

Bab II

Sifat Fisik dan Sifat Mekanik Batuan

2.1. Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan yang ditentukan untuk kepentingan penelitian adalah bobot isi asli (*natural density*), bobot isi kering (*dry density*), bobot isi jenuh (*saturated density*), berat jenis (*specific gravity*), kadar air asli (*natural water content*), kadar air jenuh (*saturated water content*), derajat kejenuhan (*degree of saturation*), porositas (*porosity*) dan angka pori (*void ratio*).

2.1.1. Penentuan Sifat Fisik Batuan

Untuk mengetahui sifat fisik batuan, dapat dihitung dengan menggunakan beberapa persamaan sebagai berikut :

a. Bobot isi (ρ)

1. Bobot isi natural (*natural density*)

$$\rho_n = \frac{W_n}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (2.1)$$

2. Bobot isi kering (*dry density*)

$$\rho_d = \frac{W_o}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (2.2)$$

3. Bobot isi jenuh (*saturated density*)

$$\rho_s = \frac{W_w}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (2.3)$$

b. Kadar air

1. Kadar air asli (*natural water content*)

$$\text{Kadar air asli} = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100\% \dots\dots\dots (2.4)$$

2. Kadar air jenuh (*saturated water content*)

$$\text{Kadar air jenuh} = \frac{W_w - W_o}{W_o} \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

c. Derajat kejenuhan (*degree of saturation*)

$$Sr = \frac{W_n - W_o}{W_w - W_o} \times 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

d. Porositas (n)

$$n = \frac{W_w - W_o}{W_w - W_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

e. Angka pori (*void ratio*)

$$e = \frac{n}{1 - n} \dots\dots\dots (2.8)$$

f. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*)

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{W_o}{(W_w - W_s)} / \text{Bobot isi air} \dots\dots\dots (2.9)$$

g. Berat jenis sejati (*true specific gravity*)

$$\text{Berat jenis sejati} = \frac{W_o}{(W_o - W_s)} / \text{Bobot isi air} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan :

W_o = Berat contoh kering (sesudah dimasukkan ke dalam oven selama 24 jam dengan temperatur kurang lebih 90°C) (gram)

W_n = Berat contoh asli (natural) (gram)

W_w = Berat contoh jenuh (sesudah dijenuhkan dengan air selama 24 jam) (gram)

W_s = Berat contoh jenuh di dalam air (tergantung didalam air) (gram)

2.2. Sifat Mekanik Batuan

2.2.1. Uji Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik

Faktor penentu cepat rambat gelombang ultrasonik didalam contoh batuan adalah kondisi rekahan yang terdapat didalam contoh batuan tersebut. Semakin lama waktu yang ditempuh oleh gelombang ultrasonik untuk melewati contoh batuan, maka hal ini mengindikasikan kondisi contoh batuan tersebut memiliki lebih banyak rekahan.

Pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik ini menggunakan PUNDIT (*Portable Unit Non-destructive Digital Indicated Tester*). Alat ini bekerja dengan memancarkan gelombang ultrasonik dari plat pemancar (*emiter*) yang ditempelkan pada salah satu permukaan contoh batuan dan kemudian gelombang ultrasonik yang telah merambat disepanjang contoh batuan

ditangkap oleh plat penerima (*receiver*) yang telah ditempelkan pada permukaan lainnya dari contoh batuan tersebut. Untuk menghitung cepat rambat gelombang ultrasonik pada contoh batuan dapat menggunakan persamaan 2.11 sebagai berikut.

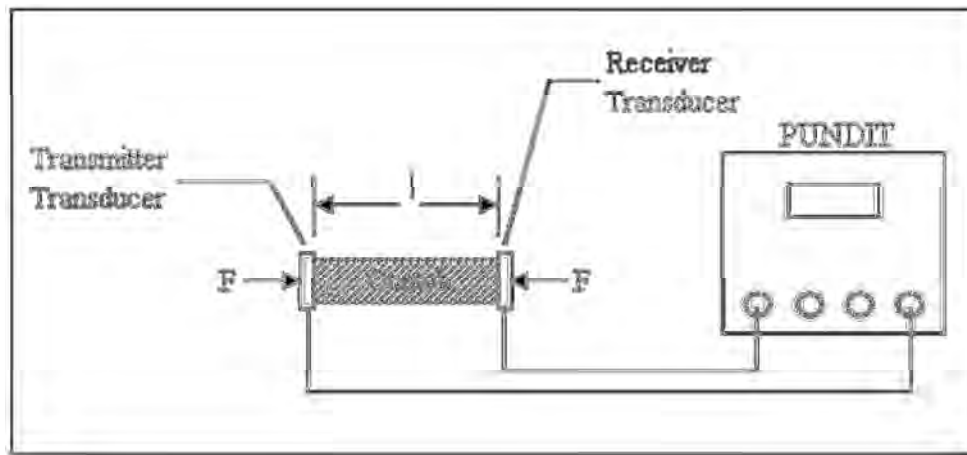
$$V_p = \frac{L}{t_p} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan:

V_p = Cepat rambat gelombang ultrasonik tekan (m/detik)

L = Panjang contoh batuan yang diuji (m)

t_p = Waktu yang dibutuhkan gelombang tekan merambat sepanjang contoh (detik)



Gambar 2.1. Rangkaian percobaan untuk memperoleh cepat rambat gelombang ultrasonik batuan.

2.2.2. Uji Kuat Tekan Uniaksial

Uji kuat tekan uniaksial (UCS) bertujuan untuk mengetahui kuat tekan uniaksial dari contoh batuan baik dalam bentuk silinder, balok, dan prisma dalam satu arah (uniaksial). Sedangkan yang menjadi tujuan utama dari uji kuat tekan uniaksial ini adalah untuk mengetahui kekuatan batuan utuh. Dari uji kuat tekan uniaksial ini dapat menghasilkan beberapa parameter penting yaitu: kurva tegangan–regangan, kuat tekan uniaksial, modulus Young, dan nisbah Poisson.

2.2.2.1. Klasifikasi Kekuatan Batuan

Didalam penelitian ini untuk menentukan terminologi kekuatan batuan dapat menggunakan klasifikasi yang disarankan oleh *International Society of Rock Mechanics* (1981) seperti dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Penentuan klasifikasi pendugaan kekuatan batuan dengan nilai Uji Kuat Tekan Uniaksial dan Point Load Index (ISRM, 1981).

Kelas	Terminologi	UCS (MPa)	PLI (MPa)	Dugaan kekuatan batuan	Contoh
R6	Sangat kuat sekali	> 250	> 10	Batuan akan pecah dengan menggunakan pukulan palu geologi secara berulang-ulang kali	Basalt segar, chert, diabas, gneis, granit, quartzit
R5	Sangat kuat	100 - 250	4 - 10	Perlu pukulan palu geologi beberapa kali untuk memecahkan batuan utuh	Ampibolit, batupasir, basalt, gabro, gneis, granodiorit, gamping, marmer, riolit, tuf
R4	Kuat	50 – 100	2 - 4	Batu yang berada di tangan dapat pecah dengan sekali pukulan palu geologi	Gamping, marmer, pilite, batupasir, sekis, shale
R3	Kuat menengah	25 - 50	1 - 2	Sekali pukulan hanya dengan menggunakan pick palu geologi dan membentuk lekukan batuan sedalam 5 mm, permukaan batuan dapat tergores dengan menggunakan pisau lipat	Batu lempung, batubara, beton, sekis, shale, siltstone
R2	Lemah	5 - 25	**	Batuan dapat dipotong dengan menggunakan pisau lipat. Namun terlalu kuat untuk dapat membentuk bongkahan segitiga	Batu kapur, batu garam, potash
R1	Sangat lemah	1 - 5	**	Batu akan terurai pecah dengan pukulan keras menggunakan pick palu geologi serta bias di gores dengan pisau lipat	Batuan sangat lapuk dan teralterasi
R0	Sangat lemah sekali	0,25 - 1	**	Batuan bias digores dengan kuku	Lempung gouge

Keterangan : ** = Uji Point Load Index terhadap batuan dengan kuat tekan uniaksial di bawah 25 MPa sangat diragukan hasilnya.

Jika Point Load Index (Is) = 1 MPa, maka index tersebut tidak akan memiliki arti. Sehingga penentuan kekuatan batuan harus berdasarkan uji UCS. Point load index (Is) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.13). Untuk mengetahui klasifikasi kekuatan batuan berdasarkan kuat tekan uniaksialnya, dapat dilakukan dengan dua metode yaitu: dengan uji kuat tekan uniaksial dilaboratorium dan uji point load index.

Untuk mengetahui kuat tekan uniaksial contoh batuan berdasarkan uji kuat tekan uniaksial dilaboratorium dapat menggunakan persamaan 2.12. Uji kuat tekan uniaksial dilaboratorium tersebut menggunakan contoh batuan berbentuk silinder dengan syarat L/D dari 2,5 hingga 3 seperti yang disarankan oleh *International Society of Rock Mechanics* (1981).

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

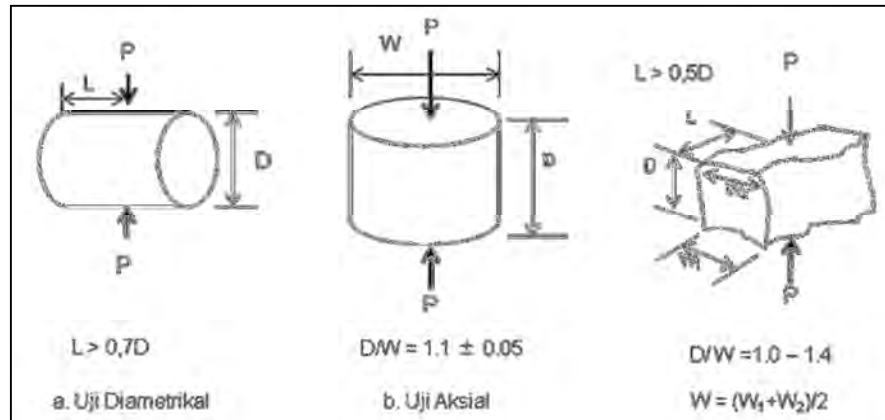
σ_c = Kuat tekan uniaksial (MPa)

F = Gaya yang diberikan pada saat contoh batuan hancur (N)

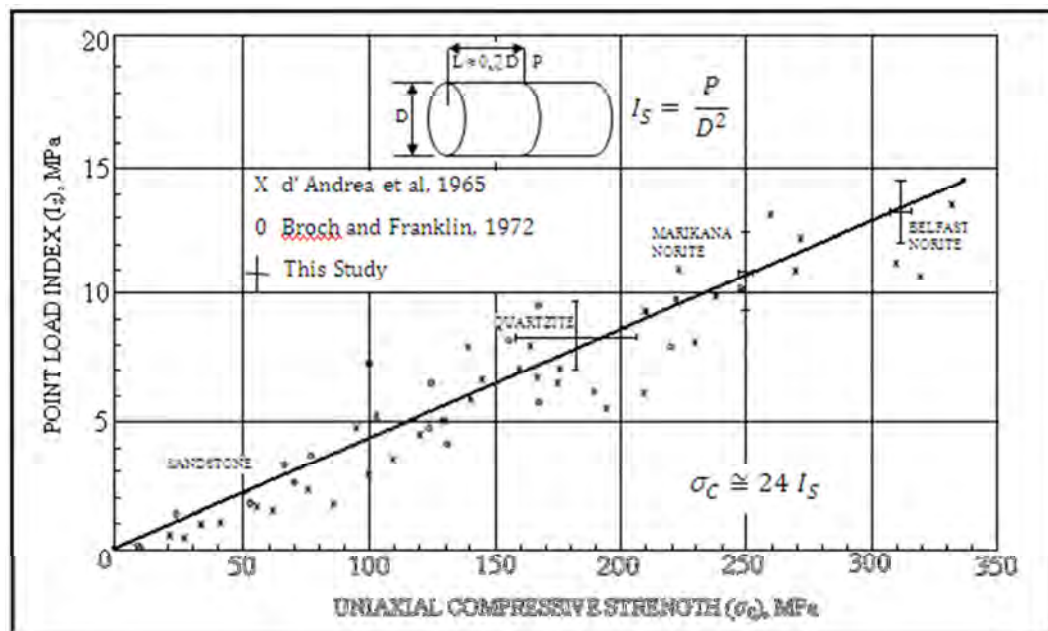
A = Luas penampang awal contoh batuan (m²)

Selain metode diatas, metode untuk menentukan kuat tekan uniaksial dapat menggunakan uji Point Load Index (PLI). Uji point load index (PLI) digunakan untuk menentukan index strength (Is) yang dapat dihubungkan dengan kuat tekan uniaksial contoh batuan.

Beberapa peneliti seperti Broch dan Franklin (1972), Guidicini dkk (1973) melakukan uji Point Load Index untuk mengetahui kuat tekan uniaksial batuan secara tidak langsung dilapangan. Dari uji point load index tersebut terdapat hubungan antara index strength (Is) terhadap kuat tekan uniaksial contoh batuan. Bieniawski (1975) juga melakukan penelitian terhadap hubungan uji kuat tekan uniaksial dan uji point load index pada lebih dari 1000 contoh batuan. Jenis perletakan contoh batuan yang digunakan didalam uji point load index oleh Bieniawski (1975) dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Jenis perletakan contoh batuan untuk uji point load index yang dilakukan Bieniawski (1975).



Gambar 2.3. Hubungan antara Point Load Index dan Kuat Tekan Uniaksial contoh batuan berukuran NX 54 mm (Bieniawski, 1975).

Dari hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa untuk mengetahui kuat tekan uniaksial batuan dilapangan sangat cocok dilakukan dengan uji Point Load Index dengan meletakkan contoh batuan secara diametral dibandingkan dengan cara aksial serta bentuk tidak beraturan. Point Load Index didapat dengan perhitungan sebagai berikut :

$$I_s = \frac{P}{D^2} \dots\dots\dots(2.13)$$

Sehingga menurut Bieniawski (1975), kuat tekan uniaksial batuan dengan contoh diameter 54 mm dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.14.

$$\sigma_c = 24 I_s \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

I_s = Point Load Index (MPa)

P = Beban maksimum pada saat contoh pecah (N)

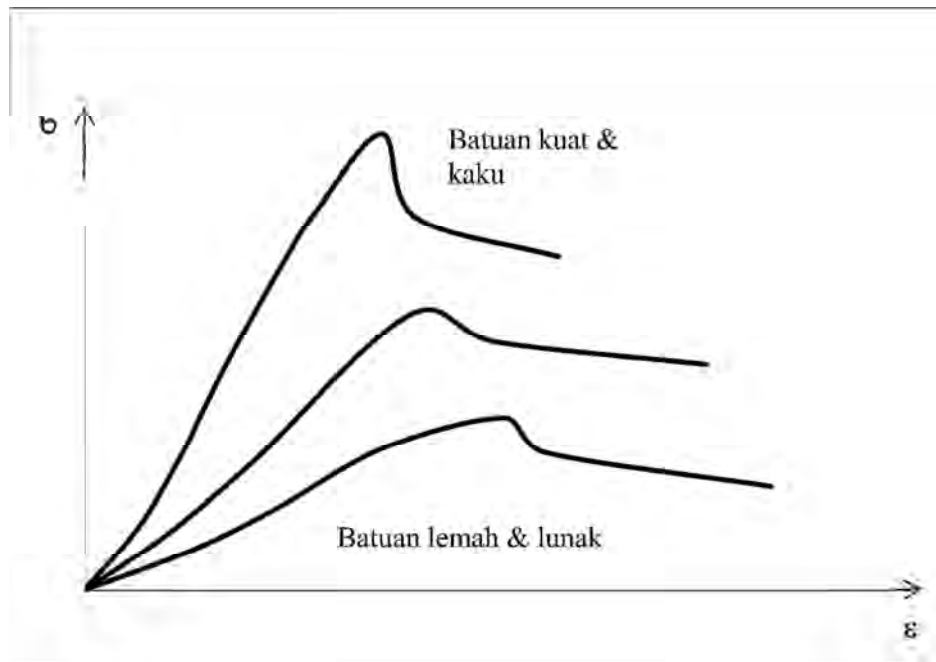
D = Jarak antar konus penekan (mm)

σ_c = Kuat Tekan Uniaksial (MPa)

2.2.2.2. Sifat Mekanik Batuan Utuh

Sifat yang dimiliki batuan utuh ketika mulai mengalami kehancuran adalah memiliki fracture (rekahan). Terbentuknya fracture (rekahan) ketika akan hancur dari contoh batuan tergantung dari kekuatan puncaknya. Setelah melampaui kekuatan puncaknya contoh batuan dapat bersifat struktur getas dan duktil. Struktur getas dari contoh batuan diakibatkan oleh proses menurunnya kekuatan batuan yang diikuti oleh sedikit atau tidak adanya deformasi yang permanen. Sedangkan struktur duktil terjadi ketika contoh batuan memiliki deformasi permanen tanpa menghilangkan kapasitas pembebanannya.

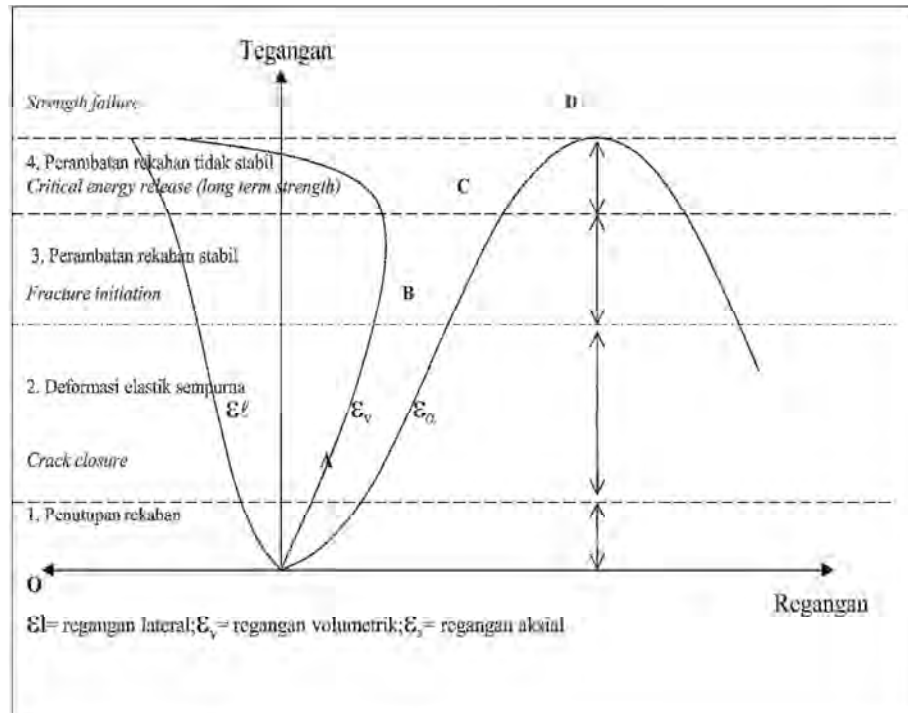
Untuk batuan yang kuat dan kaku cenderung memiliki perilaku fraktur getas sedangkan untuk batuan yang lunak dan empuk cenderung bersifat runtuh duktil. Perbedaan tersebut dapat dilihat dari kurva tegangan – regangan aksial dimana contoh batuan yang memiliki fraktur getas lebih tegak daripada contoh batuan yang lemah dan memiliki runtuh yang bersifat duktil. Adapun kurva tegangan – regangan aksial untuk contoh batuan kuat dan batuan lemah dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Kurva tegangan – regangan aksial untuk contoh batuan kuat dan batuan lemah (Astawa Rai., dkk, 2010)

Ketika contoh batuan mengalami pembebanan, terdapat beberapa proses yang dialami contoh batuan sampai mengalami kehancuran. Proses tersebut telah dijabarkan oleh Bieniawski (1967) dari hasil uji kuat tekan uniaksial pada contoh batuan brittle (Gambar 2.5). Adapun proses tersebut terdiri dari :

1. Penutupan crack (crack closure).
2. Deformasi elastik linier.
3. Inisiasi crack disertai pertumbuhan crack yang tidak stabil.
4. Pelepasan energi kritis disertai pertumbuhan crack yang tidak stabil (crack damage)
5. Keruntuhan batuan.



Gambar 2.5. Kurva tegangan-regangan (Bieniawski, 1967).

2.2.2.3. Modulus Young

Modulus Young atau modulus elastisitas merupakan kekakuan dari contoh batuan yang diukur saat contoh batuan dalam keadaan elastis ketika mengalami pembebanan. Modulus elastisitas dihitung dari kemiringan kurva tegangan-regangan aksial pada bagian kurva yang hampir linier dengan menggunakan persamaan 2.15.

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon_a} \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangan :

E = Modulus elatisitas (MPa)

$\Delta \sigma$ = Perubahan tegangan (MPa)

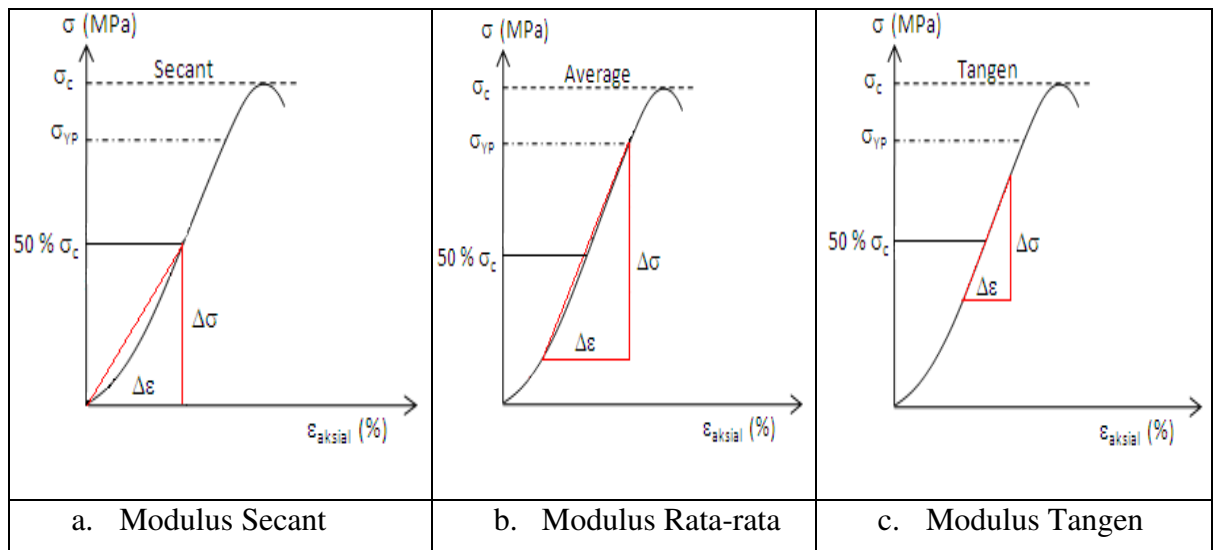
$\Delta \epsilon_a$ = Perubahan regangan aksial

Besarnya nilai modulus elastisitas bervariasi dari satu contoh batuan ke contoh batuan lainnya dan dari satu daerah geologi ke daerah geologi lainnya. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan formasi batuan, genesa, dan mineral

pembentuknya. Modulus elastisitas juga dipengaruhi oleh tipe batuan, porositas, ukuran partikel, dan kandungan airnya.

Nilai dari modulus elastisitas dapat dihitung dengan beberapa metode seperti terlihat pada Gambar 2.6.

1. Modulus secant dihitung berdasarkan kemiringan suatu garis lurus yang menghubungkan titik awal kurva tegangan – regangan aksial ke tingkat tegangan tertentu dan biasanya 50 % kuat tekan uniaksial.
2. Modulus average ditentukan dari kemiringan rata-rata pada bagian garis lurus kurva tegangan – regangan.
3. Modulus tangen dihitung pada tingkat tegangan tertentu, biasanya pada tingkat tegangan 50% dari kuat tekan.



Gambar 2.6. Penentuan nilai Modulus Sekan, Modulus Rata-rata, dan Modulus Tangen

2.2.2.4. Nisbah Poisson

Nisbah Poisson ini dapat ditentukan melalui uji kuat tekan uniaksial. Nisbah Poisson dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara regangan lateral terhadap regangan aksial. Jika suatu material diregangkan atau ditarik, maka material tersebut akan cenderung mengkerut pada dua arah lainnya. Sebaliknya, jika suatu material ditekan, maka material tersebut akan mengembang pada dua arah lainnya. Kecenderungan material untuk mengkerut atau mengembang dalam arah tegak lurus terhadap arah pembebanan dikenal sebagai efek Poisson. Dalam

menghitung nisbah Poisson harus di dalam wilayah elastik. Untuk dapat menghitung nisbah Poisson, dapat menggunakan persamaan 2.16.

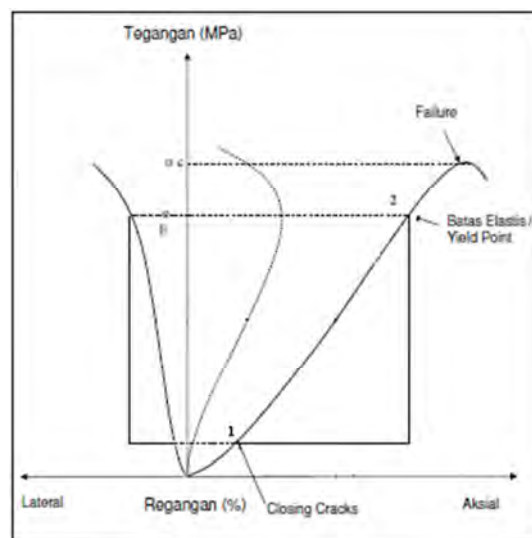
$$\nu = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_a} \dots\dots\dots (2.16)$$

Keterangan :

ν = Nisbah Poisson

ε_l = Regangan lateral

ε_a = Regangan aksial



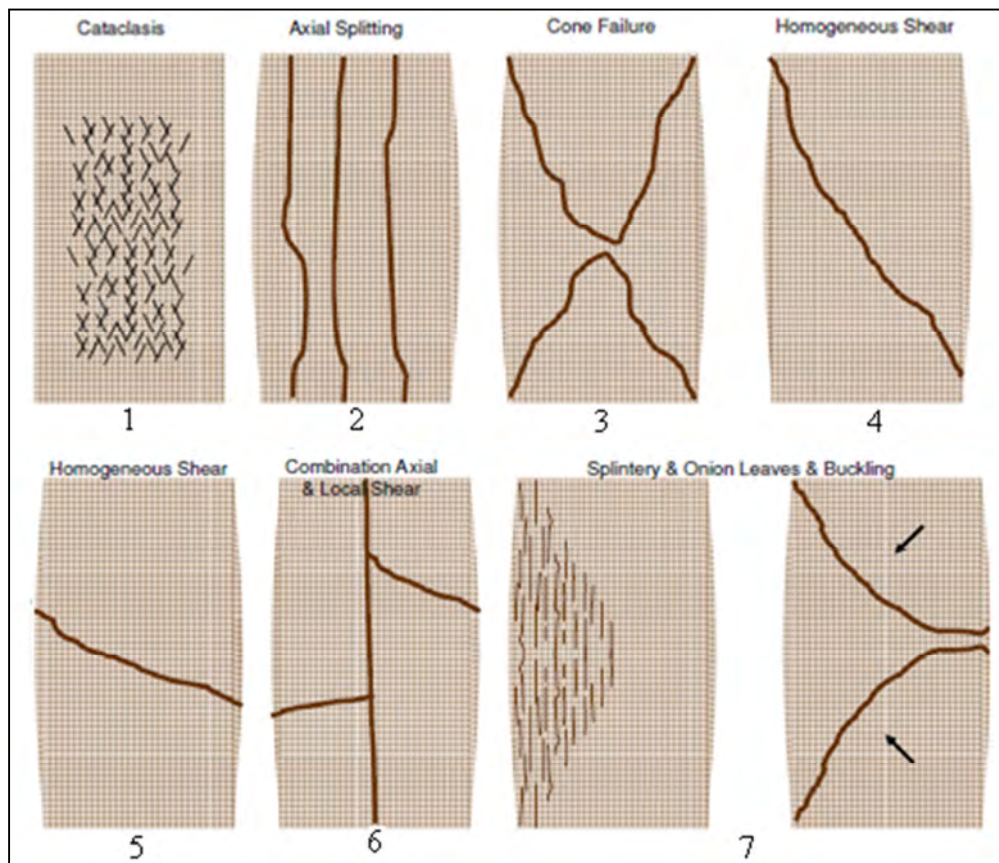
Gambar 2.7. Batas daerah elastik untuk menentukan Nisbah Poisson's

2.2.2.5. Tipe Pecah Contoh Batu Pada Uji Kuat Tekan Uniaksial

Secara teoritis penyebaran tegangan di dalam contoh batuan ketika mengalami pembebanan yakni searah dengan gaya yang dikenakan pada contoh batuan tersebut. Contoh batuan kemudian akan mengalami beban hingga mengalami keruntuhan. Perbandingan antara tinggi dan diameter yang umum digunakan adalah antara 2,5 hingga 3,0 atau lebih tepatnya untuk ukuran normal dari perbandingan L/D adalah 2,0 menurut ISRM (1981).

Saat mengalami keruntuhan contoh batuan biasanya akan memisah secara aksial (*axial split*). Hal tersebut dapat tergantung dari tingkat ketahanan contoh batuan dan kualitas permukaan contoh batuan yang bersentuhan langsung dengan permukaan alat penekan saat pembebanan. Adapun juga model pecah batuan menurut Kramadibrata, (1997) terbagi menjadi 7 model, yaitu :

1. Jenis *Cataclasis*
2. Model pecah ini merupakan model hancuran pada arah aksial (*Axial Splitting*)
3. Model hancuran kerucut (*Cone Failure*)
4. Model hancuran geser dari sudut ke sudut (*Homogeneous Shear corner to corner*)
5. Model hancuran geser (*Homogeneous Shear*)
6. Model kombinasi hancuran aksial dan geser (*Combination Axial and Local Shear*)
7. Model serpihan kulit bawang dan menekuk (*Splintery and Onion Leaves Buckling*).



Gambar 2.8. Tipe pecahnya batuan pada pengujian kuat tekan uniaksial (Kramadibrata, 1997).

2.2.2.6. Faktor – faktor yang mempengaruhi kuat tekan uniaksial

Selain faktor internal seperti mineralogi, ukuran butir dan porositasnya. Terdapat pula faktor-faktor eksternal. Faktor eksternal yang dapat mempengaruhi besarnya kuat tekan uniaksial contoh batuan dalam pengujian dapat disebabkan oleh beberapa hal, yakni sebagai berikut :

a. Gesekan antar plat penekan dan ujung permukaan contoh

Perilaku contoh batuan sangat dipengaruhi oleh kontak permukaan contoh batuan dengan plat penekannya, walaupun permukaan contoh batuan dengan plat penekan datar dan sejajar. Kekakuan dari plat penekan membatasi ekspansi lateral dari ujung contoh batuan ketika contoh batuan ditekan diantara plat mesin uji kuat tekan.

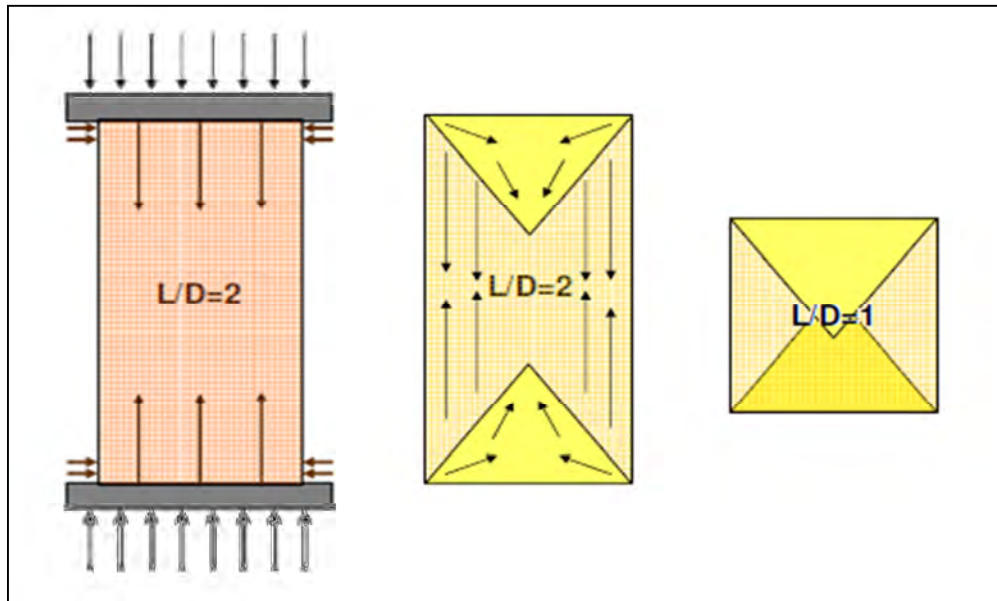
b. Geometri contoh

1. Bentuk (*Shape*)

Contoh batuan yang digunakan dapat berbentuk silinder, prisma dan kubus. Dalam pengujian ini, contoh batuan yang dipakai adalah berbentuk silinder.

2. Ukuran (*Size*)

Faktor yang menentukan suatu ukuran yang akan digunakan yaitu perbandingan panjang terhadap diameter (L/D) yang dapat mempengaruhi hasil uji. Distribusi tegangan dalam contoh batuan dengan perbandingan $L/D = 1$ akan cenderung terjadi kondisi tegangan triaksial. Sedangkan contoh batuan dengan perbandingan $L/D = 2$ akan terjadi kondisi tegangan uniaksial di dalam contoh batuan. Oleh karena itu, dalam uji ini digunakan contoh batupasir dengan perbandingan $L/D = 2$, agar batuan akan mengalami pecah karena tegangan uniaksial. Pengaruh dari ukuran terhadap kondisi uniaksial tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Keterangan : Kondisi tegangan triaksial Kondisi tegangan uniaksial

Gambar 2.9. Bentuk pecahan kerucut dan distribusi tegangan di dalam contoh batuan pada uji kuat tekan uniaksial, (Astawa Rai, dkk, 2010)

c. Laju pembebanan

Kekuatan batuan biasanya meningkat seiring dengan meningkatnya laju pembebanan yang diberikan pada contoh batuan (Vutukuri dan Lama, 1974). Houpert (1970) melakukan penelitian tentang pengaruh laju pembebanan terhadap kekuatan batuan granit. Hasilnya menunjukkan bahwa meningkatnya laju pembebanan yang diberikan dapat menyebabkan meningkatnya kekuatan batuan.

d. Lingkungan

Faktor lingkungan itu sendiri dapat terbagi menjadi dua bagian, yaitu :

1. Kelembaban

Price (1960) melakukan uji kuat tekan uniaksial terhadap sejumlah batupasir dengan persentase kelembaban yang berbeda-beda (jenuh, natural dan kering). Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, terlihat adanya penurunan kekuatan yang signifikan sejalan dengan meningkatnya kelembaban. Burshtein (1969) juga meneliti pengaruh kelembaban terhadap kuat tekan batupasir dan argillite. Dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa kelembaban 4 % menyebabkan batupasir kehilangan setengah kekuatannya.

Dalam kasus argillite, kenaikan kelembaban 1,5 % dapat menurunkan kekuatannya sampai 1/3 (sepertiga) nilai kuat tekan uniaksialnya.

2. Cairan

Beberapa mineral terurai ketika mineral tersebut bersentuhan dengan cairan dan terlarut, sehingga menghasilkan lebih banyak pori yang terisi oleh cairan. Faktor yang paling berkontribusi terhadap penurunan kekuatan batuan adalah masuknya cairan pada ujung *crack*, yang kemudian akan melarutkan material sehingga menurunkan kekuatan puncaknya, maka hal tersebut akan dapat membantu propagasi *crack*. Hal yang juga mungkin terjadi bahwa cairan akan mempengaruhi energi permukaan batuan dan karena adanya penciptaan permukaan baru selama proses *fracturing* yang bergantung pada energi permukaan batuan, kekuatannya bergantung pada penurunan atau peningkatan energi permukaan di bawah pengaruh cairan. Cairan yang membasahi permukaan batuan selalu menurunkan energi permukaan batuan dan menurunkan kekuatan.

2.2.3. Uji Triaksial

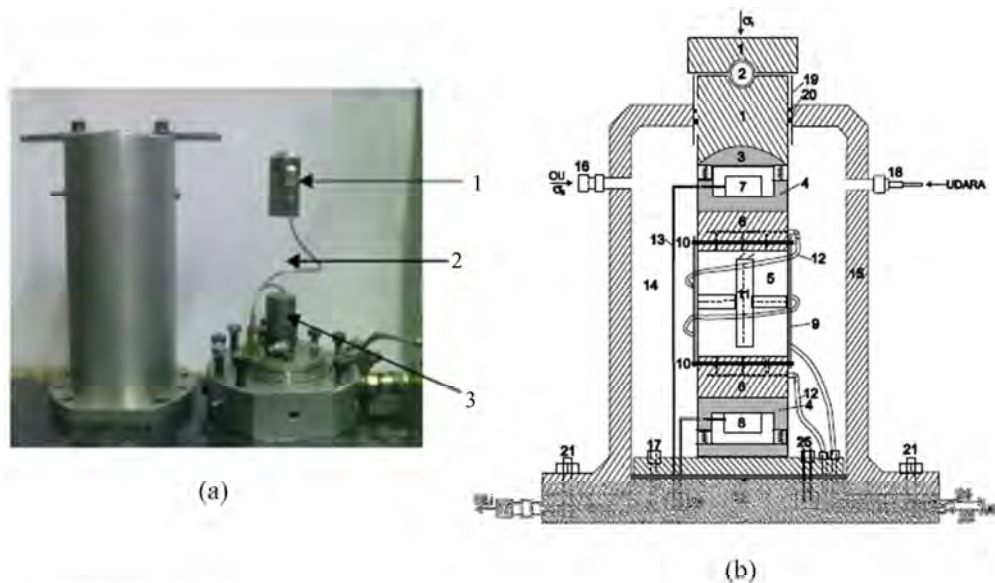
Segala aktivitas yang dilakukan manusia pada batuan seperti masalah fondasi, penggalian batuan di bawah permukaan tanah akan sangat berkaitan erat dengan persoalan tegangan yang dialami batuan. Salah satu uji yang merepresentasikan keadaan dialam adalah uji triaksial yang merupakan salah satu uji untuk menentukan kekuatan batuan di bawah tiga komponen tegangan. Pengujian ini menggunakan beberapa contoh batuan, kemudian diberi tegangan pemampatan (σ_3) yang berbeda-beda.

Kekuatan batuan pada kondisi tegangan triaksial akan sangat berguna sebagai parameter rancangan pembuatan lubang bukaan bawah tanah. Kriteria keruntuhan yang sering digunakan dalam pengolahan data uji triaksial adalah kriteria Mohr-Coulomb.

1. Kurva intrinsik (*Strength envelope*)
2. Kuat geser (τ -*Shear strength*)
3. Kohesi (C)
4. Tegangan normal (σ_n)
5. Sudut gesek dalam (ϕ)

Contoh batuan diberi lapisan karet untuk mencegah oli masuk ke dalam pori-pori batuan dan mempengaruhi nilai kuat batuan, lalu contoh batuan yang sudah dilapisi karet tersebut dimasukkan ke dalam sel triaksial kemudian diberi tekanan pemampatan ($\sigma_3 = \sigma_2$) dan dibebani secara aksial (σ_1) sampai batuan mengalami pecah.

Sel triaksial yang digunakan saat ini merujuk pada sel triaksial Von Karman (1911) seperti pada Gambar 2.10. Didalamnya terdapat fluida bertekanan yang dialirkan dengan menggunakan pompa hidrolik yang berfungsi sebagai tekanan pemampatan (σ_3) yang diberikan pada contoh batuan. Untuk mencegah masuknya fluida pemampat ke dalam contoh batuan, maka contoh batuan tersebut dibungkus dengan selubung karet. Hal ini harus dilakukan karena masuknya fluida ke dalam contoh batuan dapat mempengaruhi pengujian karena contoh batuan akan mengalami tekanan pori.



Keterangan Gambar (a) :

1. Transducer transmitter
2. Tempat contoh batuan
3. Transducer receiver

Keterangan Gambar (b) :

1. Platen penekan
2. Bola baja
3. Spherical seat
4. Alat bantu transducer
5. Contoh batuan
6. Piston berongga untuk tekanan pori
7. Sonic transmitter
8. Sonic receiver
9. Selubung karet
10. Ring pengikat selubung karet

11. Strain gauges
12. Pipa untuk tekanan pori
13. Pipa untuk kabel transducer
14. Ruang fluida pemampat
15. Dinding sel
16. Lubang masuk fluida pemampat
17. Lubang keluar fluida pemampat
18. Lubang masuk tekanan udara
19. Slide bearing
20. Sliding seal

21. Baut
22. Seal pada plat dasar sel
23. Lubang masuk tekanan pori
24. Lubang keluar tekanan pori
25. Port cable strain gauges
26. Port cable transducer

Gambar 2.10. Sel triaksial tipe Von Karman, (1911)

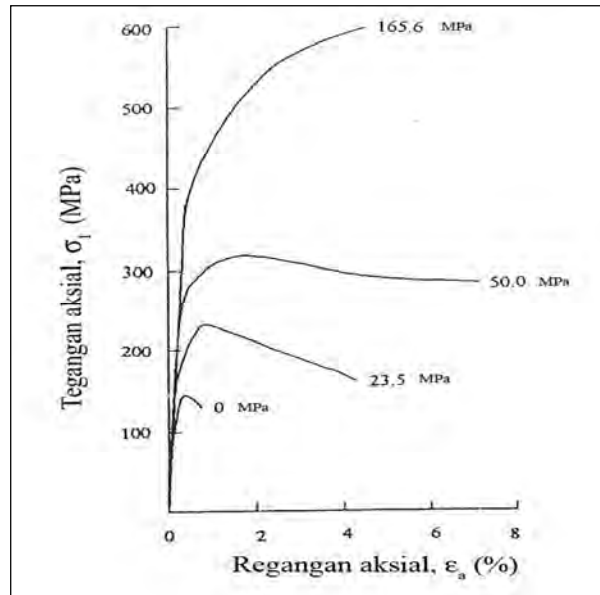
2.2.3.1 Faktor-faktor yang mempengaruhi uji triaksial

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi uji triaksial adalah sebagai berikut :

a. Tekanan Pemampatan

Meningkatnya tekanan pemampatan (σ_3) akan meningkatkan kekuatan batuan. Karena pada saat batuan mulai merekah, maka propagasi crack akan terhambat akibat adanya tekanan pemampatan. Kondisi ini dapat dilihat dari berkurangnya deformasi yang terbentuk pada contoh batuan dengan semakin besarnya tekanan pemampatan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Von Karman (1911) pada batuan *Carrara marble* (Gambar 2.11) dengan uji triaksial dan pada tekanan pemampatan yang berbeda-beda, hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan batuan akan meningkat seiring dengan penambahan tekanan pemampatan. Kurva tegangan regangan semakin menunjukkan perubahan perilaku batuan dari getas ke duktil, yang

ditunjukkan bahwa pada uji kuat tekan uniaksial ($\sigma_3 = 0$) menghasilkan *brittle failure*. Sedangkan seiring dengan penambahan tekanan pemampatan, contoh batuan menjadi semakin *ductile*.

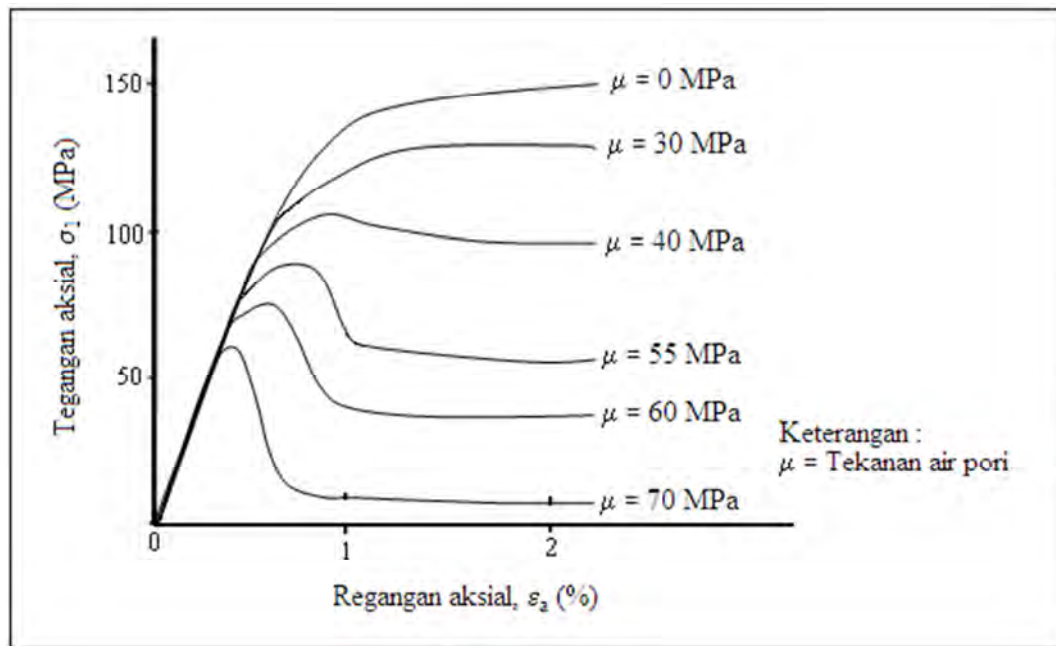


Gambar 2.11. Pengaruh tekanan pemampatan terhadap kurva Tegangan - regangan pada batuan *Carara marble* (Von Karman, 1911).

b. Tekanan Pori

Tekanan pori yang dimaksud disini adalah Tekanan Air Pori (adanya tekanan dari air yang mengisi pori batuan). Naiknya tekanan pori akan menurunkan kekuatan batuan. Efek tekanan pori terhadap kekuatan batuan umumnya diketahui sebagai “hukum tegangan efektif”. Robinson (1959) telah membuktikan hal ini dalam penelitiannya pada batu gamping dengan menggunakan uji triaksial. Tegangan pemampatan yang diberikan pada batu gamping, yakni sebesar 69 MPa secara konstan. Namun tegangan pori yang diberikan bervariasi dari 0-69 MPa. Hasil penelitian Robinson dapat dilihat pada (Gambar 2.12). Dari kurva yang diperoleh tersebut terlihat bahwa dalam kondisi tegangan pemampatan yang konstan, semakin besar tekanan pori yang diberikan maka kekuatan batuan akan menurun dan bersifat lebih getas. Sedangkan, pada pemberian tekanan pori yang kecil maka kekuatan batuan akan semakin meningkat dan bersifat lebih duktil. Efek dari tekanan pori ini

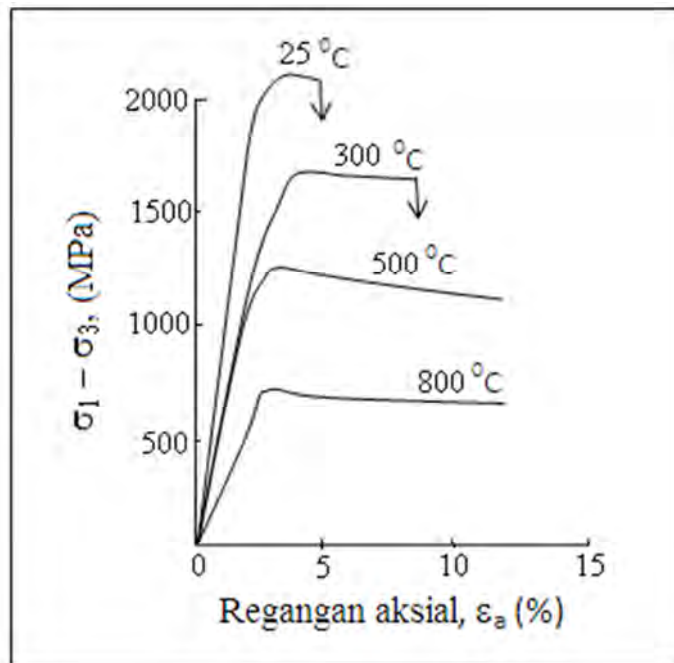
bergantung juga dari laju deformasi, dimensi contoh batuan, viskositas fluida yang menekan pori, dan porositas batuan.



Gambar 2.12. Pengaruh tekanan pori terhadap kurva tegangan-regangan pada batu limestone (Robinson, 1959).

c. Temperatur

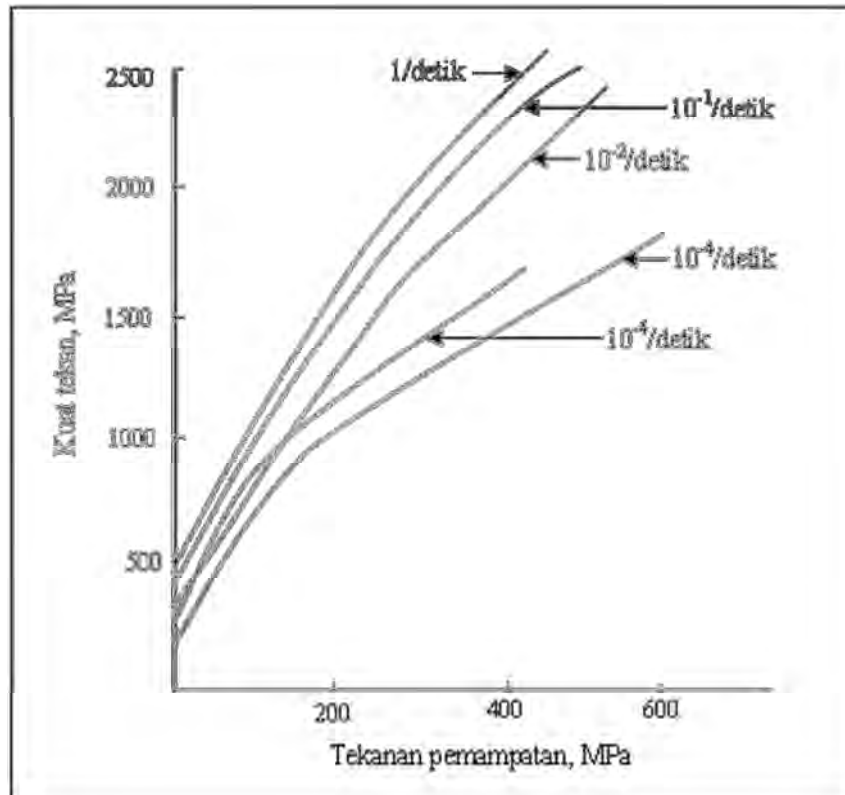
Secara umum, kenaikan temperatur menghasilkan penurunan kuat tekan batuan dan menaikkan sifat *ductility*. Gambar 2.13 merupakan hasil penelitian yang dilakukan oleh (Griggs, dkk, 1960). Dari gambar tersebut menunjukkan kurva tegangan deviatorik (*deviatoric stress*, $\sigma_1 - \sigma_3$) - regangan aksial untuk contoh batuan granit pada tekanan pemampatan 500 MPa serta pada temperatur yang berbeda-beda. Pada temperatur kamar 25°C sifat batuan masih *brittle*. Kondisi tersebut masih terlihat hingga pada temperatur mencapai 500°C. Akan tetapi pada temperatur 800°C batuan hampir seluruhnya *ductile*. Efek temperatur terhadap tegangan deviatorik saat keruntuhan untuk setiap batu granit terlihat berbeda-beda. Didalam penelitian ini pengaruh temperatur diabaikan.



Gambar 2.13. Pengaruh temperatur terhadap kurva tegangan deviatorik – regangan aksial untuk batuan granit pada tekanan pemampatan 500 MPa (angka di dalam kurva merupakan temperatur dalam derajat Celcius) (Griggs, dkk, 1960).

d. Laju Regangan

Kuat tekan biasanya bertambah seiring dengan pertambahan laju regangan. Kekuatan puncak akan mengalami kenaikan sebesar 10 % untuk setiap kenaikan laju regangan sebesar $10^{-3}/s$ (Serdengcti & Boozer, 1961). Donath & Fruth (1971) melakukan uji triaksial pada 69 contoh batuan pada temperatur kamar dengan laju regangan sebesar 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} dan $10^{-7}/s$. Pada tekanan pemampatan 200 MPa, penurunan laju regangan dari 10^{-3} hingga $10^{-7}/s$ menyebabkan penurunan kekuatan 33 % untuk batu marmer, dan 8,4 % untuk batupasir pada tingkat regangan 2 %. Gambar 2.14 menunjukkan kenaikan kuat tekan batuan *Westerley granite* seiring dengan bertambahnya laju regangan (Logan dan Handin, 1970).



Gambar 2.14. Pengaruh laju regangan terhadap kurva kuat tekan-tekanan pemampatan untuk batuan Westerley granite (Logan dan Handin, 1970).

e. Bentuk dan Dimensi Contoh

Bentuk contoh batuan yang umum digunakan untuk pengujian triaksial maupun untuk pengujian kekuatan batuan yang lain adalah berbentuk silinder, dikarenakan kemudahan dalam pengambilan contoh batuan dan kesimetrian contoh batuan.

Menurut ISRM Committee on Laboratory Test (1972), contoh batuan untuk pengujian triaksial harus memenuhi persyaratan yang sama dengan contoh untuk uji kuat tekan uniaksial. Kekuatan contoh batuan juga dipengaruhi oleh perbandingan panjang terhadap diameter contoh batuan (L/D) dan akan menurun seiring dengan naiknya perbandingan tersebut. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Mogi, 1962). Dari hasil penelitian yang dilakukan, variasi perbandingan panjang terhadap diameter contoh batuan (L/D) diketahui akan mempengaruhi kekuatan contoh batuan. Semakin besarnya ukuran contoh batuan, maka akan lebih banyak peluang kehadiran bidang lemah atau disebut juga

rekahan awal. Maka semakin besar ukuran contoh batuan yang akan diuji, kekuatan contoh batuan tersebut akan menurun.

2.2.3.2 Mekanisme pecah batuan dalam uji triaksial

Pada saat contoh batuan diberikan pembebanan uniaksial, ataupun triaksial, maka perilaku deformasi yang terjadi sebelum contoh batuan hancur dapat dibedakan menjadi dua golongan besar yaitu *brittle failure* dan *ductile failure*. *Brittle failure* terjadi apabila contoh batu yang pecah tanpa mengalami deformasi yang besar dan *ductile failure* akan terjadi apabila contoh batu yang diuji sudah mengalami deformasi yang besar sebelum pecah.

Serdengecti dan Boozer (1961) menemukan bahwa contoh batuan yang hancur akibat pembebanan triaksial tergantung pada besarnya tegangan pemampatan, temperatur dan kecepatan deformasi. *Brittle failure* terjadi pada tegangan pemampatan yang rendah, temperatur yang rendah dan laju regangan yang besar. Sebaliknya, *ductile failure* lebih sering terjadi pada tegangan pemampatan yang tinggi, temperatur yang tinggi dan laju regangan yang rendah.

Secara teoritis pada saat contoh batuan diberikan pembebanan triaksial akan pecah membentuk hancuran geser (*shear failure*), tetapi kenyataan menunjukkan bahwa tipe pecah berlainan. Griggs dan Handin (1960) mengemukakan lima tipe pecah batuan akibat pembebanan triaksial (Gambar 2.15). Kelima tipe pecah batuan tersebut yaitu:

1. Tipe 1 : Model pecah searah tegangan aksial

Kurva tegangan – regangan aksial menunjukkan garis yang cenderung linier. Dan pada saat contoh batuan mulai mengalami regangan secara plastis yang kurang dari 1 %, contoh batuan sudah mengalami penurunan kekuatan. Jenis hancuran yang terbentuk adalah memisah secara aksial (*axial splitting*) yang diakibatkan karena beban aksial (σ_1) yang diberikan pada contoh batuan (searah beban aksial). Contoh batuan pada kondisi ini cenderung lebih getas.

2. Tipe 2 : Model pecah berupa kerucut

Kurva tegangan – regangan aksial cenderung linier dan memiliki *yield point*. Setelah melewati titik *yield point*, mulai terlihat regangan permanen sebelum

hancur sebesar 1 % - 5 %. Bentuk hancuran berupa kombinasi geser dan memisah secara aksial. Kondisi kurva masih memperlihatkan sifat getas atau mulai mengalami transisi.

3. Tipe 3 : Model pecah geser dari sudut ke sudut

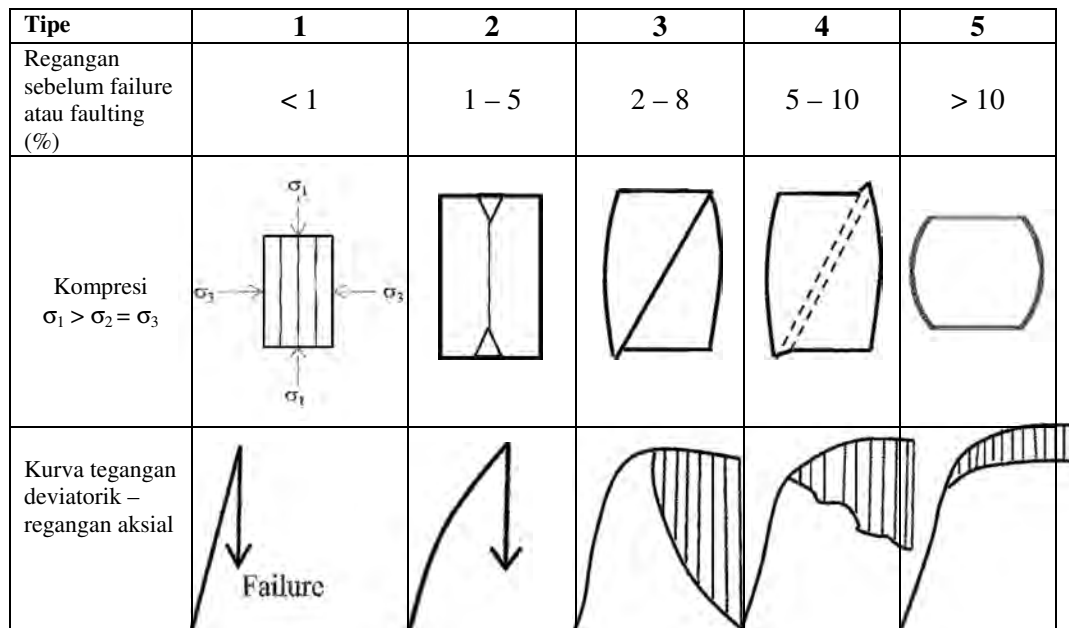
Kurva tegangan – regangan aksial masih cenderung linier sebelum mencapai titik *yield point*. Terbentuk regangan permanen setelah *yield point* antara 2 % - 8 %. Dengan semakin meningkatnya tegangan pemampatan dan laju regangan menyebabkan regangan permanen akan terus terbentuk. Sedangkan dengan meningkatnya temperatur dan meningkatnya tegangan pori menyebabkan regangan aksial setelah kekuatan puncaknya cenderung mulai menurun. Bentuk hancuran pada kondisi ini berupa geseran dan kurva tegangan – regangan mulai mengalami transisi dari getas ke duktil.

4. Tipe 4 : Model pecah geser

Kurva tegangan – regangan aksial setelah melewati *yield point* cenderung lebih permanen. Regangan permanen yang terbentuk setelah *yield point* antara 5 % - 10 %. Pada kondisi dengan semakin meningkatnya tegangan pemampatan dan laju regangan, menyebabkan regangan aksial cenderung duktil. Sedangkan pada kondisi temperatur yang meningkat dan tegangan pori yang meningkat menyebabkan regangan aksial setelah kekuatan puncaknya menurun dan kurva tegangan – regangan aksial menjadi getas. Bentuk runtutan pada kondisi ini berupa pecah geser.

5. Tipe 5

Kurva tegangan – regangan aksial setelah melewati *yield point* lebih dari 10 %. Dengan semakin meningkatnya tegangan pemampatan dan meningkatnya laju regangan menyebabkan regangan aksial cenderung duktil dan sulit untuk hancur. Sedangkan dengan semakin meningkatnya temperatur dan meningkatnya tegangan pori menyebabkan regangan aksial pada kondisi transisi. Pada kondisi ini batuan tidak memiliki hancuran.



Gambar 2.15. Tipe pecah batuan pada uji triaksial (Griggs dan Handin, 1960)

2.3. Kriteria keruntuhan batuan

Kriteria runtuh batuan diturunkan baik secara teoritik maupun secara empiris. Kriteria keruntuhan teoritis umumnya dikembangkan berdasarkan adanya hipotesa yang berkaitan dengan tegangan yang bekerja, atau dengan kata lain penggunaannya sangat terbatas. Meskipun demikian kriteria keruntuhan teoritis telah berhasil memberikan dasar bagi pengembangan konsep kekuatan batuan lainnya.

Kriteria keruntuhan empiris dihasilkan dari serangkaian pengujian pada contoh batuan. Persamaan yang diperoleh dari serangkaian pengujian ini akan memberikan prediksi yang cukup akurat terhadap suatu pengujian, sehingga dapat digunakan untuk kepentingan praktis.

2.3.1. Kriteria KeruntuhanMohr-Coulumb

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb merupakan suatu kriteria runtuh yang sangat sederhana dan praktis pada penerapannya, yaitu dengan membuat lingkaran Mohr dari tegangan-tegangan yang diperoleh dari uji triaksial saat batuan hancur ke dalam sumbu koordinat $\sigma_n - \tau$. Selanjutnya dari lingkaran-lingkaran Mohr tersebut, kemudian ditarik suatu garis lurus dari titik perpotongan pada garis

ordinat tegangan geser pada sistem koordinat yang menyinggung lingkaran-lingkaran Mohr tersebut. Garis lurus itulah yang disebut sebagai selubung kekuatan batuan Mohr-Coulomb. Dari garis lurus tersebut akan dapat diketahui sudut gesek dalam (ϕ) dan kohesi (c) dari batuan yang diuji. Dan persamaannya dinyatakan sebagai kriteria Mohr-Coulomb yang didefinisikan seperti persamaan (2.17).

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \dots \dots \dots (2.17)$$

Keterangan:

τ = Tegangan geser (MPa)

ϕ = Sudut gesek dalam ($^{\circ}$)

C = Kohesi (MPa)

σ_n = Tegangan Normal (MPa)

2.3.2. Kriteria Keruntuhan Hoek dan Brown

Hoek dan Brown (1980) membuat kriteria runtuh empiris berdasarkan hubungan antara tegangan maksimum dengan tegangan minimum (σ_1 dan σ_3) serta tegangan geser dengan tegangan normal (τ dan σ_n) yang pada umumnya non-linier.

Sebelum terbentuknya persamaan kriteria empiris Hoek dan Brown, persamaan empiris tersebut terbentuk berdasarkan teori rekahan Griffith (1924). Hoek dan Brown (1980) kemudian mencoba melakukan trial and error terhadap selubung kekuatan non-linier dari teori rekahan Griffith (1924). Sehingga akhirnya Hoek dan Brown (1980) dapat mengembangkan suatu persamaan kriteria runtuh empiris yang dituliskan dalam hubungan matematis sebagai berikut :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \dots \dots \dots (2.18)$$

Nilai m bervariasi untuk setiap jenis batuan (lihat Tabel 2.3), namun untuk batuan utuh, nilai $s = 1$ dan $a = 0,5$. Sehingga persamaan 2.18 dapat ditulis seperti persamaan 2.19.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan:

σ_3 = Tegangan utama minor (MPa)

σ_1 = Tegangan utama mayor (MPa)

m_i = Konstanta Hoek-Brown

s dan a = Konstanta massa batuan

σ_{ci} = Kuat tekan uniaksial batuan utuh (*intact rock*)(MPa)

Tabel 2.2. Variasi nilai m_i untuk beberapa jenis batuan

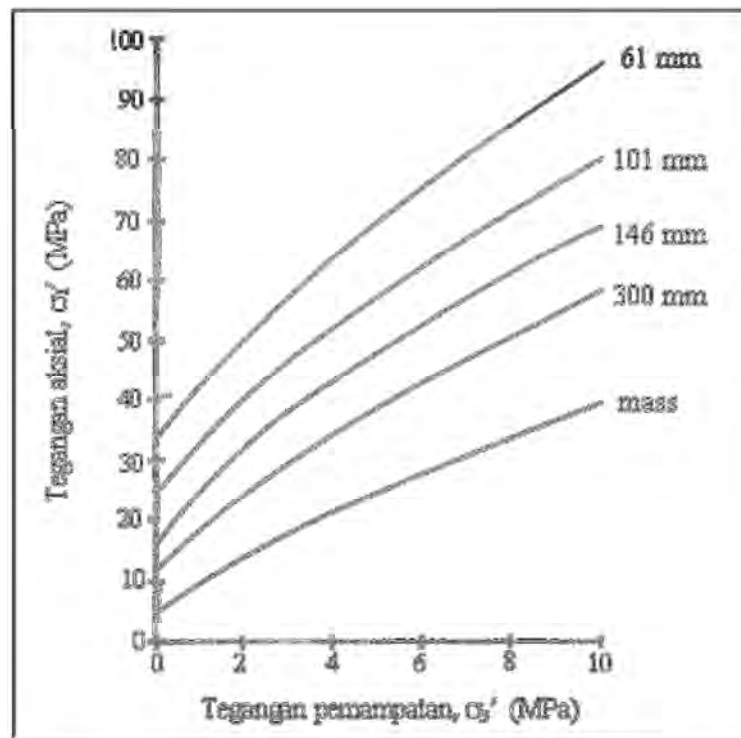
Type Batuan	Jenis Batuan	Nilai m_i
Sedimen	Batupasir	17 ± 4
	Serpilh	6 ± 2
	Dolomit	9 ± 3
Beku	Andesit	25 ± 5
	Diorit	25 ± 5
	Granit	32 ± 3
Metamorfik	Slates	7 ± 4
	Sekis	10 ± 3

2.4. Efek skala pada uji triaksial

Pengaruh ukuran contoh batuan dapat dilihat berdasarkan perbedaan karakteristik yang didapatkan dari suatu pengujian terhadap sejumlah contoh batuan yang sama pada ukuran yang berbeda dengan perlakuan yang sama.

Kehadiran efek skala pada sifat mekanik batuan seperti pada uji triaksial telah terbukti dengan dilakukannya pengujian triaksial terhadap batubara oleh Medhurst & Brown pada tahun 1998 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17. Tampak pada gambar tersebut bahwa contoh batubara yang meliputi berbagai diameter yaitu 61 mm, 101 mm, 146 mm, 300 mm dan suatu ukuran yang dianggap sebagai massa batuan. Pada pengujian tersebut, tegangan pemampatan yang digunakan

bervariasi hingga 10 MPa. Dari hasil penelitian tersebut jelas bahwa efek skala juga terjadi pada uji triaksial.



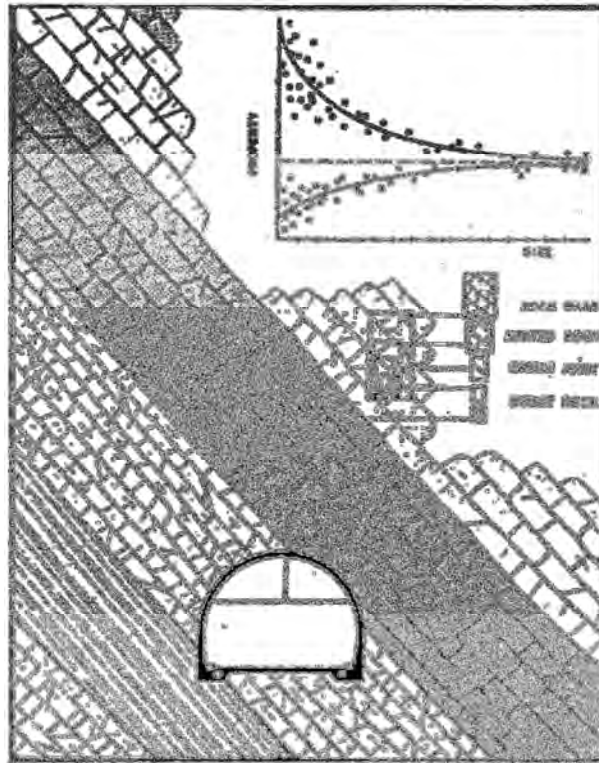
Gambar 2.17. Pengaruh ukuran contoh (efek skala) batubara Moura-Australia terhadap kekuatan batuan dalam uji triaksial. (Medhurst & Brown, 1998).

2.5. Efek skala massa batuan

Kekuatan massa batuan dipengaruhi oleh nilai *Geological Strength Index (GSI)* dari keadaan lapangan dari batuan tersebut. Nilai GSI dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2.3.

Cunha (1990) mengilustrasikan dari suatu lokasi penggalian pada Gambar 2.18, terlihat bahwa semakin besar ukuran contoh batuan, probabilitas kehadiran bidang diskontinu akan semakin meningkatkan dan keheterogenitas yang semakin banyak pada batuan tersebut. Dari kurva tersebut menunjukkan sifat massa batuan sesungguhnya yang ada di alam. Pada contoh batuan berukuran kecil hasil pengujian menunjukkan variasi nilai kekuatan yang besar dan akan berkurang hingga mempunyai nilai kekuatan yang konstan pada contoh batuan yang semakin besar, dengan memperlihatkan kurva yang semakin asimtotik.

Pada batuan utuh (*intact rock*) efek skala batuan berlaku berdasarkan pada nilai keheterogenan. Contoh batuan disebut heterogen apabila komponen mineralnya memiliki karakteristik yang berbeda dengan komponen mineral yang ada, maka dengan bertambahnya ukuran contoh maka keheterogenannya juga bertambah.



Gambar 2.18. Ilustrasi pengertian dari efek skala (Cunha, 1990)

Nilai m_b , s , dan a untuk massa batuan dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$m_b = m_i \exp [(GSI - 100)/28] \dots\dots\dots(2.20)$$

$$s = \exp [(GSI-100)/9] \text{ dan } a = 0.5, \text{ jika nilai } GSI > 25 \dots\dots\dots(2.21)$$

$$s = 0 \text{ dan } a = 0.65 - (GSI/200), \text{ jika nilai } GSI < 25 \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan :

GSI = Geological Strength Index

Kuat tekan massa batuan dapat diperkirakan dengan menggunakan kriteria keruntuhan Hoek-Brown (1997) dengan menggunakan rumus berikut :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \dots\dots\dots(2.23)$$

Kuat tekan uniaksial massa batuan (σ_{cm}) dapat diperoleh dengan mensubtitusikan $\sigma_3 = 0$ kedalam persamaan 2.23, menjadi persamaan 2.24.

$$\sigma_{cm} = \sqrt{s} \sigma_{ci} \dots\dots\dots(2.24)$$

Keterangan:

m_b = Konstanta massa batuan Hoek-Brown

σ_{cm} = Kuat tekan massa batuan, (MPa)

s dan a = Konstanta massa batuan

σ_{ci} = Kuat tekan uniaksial batuan utuh, (MPa)

Tabel 2.3. *Geological Strength Index* (Hoek dan Brown, 1997)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX From the letter codes describing the structure and surface conditions of the rock mass (from Table 4), pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the chart. The rock strength is too poor. Choosing a range of GSI from 20 to 40 is more realistic than stating that GSI = 30.		SURFACE CONDITIONS VERY GOOD Very rough fresh, unweathered surfaces GOOD Rough, slightly weathered, jointed surfaces FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces POOR Discontinuous, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of soft clay fragments VERY POOR Discontinuous, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				
STRUCTURE  BLOCKY - very well interlocked unfractured rock mass consisting of cubical blocks formed by three subvertical discontinuity sets  VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets  BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets  DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES 80 70 60 50 40 30 20 10				
		DECREASING SURFACE QUALITY				