan dibandingkan dengan uji di laboratorium karena menyangkut volume batuan yang besar sehingga hasilnya lebih representatif dan lebih menggambarkan keadaan massa batuan yang sebenarnya.

13. UJI BEBAN BATUAN

(Rock Loading Test/Jacking Test)

Uji beban batuan dilakukan untuk menentukan besaran dari modulus deformasi atau modulus elastisitas massa batuan di dalam sebuah lubang bukaan.

Kemampuan rubahan (*deformability*) suatu massa batuan in-situ biasanya ditentukan dengan cara mendongkrak batuan tersebut (*jacking test*). Peralatan yang digunakan untuk jacking test seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.18. Uji ini dilakukan di bawah tanah di dalam sebuah lubang bukaan batuan atau lebih dikenal

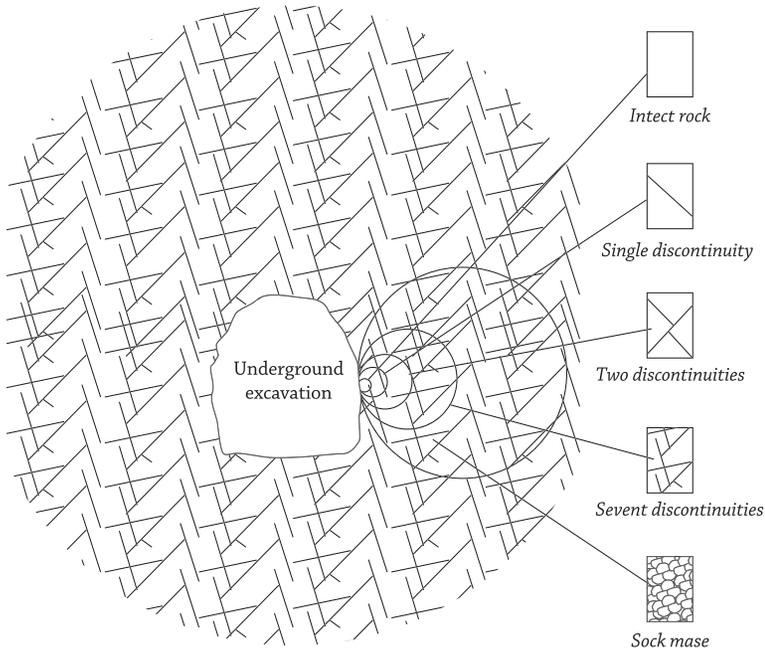
dengan istilah *test adit*. Dongkrak menekan atap dan lantai lubang bukaan atau menekan dinding yang pada bagian kontakannya merupakan permukaan plat yang rata. Hasil dari uji ini adalah deformasi atap dan lantai atau dinding akibat pembebanan oleh *jack* tersebut. Deformasi ini diukur dengan *dial gauge* dan *extensometer* pada berbagai kedalaman.

Modulus deformasi atau modulus elastisitas dapat dihitung dengan persamaan :

$$E = \left(\frac{1 - \nu^2}{2a} \right) \frac{\Delta F}{\Delta W}$$

Tabel 3.1. Jenis uji sifat mekanik di laboratorium dan penggunaan parameter hasil ujinya

Jenis Uji	Parameter yang diperoleh	Penggunaan
Uji kuat tekan	- Kuat tekan (σ_c) - Batas elastik (σ_e) - Modulus Young (E) - Nisbah Poisson (ν)	- Rancangan pilar - Kemantapan lubang bukaan - Kemantapan fondasi - Kemantapan lereng
Uji kuat tarik tak langsung	Kuat tarik (σ_t)	- Rancangan penguatan atap terowongan - Peledakan
Uji point load	- Indeks point load (I_p) - Kuat tekan (σ_c)	Mengetahui kekuatan batuan secara cepat
Uji triaksial	- Selubung kekuatan batuan - Kohesi (C) - Sudut geser dalam (ϕ)	- Kemantapan lereng - Kemantapan fondasi - Kemantapan lubang bukaan
Uji punch shear	Kuat geser	- Kemantapan lereng - Kemantapan bendungan
Uji geser langsung	- Garis kuat geser Coulomb - Kohesi (C) - Sudut geser dalam (ϕ)	- Kemantapan lereng - Kemantapan fondasi - Kemantapan lubang bukaan
Uji kecepatan rambat gelombang ultra sonik	- Kecepatan rambat gelombang tekan (v_p) - Kecepatan rambat gelombang geser (v_s) - Modulus elastisitas dinamik (E) - Nisbah Poisson dinamik (ν)	Rancangan penggalian



Gambar 3.17. Bertambahnya jumlah kekar dengan bertambah besarnya ukuran contoh (Hoek & Brown, 1980)

dengan :

- E = modulus deformasi/elastisitas
- ν = Poisson's ratio
- a = jari-jari plat distribusi
- F = penambahan beban
(*increment of load*)
- W = penambahan perpindahan
(*increment of displacement*)

Gambar 3.19. memperlihatkan contoh kurva tekanan dan perpindahan dari *jacking test* dan Gambar 3.20. memperlihatkan contoh diagram regangan pada kedalaman tertentu dari *jacking test*.

14. UJI GESER BLOK

Uji geser blok dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat geser (*shear strength*) dan parameter deformasi di daerah geser (*shear zone*) atau pada massa batuan yang banyak mengandung bidang-bidang diskontinuitas.

Uji ini harus dilakukan pada daerah yang strukturnya merupakan bagian dari konstruksi bawah tanah yang akan dibuat. Bagian batuan yang akan diuji harus sebesar mungkin. Ukuran batumannya tidak kurang dari 40 x 40 cm dengan tinggi 20

cm. Bila ukurannya lebih besar dari 40 x 40cm, maka perbandingan panjang, lebar, dan tinggi biasanya 2 : 2 : 1. Kadang-kadang landasannya merupakan blok yang ukurannya 0,70 m x 0,70m, bahkan dapat juga 1,0 x 1,0 m.

Gambar 3.21. memperlihatkan peralatan dan tata letaknya di dalam sebuah lubang bukaan. Setelah persiapan selesai, beban tangensial dan beban normal dilakukan kepada blok batuan dengan dongkrak hidrolik. Untuk uji di dalam lubang bukaan, dongkrak hidrolik menyangga atap dan dinding lubang tersebut. Dongkrak vertikal memberikan beban normal pada blok dan dongkrak miring atau horisontal memberikan beban tangensial (geser). Arah penekanan blok batu oleh dongkrak sebaiknya membentuk sudut sekitar 15° untuk menghindari rotasi blok dan meringankan beban geser. Pengukuran deformasi dilakukan selama pembebanan dan pelepasan beban dengan menggunakan *dial gauge*. Uji ini juga akan memberikan besaran sudut ketahanan geser dari batuan.

$$S = \sigma_n \cdot \tan \phi + C$$

dengan :

S = kuat geser (*shear strength*)

σ_n = beban normal di atas bidang geser

ϕ = sudut ketahanan geser dari batuan

C = kohesi batuan

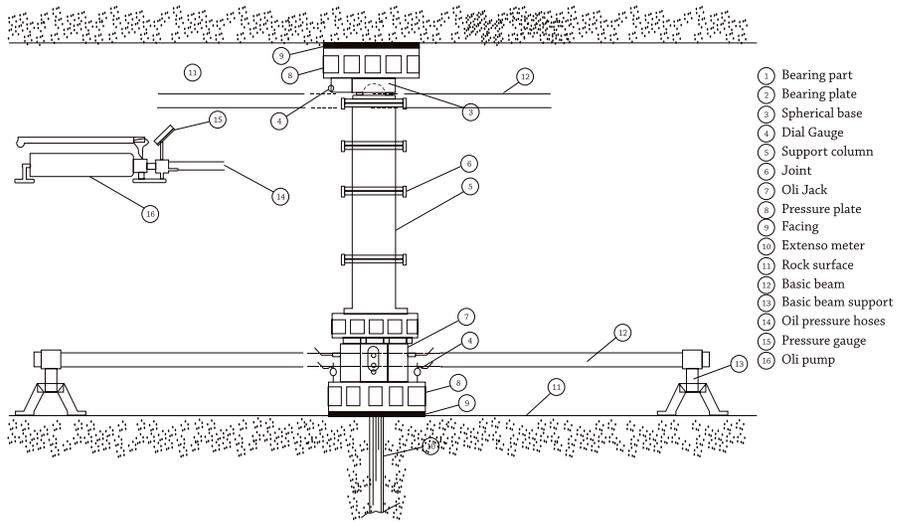
15. UJI TRIAKSIAL IN-SITU

Uji ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik deformasi dan kekuatan batuan pada kondisi pembebanan triaksial. Tempat uji adalah di dalam lubang bukaan bawah tanah.

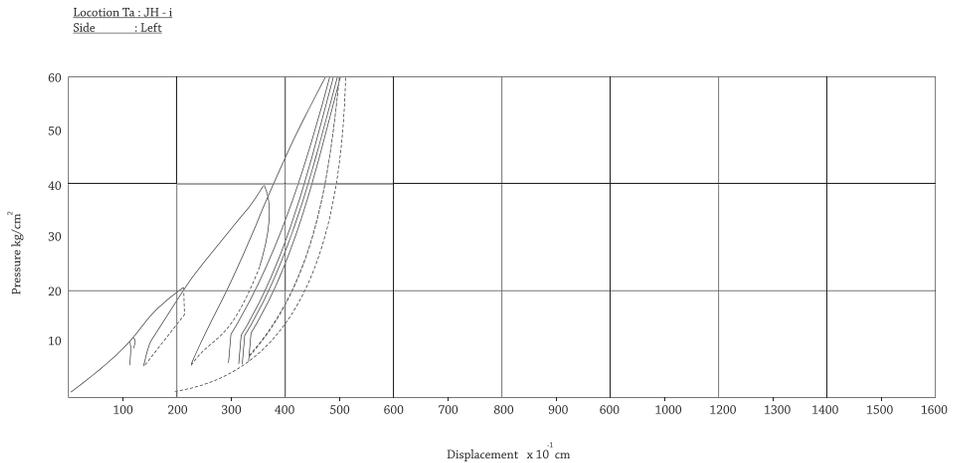
Kontak permukaan lantai, atap dan dinding yang akan dikenakan beban berukuran sekitar 1,0 m x 1,0 m. Peralatan dan tata letaknya dapat dilihat pada Gambar 22.

Pembebanan ke arah vertikal dilakukan oleh dongkrak hidrolik, sedangkan untuk arah horisontal oleh *flat jack*. Dudukan *flat jack* dibuat dengan cara menggali bagian lantai. Ruang antara *flat jack* dengan dinding batuan yang akan ditekan diisi oleh semen. Agar dapat diperoleh nilai deformasi, maka dipasang tiga buah *bore hole extensometer* sepanjang masing-masing $\pm 1,0$ m dan *electric displacement transducer* untuk mengukur perpindahan (*displacement*) vertikal. Sedangkan untuk arah horisontalnya, perpindahan diukur dengan *deflectometer* dan *electric displacement transducer* atau *Linear Variable Differential Transducer (LVDT)*.

Pada sebuah terowongan dilakukan uji triaksial in-situ. Pembebanan maksimum ke arah vertikal adalah 60 kgf/cm² dan ke arah horisontal sampai mencapai 80 kgf/cm². Kadang-kadang tekanan ke arah horisontal sampai mencapai 200 kgf/cm². Hasil uji dapat dilihat pada Tabel 3.2.

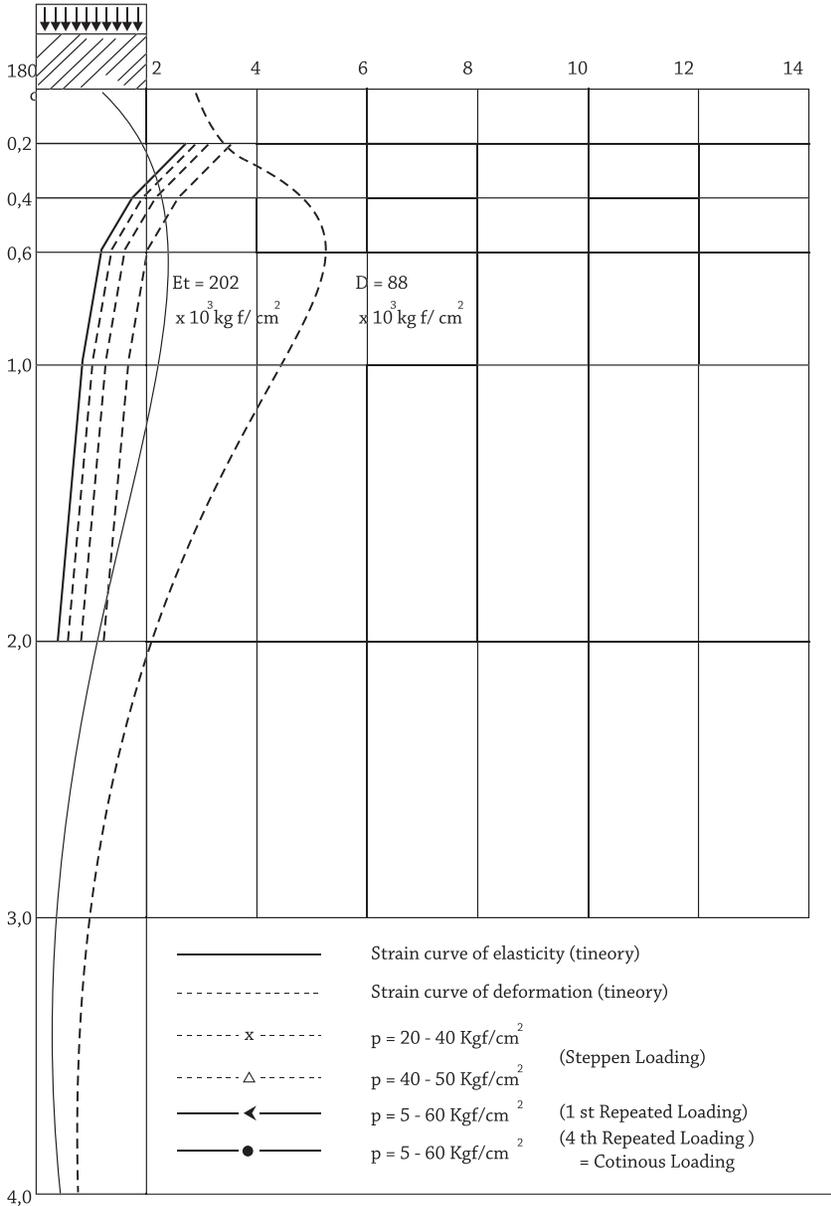


Gambar 3.18. Peralatan untuk uji beban batuan

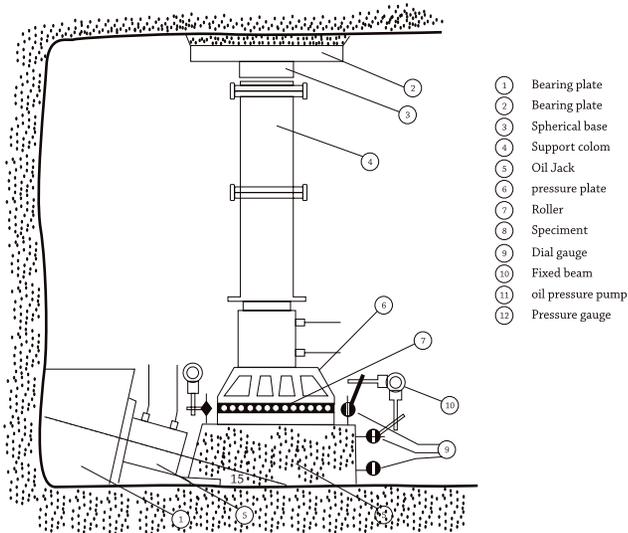


Gambar 3.19. Diagram tekanan-perpindahan dari *jacking test*

Loading plare



Gambar 3.20. Diagram regangan-kedalaman dari *jacking test*



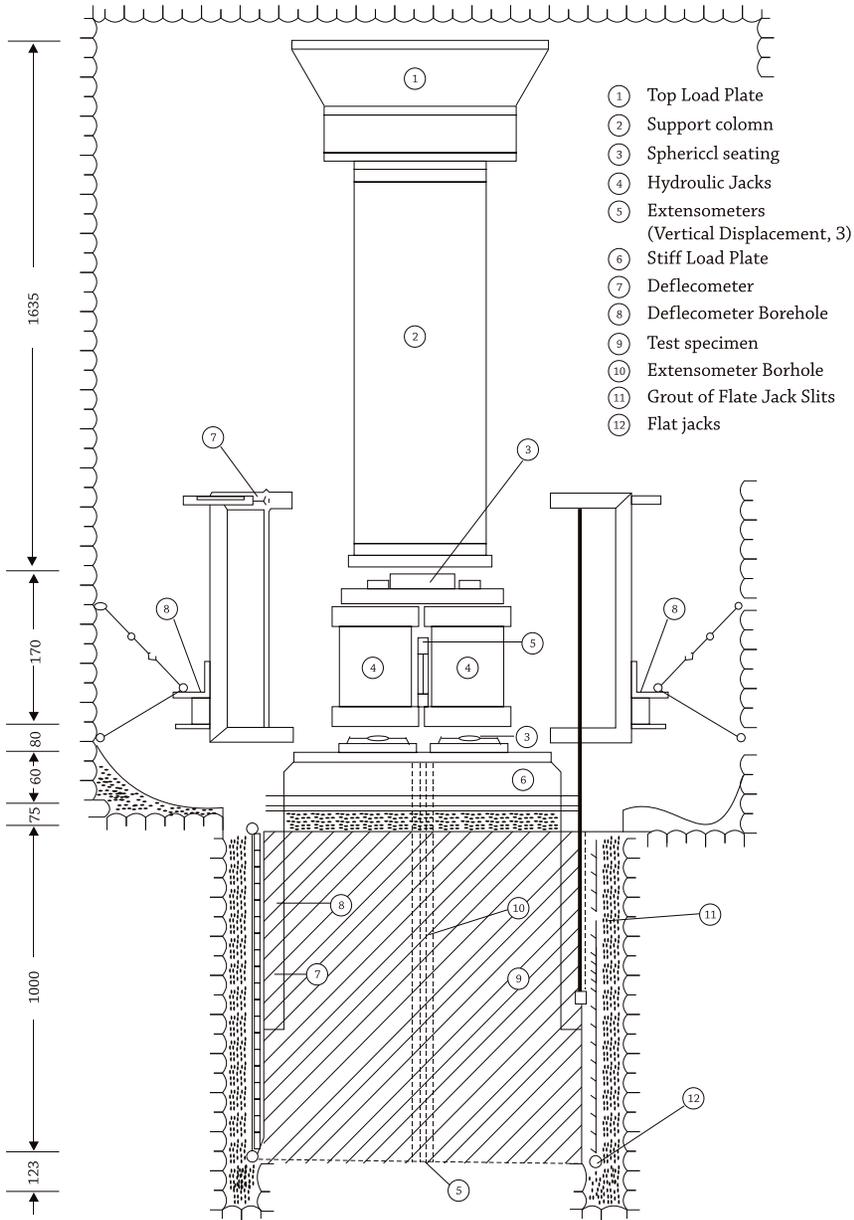
Gambar 21. Peralatan uji geser blok

Tabel 3.2. Hasil uji triaksial in-situ

Siklus No.	Interval Tegangan Vertikal kgf/cm^2	Interval perpindahan mm	E_V Modulus kgf/cm^2	E_A Modulus kgf/cm^2
1	5,0 - 30,0 30,0 - 5,0	0,00 - 0,22 0,22 - 0,07	113.000	160.000
2	5,0 - 10,0 40,0 - 0,5	0,07 - 0,31 0,31 - 0,06	145.000	140.000
3	5,0 - 40,0 40,0 - 5,0	0,06 - 0,30 0,30 - 0,06	145.000	145.000
4	5,0 - 40,0 40,0 - 5,0	0,06 - 0,27 0,27 - 0,04	166.000	152.000
5	5,0 - 60,0 60,0 - 5,0	0,04 - 0,64 0,64 - 0,24	144.000	137.000
6	5,0 - 60,0 60,0 - 5,0	0,24 - 0,72 0,72 - 0,34	144.000	144.000
7	5,0 - 60,0 60,0 - 5,0	0,34 - 0,68 0,68 - 0,52	161.000	(375.000)

E_V adalah modulus untuk pembebanan statik yang menaik.

E_A adalah modulus untuk pembebanan statik yang menurun.



Gambar 22. Peralatan uji triaksial in-situ

16. PENGGUNAAN SIFAT MEKANIK BATUAN HASIL UJI IN-SITU

Dalam Tabel 3.3. diberikan ringkasan mengenai jenis uji in-situ untuk mendapatkan parameter mekanik batuan dan penggunaan parameter tersebut.

17. PENENTUAN JUMLAH CONTOH

Dengan statistik, jumlah contoh yang dibutuhkan dalam uji di laboratorium untuk penentuan sifat fisik dan sifat mekanik sebuah batuan dengan ketelitian yang dikehendaki dapat dihitung sebagai berikut :

$$X = \mu - k\sigma$$

dengan :

X = nilai yang diambil (diperkirakan)

μ = nilai rata-rata dari populasi

σ = simpangan baku dari populasi.

Jika ada n contoh, maka dapat diketahui X^*

$$X^* = \mu^* - k\sigma^*$$

dimana tanda * menyatakan nilai yang diperkirakan.

Ketelitian (*precision*) ϵ di mana diketahui

$$X \text{ adalah : } |X - X^*|$$

Jika jumlah contoh banyak, maka:

$$\epsilon = t_{\alpha} \sqrt{\text{var}(X^*)}$$

dengan :

t adalah hazard dari Gauss,

untuk $\alpha = 0,05 \rightarrow t \cong 2$

var = variansi

Tabel 3.2 Jenis uji sifat mekanik in-situ dan penggunaan parameter hasil ujinya

Jenis Uji	Parameter yang diperoleh	Penggunaan
Uji beban batuan	- Parameter deformasi - Parameter kekuatan	- Kemantapan lubang bukaan - Kemantapan lereng
Uji geser blok	- Selubung kekuatan batuan - Kohesi (C) - Sudut geser dalam (ϕ)	- Kemantapan lubang bukaan - Kemantapan lereng
Uji triaksial in-situ	Modulus Young (E)	- Kemantapan lubang bukaan - Kemantapan lereng

Dapat ditulis :

$$\text{var}(X^*) = \text{var}(\mu^*) + k^2 \text{var}(\sigma^*)$$

$$\text{var}(\mu^*) = \frac{\sigma^2}{n}$$

$$\text{var}(\sigma^*) = \frac{\sigma^2}{2(n-1)}$$

$$\begin{aligned}\text{var}(X^*) &= \frac{\sigma^2}{n} + k^2 \frac{\sigma^2}{2(n-1)} \\ &= \sigma^2 \frac{k^2 + 2}{2n}\end{aligned}$$

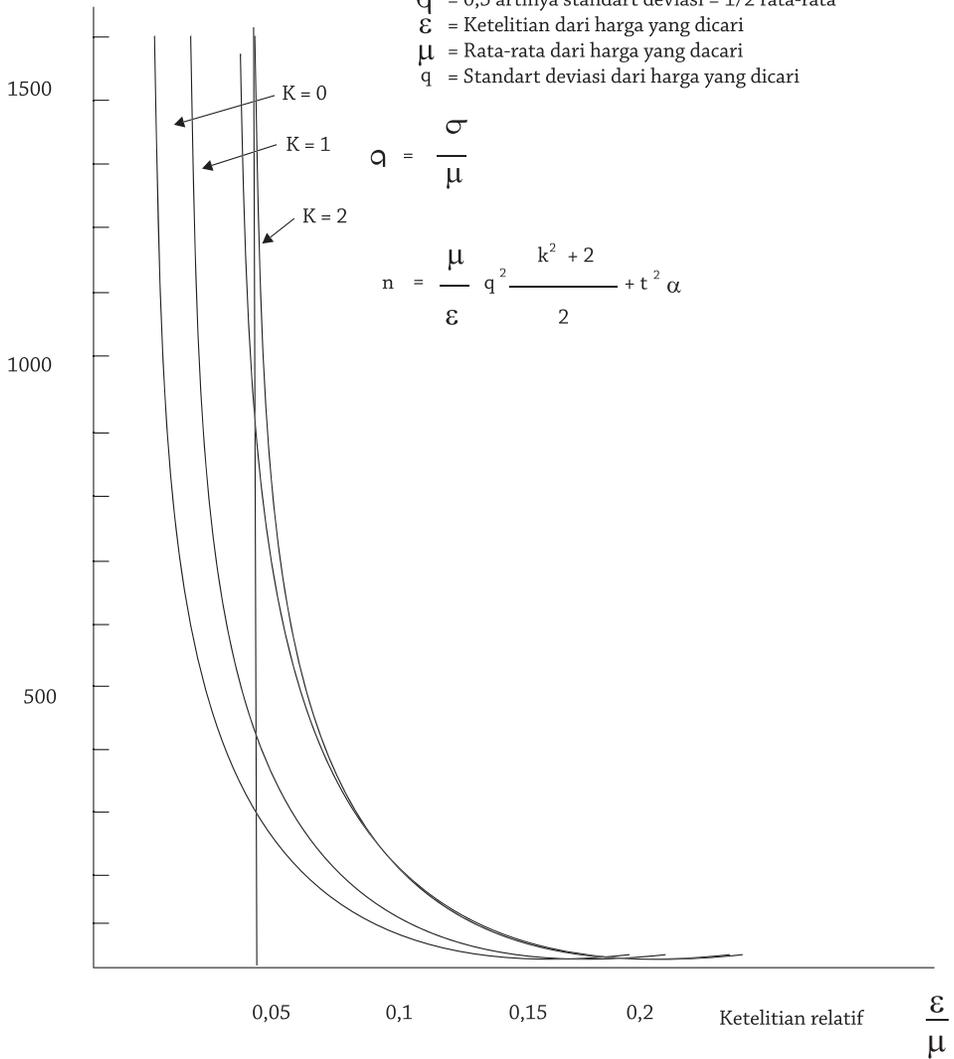
$$e = t\alpha\sigma \sqrt{\frac{k^2 + 2}{2n}}$$

$$n = t\alpha^2 \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2} \frac{k^2 + 2}{2}$$

$$q = \frac{\sigma}{\mu} \rightarrow q\mu = \sigma$$

$$n = \left(\frac{\mu}{\varepsilon}\right)^2 q^2 \frac{k^2 + 2}{2} t\alpha^2$$

Jumlah percontohan



Gambar 3.23. Kurva jumlah contoh terhadap ketelitian relatif untuk $t = 2$ dan $q = 0,5$

PERILAKU BATUAN

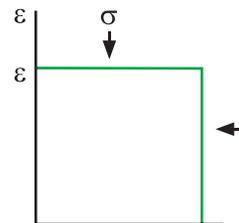
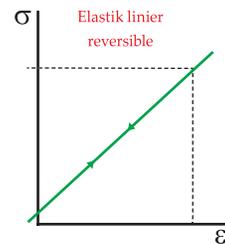
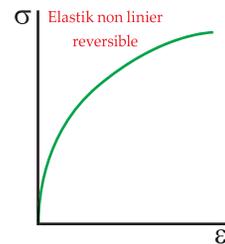
1. PERILAKU BATUAN

Batuan mempunyai perilaku (*behavior*) yang berbeda-beda pada saat menerima beban. Perilaku batuan ini dapat ditentukan antara lain di laboratorium dengan uji kuat tekan. Dari hasil uji dapat dibuat kurva tegangan-regangan, kurva *creep* dari uji dengan tegangan konstan, dan kurva relaksasi dari uji dengan regangan konstan. Dengan mengamati kurva-kurva tersebut dapat ditentukan perilaku dari batuan.

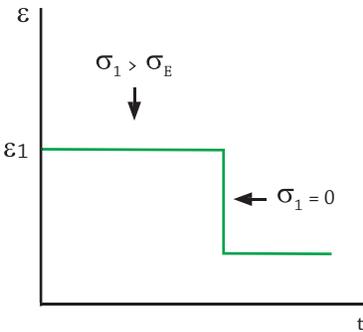
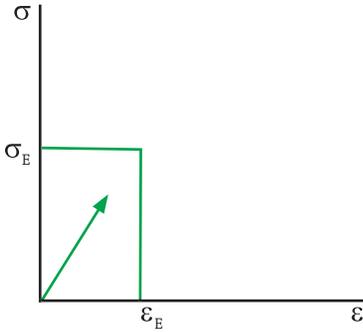
2. ELASTIK DAN ELASTO-PLASTIK

Perilaku batuan dikatakan elastik (linier maupun non linier) jika tidak terjadi deformasi permanen pada saat tegangan dibuat nol.

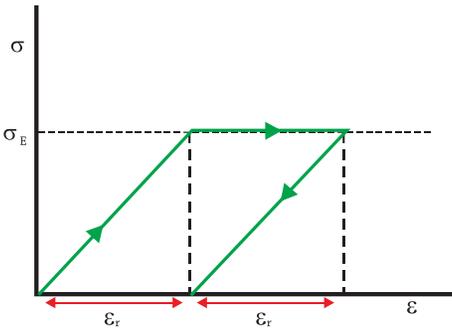
Plastisitas adalah karakteristik batuan yang mengijinkan regangan (*deformasi*) permanen yang besar sebelum batuan tersebut hancur (*failure*).



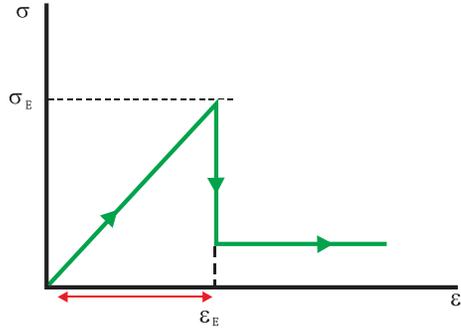
Gambar 4.1. Kurva tegangan-regangan dan regangan-waktu untuk perilaku batuan elastik linier dan elastik non linier



Gambar 4.2. Kurva tegangan-regangan dan regangan-waktu untuk perilaku batuan elasto-plastik

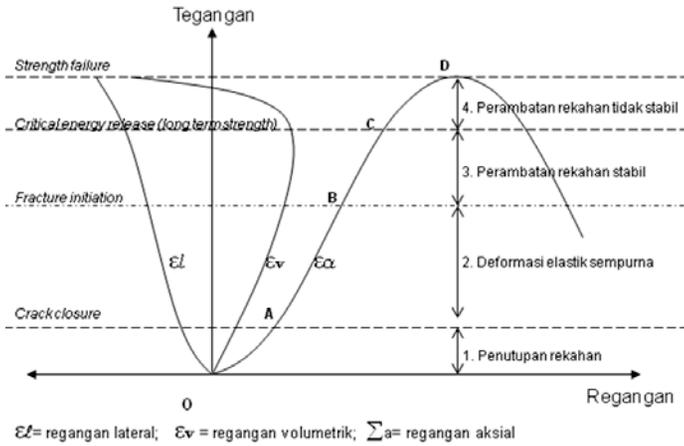


Gambar 4.3. Kurva tegangan-regangan untuk perilaku batuan elasto-plastik sempurna



Gambar 4.4. Kurva tegangan-regangan untuk perilaku batuan elastik *fragile*

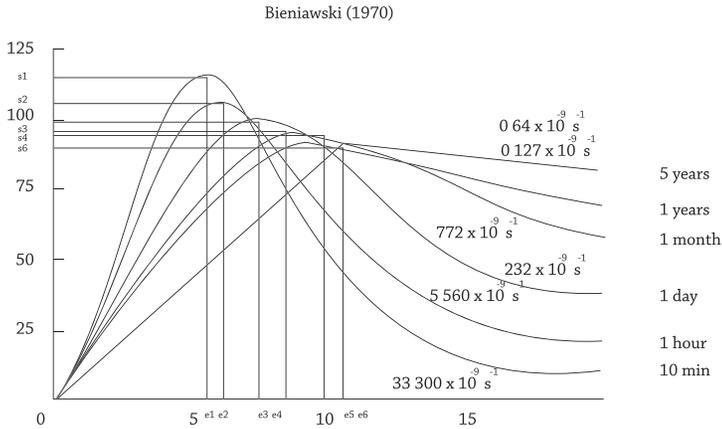
Perilaku batuan sebenarnya yang diperoleh dari uji kuat tekan digambarkan oleh Bieniawski (1984) seperti pada Gambar 4.5. Pada tahap awal batuan dikenakan gaya, kurva berbentuk landai dan tidak linier yang berarti bahwa gaya yang diterima oleh batuan dipergunakan untuk menutup rekahan awal (*pre-existing cracks*) yang terdapat di dalam batuan. Sesudah itu kurva menjadi linier sampai batas tegangan tertentu yang kita kenal dengan batas elastik (σ_E) lalu terbentuk rekahan baru dengan perambatan stabil sehingga kurva tetap linier. Sesudah batas elastik dilewati maka perambatan rekahan menjadi tidak stabil, kurva tidak linier lagi dan tidak berapa lama kemudian batuan akan hancur. Titik hancur ini menyatakan kekuatan batuan.



Gambar 4.5. Tahap utama perilaku dari sebuah batu (Bieniawski, 1984)

Kekuatan batuan yang diperoleh dari hasil uji kuat tekan di laboratorium sangat dipengaruhi oleh lamanya uji tersebut berlangsung. Gambar 4.6. memperlihatkan

kan bahwa makin lama uji berlangsung maka kekuatannya makin rendah, demikian juga dengan nilai modulus deformasinya.

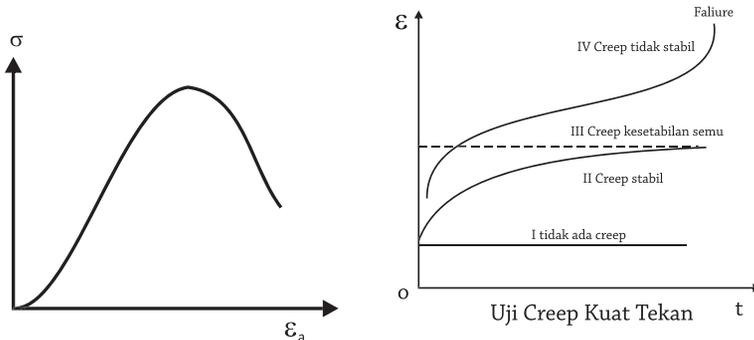


Gambar 4.6. Pengaruh waktu uji terhadap kekuatan dan bentuk kurva tegangan-regangan batuan. (Bieniawski, 1984)

3. CREEP DAN RELAKSASI BATUAN

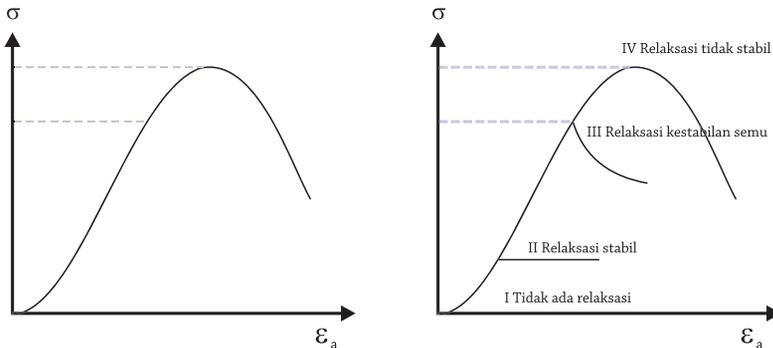
Gambar 4.7. menunjukkan bahwa di daerah I dan II pada kurva tegangan-regangan masing-masing menyatakan keadaan tidak ada *creep* dan *creep* stabil. Sehingga di daerah tersebut kestabilannya adalah untuk jangka panjang, karena regangan tidak akan bertambah sampai kapanpun pada kondisi tegangan konstan.

Daerah III terjadi *creep* dengan kestabilan semu yang pada saat tertentu akan terjadi *failure*. Daerah IV terjadi *creep* yang tidak stabil dimana pada beberapa saat saja terjadi *failure*.



Gambar 4.7. Daerah terjadinya *creep* pada kurva tegangan-regangan dan regangan-waktu

Seperti pada *creep* batuan, relaksasi batuan juga akan terjadi di daerah yang sama pada kurva tegangan-regangan (Gambar 4.8).

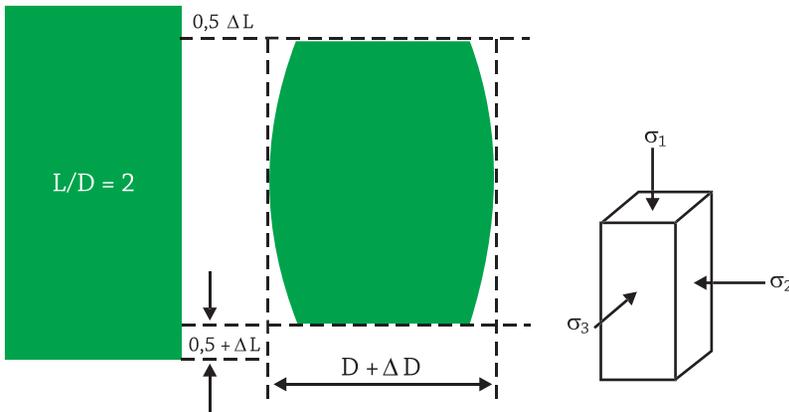


Gambar 4.8. Daerah terjadinya relaksasi pada kurva tegangan-regangan dan regangan-waktu

4. HUBUNGAN TEGANGAN DAN REGANGAN UNTUK PERILAKU BATUAN ELASTIK LINIER DAN ISOTROP

- a. Batuan dikenakan tegangan sebesar σ_1 pada arah (1), sedangkan pada arah (2) dan (3) = 0 (Gambar 4.9).

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \quad \epsilon_2 = -\frac{\nu\sigma_1}{E} \quad \epsilon_3 = -\frac{\nu\sigma_1}{E}$$



Gambar 4.9. Tegangan uniaksial dan triaksial pada batuan

- b. Batuan dikenakan tegangan sebesar τ_2 pada arah (2), sedangkan tegangan pada arah (1) dan (3) = 0.

$$\epsilon_1 = -\frac{\nu\sigma_2}{E} \quad \epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} \quad \epsilon_3 = -\frac{\nu\sigma_2}{E}$$

- c. Batuan dikenakan tegangan sebesar σ_3 pada arah (3), sedangkan tegangan pada arah (1) dan (2) = 0

$$\epsilon_1 = -\frac{\nu\sigma_3}{E} \quad \epsilon_2 = -\frac{\nu\sigma_3}{E} \quad \epsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E}$$

d. Batuan dikenakan tegangan :

σ_1 pada arah (1)

$$\epsilon_1 \text{ total} = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_2 + \sigma_3)$$

σ_2 pada arah (2)

$$\epsilon_2 \text{ total} = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_3)$$

σ_3 pada arah (3)

$$\epsilon_3 \text{ total} = \frac{\sigma_3}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

$$\text{Strain tensor : } i \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix}$$

$$\text{Stress tensor : } i \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}$$

Bentuk umum hubungan regangan dan tegangan adalah sebagai berikut :

$$\epsilon_i = \left(\frac{1 + \nu}{E} \right) s_i - \frac{\nu}{E} N$$

(arah prinsipal)

dengan $N = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

i bervariasi dari 1 sampai 3.

$\delta_{ij} = 0$ jika $i \neq j$

$\delta_{ij} = 1$ jika $i = j$

Bentuk umum hubungan tegangan dan regangan adalah sebagai berikut :

$$\sigma_i = \mu \epsilon_i + \lambda \xi \text{ (arah prinsipal)}$$

dengan $\xi = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$

i bervariasi dari 1 sampai 3

$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ adalah modulus geser

$$\lambda = \frac{E \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

μ dan λ dikenal sebagai koefisien Lamé

Jika tidak pada arah prinsipal maka hubungan antara regangan dan tegangan adalah :

$$\epsilon_{ij} = \left(\frac{1 + \nu}{E} \right) s_{ij} - \frac{\nu}{E} N \times d_j$$

i bervariasi dari 1 sampai 3

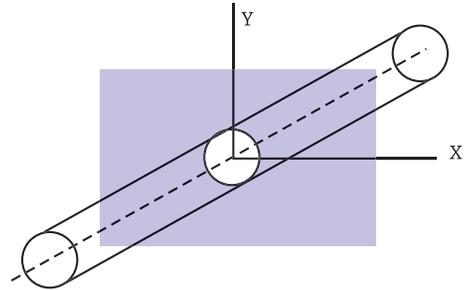
j bervariasi dari 1 sampai 3

Jika tidak pada arah prinsipal maka hu-

bungan antara tegangan dan regangan adalah :

$$\sigma_{ij} = \mu \epsilon_{ij} + \lambda \xi \times \delta_{ij}$$

i bervariasi dari 1 sampai 3
j bervariasi dari 1 sampai 3



Gambar 4.10. Regangan bidang

5. HUBUNGAN TEGANGAN DAN REGANGAN PADA BIDANG UNTUK PERILAKU BATUAN ELASTIK LINIER DAN ISOTROP

Untuk menyederhanakan perhitungan hubungan antara tegangan dan regangan maka dibuat model dua dimensi di mana pada kenyataannya adalah tiga dimensi. Model dua dimensi yang dikenal adalah :

1. Regangan bidang (*plane strain*),
2. Tegangan bidang (*plane stress*),
3. *Symmetrical revolution*.

5.1. Regangan Bidang (*Plane Strain*)

Misalkan sebuah terowongan yang mempunyai sistem sumbu kartesian x, y dan z dipotong oleh sebuah bidang dengan sumbu x, y (Gambar 4.10), sehingga :

$$\begin{aligned} \epsilon_z &= 0 \\ \gamma_{yz} &= 0 \quad (\gamma_{yz} = \epsilon_{23}) \\ \gamma_{xz} &= 0 \quad (\gamma_{xz} = \epsilon_{13}) \\ \epsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) = 0 \end{aligned}$$

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y - \nu \sigma_z) = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y - \nu 2\sigma_x - \nu 2\sigma_y)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x - \nu \sigma_z) = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x - \nu 2\sigma_x - \nu 2\sigma_y)$$

$$\sigma_x = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \epsilon_x +$$

$$\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \epsilon_y$$

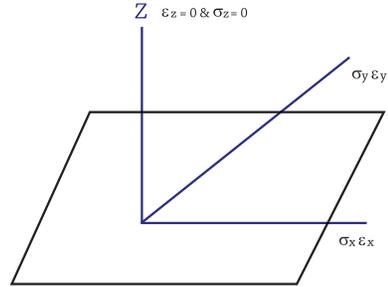
$$\sigma_y = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \epsilon_y +$$

$$\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \epsilon_x$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy}$$

dengan: $\tau_{xy} = \sigma_{12}$; $\gamma_{xy} = \varepsilon_{12}$

Dalam bentuk matriks, maka hubungannya :



Gambar 4.11. Tegangan bidang

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 \\ \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

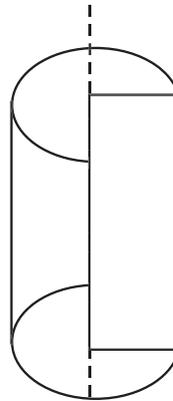
5.2. Tegangan Bidang (*Plane Stress*)

Pada tegangan bidang maka seluruh tegangan pada salah satu sumbu sama dengan nol. Pada Gambar 4.11.

$$\sigma_z = 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0.$$

5.3. Symmetrical Revolution

Gambar 4.12. memperlihatkan jika sebuah benda berbentuk silinder diputar pada sumbunya maka benda tersebut dapat diwakili oleh sebuah bidang. Karena sumbunya merupakan sumbu simetri maka benda tersebut cukup diwakili oleh bidang yang diarsir.



Gambar 4.12. *Symmetrical revolution*

KRITERIA FAILURE BATUAN

1. KRITERIA FAILURE

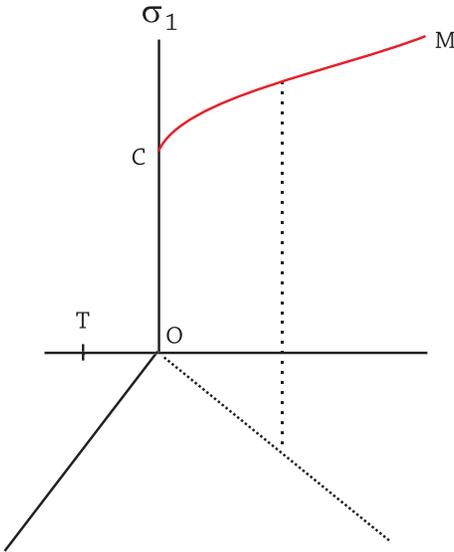
Kriteria *failure* batuan ditentukan berdasarkan hasil-hasil (*experiment*). Ekspresi dari kriteria ini mengandung satu atau lebih parameter sifat mekanik dari batuan dan menjadi sederhana jika dihitung dalam 2 dimensi dengan asumsi regangan bidang (*plane strain*) atau tegangan bidang (*plane stress*).

Pada tegangan bidang, dua tegangan prinsipal (*principal stresses*) saja yang berpengaruh karena satu tegangan utama sama dengan nol. Pada regangan bidang, jika mempunyai $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, maka *intermediate principal stress* σ_2 merupakan fungsi dari dua tegangan utama lainnya atau kriteria *failure* hanya berfungsi pada dua tegangan utama tersebut (σ_1 dan σ_3).

Gambar 5.1. menunjukkan titik-titik dari permukaan relatif kekuatan (*strength*) batuan yang diperoleh dari uji dilabora-

torium yang biasa dilakukan.

- Uji kuat tekan *unconfined*
 $\sigma_1 = \sigma_c, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, digambarkan oleh titik C.
- Uji kuat tarik
 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\sigma_1$, digambarkan oleh titik T.
- Uji triaksial
 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, digambarkan oleh kurva CM.
- OC = σ_c = kuat tekan
- OT = σ_1 = kuat tarik
- CM = tekanan traksial ($\sigma_2 = \sigma_3$)



Gambar 5.1. Ruang dari tegangan-tegangan hasil uji klasik di dalam mekanika batuan

2. TEORI MOHR

Teori Mohr menganggap bahwa :

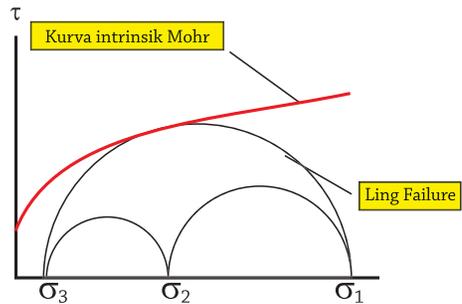
- untuk suatu keadaan tegangan $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (*intermediate stress*) tidak mempengaruhi *failure* batuan,
- kuat tarik tidak sama dengan kuat tekan.

Teori ini didasarkan pada hipotesa bahwa tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada permukaan *rupture* memainkan peranan pada proses *failure* batuan.

Untuk beberapa bidang *rupture* di mana tegangan normal sama besarnya, maka bidang yang paling lemah adalah bidang yang mempunyai tegangan geser paling besar sehingga kriteria Mohr dapat ditulis sebagai berikut :

$$\tau = f(\sigma)$$

dan digambarkan pada (σ, τ) oleh sebuah kurva pada Gambar 5.2. berikut ini:

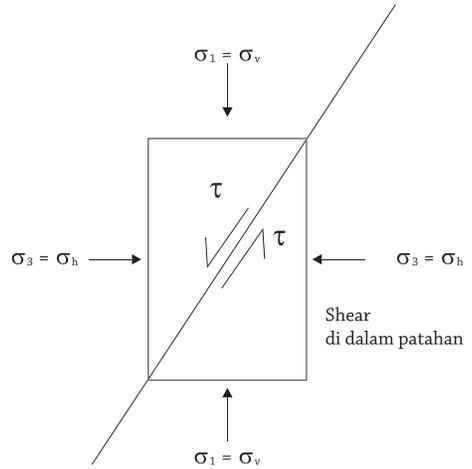


Gambar 5.2. Kriteria Mohr : $\tau = f(\sigma)$

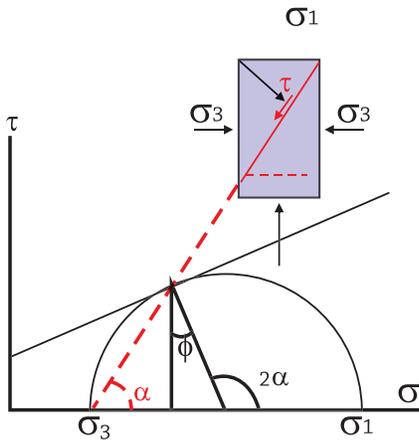
Untuk keadaan tegangan $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ yang diposisikan pada bidang (σ, τ) , terlihat bahwa lingkaran Mohr (σ_1, σ_3) mempengaruhi kriteria *failure*. *Failure* terjadi jika lingkaran Mohr menyinggung kurva Mohr (kurva *intrinsic*) dan lingkaran tersebut disebut lingkaran *failure* (Gambar 5.2.).

Kurva Mohr merupakan *envelope* dari lingkaran-lingkaran Mohr pada saat *failure*. Kurva ini tidak dapat dinyatakan dengan sebuah rumus yang sederhana, melainkan didapat dari hasil percobaan dengan menggambarkan *envelope* dari beberapa lingkaran Mohr pada saat *failure*, pada berbagai kondisi tegangan (Gambar 5.3).

Kriteria Mohr juga dapat digunakan untuk mempelajari kekuatan geser (*shear strength*) di dalam patahan, kekar, atau jenis-jenis diskontinuitas lainnya (Gambar 5.4).



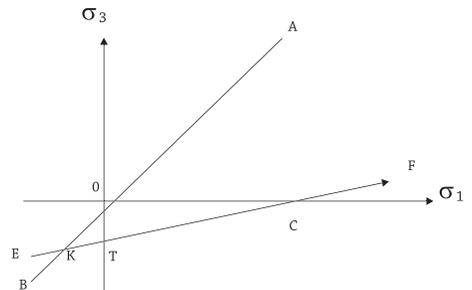
Gambar 5.4. Kekuatan geser pada patahan



Gambar 5.3. Kurva Mohr sebagai *envelope* dari lingkaran-lingkaran Mohr pada saat *failure*

3. KRITERIA MOHR-COULOMB

Untuk mempermudah perhitungan di dalam mekanika batuan maka *envelope* Mohr dianggap sebagai garis lurus. Oleh karena itu didefinisikan kriteria Mohr-Coulomb sebagai berikut (Gambar 5.5).



Gambar 5.5. Kriteria Mohr-Coulomb

$$\tau = C + \mu\sigma$$

Persamaan (1) dapat ditulis :

dengan :

- τ = tegangan geser
- σ = tegangan normal
- C = kohesi
- μ = koefisien geser dalam
dari batuan = $\tan \phi$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} - \frac{\sigma_3}{\sigma_t} = 1 \dots\dots\dots (3)$$

Jika $\tan \phi = \mu$, persamaan (2) dapat ditulis:

Misalkan σ_1 dan σ_3 adalah tegangan-tegangan utama ekstrim, maka kriteria Mohr-Coulomb dapat ditulis :

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$$

$$\sigma_1 \{(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu\} - \sigma_3 \{(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu\} = 2C \dots\dots (1)$$

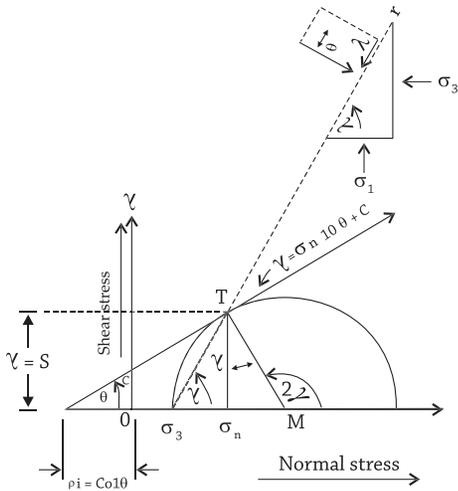
Dari persamaan (1) dapat disimpulkan bahwa batuan dapat mengalami *rupture* pada dua bidang dengan kondisi tegangan yang berbeda.

Pada bidang (σ_1, σ_3) , persamaan (3) digambarkan oleh garis EF (Gambar 5.5), tetapi karena $\sigma_1 > \sigma_3$, kriteria digambarkan oleh garis KF. Nilai σ_1 dan σ_3 di mana terjadi *failure* terletak pada sudut BKF dan sudut AKF untuk kondisi tegangan di mana tidak terjadi *failure*.

Persamaan (1) dapat disederhanakan dan merupakan fungsi dari σ_c (kuat tekan) dan σ_t (kuat tarik).

Teori ini memperkirakan bahwa $\sigma_c > \sigma_t$. Untuk $\mu = 1$ artinya $\phi = 45^\circ$ maka nilai $\sigma_c = 5,8 \sigma_t$. Hasil uji kuat tekan dan tarik untuk berbagai jenis batuan menunjukkan bahwa perbandingan $\frac{\sigma_c}{\sigma_t}$ cenderung untuk lebih besar dari 5,8. Semakin besar perbandingan tersebut, batuan bersifat semakin getas dan cenderung mudah dipisahkan.

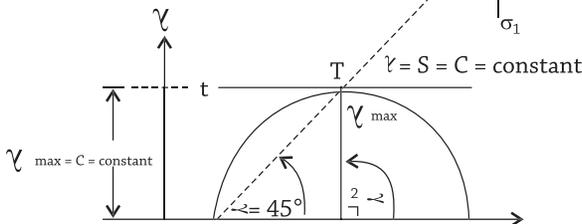
- Kondisi tekan :
 $\sigma_1 = \sigma_c, \sigma_3 = 0$
 $\sigma_1 \{(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu\} = 2C$
 - Kondisi tarik :
 $\sigma_1 = 0, \sigma_3 = -\sigma_t$
 $\sigma_t \{(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu\} = 2C$
- $$\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = \frac{\{1 + \mu^2\}^{1/2} + \mu}{\{1 + \mu^2\}^{1/2} - \mu} \dots\dots\dots (2)$$



Gambar 5.6. Kriteria Mohr-Coulomb (kasus umum)

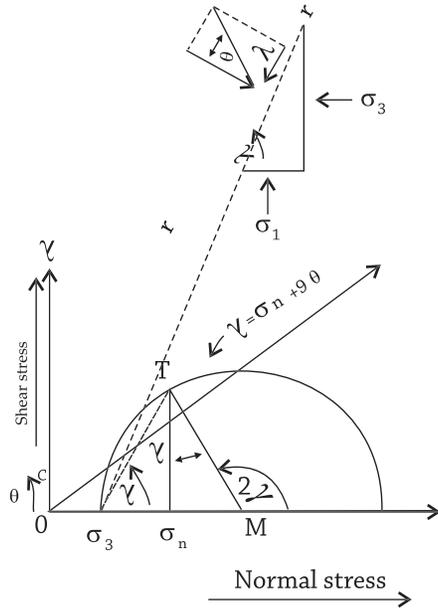
Faktor keamanan (*safety factor*) dengan menggunakan kriteria Mohr-Coulomb ditentukan berdasarkan jarak dari titik pusat lingkaran Mohr ke garis kekuatan batuan (kurva *intrinsic*) dibagi dengan

$$\begin{aligned} \text{Jika } \theta = 0 \\ S = \gamma = C = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \text{konstan} \\ \text{Jika } \phi = 0 \text{ dan } \theta = 0 \\ S = \gamma = C = \frac{\sigma_1}{2} \end{aligned}$$

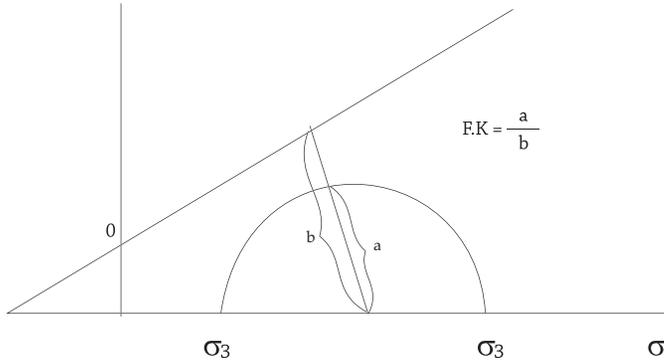


Gambar 5.8. Kriteria Mohr-Coulomb jika $\phi = 0$ (*pure cohesive material*)

jari-jari lingkaran Mohr (Gambar 5.9). Faktor keamanan ini menyatakan perbandingan keadaan kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja pada batuan tersebut.



Gambar 7. Kriteria Mohr-Coulomb jika $C = 0$



Gambar 5.9. Penentuan faktor keamanan

4. KRITERIA TEGANGAN TARIK MAKSIMUM

Kriteria ini menganggap bahwa batuan mengalami *failure* oleh *fracture fragile (brittle)* yang diakibatkan oleh tarikan (*tension*) jika padanya dikenakan tegangan utama $-\sigma_3$ yang besarnya sama dengan kuat tarik uniaxial (σ_t) dari batuan tersebut.

$$\sigma_3 = -\sigma_t$$

Menurut kriteria ini, batuan mengalami *failure* jika tegangan geser maksimum τ_{\max} sama dengan kuat geser batuan S .

$$S = \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

dengan :

σ_1 = tegangan prinsipal mayor

σ_3 = tegangan prinsipal minor

5. KRITERIA TEGANGAN GESER MAKSIMUM

Kriteria *failure* dari Tresca berlaku untuk batuan isotrop dan *ductile*. Kriteria ini merupakan fungsi dari tegangan utama σ_1 dan σ_3 .

Intermediate principal stress σ_2 tidak berperan di dalam kriteria ini.

Kriteria Tresca adalah hal khusus dari Kriteria Mohr-Coulomb (Gambar 5.8).

DISTRIBUSI TEGANGAN DI SEKITAR TEROWONGAN

1. DISTRIBUSI TEGANGAN SEBELUM DIBUAT TEROWONGAN

Dibuatnya sebuah atau beberapa terowongan di bawah tanah akan mengakibatkan perubahan distribusi tegangan (*stress distribution*) di bawah tanah, terutama di dekat terowongan-terowongan tersebut.

Sebelum terowongan dibuat, pada titik-titik di dalam massa batuan bekerja tegangan mula-mula (*initial stress*). Tegangan mula-mula ini sukar diketahui secara tepat), baik besarnya maupun arahnya. Baru sekitar 20 tahun yang lalu dengan cara pengukuran tegangan in-situ dapat diketahui lebih banyak mengenai tegangan mula-mula ini.

Tegangan mula-mula ada 3 macam, yaitu:

- a. Tegangan gravitasi (*gravitational stress*) yang terjadi karena berat dari tanah

atau batuan yang berada di atasnya (*overburden*).

- b. Tegangan tektonik (*tectonic stress*) terjadi akibat geseran-geseran pada kulit bumi yang terjadi pada waktu yang lampau maupun saat ini, seperti pada saat terjadi sesar dan lain-lain.
- c. Tegangan sisa (*residual stress*) adalah tegangan yang masih tersisa, walaupun penyebab tegangan tersebut sudah hilang yang berupa panas ataupun pembengkakan pada kulit bumi.

Jika tegangan tektonik dan tegangan sisa tidak ada atau dapat diabaikan karena kecilnya pada suatu daerah yang akan dibuat terowongan maka tegangan mula-mula hanya berupa tegangan gravitasi yang dapat dihitung secara teoritis sebagai berat persatuan luas dari tanah/batu yang terdapat di atasnya, atau dapat ditulis sebagai :

Angka Hd

$$\sigma_o = \gamma H$$

dengan :

σ_o = tegangan mula-mula

γ = density tanah/batu di atasnya

H = jarak dari permukaan tanah

2. DISTRIBUSI TEGANGAN DI SEKITAR TEROWONGAN UNTUK KEADAAN YANG PALING IDEAL

Untuk memudahkan perhitungan distribusi tegangan disekitar terowongan maka digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- Geometri dari terowongan
 - Penampang terowongan merupakan sebuah lingkaran dengan jari-jari R.
 - Terowongan berada pada bidang horisontal.
 - Terowongan terletak pada kedalaman $H \gg R$ ($H > 20 R$).
 - Terowongan sangat panjang, sehingga dapat digunakan hipotesa regangan bidang (*plane strain*).
- Keadaan batuan.
 - Kontinu.
 - Homogen.
 - Isotrop.
- Keadaan tegangan mula-mula (*initial stress*) hidrostatik.

$$\begin{bmatrix} \sigma_o & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_o & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_o \end{bmatrix}$$

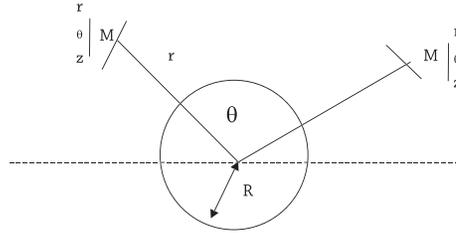
Angka Nd

$$\sigma_o = \gamma H,$$

dengan:

γ = density batuan,

H = kedalaman *Symmetrical revolution* di sekeliling Oz



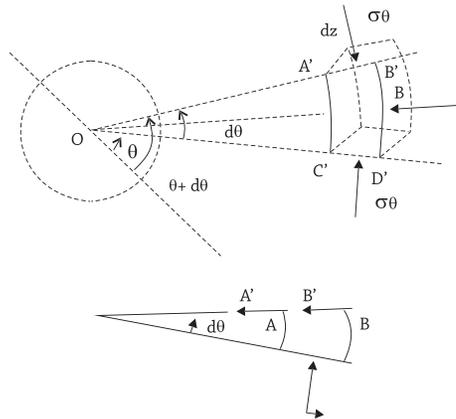
Gambar 6.1. Koordinat silindrik

Luas $ds = A' B' C' D'$

$OA = r$; $OB = r + dr$

σ_θ = tegangan tangensial

σ_r = tegangan radial



Gambar 6.2. Perhitungan distribusi tegangan di sekitar terowongan

Kesetimbangan pada Or :

$$\sigma_r \cdot r \cdot d\theta - (\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr) (r + dr) d\theta +$$

$$\sigma_\theta \cdot \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \cdot dr \cdot 2 + F_r \cdot dV = 0$$

$$\sigma_r \cdot r \cdot d\theta - \sigma_r \cdot r \cdot d\theta - \sigma_r \cdot dr \cdot d\theta - r \cdot \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \cdot dr \cdot$$

$$d\theta - \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \cdot (dr)^2 \cdot d\theta + \sigma_\theta \cdot dr \cdot d\theta + F_r \cdot dV = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \cdot (dr)^2 \cdot d\theta \text{ dan } F_r \cdot dV \text{ dapat diabaikan}$$

sehingga didapat :

$$\sigma_\theta - \sigma_r - r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = 0$$

Kesetimbangan pada Oz :

$$\sigma_z \cdot ds - (\sigma_z + d\sigma_z) \cdot ds + F_z \cdot dV = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \cdot dz \cdot ds + F_z \cdot dV = 0$$

$F_z \cdot dV$ dapat diabaikan sehingga didapat :

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \rightarrow \sigma_z = \text{konstan}$$

Kesetimbangan terowongan :

$$\sigma_\theta - \sigma_r - r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = 0 \rightarrow \sigma_z = \text{konstan} \quad (2)$$

Perpindahan dan regangan :

u = perpindahan radial

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = \frac{AB - A'B'}{AB}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{2\pi r - 2\pi(r-u)}{2\pi r} = \frac{u}{r}$$

Elastik linier (Hukum Hooke) :

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta \sigma_r}{E} - \frac{\nu}{E} (\Delta \sigma_\theta + \Delta \sigma_z)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\Delta \sigma_\theta}{E} - \frac{\nu}{E} (\Delta \sigma_r + \Delta \sigma_z)$$

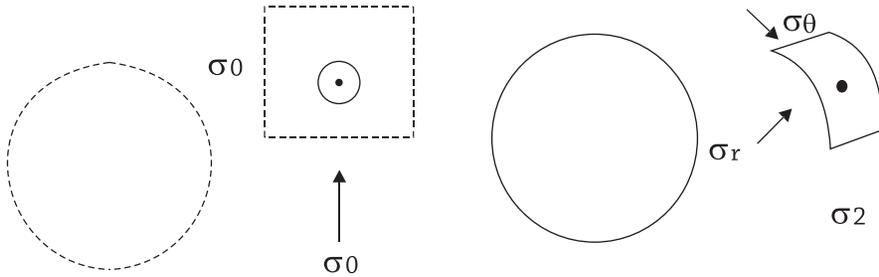
$$\varepsilon_z = \frac{\Delta \sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E} (\Delta \sigma_r + \Delta \sigma_\theta)$$

$$\rightarrow \Delta \sigma_z = \nu (\Delta \sigma_r + \Delta \sigma_\theta)$$

$$\rightarrow \Delta \sigma_r = - \Delta \sigma_\theta$$

Sebelum penggalan

Sesudah penggalan



$$\begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\sigma_r & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_r & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Gambar 6.3. Keadaan tegangan sebelum dan sesudah penggalan

$$\Delta\sigma_r = -\Delta\sigma_\theta$$

$$(1) \rightarrow \sigma_0 + \Delta\sigma_\theta - \sigma_0 - \Delta\sigma_r$$

$$-r \frac{\partial(\sigma_0 + \Delta\sigma_r)}{\partial r} = 0$$

$$\Delta\sigma_\theta - \Delta\sigma_r - r \frac{\partial(\Delta\sigma_r)}{\partial r} = 0$$

$$-2\Delta\sigma_r - r \frac{\partial(\Delta\sigma_r)}{\partial r} = 0$$

$$\rightarrow \frac{\partial(\Delta\sigma_r)}{\partial r} = 2 \frac{\partial r}{r}$$

$$\rightarrow \Delta\sigma_r = \frac{K}{r^2}$$

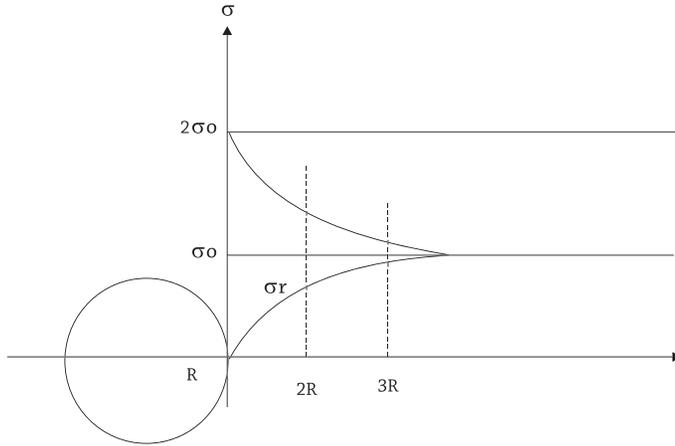
untuk $r=0$:

$$\sigma_r = 0$$

$$\Delta\sigma_r = -\sigma_0 \rightarrow K = -R^2 \times \sigma_0$$

$$\sigma_r = \sigma_0 - \sigma_0 \frac{R^2}{r^2}$$

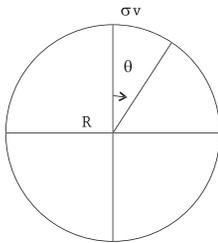
$$\sigma_\theta = \sigma_0 + \sigma_0 \frac{R^2}{r^2}$$



Gambar 6.4. Distribusi tegangan di sekitar terowongan

3. DISTRIBUSI TEGANGAN DI SEKITAR TEROWONGAN UNTUK TEGANGAN MULA-MULA TIDAK HIDROSTATIK

3.1 σ_v (Tegangan Vertikal) $\neq 0$, σ_h (Tegangan Horizontal) = 0



Gambar 6.5. Kondisi tegangan awal uniaksial

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_v}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_v}{2} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_v}{2} \left(1 - 3\frac{R^4}{r^4} + 2\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta$$

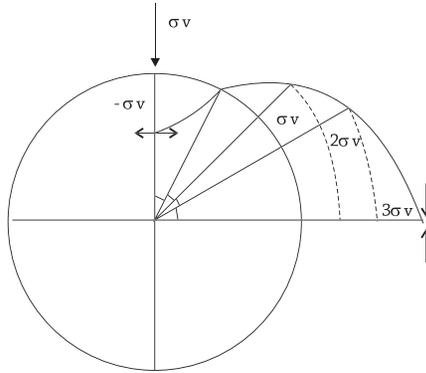
Gambar 6.5 menunjukkan bahwa tegangan tangensial tidak lagi konstan pada kontur lingkaran, di mana :

$$\sigma_{\theta} = \sigma_v (1 - 2 \cos 2\theta)$$

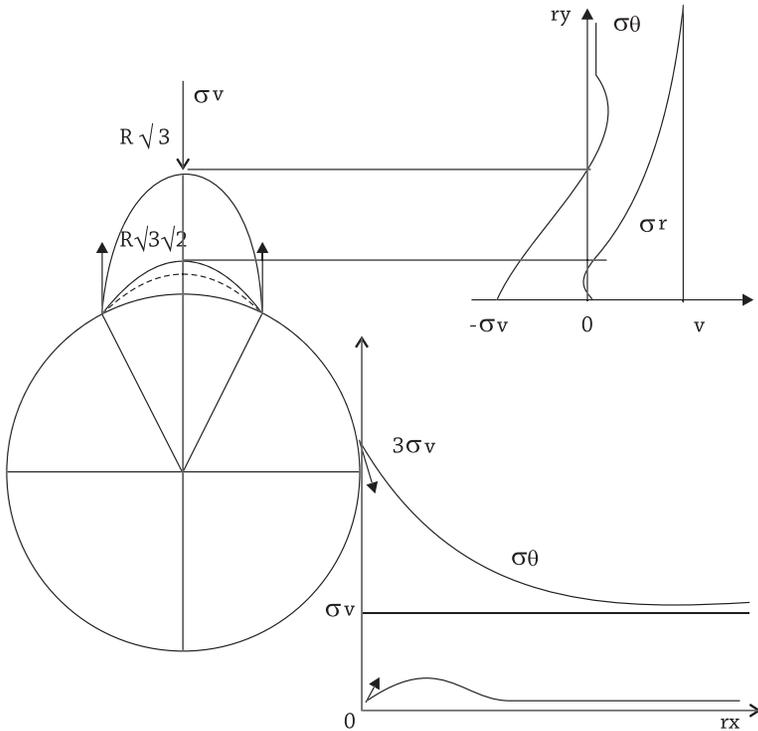
Tegangan di sekitar lubang bukaan (terowongan dengan penampangnya berbentuk lingkaran) diberikan oleh rumus di bawah ini (Duffaut, 1981) :

$$\sigma_r = \frac{\sigma_v}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_v}{2} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= -\sigma_v && \text{untuk } \theta = 0 \\ \sigma_{\theta} &= 0 && \text{untuk } \theta = \pi/6 \\ \sigma_{\theta} &= \sigma_v && \text{untuk } \theta = \pi/4 \\ \sigma_{\theta} &= 2\sigma_v && \text{untuk } \theta = \pi/3 \\ \sigma_{\theta} &= 3\sigma_v && \text{untuk } \theta = \pi/2 \end{aligned}$$

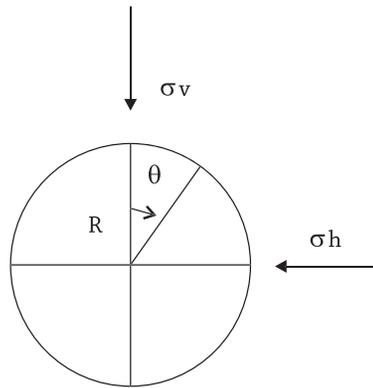


Gambar 6.6. Tegangan tangensial pada kontur sebuah terowongan berbentuk lingkaran dengan tegangan mula-mula yang uniaksial (Bonvallet, 1976)



Gambar 6.7. Distribusi tegangan pada sumbu simetri untuk tegangan mula-mula yang uniaksial (Duffaut, 1981)

1.2 σ_v (TEGANGAN VERTIKAL) $\neq 0$, σ_h (TEGANGAN HORIZONTAL) $\neq 0$



Gambar 6.8. Kondisi tegangan awal biaksial

Tegangan di sekitar lubang bukaan (terowongan yang berbentuk lingkaran) menjadi (Duffaut, 1981) :

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= 2\sigma_h && \text{untuk } \theta = \pi/6 \\ \sigma_{\theta} &= \sigma_v + \sigma_h && \text{untuk } \theta = \pi/4 \\ \sigma_{\theta} &= 2\sigma_v && \text{untuk } \theta = \pi/3 \\ \sigma_{\theta} &= 3\sigma_v - \sigma_h && \text{untuk } \theta = \pi/2 \end{aligned}$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \left(1 - 3\frac{R^4}{r^4} + 2\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta$$

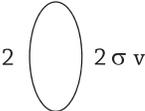
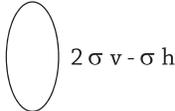
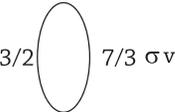
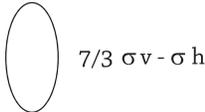
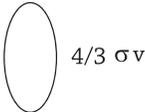
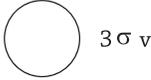
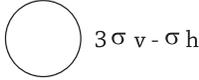
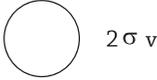
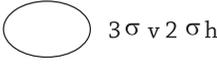
Dapat dilihat bahwa semua tarikan (*tensile*) tangensial akan hilang jika σ_h mencapai harga $\sigma_v/3$ dan untuk $\sigma_v = \sigma_h$ semua $\sigma_{\theta} = 2\sigma_v$.

Tegangan tangensial pada kontur lingkaran :

Jika terowongan tidak berbentuk lingkaran \rightarrow kontur yang tidak isotrop (kontur elips) maka tegangan ekstrim pada sumbu lubang bukaan seperti pada Tabel 6.1.

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_h - \sigma_v \quad \text{untuk } \theta = 0$$

Tabel 6.1. Tegangan ekstrim pada sumbu lubang bukaan berbentuk elips (Duffaut, 1981)

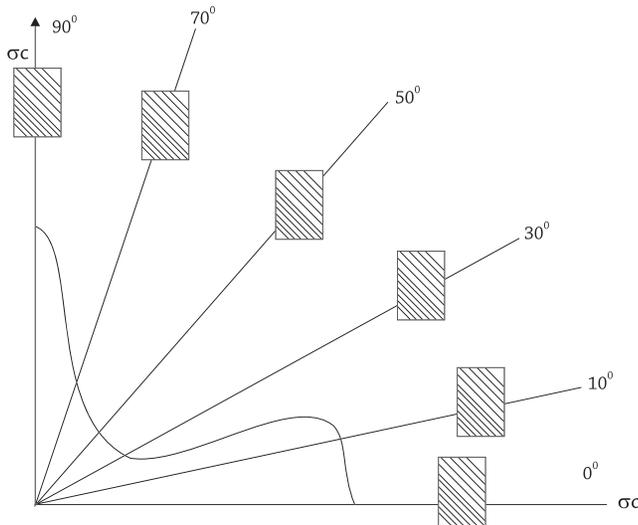
Monoxial	Elips	Hidrostatik
$\sigma_h = 0$ $-\sigma_v$ 	$\sigma_h = 0$ $-\sigma_v + 5\sigma_h$ 	$\sigma_h = 0$ $4\sigma_v$ 
Elips tegak		
$-\sigma_v$ 	$-\sigma_v + \sigma_h$ 	$3\sigma_h$ 
Lingkaran		
$-\sigma_v$ 	$-\sigma_v + 3\sigma_h$ 	$2\sigma_v$ 
$-\sigma_v$ 	$-\sigma_v + 7/3\sigma_h$ 	$4/3\sigma_v$ 
Elips datar		
$-\sigma_v$ 	$-\sigma_v + 2\sigma_h$ 	σ_v 

4. DISTRIBUSI TEGANGAN DI SEKITAR TEROWONGAN UNTUK BATUAN YANG TIDAK ISOTROP (ORTHOTROP)

Dalam hal elastik orthotrop di mana ada dua modulus yang tegak lurus E_1 dan E_2 , untuk sistem pembebanan uniaksial, distribusi tegangan tidak dipengaruhi, hanya deformasinya. Jadi distribusi yang di-

dapat dari perhitungan sebelumnya tetap berlaku.

Ketidakisotropan dari batuan sangat mempengaruhi kekuatan dari batuan tersebut. Misalnya kuat tekan dari batuan yang berlapis (*schist*) dapat bervariasi dari 1 sampai 10 kali lipat atau lebih dan merupakan fungsi dari arah perlapisan (Gambar 6.9).



Gambar 6.9.

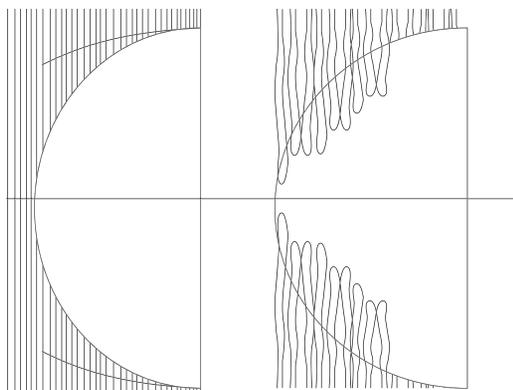
Kuat tekan dari sebuah batuan berlapis yang merupakan fungsi dari sudut perlapisan

Sebuah lubang bukaan dengan penampang berbentuk lingkaran dibuat di dalam massa batuan yang berlapis (Gambar 6.10), di mana kekuatan batuan tersebut digambarkan seperti Gambar 6.9. yang mengalami tegangan hidrostatik.

Failure timbul pada kontur bagian tengah di mana sudut perlapisan dengan kontur 40° sampai 70° (kuat tekan batuan rendah).

Fenomena ini akan diperburuk oleh tegangan prinsipal mayor yang tegak lurus pada arah perlapisan. Daerah tarikan pada sebuah lubang bukaan (tegangan

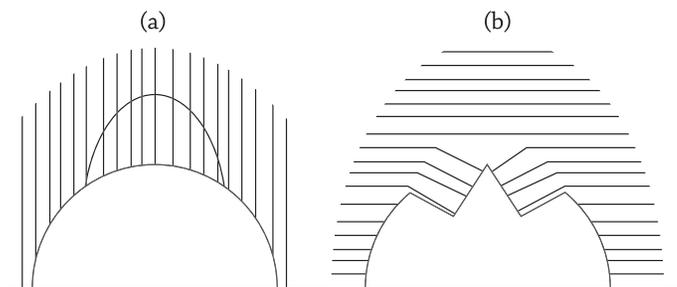
adalah uniaksial) mempunyai pengaruh yang berbeda posisinya terhadap perlapisan (Gambar 6.11).



Gambar 6.10. Evolusi sebuah lubang bukaan berbentuk lingkaran di dalam massa batuan berlapis (Duffaut, 1981)

Jika tegangan uniaksial adalah vertikal maka keadaan (a) dengan adanya tarikan tangensial yang akan memisahkan/merenggangkan perlapisan tidak begitu

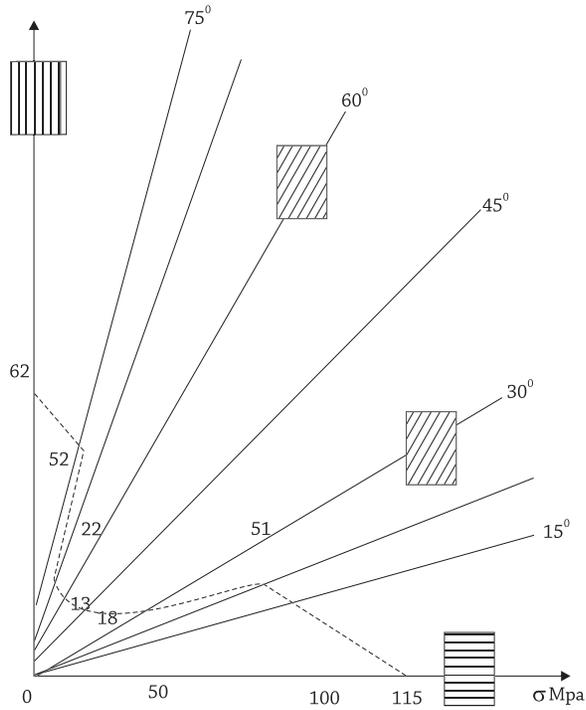
mempengaruhi kestabilan. Sebaliknya keadaan (b), tarikan tersebut pada tiap-tiap lapisan sehingga dapat patah oleh lengkungan karena beratnya sendiri.



Gambar 6.11. Daerah tarikan pada massa batuan berlapis (Duffaut, 1981)

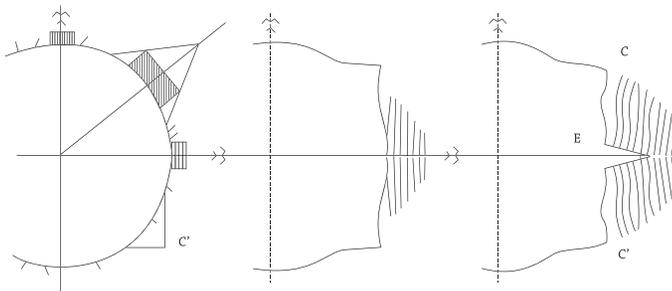
Antara nilai ekstrim 115 dan 62 MPa variasinya adalah diskontinu. Nilai mini-

mum antara sudut 20° dan 70° (Gambar 6.12).



Gambar 6.12. Kuat tekan batuan *schist* pada terowongan di PLTA Lanoux – L'Hospitalet Perancis (Duffaut, 1981)

Evolusi dari kontur terowongan dalam batuan *schist* diperlihatkan pada Gambar dengan penampang berbentuk bulat pada 6.13.



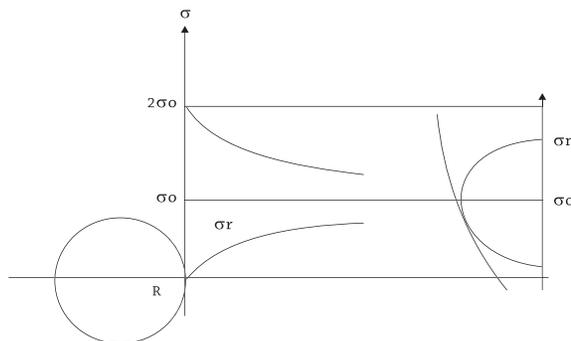
Gambar 6.13. Terowongan di PLTA Lanoux - L'Hospitalet Perancis (Duffaut, 1981)

- a. Tahap 1
Failure oleh geseran (*shear*) timbul di sekitar titik A di mana kuat tekannya paling kecil, kemudian berkembang sampai membentuk profil BCD.
- b. Tahap 2
Terbentuknya *span* yang tinggi CC' dari lapisan batuan memungkinkan terbentuknya rekahan pada dinding.
- c. Tahap 3
Lengkungan dari lapisan yang dinyatakan oleh deformasi sudut CEC' dengan bukaan yang membentuk baji (*wedge*) di E. Sesudah batuan yang hancur dibersihkan, maka kontur akhir CFC' lebih stabil dari kontur semula (CEC').

5. DISTRIBUSI TEGANGAN DI SEKITAR TEROWONGAN UNTUK BATUAN YANG MEMPUNYAI PERILAKU PLASTIK SEMPURNA DI SEKELILING TEROWONGAN

Misalkan kurva intrinsik batuan pada Gambar 6.14. memotong lingkaran Mohr yang menggambarkan tegangan pada kontur lubang bukaan dan perilaku batuan sesudah kuat tekannya dilampaui dicirikan oleh deformasi (*strain*) tak berhingga (perilaku plastik sempurna).

Pembuatan lingkaran Mohr dapat menentukan tegangan pada dinding (lingkaran Mohr untuk kuat tekan, $\sigma_{rR} = 0$, $\sigma_{\theta R} = \sigma_C$).



Gambar 6.14. Tegangan di sekitar lubang bukaan bulat untuk batuan elastik dengan tegangan mula-mula hidrostatis

Daerah elastik dibatasi oleh lingkaran yang berjari-jari R' . Akibat dari tegangan diserap oleh deformasi plastik pada daerah lingkaran sebelah dalam.

Jari-jari R' dapat dihitung dengan membuat beberapa hipotesa (dihitung oleh Katsner, untuk sebuah kurva *intrinsic* yang linier (Duffaut, 1981)) :

$$R' = R \left(\frac{2}{1 + \lambda} \frac{\sigma_0 (\lambda - 1) + \sigma_c}{\sigma_c} \right)^{\left(\frac{1}{\lambda - 1} \right)}$$

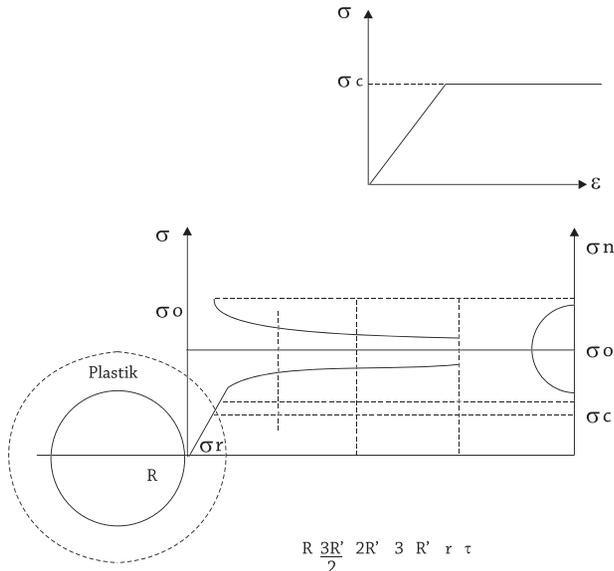
dengan :

R' = jari-jari daerah plastik
 R = jari-jari lubang bukaan

$$\lambda = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

ϕ = sudut geser dalam

Jari-jari ini dapat tak terhingga untuk batuan yang tidak mempunyai kohesi, jadi kestabilan tidak mungkin dicapai tanpa penyangga (*support*).



Gambar 6.15. Tegangan di sekitar lubang bukaan bulat dengan perilaku batuan plastik sempurna di sekelilingnya

Rumus di atas dapat dipermudah jika diambil sudut geser dalam (ϕ) = $19,5^\circ = \text{Arc sin } 1/3$ sehingga $\lambda = 2$.

$$R' = \frac{2R}{3} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_c} + 1 \right)$$

6. DISTRIBUSI TEGANGAN DI SEKITAR TEROWONGAN YANG BERBENTUK TIDAK BULAT UNTUK KEADAAN YANG PALING IDEAL

Tabel 6.2. memperlihatkan distribusi tegangan pada garis keliling terowongan dengan berbagai bentuk penampang terowongan dan berbagai keadaan tegangan mula-mula untuk keadaan yang paling ideal.

Tabel ini diambil dari simposium mekhanika batuan di Jepang tahun 1964 dengan judul "*Study on Internal Stress of Rock Stratum Around Tunnel*".

σ_h = tegangan horisontal sebelum penggalian terowongan.

σ_v = tegangan vertikal sebelum penggalian terowongan.

σ_θ = tegangan tangensial untuk tiap titik pada garis keliling terowongan.

Tabel 2. Perbandingan tegangan $\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ yang bekerja pada tiap titik garis keliling terowongan

Tegangan horizontal sebelum penggalian terowongan (σ_h)	Perbandingan tegangan sesudah penggalian terowongan ($\frac{\sigma_\theta}{\sigma_v}$)		Penampang terowongan
	A	B	
$\sigma_h = \sigma_v$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{2}$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{3}$ $\sigma_h = 0$	2,0 0,5 0,0 -1,0	2,0 2,5 2,7 3,0	
$\sigma_h = \sigma_v$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{2}$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{3}$ $\sigma_h = 0$	2,2 0,6 0,1 -1,0	1,3 1,8 1,9 2,2	
$\sigma_h = \sigma_v$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{2}$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{3}$ $\sigma_h = 0$	1,1 0,1 -0,3 -0,1	1,1 1,6 1,8 2,1	
$\sigma_h = \sigma_v$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{2}$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{3}$ $\sigma_h = 0$	1,8 0,4 -0,1 -1,0	0,7 1,2 1,3 1,7	
$\sigma_h = \sigma_v$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{2}$ $\sigma_h = \frac{\sigma_v}{3}$ $\sigma_h = 0$	0,7 -0,2 -0,4 -1,0	1,8 2,3 2,4 2,8	

PENGUKURAN TEGANGAN IN-SITU DI DALAM MASSA BATUAN

1. PENDAHULUAN

Pengukuran tegangan (*stress*) in-situ dapat mengetahui keadaan tegangan di dalam massa batuan dan dapat menentukan antara lain parameter-parameter penting untuk mengetahui perilaku (*behavior*) massa batuan di tempat asalnya.

Pengukuran ini mencakup kepentingan di berbagai bidang. Dalam bidang pertambangan, dengan diketahuinya keadaan tegangan yang ada di dalam massa batuan dapat ditentukan ukuran lubang bukaan dan kestabilan di dalam tambang. Gasifikasi batubara in-situ memerlukan diketahuinya secara tepat besar dan penyebaran tegangan di dalam massa batuan.

Bagi para geologiwan, pencarian gaya-gaya tektonik dan akibat-akibat yang ditimbulkannya tidak akan lengkap tanpa diketahuinya penyebaran tegangan di dalam struktur yang sedang dipelajari.

Dalam bidang teknik sipil, penentuan lokasi pembuatan sebuah terowongan ataupun sebuah bendungan berdasarkan pada arah tegangan utama (*principal stress*) regional. Pemecahan klasik yang biasa dilakukan untuk mengetahui keadaan tegangan di dalam massa batuan tanpa dilakukannya pengukuran in-situ adalah dengan menganggap bahwa tegangan vertikal (σ_v) pada massa batuan yang berada pada kedalaman tertentu adalah sama dengan berat per satuan luas dari batuan yang berada di atasnya atau:

$$\sigma_v = \int_0^h \gamma_z \, dz$$

dengan :

h = kedalaman

γ_z = bobot isi batuan

Sedangkan tegangan horizontal (σ_h) adalah isotrop dan besarnya :

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v$$

dengan :

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

ν = nisbah Poisson

Untuk kedalaman (h) yang besar sekali, maka keadaan tegangan pada umumnya menjadi hidrostatik, yaitu $k = 1$ dan $\sigma_h = \sigma_v$. Tetapi semua itu hanyalah sebuah estimasi global dari keadaan tegangan yang ada di dalam massa batuan, yang didasarkan pada hipotesa yang sangat sederhana seperti : homogenitas, isotropi dan perilaku (*behavior*) rheologi dari massa batuan. Tegangan residual dan tektonik kemungkinan ada di dalam massa batuan dan dapat merubah keadaan tegangan yang ada. Oleh karena itu keadaan tegangan yang sebenarnya dapat berbeda jauh dengan keadaan tegangan yang dihitung secara teoritis.

Teori hanya dapat memberikan perkiraan besaran intensitas dari tegangan yang ada, sedangkan hanya pengukuran tegangan in-situ yang dapat memberikan keterangan mengenai orientasi dan besarnya tegangan pada massa batuan di ba-

wah tanah.

Dari berbagai literatur, terdapat beberapa cara untuk mengklasifikasikan metode-metode pengukuran tegangan in-situ. Seperti metode pengukuran langsung (*direct*) dan pengukuran tidak langsung (*indirect*). Juga metode pengukuran absolut dan pengukuran relatif. Tetapi kelihatannya yang terbaik adalah klasifikasi berdasarkan tipe dari pengukuran yang dilakukan.

Adapun klasifikasi dari berbagai metode pengukuran tegangan in-situ adalah sebagai berikut :

- a. Metode yang didasarkan pada pengukuran yang dilakukan di sebuah permukaan bebas di dinding batuan. Yang dikenal antara lain adalah metode *Rosette* deformasi.
- b. Metode yang didasarkan pada pengukuran tekanan yang diperlukan untuk mengembalikan tegangan yang dibebaskan : Metode *flat jack*.
- c. Metode yang didasarkan pada pengukuran di dalam lubang bor.
 - i. Metode *overcoring*.
 - sel yang mengukur tegangan,
 - sel yang mengukur perpindahan,
 - perpindahan radial,
 - perpindahan radial dan longitudinal.
 - ii. Metode *hydraulic fracturing*.

Perlu diketahui bahwa interpretasi dari semua hasil pengukuran tegangan in-situ untuk semua metode yang telah disebutkan didasarkan pada hipotesa homogenitas, kontinuitas, isotropi dan elastik linier. Di samping itu medan tegangan dianggap homogen di sekitar tempat pengukuran dilakukan.

2. METODE ROSETTE DEFORMASI

2.1. Prinsip

Prinsip dari *rosette* deformasi adalah mengukur deformasi *superficial* pada sebuah permukaan bebas di dinding massa batuan. Deformasi ini disebabkan oleh pembebasan tegangan atau variasi tegangan.

2.2. Hipotesa

Interpretasi dari hasil pengukuran tegangan dengan metode ini berdasarkan pada hipotesa :

- Tegangan bidang (*plane stress*), yaitu tegangan yang tegak lurus bidang pengukuran sama dengan nol.
- Pembebasan tegangan adalah total (seluruhnya). Perhitungan dengan metode elemen hingga menunjukkan bahwa diperlukan pemotongan sedalam 20 cm untuk memperoleh pembebasan tegangan total.
- Perilaku (*behavior*) batuan adalah elastik linier. Tegangan dihitung lang-

sung dari deformasi yang diukur dengan bantuan Hukum Hooke.

2.3. Pengukuran

Titik-titik pengukuran sebanyak delapan buah dipasang pada lingkaran yang berdiameter 20 cm (Gambar 7.1). Jarak antara titik-titik pengukuran tersebut diukur sampai ketelitian 1 mikron. Kemudian batuan di sekitar lingkaran digergaji dengan menggunakan gergaji intan sedalam 20 cm, sehingga tegangan dibebaskan total.

Titik-titik pengukuran diukur lagi dan perpindahan yang disebabkan oleh pembebasan tegangan dihitung. Tegangan didapat dari (Bonvallet, 1976) :

$$\sigma_x = \frac{u_0 E_0 + v u_{\pi/2} E_{\pi/2}}{r(1+v)^2}$$

$$\sigma_y = \frac{u_{\pi/2} E_{\pi/2} + v u_0 E_0}{r(1-v)^2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{u_{\pi/4} E_{\pi/4} - u_{3\pi/4} E_{3\pi/4}}{r(1-v)}$$

dengan :

$$E_i = \text{modulus deformasi untuk } \theta = i$$

$$u_i = \text{perpindahan radial untuk } \theta = i$$

$$r = \text{jari-jari rosette} = 10 \text{ cm}$$

$$v = \text{nisbah Poisson}$$

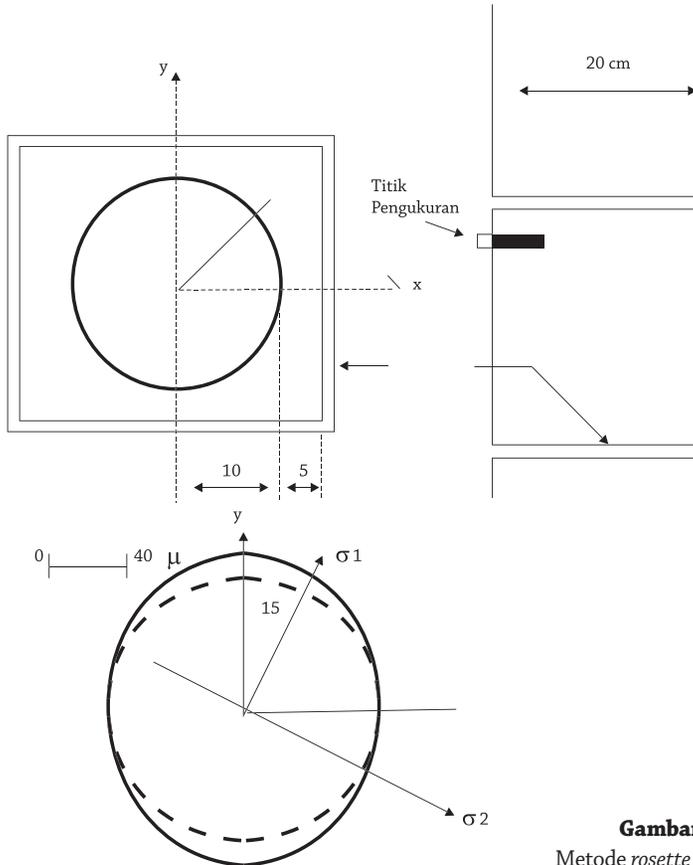
E_1 dan ν didapat dari hasil test di laboratorium mekanika batuan.

Metode *rosette* deformasi sangat menarik karena pelaksanaannya cepat, tidak memerlukan peralatan yang canggih dan hasil yang didapat mendekati sebenarnya. Besar tegangan utama dapat dihitung, demikian juga arahnya terhadap sumbu x dan y dapat ditentukan.

3. METODE FLAT JACK

3.1. Prinsip

Metode ini membebaskan sebagian tegangan yang ada di dalam massa batuan dengan jalan membuat potongan pada batuan tersebut dengan bantuan gergaji intan (Gambar 7.2). Tegangan yang dibebaskan ini akan menyebabkan terjadinya deformasi yang dapat berupa perpindahan dari titik-titik pengukuran yang



Gambar 1.
Metode *rosette* deformasi

dibuat. Kemudian ke dalam potongan tersebut dimasukkan *flat jack* agar supaya perpindahan dari titik-titik pengukuran menjadi nol. Tekanan di dalam *flat jack* yang mengakibatkan perpindahan nol menggambarkan tegangan mula-mula (*initial stress*) di dalam massa batuan.

3.2. Hipotesa

Interpretasi dari hasil pengukuran tegangan dengan metode *flat jack* berdasarkan pada hipotesa :

- a. Perilaku (*behaviour*) batuan adalah elastik *reversible*, tidak perlu linier dan batuan homogen.
- b. Tegangan pada dinding batuan tidak dipengaruhi oleh proses penggalian.
- c. Tegangan yang diukur tegak lurus dengan potongan yang dibuat atau tegak lurus dengan *flat jack*.

Diharapkan bahwa arah tegangan ini mendekati arah dari tegangan utama.

3.3. Pengukuran

Titik-titik pengukuran yang berupa baut besi dipasang dengan jarak 10 cm, masing-masing L_1 , L_2 dan L_3 (Gambar 7.3.). Kemudian dibuat potongan pada batuan dengan bantuan gergaji intan yang besarnya hampir sama dengan ukuran *flat jack*.

Kemudian titik-titik pengukuran diukur jaraknya. Tentu saja jaraknya akan bertambah pendek akibat adanya potongan ($L_1 - \Delta L_1$, $L_2 - \Delta L_2$, $L_3 - \Delta L_3$). Sesudah pengukuran selesai, ke dalam potongan dimasukkan *flat jack* yang berupa 2 lembar potongan baja yang dijadikan satu dengan mengelas ujungnya (Gambar 4). *Flat jack* ini dipompa dengan pompa hidraulik sampai ΔL_1 , ΔL_2 dan ΔL_3 menjadi nol, yang berarti kembali ke keadaan semula. Dalam kondisi ini tekanan di dalam *flat jack* sama dengan tegangan yang dibebaskan yang merupakan tegangan yang berada dalam massa batuan. Kekurangan utama dari metode *flat jack* adalah karena pengukuran dilakukan pada batuan yang sudah tidak solid lagi karena pengaruh proses penggalian sehingga hasil pengukuran yang didapat tidak representatif.

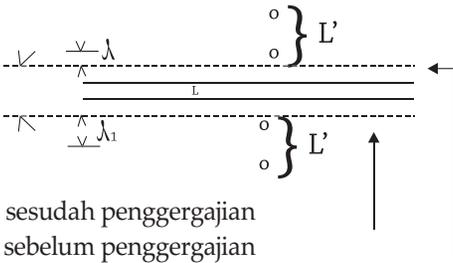
Tetapi kekurangan ini dapat diatasi dengan melakukan pengukuran pada kedalaman tertentu artinya pada batuan yang solid. Pengukuran dilakukan dua kali, yang pertama pada batuan yang tidak solid kemudian dilakukan penggalian sampai kedalaman 30 cm dan pengukuran yang kedua dilakukan (Gambar 4). Teknik yang digunakan tidak memungkinkan untuk melakukan pengukuran selama penggergajian, oleh karena itu kurva D1 (kurva pembebasan tegangan pada saat penggergajian) hanya dapat diduga seperti Gambar 7.2.

3.4. Pengukuran Modulus

Deformasi dengan Flat Jack

Perhitungan kestabilan pekerjaan di bawah tanah memerlukan diketahuinya karakteristik elastisitas dari batuan, terutama modulus deformasi.

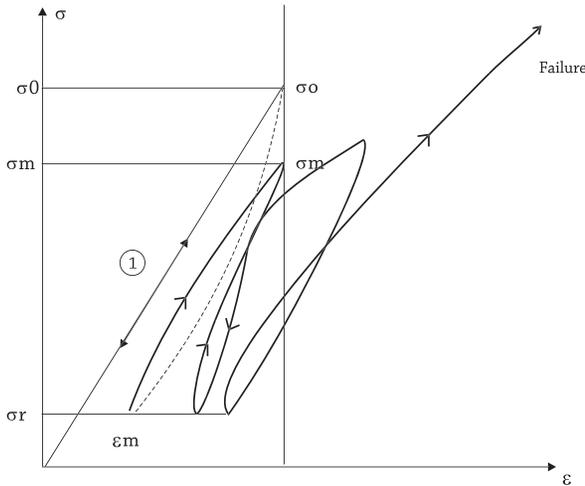
Flat jack menghasilkan tegangan yang diketahui besarnya di dalam massa batuan atau dapat dihitung pada daerah tertentu, sehingga dengan mengukur deformasi yang dihasilkan oleh tegangan tersebut, modulus deformasi dapat dihitung.



Gambar di samping menunjukkan perpindahan akibat penggergajian.

$$L = l_1 + l_2 + e$$

$$L + |\Delta L| = l_1 + \Delta l_1 + l_2 + \Delta l_2 + e + \Delta e$$



- σ_0 = "initial stress"
- σ_m = stress yang diukur
- ϵ_m = strain yang diukur
- σ_r = "residual stress" sesudah penggergajian

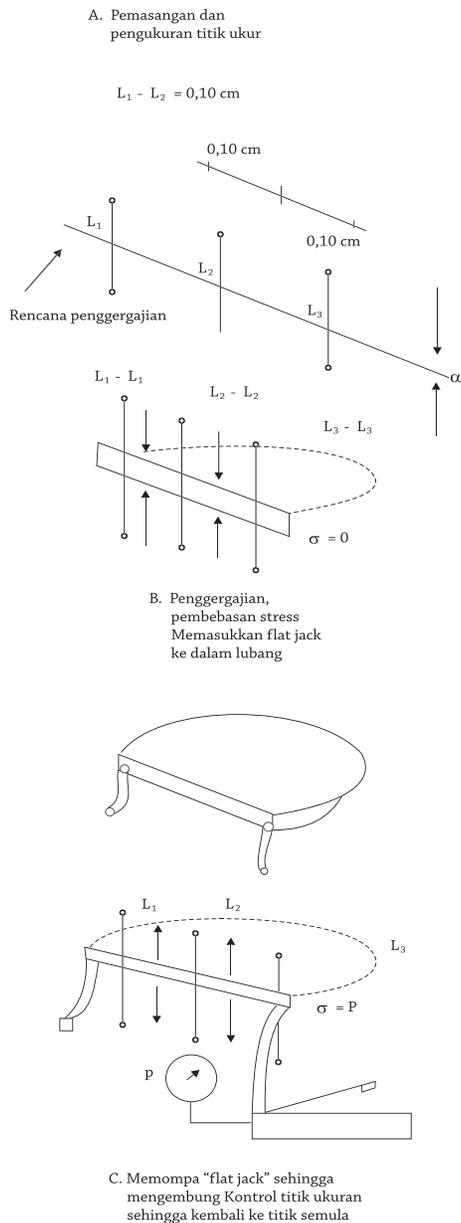
- 1 = kurva $\sigma - \epsilon$ elastik teori
- D 1 = kurva pelepasan beban (pembebasan stress) selama penggergajian
- C1, C2 = kurva pembebanan } diketahui
- D1, D2 = kurva pelepasan }

Gambar 7.2. Kurva tegangan-regangan pada uji *flat jack*

$\frac{\Delta l_1}{l_1}$ dan $\frac{\Delta l_2}{l_2}$ menggambarkan regangan elastik dari batuan demikian juga dengan $\frac{\Delta L'}{L'}$

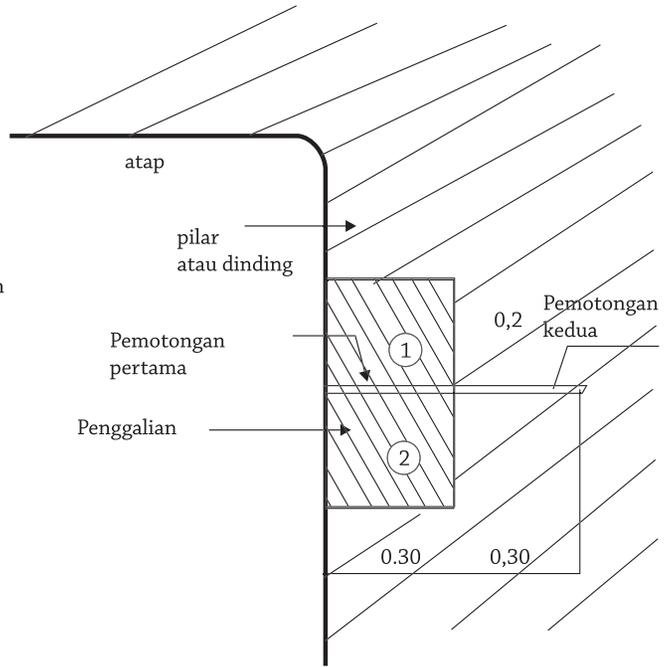
Δe = perpindahan yang disebabkan oleh relaksasi dari batuan pada lubang gergajian sesudah pembebasan tegangan.

Oleh sebab itu, kemiringan dari kurva σ - ϵ yang diukur dari titik pengukuran L tidak menggambarkan modulus deformasi karena regangan global yang diukur, termasuk relaksasi yang disebabkan oleh penggergajian. Sebaliknya, tangent dari bagian linier kurva σ - ϵ , yang diukur dari titik pengukuran L' adalah sama dengan modulus deformasi dengan faktor koreksi yang tergantung dari geometri potongan gergaji.

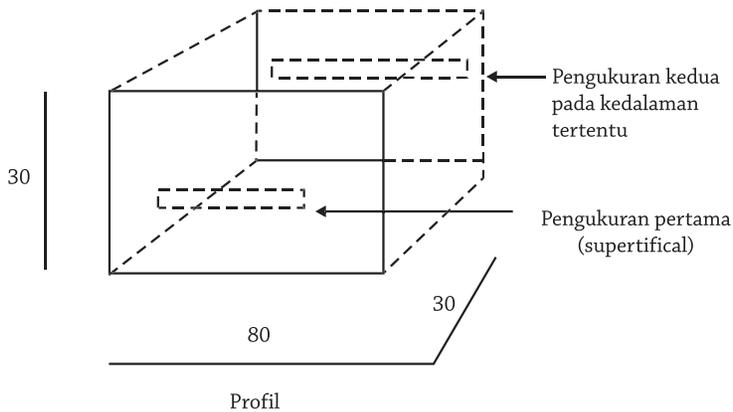


Gambar 3. Prinsip uji flat jack

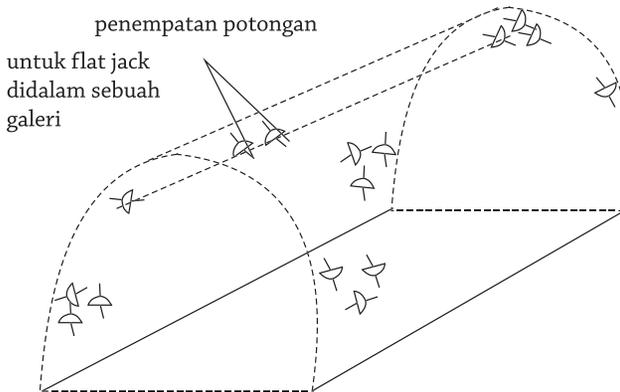
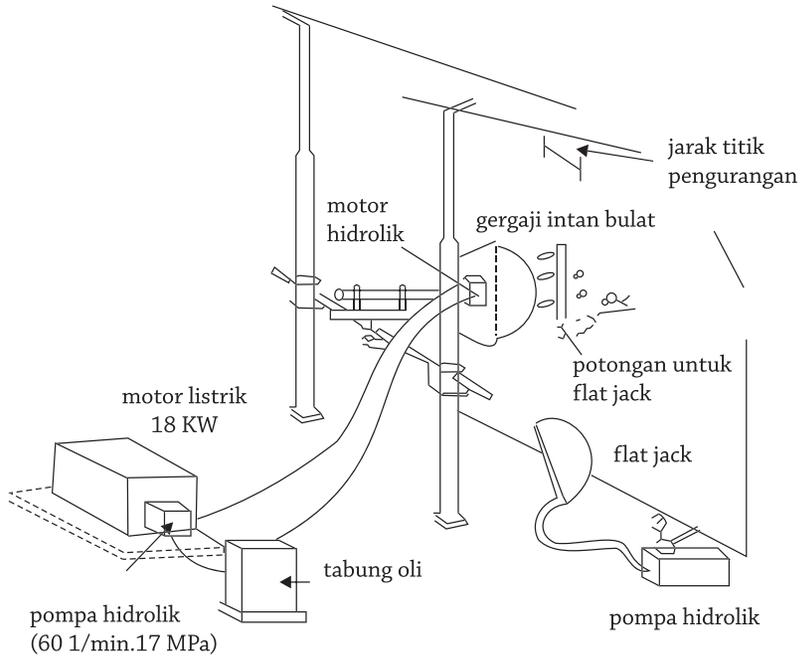
1. Pengukuran "Superticial"
2. Penggalian
3. Pengukuran pada kedalaman



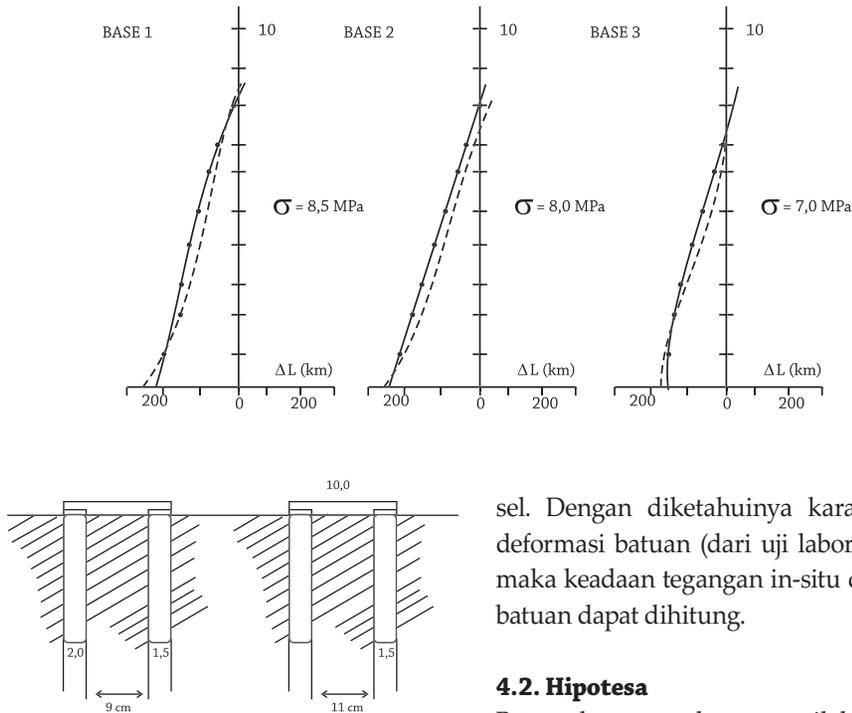
Potongan memanjang



Gambar 7.5. Metode *flat jack* pada kedalaman tertentu



Gambar 7.6. Peralatan untuk melakukan pengukuran tegangan in-situ dengan metode *flat jack*



Gambar 7.7 Contoh uji flat jack di terowongan Rove (Perancis)

4. METODE OVERCORING

4.1. Prinsip

Prinsip dari metode *overcoring* adalah membebaskan seluruh tegangan yang ada di massa batuan dengan cara *overcoring*. Kemudian deformasi pada batuan yang disebabkan oleh dibebaskannya tegangan tersebut diukur dengan menggunakan

sel. Dengan diketahuinya karakteristik deformasi batuan (dari uji laboratorium) maka keadaan tegangan in-situ di dalam batuan dapat dihitung.

4.2. Hipotesa

Batuan homogen dengan perilaku elastik *reversible*.

4.3. Pengukuran

Untuk mengetahui keadaan tegangan di dalam massa batuan adalah dengan mengukur arah dan besarnya tiga tegangan utama pada sebuah titik yang ditentukan.

Secara teoritis, perlu diukur paling sedikit enam tegangan yang berbeda untuk dapat mengetahui keadaan tegangan (Gambar 8).

Pengukuran tegangan dengan metode *overcoring* adalah pengukuran secara tidak langsung. Tegangan akan dibebaskan dengan pemboran *overcoring* yang akan memisahkan inti batuan yang telah dipasang sel tertentu dari massa batuan (Gambar 9). Perpindahan yang merupakan fungsi dari tegangan dapat dihitung dengan rumus-rumus yang banyak dibuat oleh para peneliti dan tiap rumus berlaku untuk sel tertentu yang digunakan.

Dengan menggunakan teori elastisitas linier, isotrop, maka perpindahan atau tegangan yang diukur hanya pada dinding lubang bor, artinya $p = r$ di mana r adalah jari-jari lubang bor (dalam sistem koordinat polar p, θ, z).

Untuk sel dari *University of Liege* (Belgia) yang dapat mengukur perpindahan radial dan longitudinal diperoleh hubungan sederhana sebagai berikut (Gambar 9) :

a. Perpindahan longitudinal

$$u_z^r = \frac{r}{E} \left\{ -\frac{z\nu}{r} \sigma_x - \frac{z\nu}{r} \sigma_y + \frac{z}{r} \sigma_z - 4(1+\nu) \sin \theta \cdot t_{xy} - 4(1+\nu) \cos \theta \cdot \tau_{xy} \right\}$$

b. Perpindahan radial

$$u_p^r = \frac{r}{E} \left\{ [1 + 2(1 + \nu^2) \cos 2\theta] \sigma_x + [1 - 2(1 + \nu^2) \sin 2\theta] \sigma_y - \nu \sigma_x - 4(1 - \nu^2) \sin 2\theta \cdot \tau_{xy} \right\}$$

Berdasarkan pengukuran beberapa kali dari perpindahan radial dan longitudinal (untuk θ yang berbeda-beda) dapat diperoleh hubungan yang baik untuk dapat memecahkan persamaan matriks :

$$[M] \cdot \{S\} = \{U\} \dots \text{(Hukum Hooke)}$$

dengan :

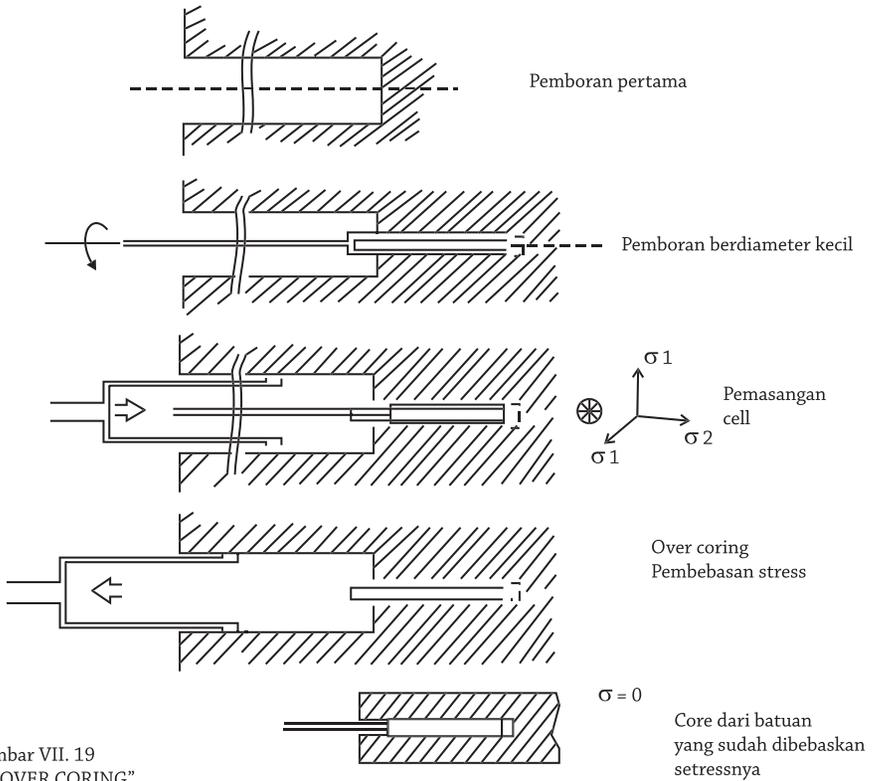
[M] = matriks yang elemen-elemennya hanya tergantung dari geometri sel dan karakteristik mekanik batuan (E,ν).

{S} = matriks dari tegangan.

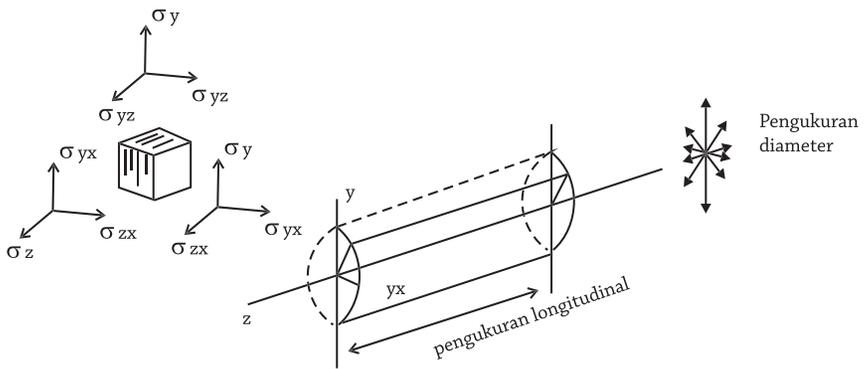
{U} = matriks dari perpindahan.

dengan demikian tegangan utama dan arahnya dapat dihitung.

Keenam tegangan yang tidak diketahui secara teoritis hanya memerlukan enam persamaan untuk menghitungnya.



Gambar VII. 19
Prinsip "OVER CORING"



Gambar 7.8. Sistem tegangan yang ada di dalam massa batuan

Untuk sel yang mengukur secara langsung tegangan dengan menggunakan *extensometer gauge* (misalnya sel dari Leeman) pada dinding lubang bor, didapat hubungan antara tegangan $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ dan tegangan yang diukur pada dinding lubang bor (dalam sistem p, θ, z yang berhubungan dengan sel) sebagai berikut (Bertrand, 1983) :

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta} &= (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4 \tau_{xy} \sin 2\theta \\ \sigma_{zz} &= -\gamma \{ 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 4 \tau_{xy} \sin 2\theta \} + \sigma_z \\ \sigma_{\theta z} &= -2 \tau_{xz} \sin \theta + 2 \tau_{yz} \cos \theta\end{aligned}$$

Pengukuran beberapa kali tegangan normal atau tegangan tangensial untuk berbagai arah akan menghasilkan hubungan yang cukup untuk memecahkan sistem persamaan. Dibutuhkan paling sedikit enam pengukuran.

4.3.1. Sel yang mengukur tegangan dengan *extensometer gauge*

- a. Leeman dan Hayes pada tahun 1966 mempublikasikan prinsip pengukuran dan teori dari sel yang dilengkapi dengan *extensometer gauge* yang berupa tiga *rosette*. Tiap *rosette* terdiri dari dua *gauge* yang saling tegak lurus (A dan C) dan *gauge* yang ketiga (B) miring terhadap dua lainnya ($\theta_A = 0, \theta_B = 45, \theta_C = 90$). Ketiga *rosette* yang diperkenalkan oleh Leeman merupakan harga θ

dari 0, $\pi/2$, dan $5\pi/4$. Sembilan angka tegangan diukur setiap kali pengukuran.

Kesulitan penggunaan sel ini adalah cara penempelan *extensometer gauge* pada dinding lubang bor, terutama kalau ada air.

- b. Sel CSIRO (Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization). Sel ini digunakan untuk lubang bor yang pendek (+ 10 m) yang dibuat dari permukaan tanah atau dari dalam tanah (terowongan). Sel ini terdiri dari tiga *rosette* dengan sudut 120° yang masing-masing terdiri dari tiga *gauge* yang dipasang pada sebuah tabung. Diperlukan lubang bor dengan diameter 38 mm (EX). *Overcoring* dapat dilakukan dengan diameter 100 sampai 150 mm.
- c. Sel dari *Swedish State Power Board*. Peralatan yang digunakan dapat melakukan *overcoring* dengan diameter 76 mm sampai mencapai kedalaman 300 m. Ukuran sel adalah $D = 36$ mm, panjang 400 mm. Sel terdiri dari tiga *rosette* dengan sudut 120° yang masing-masing terdiri dari tiga *gauge* yang dipasang pada selembar bahan yang dengan sistem tertentu dapat menempel pada dinding lubang bor. Dengan sel ini tidak dapat dilakukan pengukuran selama *overcoring*. Oleh karena itu pengukuran hanya dila-

kukan dua kali, yaitu sebelum dan sesudah *overcoring* untuk kesembilan gauge yang dipasang.

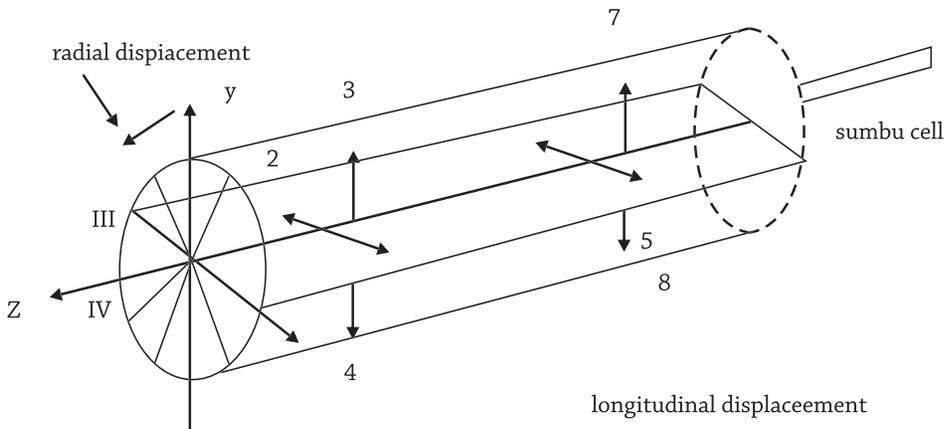
4.3.2. Sel yang mengukur perpindahan

Di dalam praktek, lebih mudah menggunakan sel yang mengukur perpindahan dinding lubang bor, terutama perpindahan radial walaupun memberikan angka yang rendah dengan dibebaskannya tegangan.

a. Sel yang hanya mengukur perpindahan radial, lebih dikenal dengan sel USBM (US. Bureau of Mines). Sel tersebut memerlukan lubang bor dengan diameter 38 mm dan terdiri dari tiga pengukuran diameterikal dengan

sudut 120° . *Overcoring* dilakukan dengan $D = 150$ mm dan selama *overcoring* dapat dilakukan pengukuran. Ketidalamannya dibatasi sampai puluhan meter. Metode ini mudah dan hasilnya cukup baik.

b. Sel yang mengukur perpindahan radial dan longitudinal. Sel dari *University of Liege* yang dikembangkan oleh F. Bonnechere dapat mengukur sekaligus perpindahan radial dalam delapan titik pada empat diameter dengan sudut 45° dan perpindahan longitudinal dalam delapan titik seperti pada Gambar 9.



Gambar 7.9. Penempatan dispositif pengukuran perpindahan (sel *University of Liege*)

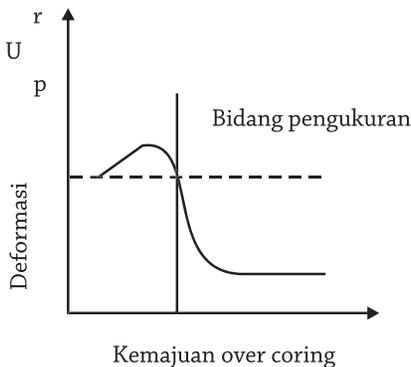
Perpindahan longitudinal

$$u_z^r = \frac{r}{E} \left\{ -\frac{z\nu}{r} \sigma_x - \frac{z\nu}{r} \sigma_y + \frac{z}{r} \sigma_z - 4(1+\nu) \sin \theta \cdot \tau_{xy} - 4(1+\nu) \cos \theta \cdot \tau_{xy} \right\}$$

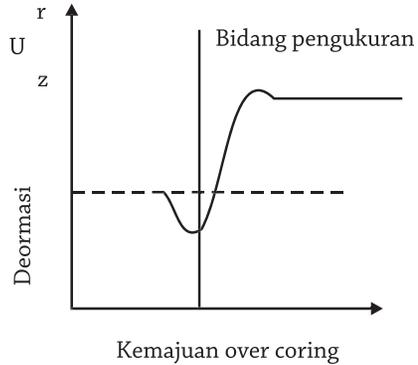
Perpindahan radial

$$u_p^r = \frac{r}{E} \left\{ [1 + 2(1+\nu^2) \cos 2\theta] \sigma_x + [1 - 2(1+\nu^2) \sin 2\theta] \sigma_y - \nu \sigma_x - 4(1-\nu^2) \sin 2\theta \cdot \tau_{xy} \right\}$$

Titik-titik pengukuran ditekan ke dinding lubang bor ($D = 76 \text{ mm}$) dengan menggunakan dongkrak. Kontak antara titik pengukuran dengan dinding lubang bor dapat dijaga dengan baik selama pengukuran. *Overcoring* dilakukan dengan $D = 150 \text{ mm}$. Selama *overcoring* dapat direkam 12 perpindahan secara kontinu.



Deformasi radial teori



Deformasi longitudinal teori

Gambar 7.10. Deformasi radial dan deformasi longitudinal pada saat *overcoring*

5. METODE HYDRAULIC FRACTURING

5.1. Prinsip

Metode ini dapat mengukur tegangan in-situ di dalam massa batuan dengan cara menguji perilaku rekahan yang sudah ada atau rekahan yang baru dibentuk dengan injeksi air sampai tekanan yang diperlukan untuk membuka kembali rekahan tersebut di dalam sebuah lubang bor.

Analisa dari data yang didapat (berupa debit air dan tekanannya) dapat menentukan besarnya tegangan normal yang ada pada rekahan yang diuji.

Dengan melakukan pengujian pada berbagai rekahan yang ada di dalam massa

batuan maka keadaan tegangan di dalam massa batuan dapat diketahui.

Kelemahan *hydraulic fracturing* adalah tidak dapat melakukan pengukuran dengan presisi (ketelitian) yang tinggi dan tidak dapat mengukur tegangan yang kecil.

5.2. Peralatan yang Digunakan (Gambar 7.11)

Metode yang umum digunakan adalah *double packer* di dalam lubang bor tanpa *casing*, yaitu mengisolir bagian dari lubang bor yang akan diuji dengan dua buah *packer*.

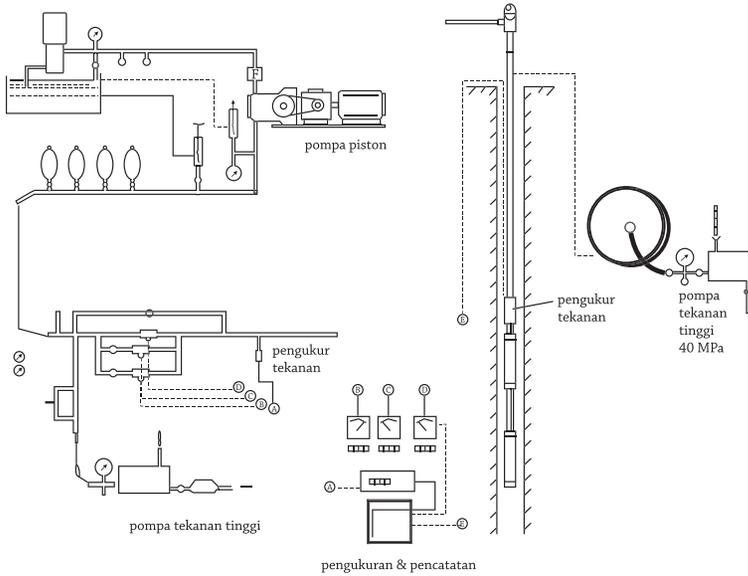
Panjang dari bagian lubang bor yang diisolir biasanya antara 70 cm sampai dengan 1 m, tetapi dapat juga 5 atau 10 m (Gambar12).

Diameter lubang bor agar *packer* dapat dimasukkan adalah antara 60 sampai dengan 120 mm dan batuan harus mempunyai kekuatan yang cukup.

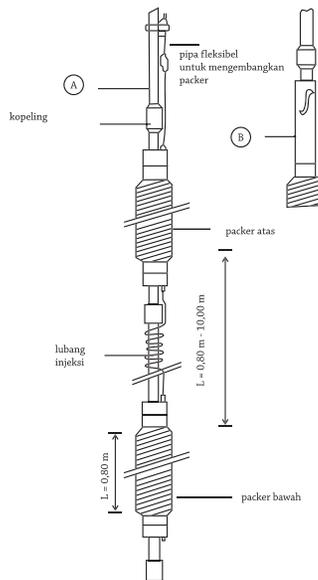
Packer tersebut dapat bekerja sampai tekanan 40 MPa dan dikembangkan dengan pompa tekanan tinggi (debit kecil).

Ke dalam lubang bor yang sudah diisolir diinjeksikan fluida (pada umumnya air) dengan menggunakan pompa tekanan tinggi (pompa tripleks). Tekanan air dapat mencapai puluhan MPa. Pengendalian *fracturing* adalah dengan melihat debit dan tekanan yang diberikan oleh indikator analogik atau numerik dan pencatatan di kertas (pencatat 6 jalur).

Analisis dari hasil yang diperoleh memerlukan keterangan dari orientasi rekahan yang sudah ada maupun rekahan yang baru dibuat. Orientasi rekahan tersebut diketahui dengan cara mengambil gambar dengan suatu alat (sistem Pajari) seperti pada Gambar 17 maupun memasukkan kamera TV ke dalam lubang bor.



Gambar 7.11. Contoh peralatan yang digunakan untuk uji *hydraulic fracturing* skala kecil



Gambar 7.12. Sistem *double packer* untuk uji *hydraulic fracturing* di dalam lubang bor

5.2. Kurva Tipe Fracturing

Dari Gambar 13 dapat dibedakan dengan jelas :

- Tekanan *fracturing* (yang mempunyai hubungan dengan kuat tarik batuan), P_{fr} .
- Tekanan pertambahan besar, P_c .
- Tekanan penutupan sesudah pompa injeksi dihentikan, P_f .

Dalam hal pengujian dilakukan di tempat yang sudah ada rekahnya, kurva memberikan puncak (*peak*) dari tekanan pembukaan kembali yang kurang dari puncak tekanan *fracturing*, bahkan puncak tersebut tidak ada seperti ditunjukkan oleh Gambar 7.13b.

5.3. Interpretasi dari Uji Hydraulic Fracturing

Pemboran mengakibatkan berubahnya distribusi tegangan di sekitar lubang bor. Untuk keadaan di mana tegangan utama σ_2 , σ_3 pada bidang yang tegak lurus pada sumbu lubang bor (dengan $\sigma_2 > \sigma_3$), tegangan tangensial σ_θ pada dinding lubang bor mempunyai harga minimal $3\sigma_3 - \sigma_2$.

Dengan mengambil $\theta = 0$ searah dengan σ_2 , variasi σ_θ pada dinding lubang bor disajikan pada Gambar 14 (1) dan 14 (2) (Wolff, et al.)

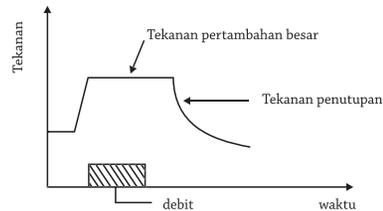
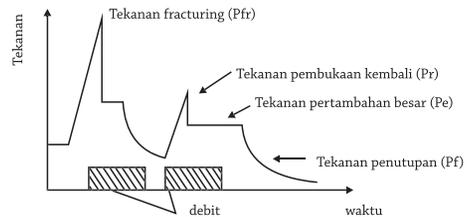
Di lain pihak, untuk $\theta = 0$ (tegangan minimal) bertambah kecil sebagai fungsi dari σ_2/σ_3 (Gambar 14 (3)).

dengan :

$$\sigma_\theta = 2\sigma_2 = 2\sigma_3 \text{ untuk } \sigma_2/\sigma_3 = 1$$

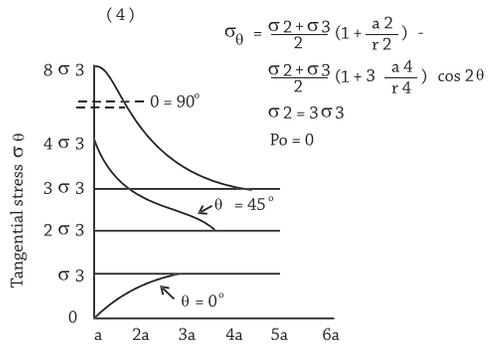
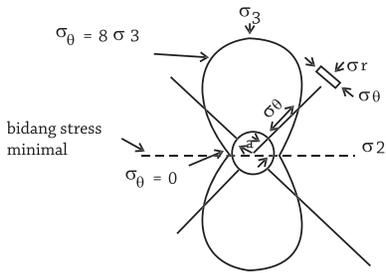
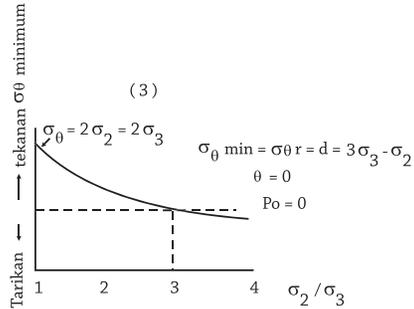
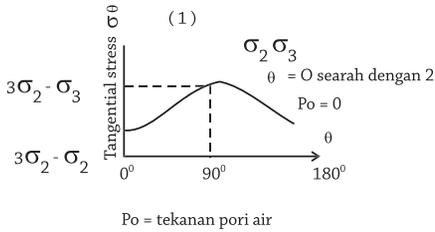
$$\sigma_\theta = 0 \text{ untuk } \sigma_2/\sigma_3 = 3$$

σ_θ mempunyai mempunyai harga negatif (tegangan tarikan) untuk $\sigma_2/\sigma_3 > 3$.



Gambar 7.13. Skema dari dua tipe perilaku batuan pada saat *hydraulic fracturing*

Gambar 14 (4) menunjukkan bahwa mulai dari jarak $2a$ (a = jari-jari lubang) dari dinding lubang, σ_θ hampir tidak berubah.



Gambar 14. Interpretasi dari uji *hydraulic fracturing*

Haimson memperkenalkan konsep tegangan efektif (*effective stress*) yang dinyatakan dengan tekanan *fracturing* :

$$P_{fr} - P_o = (3 \sigma_h - \sigma_H + R_I - 2 P_o) K$$

dengan :

P_{fr} = tekanan *fracturing*

P_o = tekanan pori air

σ_h = tegangan horizontal minimum
= σ_3

σ_H = tegangan horizontal maximum
= σ_2

R = kuat tarik dalam *hydraulic fracturing*

K = parameter yang menghubungkan efek dari tekanan pori air dan *compressibility*.

Di dalam batuan yang permeabilitasnya sangat kecil, K dapat dianggap 1 sehingga:

$$P_{fr} = 3 \sigma_h - \sigma_H + R_T - P_o$$

Jika batuan tidak permeabel, $P_o = 0$ dan

$$P_{fr} = 3 \sigma_h - \sigma_H + R_T$$

Dengan membuka lagi rekahan maka persamaan menjadi (dengan menganggap

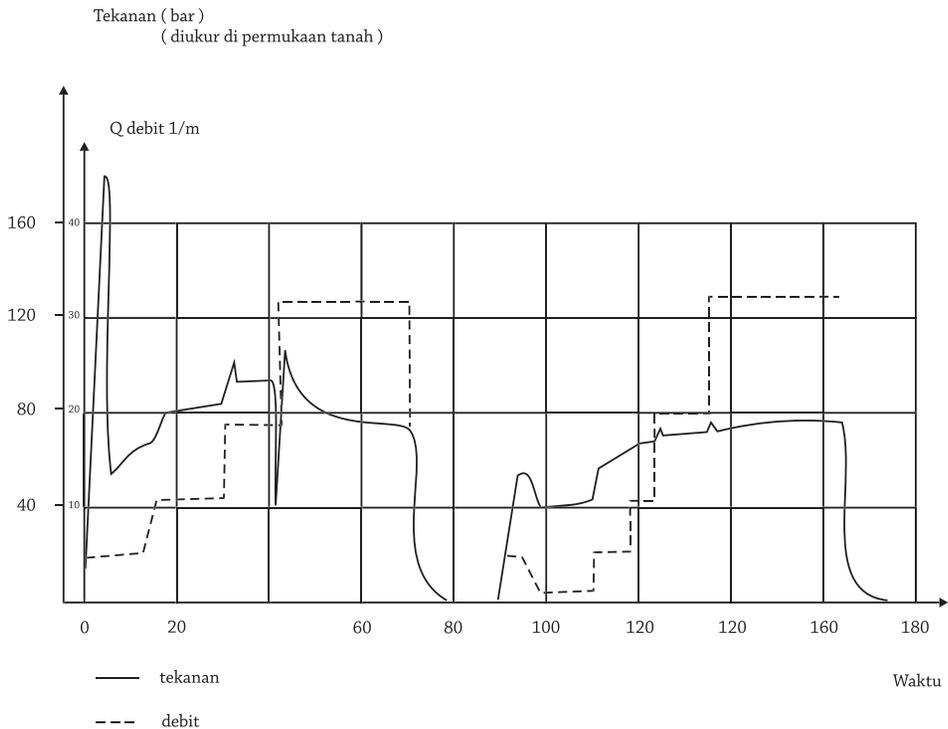
$$P_r = P_{fr} - R_T):$$

$$P_r = 3 \sigma_h - \sigma_H$$

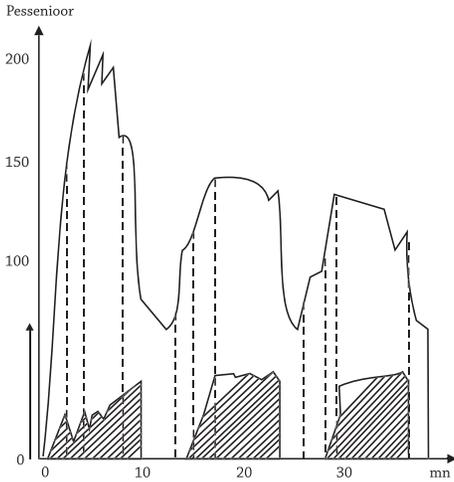
Dengan diketahuinya tekanan penutupan P_f dan tekanan pembukaan P_r yang ditentukan pada saat uji, maka dapat ditentukan (paling tidak dari sudut teori) :

$$\sigma_h = P_f$$

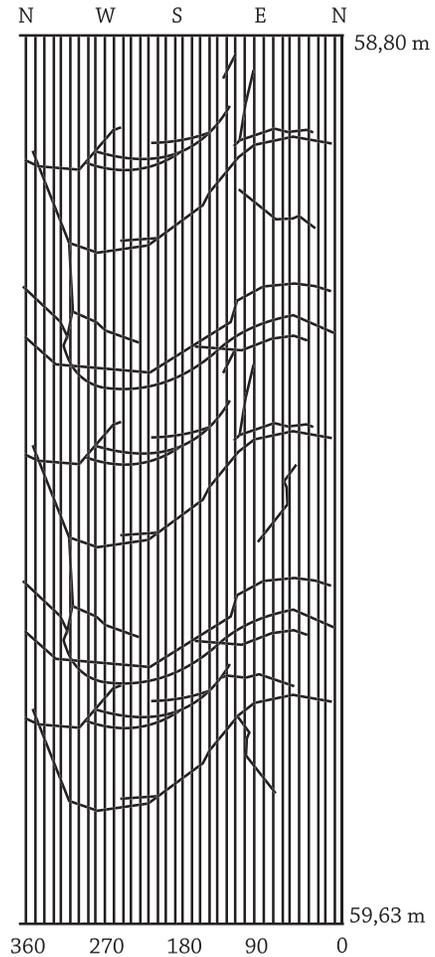
$$\sigma_H = s P_f - P_r$$



Gambar 7.15. Kurva *hydraulic fracturing* di dalam *bituminous schist*



Gambar 7.16. Kurva *hydraulic fracturing*, uji dilakukan pada batu pasir *schisteux*, tegangan minimal 9 MPa, pada bidang perlapisan tegangan yang diukur adalah 20 MPa



Gambar 7.17. Orientasi rekahan yang diambil dengan suatu alat (sistem Pajari)

PENGUKURAN TEGANGAN

IN-SITU DI DALAM MASSA BATUAN

1. KLASIFIKASI BATUAN

Metode rancangan empiris berhubungan dengan pengalaman praktis yang diperoleh dari proyek-proyek sebelumnya untuk mengantisipasi kondisi dari lokasi proyek yang diusulkan.

Klasifikasi massa batuan merupakan cikal bakal dari pendekatan rancangan empiris dan digunakan secara luas di dalam rekayasa batuan. Dalam kenyataannya, dibanyak proyek, pendekatan klasifikasi digunakan sebagai dasar praktis untuk merancang struktur di bawah tanah yang kompleks. Klasifikasi massa batuan tidak digunakan sebagai pengganti untuk rancangan rekayasa. Tetapi harus digunakan bersama-sama dengan metode observasi dan analitik untuk memformulasikan secara menyeluruh rancangan yang rasional, yang cocok dengan tujuan rancangan dan kondisi geologi di lapangan.

Tujuan klasifikasi massa batuan adalah:

- a. Mengidentifikasi parameter yang terpenting yang mempengaruhi perilaku massa batuan.
- b. Membagi formasi massa batuan yang khusus ke dalam grup yang mempunyai perilaku sama, yaitu kelas massa batuan dengan berbagai kualitas.
- c. Memberikan dasar untuk pengertian karakteristik dari tiap kelas massa batuan.
- d. Menghubungkan pengalaman dari kondisi massa batuan di satu lokasi dengan pengalaman yang ditemui di lokasi lain.
- e. Mengambil data kuantitatif dan pedoman untuk rancangan rekayasa (*engineering design*).
- f. Memberikan dasar umum untuk komunikasi diantara para insinyur dan geologian.

Untuk mencapai tujuan tersebut maka sistem klasifikasi harus :

- a. Sederhana, mudah diingat dan mudah dimengerti.
- b. Setiap istilah jelas dan terminologi yang digunakan dapat diterima secara luas oleh engineer dan geologist.
- c. Sifat-sifat massa batuan yang paling signifikan diikutsertakan.
- d. Berdasarkan pada parameter yang dapat diukur dengan uji yang cepat, relevan serta murah di lapangan.
- e. Berdasarkan sistem rating yang dapat memberikan bobot relatif yang penting pada parameter klasifikasi.
- f. Dapat berfungsi untuk menyediakan data-data kuantitatif untuk rancangan penyangga batuan.

Tiga keuntungan yang diperoleh dari klasifikasi massa batuan adalah :

- a. Meningkatkan kualitas dari penyelidikan lapangan (*site investigation*) dengan meminta data masukan yang minimum sebagai parameter klasifikasi.
- b. Memberikan informasi kuantitatif untuk tujuan rancangan.
- c. Penilaian rekayasa dapat lebih baik dan komunikasi dapat lebih efektif pada suatu proyek.

Kebanyakan terowongan sekarang dibangun berdasarkan beberapa sistem klasifikasi. Seperti yang banyak digunakan dan yang paling baik diketahui adalah klasifikasi beban batuan Terzaghi, yang sudah diperkenalkan lebih dari 40 tahun yang lalu (Terzaghi, 1946). Sejak itu, klasifikasi ini dimodifikasi (Deere dan kawan-kawan, 1970) dan sistem klasifikasi baru diusulkan. Sistem ini memperkenalkan teknologi penyangga batuan yang baru, yang diberi nama *rock bolt* dan *shotcrete*, yang digunakan di berbagai proyek seperti terowongan, ruang bawah tanah, tambang, lereng dan fondasi.

Saat ini terdapat berbagai sistem klasifikasi batuan seperti yang terlihat pada Tabel 8.1.

Dari berbagai sistem klasifikasi massa batuan yang ada, enam yang perlu mendapat perhatian khusus karena yang paling umum, yaitu yang diusulkan oleh Terzaghi (1946), Lauffer (1958), Deere dan kawan-kawan (1967), Wickham dan kawan-kawan (1972), Bieniawski (1973), Barton dan kawan-kawan (1974). Klasifikasi beban batuan Terzaghi (1946), klasifikasi pertama yang diperkenalkan, dan digunakan di Amerika Serikat lebih dari 35 tahun, telah dibuktikan dengan sukses untuk penerowongan dengan penyangga besi baja (*steel support*).

Tabel 8.1. Klasifikasi massa batuan yang saat ini banyak digunakan

Name of Classification	Originator and Date	Country of Origin	Applications
1. Rock load	Terzaghi, 1946	USA	Tunnels with steel support
2. Stand-up time	Lauffer, 1958	Austria	Tunneling
3. NATM	Pacheretal.,1964	Austria	Tunneling
4. Rock quality desiflnation	Deere at al., '1972	USA	Core logging, tunneling
5. RSR concept	Wickhman et al., 1972	USA	Tunneling
6. RMR system (Geomechanics Classification)	Bieniawski, 1973	South Africa	Tunnels, mines, slopes
	Last modified, 1979-USA)		Foundations
	Weaver, 1975	South Africa	Rippability
	Laubscher, 1977	South Africa	Mining
	OliVier, 1979	South Africa	Weatherability
	Ghose and Raju, 1981	India	Coal Mining
	Moreno Tallon, 1982	Spain	Tunneling
	Kendorski et al., 1983	USA	Hard rock mining
	Nakao et al., 1983	Japan	Tunneling
	Serafim and Pereira, 1983	Portugal	Foundations
	Gonzalez de Vallejo, 1983	Spain	Tunneling
	Unal,1983	USA	Roof bolting in coal mines
	Romana, 1985	Spain	Slope stability
	Newman, 1985	USA	Coal mining
Sandbak, 1985	USA	Boreability	
Smith,1986	USA	Dregeability	
Venkateswarlu, 1986	Iodia	Coal mining	
Robertson, 1988	Canada	Slope stability	
7. Q System Q-system extensions	Barton et al., 1974	Norway	Tunnels, chambers
	Kirsten, 1982	South Africa	Excavability
	Kirsten, 1983	South Africa	Tunneling
8. Strenght-size	Franklin, 1975	Canada	Tunneling
9. Basic geothecical description	International Society for Rock mechanics, 1981		General communication
10. Unified classification	Williamson, 1984	USA	General, Communication

Klasifikasi Lauffer (1958) didasarkan pada hasil kerja dari Stini (1950) dan merupakan langkah maju dalam seni penerowongan dengan diperkenalkannya konsep *Stand-up time* dari *active span* di dalam terowongan, dimana dapat ditentukannya tipe dan jumlah penyangga di dalam terowongan secara lebih relevan.

Klasifikasi dari Deere dan kawan-kawan (1967) memperkenalkan indeks Rock Quality Designation (RQD), yang merupakan metode yang sederhana dan praktis untuk mendeskripsikan kualitas inti batuan dari lubang bor.

Konsep dari Rock Structure Rating (RSR) dikembangkan di Amerika Serikat oleh Wickham dan kawan-kawan (1972, 1974), yang merupakan sistem pertama yang memberikan gambaran rating klasifikasi untuk memberikan bobot yang relatif penting dari parameter klasifikasi.

Klasifikasi geomekanika (RMR system), diusulkan oleh Bieniawski (1973), dan Q system oleh Barton dan kawan-kawan (1974), telah dikembangkan secara terpisah dan kedua-duanya menyediakan data kuantitatif untuk memilih penguatan terowongan yang modern seperti *rock bolt* dan *shotcrete*.

Sistem Q dikembangkan khususnya untuk terowongan dan ruang bawah tanah, sedangkan klasifikasi geomekanika walau-

pun awalnya dikembangkan untuk terowongan, dapat digunakan untuk rock slopes dan fondasi, penilaian *ground rippability*, masalah-masalah di pertambangan (Laudbscher, 1977, Ghose dan Raju, 1981, Kendorski dan kawan-kawan, 1983).

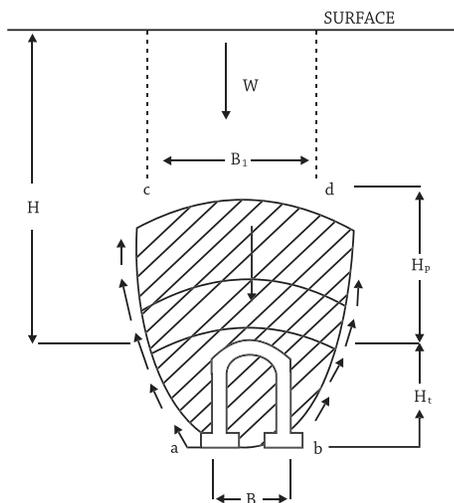
2. METODE ROCK LOAD CLASSIFICATION

Terzaghi (1946) memformulasikan metode klasifikasi rasional yang pertama dengan mengevaluasi beban batuan yang tepat untuk merancang *steel sets*. Ini merupakan pengembangan yang penting karena penyangga dengan *steel sets* telah digunakan secara luas untuk penggalian terowongan batuan selama 50 tahun yang lalu. Klasifikasi ini hanya cocok untuk memperkirakan beban batuan untuk terowongan yang disangga dengan *steel arch*, tetapi tidak cocok untuk metode penerowongan yang modern dengan menggunakan *shotcrete* dan *rock bolt*. Sesudah mempelajari secara rinci, Cecil (1970) menyimpulkan bahwa metode Terzaghi terlalu umum untuk dapat mengevaluasi secara objektif kualitas batuan dan tidak menyediakan informasi kuantitatif dari sifat-sifat massa batuan.

Gambaran utama dari klasifikasi Terzaghi diberikan pada gambar 1 dan dituliskan pada Tabel 2 dan 3.

Nilai rock load di Tabel 2 digunakan un-

tuk mendeskripsikan *ground conditions* jika terowongan terletak di bawah muka air tanah. Jika terowongan terletak di atas muka air tanah, *rock load* untuk kelas 4 - 6 dapat dikurangi dengan 50 %. Revisi yang penting dari koefisien *rock load* klasifikasi Terzaghi diberikan oleh Rose (1982) di dalam Tabel 2, yang memperlihatkan kondisi batuan Terzaghi 4 - 6 harus dikurangi dengan 50 % dari nilai *rock load* awal karena muka air tanah efeknya kecil terhadap *rock load*.



Gambar 1. Konsep beban batuan terowongan oleh Terzaghi (1946)

3. KLASIFIKASI STAND-UP TIME

Klasifikasi tahun 1958 oleh Lauffer merupakan fondasi di dalam awal kerja dari geologi terowongan oleh Stini (1950), yang dianggap sebagai bapak dari Sekolah Aus-

tria untuk penerowongan dan mekanika batuan. Stini menekankan pentingnya cacad struktur di dalam massa batuan. Lauffer mengusulkan *stand-up time* untuk berbagai *active span* yang dihubungkan pada berbagai kelas massa batuan.

Active unsupported span adalah lebar terowongan atau jarak dari *face* ke penyangga jika ini lebih besar dari lebar terowongan. *Stand-up time* adalah jangka waktu dimana terowongan dapat stabil tanpa penyangga sesudah penggalian. Harus dicatat bahwa beberapa faktor dapat mempengaruhi *stand-up time*, seperti orientasi dari sumbu terowongan, bentuk penampang terowongan, metode penggalian dan metode penyangga.

Klasifikasi awal Lauffer tidak lama digunakan, semenjak dimodifikasi beberapa kali oleh engineer Austria, terutama oleh Pacher dan kawan-kawan (1974), yang memelopori pengembangan New Austrian Tunneling Method (NATM).

Hal utama yang penting di dalam klasifikasi Lauffer Pacher adalah penambahan *span* terowongan akan mengurangi langsung *stand-up time*.

Sebagai contoh, pada saat membuat *pilot tunnel* dengan *span* kecil dapat berhasil menggali dengan *full face* di batuan yang kondisinya *fair*, sedangkan lubang bukaan dengan *span* yang besar dibatuan

Table 8.2. *Original Terzaghi's Rock Load Classification (1946)^{a,b}*

Rock condition	Rock Load Hp (ft)	Remarks
1. Hard and intact	Zero	Light lining required only if spalling or popping occurs
2. Hard stratified or schistose	0 - 0.58	Light support, mainly for protection against spalls. Load may change erratically from point to point.
3. Massive, moderately jointed	0 - 0.258	No side pressure
4. Moderately blocky and seamy	0.25 - 0.35 (8+Ht)	Little or no side pressure
5. Very Blocky and seamy	(0.35 - 1.1 0) (8+ Ht)	Considerable side pressure softening effects of seepage toward bottom of tunnel require either continuous support for lower ends of ribs or circular ribs
6. Completely crushed	1.10 (8+ Ht)	Heavy side pressure, invert struts required, circular ribs are recommended
7. Squeezing mck, moderate depth	(1.10-2.10) (8+ Ht)	
8. Squeezing rock, great depth	(2.10-4.50) (8+ Ht)	
9. Swelling rock	Up to 250 ft, irrespective of the value of (8+ Ht)	Circular ribs me required. In extreme cases, use yielding Support

a After Terzaghi (1946)

b Rock load Hp in feet on tunnel roof with width B (ft) and height H, (ft) at depth of more than 1.5 (B+ Hg)

Definitions :

Intact rock contains neither joints nor hair cracks. Hence, if it breaks, it breaks across sound rock. On account of the injury to the rock due to blasting, spalls may drop off the roof several hours or days after blasting. This is known as a spalling condition. Hard intact rock may also be encountered in the popping condition involving the spontaneous and violent detachment of rock slabs from the sides of roof.

Stratified rock consists of individual strata with little or no resistance against separation along the boundaries between strata. the strata may or may not

be weakened by transverse joints. In such rock, the spalling condition is quite common.

Moderately jointed rock contains joints and hair cracks, but the blocks between joints are locally grown together or so intimately interlocked that vertical walls do not require lateral support in rocks of this type, both spalling and popping conditions may be encountered.

Block and seamy rock consists of chemically intact rock fragments which entirely separated from each other and imperfectly interlocked. In such rock, vertical wall may require lateral support.

Crushed but chemically intact rock has the character of a crusher run. If most or all of the fragments are as small as fine sand grains and no recommendation has taken place, crushed rock below the water table exhibits the properties of a water-bearing sand.

Squeezing rock slowly advances into the tunnel without perceptible volume increase. A prerequisite for squeeze is a high percentage of microscopic submicroscopic particles of micaceous mineral or of clay minerals or of clay minerals with slow swelling capacity.

Swelling rock advances into the tunnel chiefly on account of expansion. The capacity to swells seems to be limited to those rocks that contain clay minerals such as montmorillonite, with a high swelling capacity

Tabel 8.3. Klasifikasi Rock Load Terzaghi yang umum digunakan ^{a, b}

Rock Condition	RQD	Rock Load Hp (ft)	Remarks
1. Hard and intact	95 - 100	Zero	Same as Terzaghi (1946)
2. Hard stratified or schistose	90 - 99	0 - 0.5 B	Same as Terzaghi (1946)
3. Massive, moderately jointed	85 - 95	0 - 0.25 B	Same as Terzaghi (1946)
4. Moderately blocky and seamy	75 - 85	0.25 B - 0.20 (B + Ht)	
5. Very blocky and seamy	30 - 75	(0.20 - 0.60) (B + Ht)	Types 4, 5 and 6 reduced by about 50% from Terzaghi values because
6. Completely crushed but chemically intact	3 - 30	(0.60 - 1.10)(B + Ht)	water table has little effect on rock load Terzaghi, 1946; Brekke, 1968
6a. Sand and gravel	0 - 3	(1.10 - 1.40)(B + Ht)	Same as Terzaghi (1946)
7. Squeezing rock, moderate depth	NA	(1.10 - 2.10) (B + Ht)	Same as Terzaghi (1946)
8. Squeezing rock, great depth	NA	(2.10 - 4.50) (B + Ht)	Same as Terzaghi (1946)
9. Swelling rock	NA	Up to 250 ft irrespective of value of (B + Ht)	Same as Terzaghi (1946)

a As modified by Deere et al., (1970) and Rose (1982)

b Rock Load Hp in feet c.f. rock on roof c/f support iQ tunnel with width 8 (ft) and height HI (ft) at depth of more than 1.5 (B + Ht).

c Not applicable.

yang sama dibuktikan tidak mungkin untuk menyangga di dalam waktu *stand-up time* nya. Hanya dengan sistem *heading dan benching* yang lebih kecil atau *multiple drift*, penampang terowongan yang besar dapat digali di kondisi batuan seperti ini.

Klasifikasi ini memperkenalkan *stand-up time* dan *span* sebagai parameter yang relevan di dalam menentukan tipe dan jumlah penyangga terowongan, dan ini akan mempengaruhi pengembangan yang lebih maju dari sistem klasifikasi massa batuan.

4. INDEKS ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD)

Indeks RQD telah diperkenalkan lebih dari 20 tahun yang lalu sebagai indeks dari kualitas batuan pada saat informasi kualitas batuan hanya tersedia dari deskripsi ahli geologi dan persentase dari perolehan inti (*core recovery*). RQD adalah modifikasi dari persentase perolehan inti yang utuh dengan panjang 10 cm atau lebih. Ini adalah indeks kuantitatif yang telah digunakan secara luas untuk mengidentifikasi daerah batuan yang kualitasnya rendah sehingga dapat diputuskan untuk penambahan pemboran atau pekerjaan eksplorasi lainnya.

Untuk menentukan RQD, ISRM merekomendasikan ukuran inti paling kecil berdiameter NX (54,7 mm) yang dibor dengan menggunakan *double tube core barrels*.

Hubungan antara indeks RQD dan kualitas teknik dari batuan adalah sebagai berikut (Deere, 1968) :

RQD (%)	Kualitas Batuan
< 25	Sangat jelek (very poor)
25 - 50	Jelek (poor)
50 - 75	Sedang (fair)
75 - 90	Baik (good)
90 - 100	Sangat Baik (excellent)

Prosedur yang betul untuk mengukur RQD diperlihatkan di Gambar 2.

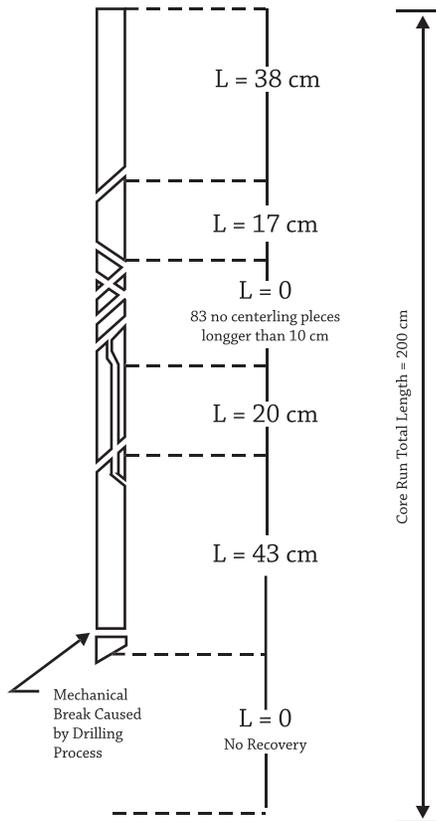
Cording dan Deere (1972) mencoba untuk menghubungkan faktor *rock load* Terzaghi dan memberikan tabel hubungan antara penyangga terowongan dan RQD (Tabel 4). Mereka menemukan bahwa konsep *rock load* Terzaghi harus dibatasi untuk terowongan yang disangga dengan *steel sets*, dan tidak dapat digunakan dengan baik untuk lubang bukaan yang disangga oleh rock bolt.

Merritt (1972) menemukan bahwa RQD dapat merupakan nilai yang penting di dalam memperkirakan kebutuhan penyangga untuk terowongan batuan. Merritt membandingkan kriteria penyangga yang didasarkan pada versi perbaikannya, sebagai fungsi dari lebar terowongan dan RQD, dengan yang diusulkan oleh yang lainnya. Ini diringkaskan di dalam Tabel 8.4. yang dikumpulkan oleh Deere dan Deere (1988).

$$RQD = \frac{\sum \text{Length of Core Pieces} > 10 \text{ cm (4 In.)}}{\text{Total Core Run Length}} \times 100 \%$$

$$RQD = \frac{38 + 17 + 20 + 43}{200} \times 100 \%$$

$$RQD = 59 \% \text{ (FAIR)}$$



Gambar 2. Prosedur untuk pengukuran dan perhitungan RQD (Deere, 1989)

Palmstrom (1982) mengusulkan jika inti tidak tersedia, RQD dapat diperkirakan dari jumlah kekar-kekar (*joints*) per satuan volume, di dalam mana jumlah kekar per meter untuk tiap kekar ditambahkan. Konversi untuk massa batuan yang bebas lempung adalah :

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

J_v adalah jumlah total kekar per m^3 .

Walaupun RQD adalah indeks yang sederhana dan murah, tapi sendirian tidak cukup untuk melakukan deskripsi yang baik dari massa batuan, karena tidak memperhatikan orientasi kekar, keketaan (*tightness*), dan material pengisi. Yang utama adalah sebagai parameter praktis yang didasarkan pada pengukuran persentase dari interval batuan yang baik di dalam lubang bor.

5. KONSEP ROCK STRUCTURE RATING (RSR)

Konsep RSR, model prediksi *ground-support*, dikembangkan di Amerika Serikat pada tahun 1972 oleh Wickham, Tiedemann, dan Skinner. Konsepnya adalah metode kuantitatif untuk mendeskripsi kualitas massa batuan dan untuk memilih penyangga yang tepat. Ini merupakan sistem klasifikasi massa batuan yang lengkap yang diusulkan sejak Terzaghi tahun 1946.

Tabel 8.4. Perbandingan dari RQD dan kebutuhan penyangga untuk terowongan dengan lebar 6 m ^a

	No. Support or Local Bolts	Patern Bolts	Steel Ribs
Deer et al,	ROD 75 – 100	ROD 50 – 75 (1.5 – 1.8 m spacing) ROD 25 – 50 (0.9 – 1.5 m spacing)	ROD 50 – 75 (light ribs on 1.5 – 1.8m spacing as alternative to bolts) RQD 25 – 50 (light to medium ribs on 0.9-1.5 spacing as alternative to bolts) ROD 0 – 25 (medium to heavy circular ribs on 0.6 - 0.9 spacing)
Cecil (1970)	ROD 82 – 100	ROD 52 – 82 (alternatevely 40 – 60 mm shotcrete)	ROE > 0 – 52 (ribs or reinforced shotcrete)
Merrit (1972)	ROD 72 – 100	ROD 23 – 72 (1.2 – 1.8 m spacing)	ROD 0 – 23

* Data interpolated from Merrit (1972) by Deere and Deere (1988)

Konsep RSR merupakan satu langkah maju dalam beberapa aspek; pertama, merupakan klasifikasi kuantitatif tidak seperti Terzaghi yang kualitatif; kedua, merupakan klasifikasi massa batuan yang menggabungkan banyak parameter, tidak seperti indeks RQD yang hanya dibatasi pada kualitas inti; ketiga, merupakan klasifikasi yang lengkap yang mempunyai input dan output, tidak seperti tipe klasifikasi Lauffer yang menghubungkan pengalaman praktek untuk memutuskan kelas massa batuan dan kemudian memberikan output berupa *stand-up time* dan *span*.

Kontribusi utama dari konsep RSR adalah mengenalkan sistem rating untuk massa batuan. Ini adalah jumlah dari nilai bobot parameter individu di dalam sistem klasifikasi.

Konsep RSR memandang dua kategori umum dari faktor yang mempunyai perilaku massa batuan di dalam terowongan: parameter geologi dan parameter konstruksi.

Parameter geologi adalah a) tipe batuan; b) pola kekar (jarak rata-rata kekar); c) orientasi kekar (*dip dan strike*); d) tipe diskontinuitas; e) major *fault, shears* dan *folds*; f) sifat-sifat material batuan dan q) pelapukan atau alterasi. Pembuat konsep ini menekankan bahwa dalam beberapa hal dapat dimungkinkan menentukan faktor-faktor di atas secara teliti, tetapi di lain hal, hanya dapat dibuat pendekatan umum.

Parameter konstruksi adalah a) ukuran terowongan; b) arah penggalian; dan c) me-

tode penggalian. Semua faktor di atas dikelompokkan kedalam tiga parameter dasar A, B dan C (masing-masing tabel 5, 6, dan 7), yang secara bersama-sama merupakan evaluasi efek relatif dari berbagai faktor geologi pada syarat penyangga.

Ketiga parameter tersebut adalah :

- a. Parameter A : Penilaian umum dari struktur batuan berdasarkan :
 - i. Tipe batuan asal (beku, metamorf, sedimen).
 - ii. Kekerasan batuan (keras, medium, lunak, decomposed).
 - iii. Struktur geologi (masif, sedikit dipatahkan/dilipat, cukup dipatahkan/ dilipat, secara intensif dipatahkan/dilipat).
- b. Parameter B : Efek pola diskontinuitas terhadap arah penggalian terowongan berdasarkan :
 - i. Jarak kekar.
 - ii. Orientasi kekar (*strike* dan *dip*).
 - iii. Arah penggalian terowongan.
- c. Parameter C : Efek aliran air tanah berdasarkan :
 - i. Kualitas massa batuan total yang disebabkan oleh kombinasi parameter A dan B.
 - ii. Kondisi kekar (baik, sedang, jelek).
 - iii. Jumlah aliran air (dalam *gallon per minute per 1000 feet* di dalam terowongan).

Nilai RSR untuk tiap seksi terowongan diperoleh dengan menjumlahkan bobot nilai angka untuk tiap parameter.

$RSR = A + B + C$, dengan nilai maksimum 100. RSR mencerminkan kualitas massa batuan dengan kebutuhan akan penyangga.

Jika digunakan *tunnel boring machine* (TBM) untuk menggantikan metode penggalian dengan pemboran dan peledakan, maka RSR harus dikoreksi dengan menggunakan *Adjustment Factor* (AF) untuk berbagai diameter terowongan sebagai berikut :

diameter 9,15 m	: AF = 1,058
diameter 8 m	: AF = 1,127
diameter 7,63 m	: AF = 1,135
diameter 7 m	: AF = 1,150
diameter 6,10 m	: AF = 1,168
diameter 6 m	: AF = 1,171
diameter 5 m	: AF = 1,183
diameter 4,58 m	: AF = 1,180
diameter 4 m	: AF = 1,192
diameter 3,05 m	: AF = 1,200

Model prediksi RSR dikembangkan terutama untuk penyangga *steel rib*.

Data yang kurang telah tersedia untuk menghubungkan struktur batuan dan penyangga *rock bolt* atau *shotcrete*. Bagaimanapun juga, penaksiran kebutuhan *rock bolt* dibuat dengan menganggap *rock*

Tabel 8.5. *Rock Structure Rating, Parameter A : Daerah Geologi Umum*

	Basic Rock Type				Geological Structure			
	Hard	Medium	Soft	Decom- posed				
Igneous	1	2	3	4		Moderately		Intensely
Metamorphic	1	2	3	4		Slightly	Faulted	Faulted
Sedimentary	2	3	4	4	Massive	or Folded	or Folded	or Folded
Type 1					30	22	15	9
Type 2					27	20	13	8
Type 3					24	18	12	7
Type 4					19	15	10	6

After Wickhman et.al., (1974)

Tabel 8.6. *Rock Structure Rating, Parameter B : Pola Kekar, Arah Penggalian ^a*

	Strike 1 to Axis			Strike 1 to Axis				
	Direction of Drive			Direction of Drive				
	Both	With Dip		Both	With Dip			
	Dip of Prominent Joints ^d			Dip of Prominent Joints ^d				
Average Joint Spacing	Flat	Dipping	Vertical	Dipping	Vertical	Flat	Dipping	Vertical
1. Very closely jointed, <2 in.	9	11	13	10	12	9	9	7
2. Closely jointed, 2 - 6 in.	13	16	19	15	17	14	14	11
3. Moderately Jointed, 6 - 12 in	23	24	28	19	22	23	23	19
4. Moderate to blocky, 1-2 ft	30	32	36	25	28	30	28	24
5. Blocky to massive, 2-4 ft	36	38	40	33	35	36	34	28
6. Massive, >4 ft	40	43	45	37	40	40	38	34

^a After Wickham et al., (1974).

^b Dip: flat: 0-20°; dipping: 20-50 °; and vertical: 50-90°.

Tabel 8.7. *Rock Structure Rating, Parameter C : Air Tanah, Kondisi Kekar ^a*

Anticipated water Inflow (gpm/1000 ft)	Sum of Parameters A + B					
	13-44			45-75		
	Joint Condition					
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor
None	22	18	12	25	22	18
Slight,<200 gpm	19	15	9	23	19	14
Moderate,200-1 000 gpm	15	11	7	21	16	12
Heavy,>1000 gpm	10	8	6	18	14	10

^a After Wickhman et.al., (1974)

^b Joint condition : good =light or cemented: fair =s lightly weathered or altered: poor = severely weathered, altered, or open.

load terhadap kuat tarik dari *bolt*. Diberikan hubungan untuk diameter *rock bolt* 25 mm dengan beban kerja 24.000 lb :

$$\text{Spacing (ft)} = \frac{24}{W}$$

dengan *w* adalah beban batuan dalam 1000 lb/ft² .

Tidak ada koreksi yang dapat ditemukan antara kondisi geologi dan persyaratan shotcrete, sehingga hubungan empiris di bawah ini disarankan :

$$t = 1 + \frac{W}{1,25} \text{ atau } t = D \frac{65 - \text{RSR}}{150}$$

dengan

- t* = tebal shotcrete (inch)
- W* = beban batuan, lb/ft²
- D* = diameter terowongan, ft

Gambar 8.3 memperlihatkan kurva untuk menentukan sistem *ground-support* tipikal berdasarkan prediksi RSR yang menyangkut kualitas massa batuan sampai arah penggalian terowongan. Kurva ini dapat digunakan untuk bentuk terowongan bulat atau tapal kuda.

Konsep RSR adalah metode yang sangat berguna untuk memilih penyangga *steel rib* untuk terowongan batuan. Konsep RSR tidak direkomendasikan untuk memilih penyangga *rock bolt* atau *shotcrete*.

6. KLASIFIKASI GEOMEKANIKA (SISTEM RMR)

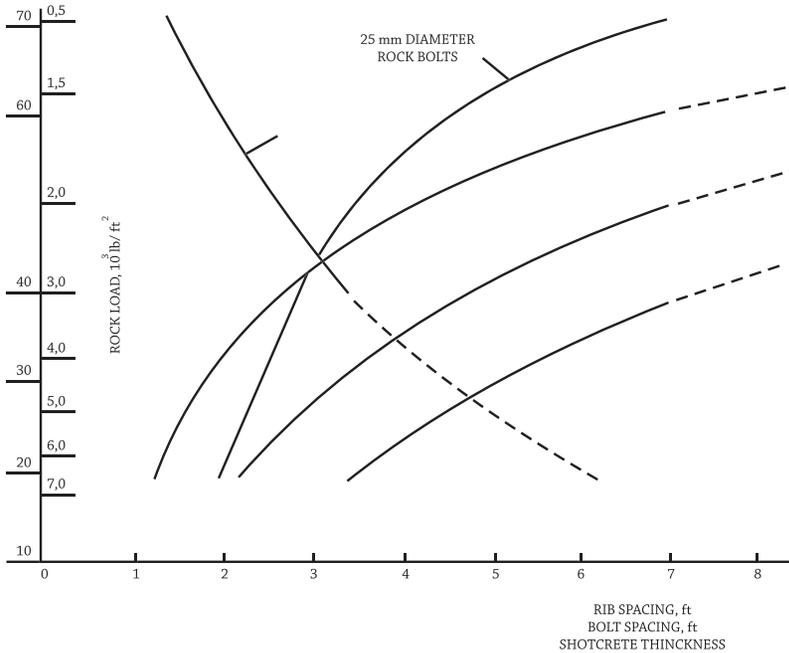
Sistem RMR menggunakan enam parameter untuk mengklasifikasikan massa batuan, yaitu :

- a. *Uniaxial compressive strength of rock material*.
- b. *Rock Quality Designation (RQD)*.
- c. *Spacing of discontinuities*.
- d. *Condition of discontinuities*.
- e. *Groundwater conditions*.
- f. *Orientation of discontinuities*.

Karena parameter tersebut dapat diperoleh dari lubang bor, penyelidikan di lapangan baik di permukaan maupun di bawah tanah.

Ada enam langkah dalam menggunakan klasifikasi geomekanika (sistem RMR) :

- a. Langkah pertama adalah dengan menghitung rating total dari lima parameter yang terdapat di dalam Tabel 8.8 sesuai dengan kondisi lapangan yang sebenarnya.
- b. Langkah kedua adalah menilai kedudukan sumbu terowongan terhadap jurus (*strike*) dan kemiringan (*dip*) bidang-bidang diskontinuitas seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 8.9.
- c. Langkah ketiga, setelah menentukan kedudukan sumbu terowongan terhadap jurus dan kemiringan bidang-bidang diskontinuitas, maka rating-nya ditetapkan berdasarkan Tabel 8.10.



Gambar 8.3. Konsep RSR : Kurva penyangga untuk terowongan berdiameter 7,3 m

Langkah ini disebut juga sebagai penyesuaian rating (*rating adjustment*).

- d. Langkah keempat adalah menjumlahkan rating yang didapat dari langkah pertama dengan rating yang didapatkan dari langkah ketiga sehingga didapatkan rating total sesudah penyesuaian. Dari rating total ini dapat diketahui kelas dari massa batuan berdasarkan Tabel 8.11.
- e. Langkah kelima, setelah kelas massa batuan diketahui maka dapat diketahui *stand-up time* dari massa batuan tersebut dengan *span* tertentu serta

kohesi dan sudut geser dalam-nya seperti diperlihatkan oleh Tabel 8.12.

Bieniawski (1976) memberikan hubungan antara waktu stabil tanpa penyangga (*stand-up time*) dengan *span* untuk berbagai kelas massa batuan menurut klasifikasi geomekanika seperti diperlihatkan oleh Gambar 8.4. Hubungan ini sangat penting sekali diketahui pada saat penggalian terowongan.

- f. Berdasarkan pada Klasifikasi Geomekanika ini, Bieniawski memberikan petunjuk untuk penggalian dan

Tabel 8.8 Parameter Klasifikasi dan Rating-nya

Parameter		Range of Values				
1	Strength of intact rock material	>10	4-10	2-4	1-2	For this low range, uniaxial compressive test is preferred
	Popint-load strenght Index (Mpa)					
	Uniaxial compressive strenght Rating	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25
		15	12	7	4	2
2	Drill core quality RQD (%) Rating	90-100	75-90	50-75	25 - 50	<25
		20	17	13	8	
	Spacing of discontinuities Rating	>2m	0.6-2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	<60 m
		20	15	10	8	
	Condition of Discontinuities	Very rough surfaces not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Continuous Separation 1-5 mm	0
	Rating	30	25	20	10	0
	Ground-water	Inflow per 10 m Tunnel Length (L/min)	<10	10 - 25	25 - 125	>125
		Ratio = Joint Water Pressure Major principal stress	<0.1	0.1 - 0.2	0.2-0.5	>0.5
	General Conditions	Completely Dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing
	Ratings	15	10	7	4	0

penyanggaan terowongan batuan dalam hubungan dengan sistem RMR seperti diperlihatkan di Tabel 8.13. Petunjuk ini hanya berlaku untuk terowongan di batuan dengan lebar 10 m, berbentuk tapal kuda (*horseshoe*), tegangan vertikal lebih kecil dari 25 MPa, serta metode penggalian dengan pemboran dan peledakan.

Gambar 8.5 memperlihatkan formulir data masukan yang akan digunakan pada saat penyelidikan di lapangan untuk klasifikasi massa batuan.

7. KLASIFIKASI SISTEM Q.

Klasifikasi massa batuan dengan sistem Q didasarkan pada penilaian numerik dari kualitas massa batuan dengan menggunakan enam parameter yang berbeda :

- a. RQD.
- b. *Number of joint sets.*
- c. *Roughness of the most unfavorable joint or discontinuity.*
- d. *Degree of alternation or filling a long the weakest joint.*
- e. *Water inflow.*
- f. *Stress condition.*

Tabel 8.9. Efek orientasi jurus dan kemiringan diskontinuitas di dalam penerowongan

Strike Perpendicular to Tunnel axis			
Drive with Dip		Drive agiants Dip	
Dip 45-90	Dip 45-90	Dip 45-90	Dip 20-45
Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable
Strike Parallel to Tunnel Axis		Irrespective of Strike	
Dip 20-45	Dip 45-90	Dip 0-20	
Fair	Very unfavorable	Fair	

Modified after Wickman et.al., (1972)

Tabel 8.10. Penyesuaian rating untuk orientasi bidang-bidang diskontinuitas

Strike and Dip Orientation of Discontinuities	Very Favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very Unfavorable
Tunnels and mines	0	-2	-5	-10	-12
Headings Foundation	0	-2	-7	-15	-25
Stopes	0	-5	-25	-50	-60

Tabel 8.11. Kelas massa batuan yang ditentukan dari rating total

Rating	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Class on	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair Rock	Poor rock	Very poor rock

Tabel 8.12. Arti dari kelas massa batuan.

Class no.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 yr for - 15 m span	1 wk for - 10 m	1 wk for - 5 m	10 h for - 2.5 m span	30 min for 1 m span
Cohesion of the rock mass (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	<100
Friction angle of the rock mass (deg)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Keenam persamaan ini dikelompokkan kedalam tiga kelompok hasil bagi untuk memberikan kualitas massa batuan Q secara total sebagai berikut :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

dengan :

RQD = rock quality designation

J_n = joint set number

J_r = joint roughness number

J_a = joint alteration number

J_w = joint water reduction number

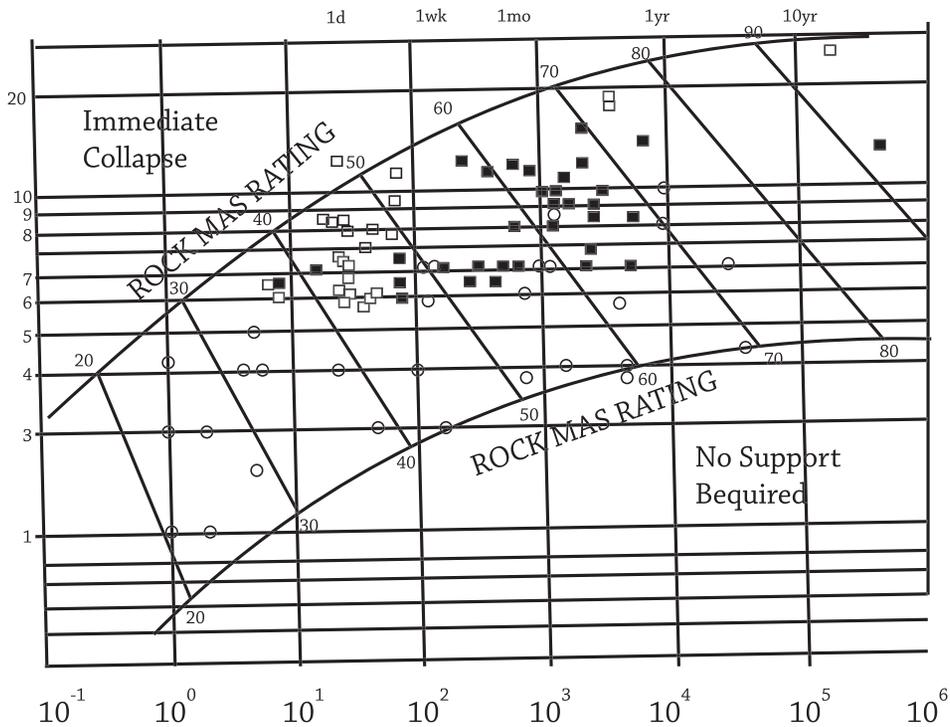
SRF = stress reduction factor

Kualitas batuan dapat berkisar dari $Q = 0,001$ sampai $Q = 1000$ pada skala logaritmik kualitas massa batuan.

Prosedur Klasifikasi

Tabel 14 memberikan nilai numerik dari tiap parameter klasifikasi. Dua parameter pertama menggambarkan struktur menyeluruh dari massa batuan, dan perbandingan kedua parameter tersebut adalah ukuran relatif dari blok. Perbandingan antara parameter ketiga dan keempat adalah indikator dari kuat geser inter-blok (dari kekar-kekar). Parameter kelima adalah ukuran untuk tekanan air, sedangkan parameter keenam adalah ukuran untuk :

- Beban lepas didalam hal daerah geseran dan batuan lempung.
- Tegangan batuan dalam hal batuan *competent*.
- Beban *squeezing* dan swelling di batuan *incompetent plastis*.



Stand-up Time, hrs

Gambar 4. Hubungan antara *stand-up time* dengan *span* untuk berbagai kelas massa batuan

Parameter keenam ini adalah parameter tegangan total. Perbandingan antara parameter kelima dan keenam menggambarkan tegangan aktif (*active stress*).

Nilai Q dihubungkan dengan kebutuhan penyangga terowongan dengan menetapkan dimensi ekuivalen (*equivalent dimension*) dari galian. Dimensi ekuivalen merupakan fungsi dari ukuran dan kegunaan

dari galian, didapat dengan membagi *span*, diameter atau tinggi dinding galian dengan harga yang disebut Excavation Support Ratio (ESR).

$$\text{Dimensi ekuivalen} = \frac{\text{Span atau tinggi (m)}}{\text{ESR}}$$

Tabel 15 memperlihatkan harga ESR untuk berbagai lubang bukaan bawah tanah

Tabel 8.13. Petunjuk untuk pengalihan dan penyangga terowongan batuan dengan sistem RMR

Rock Mass Class	Excavation	Support		
		Rock bolts (20 mm Dia, fully Grouted)	Shotcret	Steel Sets
Very good rock I; RMR:81 -100	Full face 3 m advance	Generally, no support required except for occasional spot bolting		
Good rock II; RMR:61-80	Full face 1.0 -1.5 m advance Complete support 20 m from face	Locally bolts in crown 3m long, spaced 2.5 m, with occasional mesh	50 mm in crown where require	None
Fair Rock III; RMR: 41 -60	Top heading and bench 1.5 -3 m advance in Top heading Commeence support 10 m From face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5-2m in crown and walls with	50-100 mm in crown and 30 mm in sides	None
Poor Rock IV; RMR : 21-40	Top heading and bench 1.0 -1.5 m advance in Top heading. Install support in crown Concurrently with Excavation 10m from face	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m and wall with wire mesh	100-150 mm in crown and 100 mm in side	Light to medium ribs spaced 1.5 m where RMR : required
Very Poor Rock V; RMR: <20	Multiple drifts long, spaced 1 - 1.5 m heading. Install support concurrently with Excavation. Shotcrete As soon as possible after blasting	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with With wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown 150 mm in sides, and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced; 0.75 m with steell aging and forepolling if required. Close invert.

^a Shape : horseshoe: width: 10 m Vertical stress < 25 Mpa; construction: drilling and blasting

INPUT DATA FORM : GEOMECHANICS CLASSIFICATION (ROCK MASS RATING SYSTEM)

Name of project:
 Site of survey:
 Conducted by:
 Date:

STRUCTURAL REGION	DEPTH, m	ROCK TYPE
STRENGTH OF INTACT ROCK MATERIAL		
Uniaxial Point-load compressive strength, MPa	DRILL CORE QUALITY R.O.D.	
Designation	Excellent quality: 90-100% Good quality: 75-90% Fair quality: 50-75% Poor quality: 25-50% Very poor quality: < 25%	
Very High: 100-250	> 10	
High: 50-100	4-10	
Medium High: 25-50	0-4	
Moderate: 1-5	1-2	
Low: 1-5	< 1	
Very Low: 1-5	0-4	
R.O.D. = Rock Quality Designation		
STRIKE AND DIP ORIENTATIONS		
Set 1 Strike (average)	(from to)	Dip: (direction)
Set 2 Strike	(from to)	Dip: (direction)
Set 3 Strike	(from to)	Dip: (direction)
Set 4 Strike	(from to)	Dip: (direction)
NOTE: Refer all directions to magnetic north.		
SPACING OF DISCONTINUITIES		
Very wide: Over 2 m	Set 1	Set 2 Set 3 Set 4
Wide: 0.6 - 2 m
Moderate: 200 - 600 mm
Close: 60 - 200 mm
Very close: < 60 mm
GROUND WATER		
INFLOW per 10 m of tunnel length	liters/minute	GENERAL CONDITIONS (completely dry, damp, wet, dripping or flowing under or low/medium or high pressure):
WATER PRESSURE	kPa	IN SITU STRESSES

PERSISTENCE (CONTINUITY)	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
Very low: < 1 m
Low: 1 - 3 m
Medium: 3 - 10 m
High: 10 - 20 m
Very high: > 20 m
SEPARATION (APERTURE)				
Very tight joints: < 0.1 mm
Tight joints: 0.1 - 0.5 mm
Moderately open joints: 0.5 - 2.5 mm
Open joints: 2.5 - 10 mm
Very wide aperture: > 10 mm
ROUGHNESS (state also if surfaces are stepped, undulating or planar)				
Very rough surfaces:
Rough surfaces:
Slightly rough surfaces:
Smooth surfaces:
Stippled surfaces:
FILLING (GOUZE)				
Type:
Thickness:
Uniaxial compressive strength, MPa
Seepage:
WALL ROCK OF DISCONTINUITIES				
Unweathered
Slightly weathered
Moderately weathered
Highly weathered
Completely weathered
Residual soil
GENERAL REMARKS AND ADDITIONAL DATA				
MAJOR FAULTS specify locality, nature and orientations.				

NOTE: For estimations and methods consult ISRM document: "Quantitative description of discontinuities in rock masses."

Gambar 5. Formulir data masukan untuk klasifikasi massa batuan

serta tingkat keamanan yang dikehendaki.

Hubungan antara indeks Q dan dimensi ekuivalen dapat menentukan ukuran penyangga yang sesuai seperti diperlihatkan oleh Gambar 6. Barton dan kawan-kawan (1974) menyediakan katagori penyangga sebanyak 38 buah yang memenuhi syarat untuk penyangga permanen seperti dibagikan oleh Tabel 16 sampai Tabel 20.

Untuk menentukan penyangga sementara (*temporary support*), indeks Q ditambah menjadi 5 Q atau ESR ditambah menjadi 1,5 ESR.

Harus dicatat bahwa panjang baut batuan (*rock bolt*) tidak ditentukan di dalam Tabel 16, tetapi panjang baut tersebut (L) ditentukan dari persamaan :

$$L = \frac{2 + 0,15 B}{ESR}$$

dengan B adalah lebar lubang bukaan.

Span maksimum yang tidak disangga dapat diperoleh dari hubungan berikut ini :

$$\begin{aligned} \text{Span maksimum (unsupported)} \\ = 2 (\text{ESR}) Q^{0,4} \end{aligned}$$

Hubungan antara nilai Q dan tekanan penyangga permanen (P_{roof}) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$P_{\text{roof}} = \frac{2}{J_r} Q^{-1/3}$$

Jika jumlah *joint set* kurang dari tiga, persamaan tersebut menjadi :

$$\text{Proof} = \frac{2}{3} J_n^{1/2} J_r^{-1} Q^{-1/3}$$

Walaupun Sistem Q melibatkan sembilan kelas massa batuan dan 38 kategori penyangga, ini tidak terlalu rumit.

Beberapa pemakai Sistem Q menggaris bawahi bahwa skala logaritme terbuka Q bervariasi dari 0,001 sampai 1000 yang dapat menyebabkan kesulitan. Akan lebih mudah dengan menggunakan skala linier sampai dengan 100.

Tabel 8.14. Deskripsi Sistem Q dan Rating-nya : Parameter RQD, J_n , J_r , J_a , SRF, J_w .

Rock Quality Designation (RQD)		
very poor	0-25	Note: (I) Where RQD is reported or measured as ~ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q in equation (5.1). (ii) RQD intervals of 5,i.e., 100,95,90 ... etc are sufficiently accurate
Poor	25-50	
Fair	50-75	
Good	75-90	
Exclcellent	90-100	
Joint set number J_n		
Massive, none or few joints	0.5 - 1.0	Note: (i) For intersection, use (3.0 x J_n) (ii) For portals, use (2.0 x J_n)
One joint Set	2	
One joint set plus random	3	
Two joint sets	4	
Two joint sets plus random	6	
Three joint sets plus random	9	
Four or more joint sets, random, heavily jointed	12	
sugar cube etc.	15	
Crush rock, earthlike	20	
Joint Roughness Number J_r		
(a) Rock wall contact joint		Note: (i) Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m (ii) $J_r = 0.5$ can be used for planer slickensided joints hailing lineations, provided the lineations are favorably orientied (iii) Descriptions B to G refer to small-scale features and intermediate-scales features, in that order.
(b) Rock wall contact before 10-cm shear		
Discontinuos joint	4	
Rough or irregular, undulating	3	
Smooth, Undulating	2.0	
Slickensided, Undulating	1.5	
rough or irregular, planar	1.5	
Smooth planar	1.0b	
Slickensided	0.5	
(c) No rock wall contact when sheared		
Zone containing clay minerals thisck enough to prevent rock wall contact	1.0b	
sandy, gravelly, or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0b	
Joint Alteration Number J_a		
	J_a	'Pr (approx)
(a) rock wall contact		
A. Tightly healed, hard, nonsoftening impermeable filling, i.e., quartz oe epidote	0.75	

Tabel 8.14. (Lanjutan)

B. Unaltered joint walls, surface staining only	1.0	25 - 35
C. Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings, sandy particles, clay free disintegrated rock, etc.	2.0	25 - 30
D. Silty or sandy clay coatings, small clay Fraction (nonsoftening)	3.0	20 - 25
E. Softening or low-friction clay mineral coatings, i.e., kalinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum, and graphite, etc., and small quantities of swelling clays (discontinuous)	4.0	8 - 16
(b) Rock wall contact before 1-2 mm shear		
F. Sandy particles, clay free disintegrated rock, etc.	4.0	25 - 35
G. strongly over consolidated, nonsoftening clay mineral fillings (continuous, < 5 mm in thickness).	6.0	
H. Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings. (Continuous, < 5 mm in thickness).	8.0	
J. Swelling clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, < mm in thickness). Value of Ja depends on percentage of swelling clay sized particles, and access to water, etc.	8.0 - 12.0	
(c) No rock wall, contact when sheared.		
K. Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay (see G, H, J. for description of clay condition).	6.0, 8.0 or 13.0 - 20.0	
L. Zones or bands of silty or sandy clay, small clay fraction (nonsoftening).		
M. Thick, continuous zones or bands of clay (see G, H, J. for description of clay condition).		
Note :		
(I) Values of o, are intended as an approximate guide to mineralogical properties of the alteration products, if present		

Tabel 8.14. (Lanjutan)

Stress Reduction Factor (SRF)			
(a) Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated	Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)	10.0	
B.	Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation < 50 m).	5.0	
C.	Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock. (depth of excavation > 50m),	2.5	
D.	Multiple shear zones in competent rock (clay free), loose surrounding rock (any depth)	7.5	
E.	Single-shear zones in competent rock (clay free), (depth of excavation < 50m),	5.0	
F.	Single-shear zone in competent rock (clay free), (depth of excavation > 50m).	2.5	
G.	Loose open joints, heavily jointed or "sugar cube" etc, (any depth), (b) Competent rock, rock. stress problems	5.0	
H.	Low stress, near surface (σ_c/σ_1 Cit-lcr1 > 200 :: > 0.13)	2.5	
J.	Medium stress		
K.	High-stress, very tight structure (usually favorable to stability, may be unfavorable to wall stability)	10-5	0.66-0.33
L.	Mild rock burst (massive rock)	5-2.5	0.33-0.16
M.	Heavy rock burst (massive rock)	<2.5	<0.16
	(c) Squeezing rock: plastic flow of incompetent rock under the influence of high rock pressures		
N.	Mild squeezing rock pressure	5 - 10	
O.	Heavy squeezing rock pressure	10 - 20	
(d)	Swelling rock: chemical swelling activity depending on presence of water		

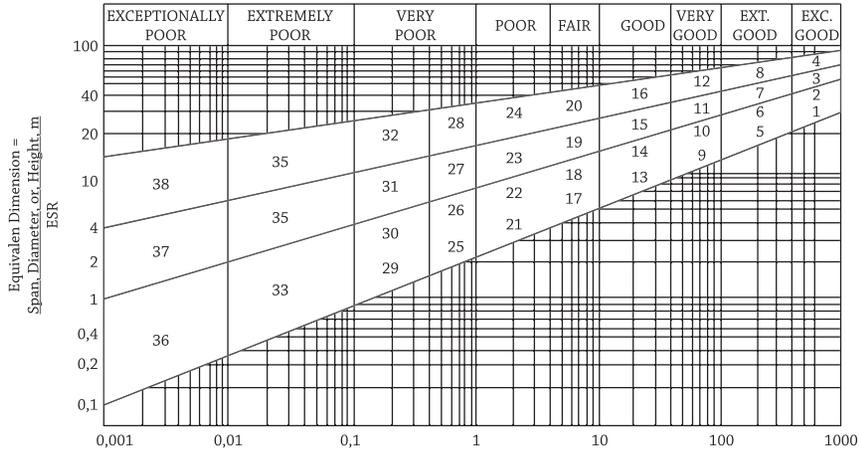
Note;
 (i) Reduce these SRF values by 25 - 50 % if the relevant shear zones only influence but do not intersect the excavation
 (ii) For strongly anisotropic stress field (if measured): when $5 \sim \nu C_1 a_1$:s: 10, reduce σ_c and σ_1 to 0,8 σ_c and 0.8 σ_1 when $u_1 \leq 10$, reduce C_1 and a_1 to 0.6 σ_c and 0.6 σ_1 (where σ_1 = unconfined compressive strength, σ_1 = tensile strength (point load), σ_1 and σ_3 = major and minor principal stresses)

Tabel 8.14. (Lanjutan)

P. Mild swelling rock pressure		5 - 10	
R. Heavy swelling rock pressure		10 - 15	
Joint Water Reduction Factor J_w			
	J_w	Approximate water Pressure ($k \sim J/cm^2$)	
A. Dry excavations or minor inflow, i.e., B. 5 L/min locally	1.0	< 1	Note: (I) Factors C-F crude estimates. Increase J_w if drainage measures are installed.
Medium inflow or pressure occasional outwash of joint fillings.	0.66	1.0-2.5	(ii) Special problems caused by ice forma- tion are not considered.
C. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5	2.5-10.0	
D. Large inflow or high pressure, con- siderable outwash of joint fillings	0,33	2.5-10.0	
E. Exceptionally high inflow or water. pressure at blasting, decaying with time	0.2-0.1	>10.0	
F. Exceptionally high inflow or water pressure continuing without notice- able decay.	0.1-0.05	>10.0	

Tabel 8.15. Harga ESR.

Excavation Category	ESR	No. of Cases
A. Temporary mine openings	3 - 5	2
B. Vertical shafts ; Circular section	2.5	
Rectangular square section	2.0	
C. Permanent mine openings, water tunnels for hydropower (excluding high-pressure Penstock), pilot tunnels, drifts, and headings for large excavations	1.6	83
D. Storage caverns. water treatment plants, minor highway and railroad tunnels, surge chambers, access tunnels.	1.3	25
E. Power stations, major highway or railroad tunnels, civil defense chambers, portals, intersections.	1.0	73
f. Underground nuclear power stations, railroad stations, factories.	0.8	2



Gambar 6. Hubungan antara dimensi ekuivalen dengan kualitas massa batuan (Barton dkk, 1974)

Tabel 8.16. Sistem Q : Ukuran penyangga

Support Category	Q	Conditional Factors		Span/ ESR (m)	Pb (kg/cm ²)	Span/ ESR (m)	Type of Support	Notes (Table 5.6.)
		RQD/ Jn	Jp/Jn					
1c	1000 - 400			<0.01	20 - 40		sb(utg)	
2c	1000 - 400			<0.01	30 - 60		sb(utg)	
3c	1000 - 400			<0.01	46 - 80		sb(utg)	
4c	1000 - 400			<0.01	65 - 100		sb(utg)	
5c	400 - 100			0.05	12 - 30		sb(utg)	
6c	400 - 100			0.05	19 - 45		sb(utg)	
7c	400 - 100			0.05	30 - 65		sb(utg)	
8c	400 - 100			0.25	48 - 88		sb(utg)	
9c	100 - 40	>20		0.25	8.5 - 19		sb(utg)	
		<20					B(utg) 2.5 - 3 m	
10c	100 - 40	>30		0.25	14 - 30		B(utg) 2 - 3 m	
		<30					B(utg) 1.5 - 2 m + clm	
11c	100 - 40	>30		0.25	23 - 48		B(tg) 2 - 3 m	
		<30					B(tg) 1.5 - 2 m + clm	
12c	100 - 40	>30		0.25	40 - 72		B(tg) 2 - 3 m	
		<30					B(tg) 1.5 - 2 m + clm	
13	40 - 10	>10	>1.5		0.5		sb(utg)	I

Support Category	Q	Conditional Factors		Span/ESR (m)	Pb (kg/cm ²)	Span/ESR (m)	Type of Support	Notes (Table 5.6.)
		RQD/Jn	Jp/Jn					
		>10	<1.5				B(utg) 1.5 - 2 m	I
		<10	>1.5				B(utg) 1.5 - 2 m	I
		<10					B(utg) 1.5 - 2 m + s(mr) 5 - 10 cm	I
14	40 - 10	>10		>15	0.5	9 - 23	B(tg) 1.5 - 2 m + clm	I, II
		<10		>15			B(tg) 1.5 - 2 m + s(mr) 5 - 10 cm	I, II
				<15			B(utg) 1.5 - 2 m + clm	I, III
15	40 - 10	>10			0.5	15 - 40	B(tg) 1.5 - 2 m + clm	I, II, IV
		<10					B(tg) 1.5 - 2 + S((mr) 5 - 10	I, II, IV
16	40 - 10	>15			0.5	30 - 65	B(tg) 1.5 - 2 m + clm	I, V, VI
		<15					B(tg) 1.5 - 2 m + s(mr) 10 - 15 cm	I, V, VI
17	10 - 4	>30			1.0	3.5 - 9	sb (utg)	I
		>10, <30					B (utg) 1 - 1.5 m	I
		<10		>6			B (uIg) 1 - 1.5 m + S 2 - 3 cm	I
		<10		<6			S 2 - 3 cm	I
18	10 - 4	>5		>10	1.0	7 - 15	B (tg) 1 - 1.5 m + clm	I, III
		>5		<10			B (utg) 1 - 1.5 m + clm	I
		<5		>10			B (tg) 1 - 1.5 m + S 2 - 3 cm	I, III
		<5		<10			B (utg) 1 - 1.5 m + S 2 - 3 cm	I
19	10 - 4			>20	1.0	12 - 29	B (tg) 1 - 2 m + S (mr) 10 - 15 cm	I, II, IV
				<20			B (tg) 1 - 1.5 m + S (mr) 5 - 10 cm	I, II
20c	10 - 4			>35	1.0	24 - 52	B (tg) 1 - 2 m + S (mr) 20 - 25 cm	I, II, VI
				<35			B (tg) 1 - 2 m + S (mr) 10 - 20 cm	I, II, IV
21	4 - 1	>12.5	<0.75		1.5	2.1 - 6.5	B (utg) 1m + S 2 - 3 cm	I
		<12.5	<0.75				S 2.5 - 5 cm	I
			>0.75				B (utg) 1m	I
22	4 - 1	>10, <30	>1.0		1.5	4.5 - 11.5	B (utg) 1m + clm	I
		<10	>1.0				S 2.5 - 7.5 cm	I
		<30	<1.0				B (utg) 1 m + S (mr) 2.5 - 5 cm	I
		>30					B (utg) 1 m	I
23	4 - 1			>15	1.5	8 - 24	B (tg) 1 - 1.5 m + S (mr) 10 - 15 cm	I, II, IV, VII
				<15			B (utg) 1 - 1.5 m + S (mr) 5 - 10 m	I

Support Category	Q	Conditional Factors		Span/ ESR (m)	Pb (kg/cm ²)	Span/ ESR (m)	Type of Support	Notes (Table 5.6.)
		RQD/Jn	Jp/Jn					
24 c,d	4 - 1			>30	1.5	18 - 46	B(tg) 1 - 1.5 m + S (mr) 15 - 30 cm	I, V, VI
				<30			B(tg) 1 - 1.5 m + S (mr) 10 - 15 cm	I, II, IV
25	1.0 - 0.4	>10	>0.5		2.25	1.5 - 4.2	B(utg) 1 m + mr or clm	I
		<10	>0.5				B(utg) 1 m + S (mr) 5 cm	I
			<0.5				B(tg) 1 m + S (Mr) 5 cm	I
26	1.0 - 0.4				2.25	3.2 - 7.5	B(tg) 1 m + S (mr) 5 - 7.5 cm	VIII, X, XI
							B(utg) 1 m + S 2.5 - 5 cm	I, IX
27	1.0 - 0.4			>12	2.25	6 - 18	B(tg) 1 m + S (mr) 7.5 - 10 cm	I, IX
				>12			B(utg) 1 m + S (mr) 5 - 7.5 cm	I, IX
				>12			CCA 20 - 40 cm + B(tg) 1 m	VIII, X, XI
				>12			S(mr) 10 - 20 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, XI
28	1.0 - 0.4			>30	2.25	15 - 38	B(tg) 1 m + S (mr) 30-40cm	I, IV, V, IX
				>20,<30			B (tg) 1 m + S (mr) 20-30 cm	I,II,IV, IX
				<20			B(tg) 1m + S (mr) 15 - 20 cm CCA (sr) 30 - 100 cm + B (tg) 1 m	I,II,IX IV, VIII, X, XI
29	0.4 - 0.1	>5	>0.25		3.0	1.0 - 3.1	B(utg) 1 m + S 2 - 3 cm	
		<5	>0.25				B(utg) 1 m + S (mr) 5 cm	
			<0.25				B(tg) 1 m + S (Mr) 5 cm	
30	0.4 - 0.1	>5			3.0	2.2 - 6	B(tg) 1 m + S 2.5 - 5 cm	IX
		<5					S(mr) 5 - 7.5 cm	IX
							B(tg) 1 m + S (mr) 5 - 7.5 cm	VIII, X, XI
31	0.4 - 0.1	>4			3.0	4 - 14.5	B(tg) 1 m + S (mr) 5 - 12.5 cm	IX
		<4, >1.5					S (mr) 7.5 - 25 cm	IX
		<1.5					CCA 20 - 40 cm + B(tg) 1 m	IX, XI
							CCA (sr) 30 - 50 cm + B(tg) 1 m	VIII, X, XI
32	0.4 - 0.1			>20	3.0	11 - 34	B(tg) 1 m + S (mr) 40 - 60 cm	II, IV, IX, XI

Support Category	Q	Conditional Factors		Span/ESR (m)	Pb (kg/cm ²)	Span/ESR (m)	Type of Support	Notes (Table 5.6.)
		RQD/Jn	Jp/Jn					
				<20			B(tg) 1 m + S (mr) 20 - 40 cm	III, IV, IX, XI
33	0.1 - 0.01	>2			6	1.0 - 3.9	B (tg) 1 m + S (mr) 2.5 - 5 cm	IX
		<2					S (mr) 5 - 10 cm	IX
							S (mr) 7.5 - 15 cm	VIII, X
34	0.1 - 0.01	>2	>0.25		6	2.0 - 11	B (tg) 1 m + S (mr) 5 - 7.5 cm	IX
		<2	>0.25				S (mr) 7.5 - 15 cm	IX
			<0.25				S (mr) 15 - 25 cm	IX
							CCA (sr) 20 - 60 cm + B (tg) 1 m	VIII, X, XI
35c	0.1 - 0.01			>15	6	6.2 - 28	B (tg) 1 m + S (mr) 30 - 100 cm	II, IX, XI
				>15			CCA (sr) 60 - 200 cm + B(tg) 1 m	VIII, X, XI, II
				<15			B(tg) 1 m + S (mr) 20 - 75 cm	IX, XI, III
				<15			CCA (sr) 40 - 150 cm + B(tg) 1 m	VIII, X, XI, III
36	0.01 - 0.001				12	1.0 - 2.0	S (mr) 10 - 20 cm	IX
							S (mr) 10 - 20 cm + B (tg) 0.5 - 1.0 m	VIII, X, XI
37	0.01 - 0.001				12	1.0 - 6.5	S (mr) 20 - 60 cm	IX
							S (mr) 20 - 60 cm + B(tg) 0.5 - 1.0 m	VIII, X, XI
38	0.01 - 0.001			>10	12	4.0 - 20	CCA (sr) 100 - 300 cm	IX
				>10			CCA (sr) 100 - 300 cm + B(tg) 1 m	VIII, X, II, XI
				<10			S (mr) 70 - 200 cm	IX
				<10			S (mr) 70 - 200 cm	VIII, X, III, XI

a after Barton et.al., (1974).

b approx

c Original authors estimates of support. Insufficient case records available for reliable estimation of support requirements. The type of support to be used in categories 1 - 8 will depend on the blasting technique, smooth wall blasting and through barring-down may remove the need for support. Rough-wall blasting may result in the need for single applications of shotcrete, especially where the excavation height is > 25 m. Future case records should differentiate categories 1 - 8 Key; sb =spot bolting; B =systematic bolting; (utg) = untensioned, grouted; (tg) tensioned expanding shell type for competent rock masses, grouted post-tensioned in very poor quality rock masses; S =shotcrete; (mr) =mesh-reinforced; elm =chain link mesh; CCA =cast concrete arch; (Sl) steel reinforced. Bolt spacings are given in meters (m). shotcrete or cast concrete arch thickness is given in centimeters (cm).

D See note XII Table 5.6

Buku Ajar Mekanika Batuan merupakan buku pegangan wajib bagi mahasiswa yang mengambil kuliah mekanika tanah batuan. Buku ini membahas tentang definisi batuan, karakteristik batuan serta sifat fisik dan mekanik batuan. Buku ini juga membahas tentang pola tegangan dan regangan yang bekerja pada batuan. Pola keruntuhan batuan juga menjadi salah satu bahasan selain klasifikasi batuan. Buku mekanika batuan ini memberikan ilmu dasar tentang batuan. Dengan membaca buku ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam kegiatan engineering desain untuk berbagai kegiatan konstruksi yg melibatkan batuan.



Supandi lahir di Blitar Jawa Timur. Memiliki *background* pendidikan teknik Geologi dengan *specialist pada Geomechanic, Geohydrology, Engineering Geology* dan keselamatan dan lingkungan pertambangan. Selain sebagai dosen aktif juga terlibat aktif dalam riset-riset bersama praktisi pada industri Pertambangan. Telah menghasilkan puluhan publikasi pada Jurnal International berputasi dan beberapa buku referensi.

Scan Me:



MEGAPRESS

Anggota IKAPI Nomor : 435/JBA/2022

E-Mail : press.megapress@gmail.com

Office : Janati Park III Cluster Copernicus Blok

D.07, Cibeuhi, Jatinangor

Sumedang - Jawa Barat - Indonesia 45363

Telp : 0812.1208.8836

ISBN 978-623-8221-94-3

