

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Teori Elastisitas

Elastisitas merupakan watak dasar dari suatu medium padat dengan parameter-parameter elastiknya mencerminkan sifat-sifat kelenturan, kekuatan dan daya tahan medium tersebut.

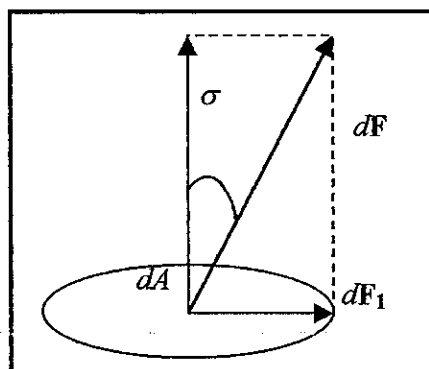
Teori Elastisitas ini berhubungan dengan gaya yang dikenakan pada permukaan luar sebuah benda dan dihasilkan perubahan bentuk serta ukuran. Hubungan antara gaya-gaya yang dikenakan dan pergeseran-pergeseran digambarkan dalam bentuk konsep tegangan dan regangan (Telford dkk, 1976).

2.1.1 Tegangan (*Stress*)

Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai gaya persatuan luas. Jika suatu gaya diberikan secara merata pada setiap titik di permukaan suatu benda (gambar 2.1), maka dengan mengambil suatu elemen luas benda dA dan elemen gaya yang bekerja adalah dF tegangan yang dialami benda adalah:

$$\sigma = \frac{dF}{dA} \quad (2.1)$$

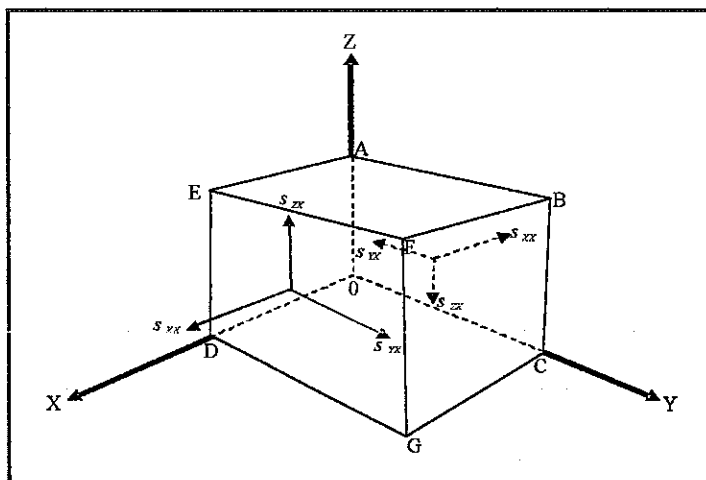
dengan dF adalah elemen gaya yang bekerja pada benda dalam newton (N), dA adalah elemen luas benda (m^2) dan σ adalah tegangan yang dialami benda (N/m^2).



Gambar 2.1 Elemen gaya dF yang bekerja pada elemen luas dA (Lilik dan Satria, 1997)

Jika arah vektor gaya tegak lurus terhadap luasan maka disebut sebagai tegangan normal (*normal stress*) tetapi jika arah vektor gaya berada pada arah tangensial terhadap luasan, tegangannya disebut sebagai tegangan geser (*shearing stress*). Untuk arah vektor gaya yang memiliki arah selain tegak lurus dan tangensial terhadap luasan dapat diproyeksikan pada arah searah dan tegak lurus luasan masing-masing elemen atau pada arah normal dan tegangan gesernya (Lilik dan Satria, 1997).

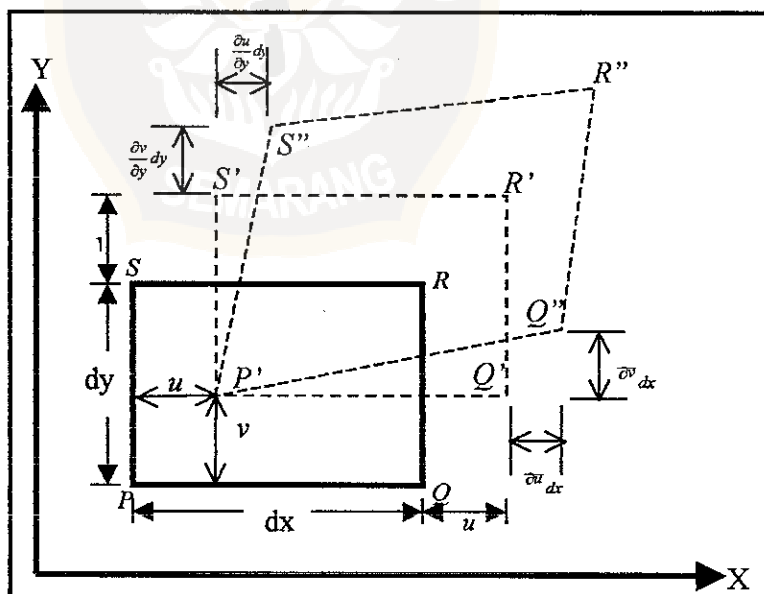
Pada gambar 2.2, *Stress* dinotasikan dengan (σ), untuk σ_{yx} berarti tegangan yang bekerja pada bidang X searah sumbu Y. Sedangkan σ_{xx} adalah tegangan yang bekerja pada bidang X searah sumbu X (tegangan normal). Bila suatu medium berada dalam keseimbangan statik, maka tegangan-tegangannya harus seimbang, berarti σ_{xx} , σ_{yx} dan σ_{zx} yang bekerja pada muka OABC harus sama dan berlawanan arah terhadap tegangan yang bekerja pada muka yang berlawanan DEFG (Telford dkk, 1976).



Gambar 2.2 Komponen tegangan pada sebuah elemen volume yang tegak lurus permukaan di sumbu X (Telford dkk, 1976)

2.1.2 Regangan (*strain*)

Jika sebuah benda elastik dikenakan tegangan maka akan terjadi perubahan bentuk dan dimensi. Perubahan tersebut dinamakan regangan. Untuk menganalisis perubahan regangan yang terjadi dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Analisis regangan dua dimensi (Telford dkk, 1976)

Bila segi empat $PQRS$ dalam bidang (X,Y) dikenakan tegangan, misal terjadi perpindahan dari titik P ke P' . Komponen pergeseran PP' adalah u dan v . Bila semua titik Q , R dan S berpindah dengan besar pergeseran yang sama, maka perubahan tersebut dinamakan gerak translasi. Dalam hal ini tidak ada perubahan bentuk sehingga tidak terjadi regangan.

Bila besar pergeseran u dan v berbeda untuk masing-masing titik P , Q , R dan S , maka segiempat tersebut akan mengalami perubahan bentuk dan ukuran, sehingga terjadi proses peregangan. Perubahan tersebut dinamakan deformasi .

2.2 Perilaku Batuan

Batuan mempunyai perilaku (*behaviour*) yang berbeda-beda pada saat menerima beban. Perilaku batuan ini terdiri dari elastik dan elasto plastik serta dapat ditentukan antara lain di laboratorium dengan pengujian kuat tekan (Made dan Kramadibrata, 1988).

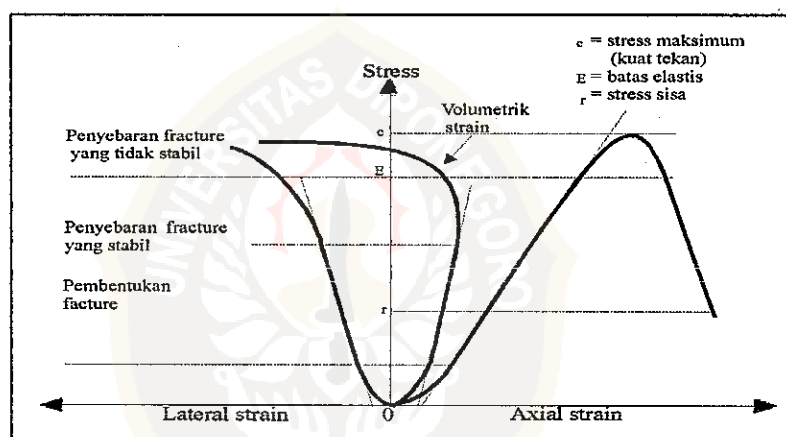
2.2.1 Elastik

Perilaku batuan dikatakan elastik (linear maupun non linear) jika tidak terjadi deformasi permanen pada saat tegangan dihilangkan.

2.2.2 Elastoplastik

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

Perilaku batuan sebenarnya yang diperoleh dari pengujian kuat tekan digambarkan seperti pada gambar 2.4. Pada tahap awal batuan dikenakan gaya, kurva berbentuk landai dan tidak linear yang berarti bahwa gaya yang diterima oleh batuan dipergunakan untuk menutup *crack* atau *fissure* yang terdapat di dalam batuan. Sesudah itu kurva menjadi linear sampai batas tertentu yang kita kenal dengan batas elastik (titik E). Terbentuk *fracture* baru dan perambatannya stabil sehingga kurva tetap linear. Sesudah batas elastik dilewati maka perambatan *fracture* tidak stabil, kurva tidak linear lagi dan tidak berapa lama kemudian batuan akan hancur. Titik hancur ini menandakan kekuatan batuan.



Gambar 2.4 Tahap utama perilaku dari sebuah batu pada saat menerima beban (Made dan Kramadibrata, 1988 *op. cit.* Bienniawski, 1987)

2.3 Sifat-sifat Teknis Batuan

Metode penggalan batuan banyak ditentukan oleh karakteristik batuan utuh dan masa batuan. Setiap massa batuan terbentuk dari sekumpulan batuan utuh yang dipisahkan satu dengan lainnya oleh bidang diskontinu seperti patahan, kekar, bidang perlapisan, bidang geser dan lainnya. Perilaku massa batuan sangat

bergantung pada sifat-sifat bidang diskontinu. Namun demikian beberapa contoh hubungan antara kemampuledakan dengan sejumlah parameter sangat erat kaitannya, seperti batuan kuat membutuhkan energi peledakan lebih besar daripada batuan lemah, ketidakhadiran bidang lemah akan membutuhkan energi peledakan lebih besar untuk mendapatkan fragmentasi yang diinginkan.

Batuan lunak atau plastik cenderung untuk menyerap energi peledakan, sehingga membuat peledakan tidak efektif dan batuan berbobot isi tinggi membutuhkan energi peledakan lebih besar untuk membongkar dan memindahkannya (Kramadibrata, 2001).

2.3.1 Sifat-sifat batuan utuh

Parameter-parameter penting yang mempengaruhi kemampuledakan suatu massa batuan pada dasarnya dapat dibagi dalam dua kategori yaitu batuan utuh dan massa batuan.

Sifat-sifat yang berpengaruh untuk kedua jenis batuan tersebut adalah :

1. Sifat fisik

Sifat fisik material yang sangat berpengaruh terhadap peledakan adalah bobot isi (*density*), porositas, absorpsi dan kandungan air.

2. Sifat mekanik

Beberapa sifat mekanik yang penting untuk diperhatikan adalah :

- a. Kuat tekan statik dan dinamik.
- b. Kuat tarik statik dan dinamik.
- c. Modulus Young statik dan dinamik.
- d. Nisbah Poisson statik dan dinamik.

- e. Kuat geser.
- f. Kecepatan ultra sonik.

Dalam metode peledakan *controlled blasting pre-splitting*, parameter sifat mekanik yang paling berpengaruh terhadap keberhasilan metode peledakan tersebut adalah parameter kuat tarik batuan. Harga kuat tarik yang digunakan adalah harga kuat tarik tak langsung (UTS / *Brazilian*). Nilai kuat tarik (UTS) selalu jauh lebih kecil daripada nilai kuat tekannya (UCS).

Perbandingan antara UCS terhadap UTS, sering disebut *toughness ratio* atau *brittleness index* dan telah diakui bermanfaat untuk memperkirakan kemudahan batuan dipecahkan sebab besaran ini memberikan nilai indeks *brittle* suatu batuan utuh (Kramadibrata, 2001).

2.3.2 Sifat-sifat massa batuan

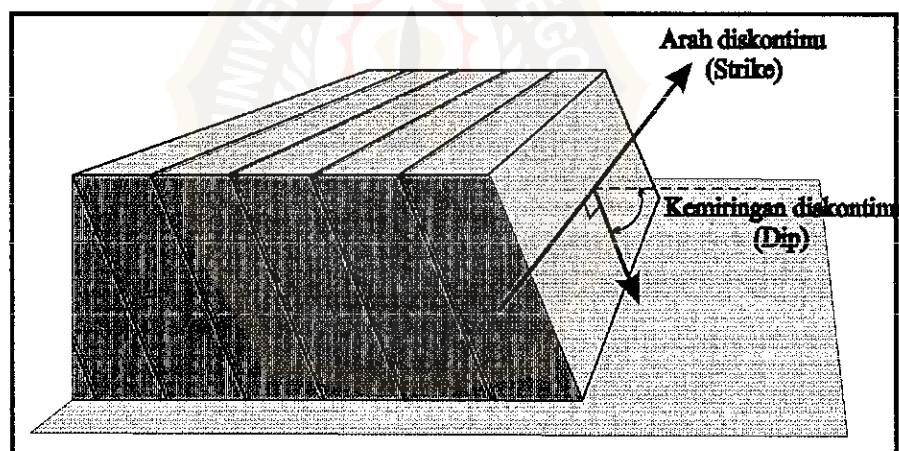
Sifat-sifat massa batuan dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu (Kramadibrata, 2001) :

1. Bidang diskontinu

Bidang diskontinu di dalam massa batuan dapat membantu mudahnya proses penggalian. Dua parameter penting dalam karakteristik bidang diskontinu adalah kekerapan (frekuensi) atau jarak antara bidang diskontinu dan orientasi yang selanjutnya dibagi dalam dua bagian, yaitu arah kemiringan (*dip direction*) dan kemiringan (*dip*) seperti yang telah digambarkan pada gambar 2.5.

Keberadaan bidang diskontinu dalam massa batuan dapat membantu pencapaian fragmentasi yang diinginkan. Namun demikian, ketidakhadiran bidang diskontinu akan membuat peledakan massa batuan masif lebih dapat diduga dan akan lebih cocok dengan perhitungan konvensional.

Permukaan dari bidang-bidang diskontinu akan bertindak sebagai bidang bebas parsial sehingga gelombang kejut akibat peledakan dapat dipantulkan atau dibiarkan oleh bidang-bidang tersebut yang tidak diperhitungkan pada awal perancangan peledakan. Oleh karena itu bilamana kondisi bidang diskontinu dapat diperkirakan maka rancangan peledakannya pun dapat disesuaikan dengan kondisi setempat.



Gambar 2.5 Diskontinu pada batuan (Kramadibrata, 2001)

2. *Rock Quality Designation (RQD)*

Adanya bidang diskontinu di dalam massa batuan sering memberi pengaruh buruk pada sifat mekanik dan perlu diketahui besaran kuantitatif dari bidang diskontinu. Parameter yang dapat menunjukkan kualitas massa batuan

sebelum penggalian dilakukan adalah *Rock Quality Designation* (RQD) yang dikembangkan oleh Deere (1964) yang datanya diperoleh melalui pemboran inti. Bila bor inti tidak tersedia, RQD dapat dihitung secara tidak langsung dengan melakukan pengukuran orientasi dan jarak antar diskontinu pada singkapan massa batuan.

3. Jarak antar bidang diskontinu

Jarak pisah antar diskontinu atau kekar adalah jarak tegak lurus antara dua bidang diskontinu yang berurutan sepanjang sebuah garis pengamatan yang disebut *scan-line* dan dinyatakan sebagai *intact length*.

Semakin jauh jarak antar bidang diskontinu maka massa batuan secara keseluruhan dapat dikatakan masif, sedangkan bila jarak antar diskontinu ini kecil, maka massa batuan mengalami rusak berat dan energi hasil ledakan akan lebih banyak diserap oleh rekahan-rekahan tersebut.

4. Orientasi bidang diskontinu

Strike adalah arah garis horizontal pada bidang diskontinu yang tegak lurus terhadap kemiringan bidangnya sedangkan *dip* adalah sudut tegak ke bawah dari garis horizontal.

Orientasi diskontinu dapat mempengaruhi kinerja pemboran dan peledakan, pengaruh ini sangat mudah untuk dijelaskan secara kualitatif namun pada perhitungannya dalam merancang peledakan sulit untuk diterapkan.

Arah rekahan horizontal dalam massa batuan umumnya sangat menguntungkan untuk peledakan. Bongkaran pada kaki lereng dari lubang

tembak akan baik dan akan menghasilkan permukaan yang relatif rata.

Rekahan vertikal dan searah terhadap muka lereng juga akan menguntungkan peledakan karena energi peledakannya diarahkan langsung ke bagian yang terkekarkan.

2.3.3 *Breaking characteristic*

Breaking characteristic menggambarkan sifat batuan apabila dipukul dengan palu. Setiap jenis batuan mempunyai sifat khusus dan derajat kerusakan yang berhubungan dengan tekstur, komposisi mineral dan strukturnya.

Breaking charactetistic dari bermacam-macam batuan yang sering dinyatakan dalam istilah *The Los Angeles Co-Efficient* adalah ukuran relatif untuk menentukan tahanan batuan terhadap penghancuran (Kramadibrata, 2001).

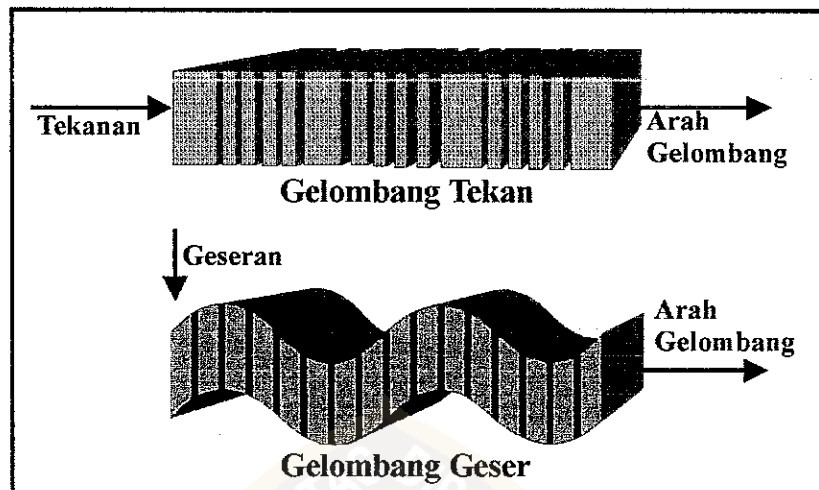
2.4 Vibrasi Pada Peledakan

2.4.1 Gelombang seismik

Gelombang seismik adalah gelombang yang menggambarkan penjaralan energi melalui bumi yang padat. Gelombang seismik dibagi dua, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*) (Kramadibrata, 2001).

Terdapat dua macam gelombang badan, yaitu gelombang tekan (*compressional wave*) dan gelombang geser (*shear wave*). Gelombang tekan adalah jenis gelombang tekan-tarik yang akan menghasilkan pemadatan (kompresi) dan pemuaian (dilatasi) pada arah yang sama dengan arah perambatan

gelombang sedangkan gelombang geser adalah gelombang melintang (transversal) yang bergetar tegak lurus pada arah perambatan gelombang. Kedua jenis gelombang badan ini dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Gerakan partikel pada berbagai gelombang (Kramadibrata, 2001)

Gelombang permukaan (*surface wave*) adalah gelombang yang merambat di atas permukaan batuan tetapi tidak menembus batuan. Kedalaman batuan yang dipengaruhi oleh gerak gelombang adalah kira-kira satu panjang gelombang.

Gelombang seismik adalah gelombang yang elastis. Elastisitas adalah suatu sifat dari material yang menyebabkan material tersebut dapat memperoleh kembali bentuk dan ukuran semula setelah dikenakan deformasi (perubahan bentuk). Batuan akan menghasilkan gelombang elastis atau seismik apabila mengalami deformasi.

Deformasi dapat terjadi karena dua cara, yaitu perubahan volume karena kompresi (*compression*) atau perubahan bentuk karena geseran (*shear*). Kemampuan material untuk menahan deformasi dinyatakan dengan *modulus elastis*. Apabila deformasi disebabkan oleh kompresi, maka tahanannya diukur

oleh *bulk modulus*. Apabila deformasi merupakan akibat geseran maka tahanannya diukur oleh *modulus of rigidity*.

Kegiatan peledakan akan selalu menghasilkan getaran atau gelombang seismik. Tujuan peledakan umumnya adalah untuk memecahkan batuan. Pekerjaan ini membutuhkan sejumlah energi yang cukup sehingga melebihi atau melampaui batas elastis batuan. Apabila hal tersebut terjadi maka batuan akan pecah. Proses pemecahan akan berjalan terus hingga energi yang dihasilkan oleh bahan peledak semakin lama akan semakin berkurang dan menjadi lebih kecil dari kekuatan batuan, sehingga proses pemecahan batuan akan berhenti. Energi yang tersisa akan menjalar melalui batuan, mengakibatkan deformasi dalam batuan tetapi tidak memecahkan batuan, karena masih di dalam batas elastisnya. (Kramadibrata, 2001).

2.4.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi vibrasi

Dua faktor prinsip yang mempengaruhi tingkat getaran akibat ledakan suatu muatan bahan peledak adalah jarak dan ukuran (jumlah) muatan. Beberapa penelitian telah dilakukan dalam usaha menentukan hubungan antara faktor-faktor tersebut dengan tingkat getaran.

Faktor terpenting yang mempengaruhi terjadinya getaran adalah ukuran (jumlah) muatan bahan peledak, apabila jumlah muatan bertambah maka tingkat getaran akan bertambah namun pertambahannya tidaklah secara linear tetapi bertambah secara eksponensial terhadap jumlah muatan.

Apabila jarak dari tempat peledakan bertambah besar maka getaran akibat peledakan akan semakin kecil, menurun secara eksponensial seiring dengan pertambahan jarak (Kramadibrata, 2001).

2.5 Redaman (Atenuasi)

2.5.1 Redaman amplitudo

Gelombang yang merambat di dalam suatu medium/batuan akan mengalami efek peredaman, seperti penurunan amplitudo. Perubahan amplitudo akibat redaman α adalah (Sismanto, 1996) :

$$A(x) = A_0 \cdot e^{-\alpha(x-x_0)} \quad (2.2)$$

dengan A adalah amplitudo pada jarak x , A_0 adalah amplitudo pada jarak x_0 dan α adalah koefisien redaman.

2.5.2 Berkurangnya energi karena transmisi

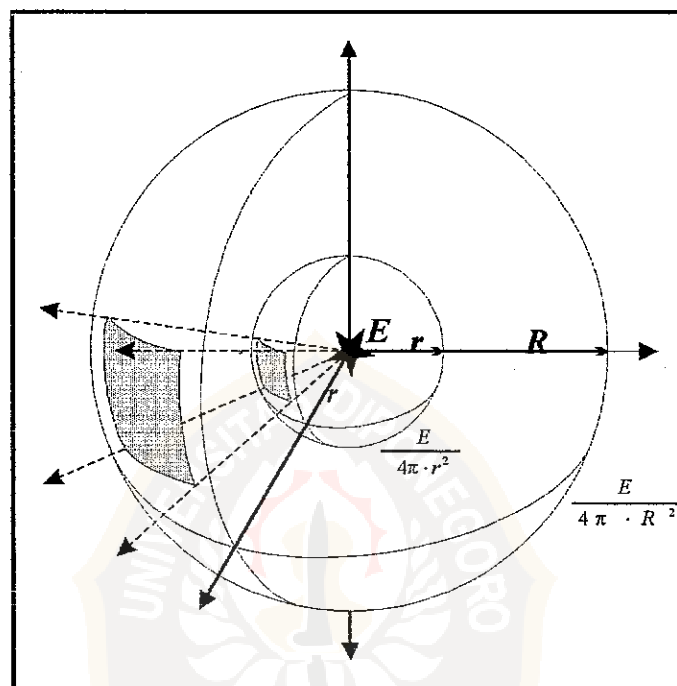
Redaman ini disebabkan oleh sifat-sifat fisis batuan yang menyerap sebagian energi gelombang. Hilangnya energi tersebut akibat gesekan gerak antar partikel di dalam batuan yang menjadi panas dan menyusut menurut waktu.

2.5.3 Berkurangnya energi karena *spherical spreading* (divergensi)

Energi gelombang seismik dari sumber (peledakan) akan menyebar ke segala arah dan terdistribusi keseluruh luasan berbentuk bola. Karena energi

persatuan luas berbanding terbalik dengan jarak kuadrat dari sumber maka semakin jauh jaraknya energi akan semakin kecil.

Berkurangnya energi karena transmisi dan divergensi dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Berkurangnya energi karena transmisi dan divergensi (Reynolds, 1997)

2.6 Bahan peledak dan sifat-sifat bahan peledak

Secara praktis, bahan peledak (handak) adalah kumpulan bahan kimia yang mampu mengurai dengan cepat dan menghasilkan ledakan. Penguraian ini menghasilkan gas bertemperatur dan bertekanan tinggi sehingga dapat melakukan kerja mekanis ke sekelilingnya. Secara umum bahan peledak dapat didefinisikan sebagai kumpulan dari unsur padat, cair atau gas yang berkondisi metastabil dan dapat melakukan reaksi kimia dengan cepat tanpa ada unsur lainnya seperti oksigen atmosfer. Reaksinya dapat dipicu secara mekanis kejutan atau panas.

Bahan peledak mempunyai bermacam-macam sifat. Untuk jenis bahan peledak tertentu sifat-sifatnya bervariasi tergantung dari pabrik yang membuatnya. Sifat-sifat bahan peledak terdiri dari sifat fisik bahan peledak dan sifat detonasi (Kramadibrata, 2001).

2.6.1 Sifat-sifat fisik

Sifat-sifat fisik bahan peledak terdiri dari (Kramadibrata, 2001) :

1. Bobot isi (*Density*)

Bobot isi berhubungan dengan massa bahan peledak yang menempati ruang tembak. Energi peledakan yang dihasilkan oleh bahan peledak merupakan fungsi dari jumlah massanya, semakin tinggi bobot isi semakin besar energi peledakannya. Bahan peledak yang memiliki bobot isi tinggi akan menghasilkan kecepatan detonasi dan tekanan yang tinggi.

2. Sensitivitas

Sensitivitas adalah ukuran kemudahan bahan peledak untuk dipicu atau lebih khusus lagi adalah energi minimum untuk meledakan suatu bahan peledak dan sering dinyatakan dalam *cap sensitivity*.

3. Ketahanan terhadap air

Ketahanan bahan peledak terhadap air adalah ukuran dari kemampuan suatu bahan peledak berada dalam air dengan tidak merusak atau mengurangi kepekaan (*sensitifitas*).

4. Stabilitas kimia

Semua bahan peledak selalu disimpan dalam gudang dalam waktu yang sangat bervariasi. Selama penyimpanan perlu diperhatikan bahwa faktor

keamanan dan sifat-sifat kimianya tidak berubah. Kestabilan kimia bahan peledak dapat diperkirakan melalui pengujian yang disebut *Abel Heat Test*.

5. Karakteristik gas peledakan

Detonasi suatu bahan peledak komersial menghasilkan uap air (H_2O), karbondioksida (CO_2) dan nitrogen (N_2), walaupun terkadang terdapat juga hasil tambahan yang tidak diharapkan yaitu gas-gas beracun seperti karbon monoksida (CO) dan nitrogen oksida (NO). Gas-gas beracun ini terbentuk karena hasil suatu proses peledakan yang tidak *zero oxygen balance*. Gas-gas beracun ini disebut sebagai *fumes* dan *fumes class* dari suatu bahan peledak menyatakan sifat-sifat dan jumlah dari gas-gas beracun yang terbentuk dalam proses peledakan.

2.6.2 Sifat-sifat detonasi

Sifat-sifat detonasi bahan peledak terdiri dari (Kramadibrata, 2001) :

1. Kecepatan detonasi (*Velocity Of Detonation / VOD*)

Kecepatan detonasi dapat diukur atau dinyatakan dalam harga terkurung (*confined*) atau harga tidak terkurung (*unconfined*) dengan satuan meter per detik. Kecepatan detonasi terkurung adalah ukuran kecepatan dari kecepatan gelombang detonasi yang merambat melalui kolom bahan peledak di dalam lubang tembak atau ruang terkurung lainnya sedangkan kecepatan detonasi tidak terkurung menunjukkan kecepatan detonasi bahan peledak apabila diledakkan dalam keadaan terbuka atau tidak terkurung. Jika bahan peledak umumnya digunakan dalam keadaan tingkat pengurangan tertentu maka harga

kecepatan detonasi dalam keadaan terbuka atau tidak terkurung akan lebih berarti. Kecepatan detonasi tidak terkurung umumnya antara 70 – 80 % dari kecepatan detonasi terkurung.

Beberapa bahan peledak dan umumnya *blasting agent* sangat peka terhadap perubahan diameter muatan. Apabila diameter dikurangi sampai batas tertentu akan terjadi mejen, diameter ini disebut sebagai diameter kritis yang mengakibatkan perambatan tidak dapat berlangsung atau berhenti.

2. Tekanan detonasi (*detonation pressure*) atau tekanan karakteristik bahan peledak

Tekanan detonasi dinyatakan sebagai tekanan karakteristik bahan peledak sebagai indikasi dari tekanan yang diperoleh pada saat bahan peledak sebanyak 1000 kg diledakkan di dalam ruangan dengan volume 1 m³. Harga dari tekanan karakteristik ini dinyatakan dengan MPa. Perlu diketahui bahwa sebagian besar bahan peledak tidak memiliki densitas yang sama sebesar 1000 kg/m³, oleh karena itu untuk memperoleh harga perkiraan tekanan karakteristik yang paling tepat bagi setiap bahan peledak yang digunakan perlu dikenai harga gaya berat jenis dari setiap bahan peledak yang digunakan. Secara matematis harga gaya berat jenis dari bahan peledak dinyatakan dengan (Italesplosivi, 1990):

$$\Delta e = \frac{\rho_c}{1000} \quad (2.3)$$

dengan Δe adalah gaya berat jenis bahan peledak dan ρ_c adalah densitas bahan peledak (kg/m³).

3. Tekanan lubang ledak.

Tekanan lubang ledak yang dipublikasikan oleh produsen bahan peledak didasarkan pada pengukuran VOD dengan muatan bahan peledak terkurung, perhitungan-perhitungan bobot isi bahan peledak dan termodinamika. Tekanan lubang ledak menunjukkan bahwa energi gas dari bahan peledak dan nilainya bergantung pada pengungkungan, jumlah gas yang dibangkitkan dan temperatur produksi reaksi kimia bahan peledak.

Pada metode peledakan *pre-splitting* tekanan lubang ledak dikurangi sekecil mungkin sampai harga yang dibutuhkan untuk membentuk rekahan di antara lubang tembak dengan sistem pengisian bahan peledak secara *decoupled*. Pada hal ini tekanan lubang ledak juga merupakan fungsi dari volume bahan peledak yang digunakan dan volume lubang ledak serta harga dari tekanan detonasi atau tekanan spesifik bahan peledak.

4. Kekuatan atau Energi (*Strength*)

Kekuatan (*strength*) adalah ukuran untuk mengukur energi yang terkandung dalam bahan peledak dan kerja yang dapat dilakukan bahan peledak. Pengujian yang digunakan untuk mengukur kekuatan adalah *ballistic mortar test*.

Terdapat dua macam ukuran *strength* yang digunakan untuk menilai bahan peledak komersial yaitu *weight strength* yang membandingkan kekuatan bahan peledak dengan dasar berat yang sama. Menurut Scott, (1996) kekuatan (*strength*) yang dilepaskan oleh suatu bahan peledak dapat dibandingkan dengan kekuatan yang diberikan oleh ekivalen berat bahan

peledak ANFO, perbandingan ini berguna untuk membandingkan potensi kinerja suatu bahan peledak dengan basis faktor berat, ukuran *strength* yang lain adalah *bulk strength* yang membandingkan kekuatan suatu bahan peledak terhadap kekuatan yang diberikan oleh volume ekuivalen bahan peledak ANFO, perbandingan ini berguna untuk membandingkan potensi kinerja suatu bahan peledak dengan basis volume ekuivalen lubang tembak atau panjang muatan untuk diameter lubang yang sama.

Energi tersedia tidak memberikan indikasi laju pelepasan energi (*Energy Release Rate* atau ERR) atau porsi suatu bahan peledak untuk bekerja secara efektif dalam pembongkaran dan pemindahan batuan. *weight* dan *bulk strength* tidak memberikan data energi tersedia secara langsung melainkan hanya perkiraan kerja efektif yang dapat dilakukan oleh suatu bahan peledak sehingga timbul suatu istilah baru yang disebut sebagai energi efektif.

Proses pemindahan energi yang dihasilkan bahan peledak yang digunakan ke batuan merupakan fungsi dari karakteristik bahan peledak sebagai pemberi energi dan karakteristik batuan sebagai penerima energi.

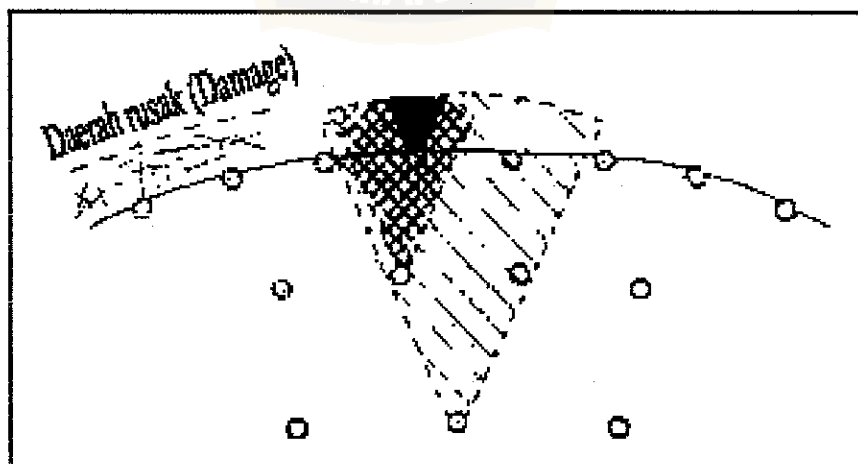
Kemampuserahan energi yang dihasilkan oleh bahan peledak kepada batuan ditentukan oleh faktor impedansi (η) yang merupakan fungsi dari impedansi bahan peledak (I_c) sebagai indikasi dari hubungan densitas bahan peledak dan kecepatan detonasi yang dimiliki bahan peledak serta impedansi batuan (I_r) sebagai indikasi dari hubungan densitas batuan dan kecepatan seismik pada batuan.

Kemampuserahan energi bahan peledak pada batuan yang dipengaruhi oleh faktor impedansi, dinyatakan secara matematis oleh persamaan berikut (Italesplosivi, 1990):

$$\eta = 1 - \frac{(I_c - I_r)^2}{(I_c + I_r)^2} \quad (2.4)$$

2.7 Kerusakan (*Damage*) pada Batuan Akibat Peledakan dengan *Controlled Blasting*

Konsep terjadinya kerusakan (*damage*) pada batuan dalam *controlled blasting* dijelaskan pada gambar 2.8. Dengan diketahuinya sejumlah bahan peledak akan menghasilkan kerusakan di sekitar massa batuan maka dengan *controlled blasting* dapat dilakukan modifikasi terhadap jenis bahan peledak atau penempatan khusus bagi sejumlah bahan peledak sehingga daerah yang rusak akibat dari peledakan tidak akan melebihi daerah sekitar lubang ledak *perimeter* seperti yang telah dilakukan percobaannya oleh Favreau dkk (1989).



Gambar 2.8 Daerah yang rusak (*damage*) akibat ledakan (Lizotte, 1994 *op. cit.* Holmberg, 1982)

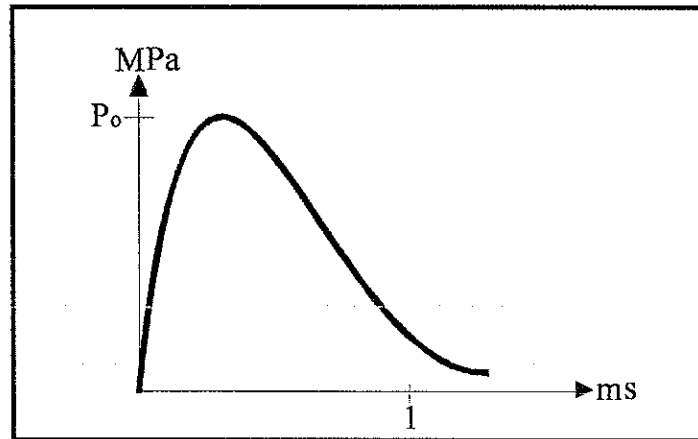
Batuan akan rusak (*damage*) ketika tidak lagi terdapat reaksi yang elastis yaitu ketika deformasinya bersifat plastis. Hal ini akan terjadi apabila tingkat regangan telah melebihi kekuatan batuan (Lizotte, 1994 *op. cit.* Holmberg, 1982).

Besarnya tegangan yang bekerja pada massa batuan tergantung pada besarnya tekanan (*pressure*) pada lubang bor akibat ledakan yang ditransmisikan secara efisien kepada batuan. Hal ini akan tergantung pada jenis, kerapatan efektif dan *decoupling ratio* dari bahan peledak. Tekanan efektif berhubungan dengan tekanan pada dinding lubang bor, dengan asumsi bahwa ekspansi gas hasil ledakan adalah isothermal, yang dituliskan seperti pada persamaan 2.5 (Lizotte, 1994 *op. cit.* Day dan Webster, 1982).

$$\frac{P_{eff}}{P_c} = \frac{V_c}{V_f} \quad (2.5)$$

dengan P_{eff} adalah tekanan efektif (MPa), P_c adalah tekanan ledak dari bahan peledak (MPa), V_c adalah volume dari bahan peledak (m^3) dan V_f adalah volume dari lubang bor (m^3).

Tekanan efektif (P_{eff}) dapat dianggap sama dengan tekanan maksimum pada dinding lubang bor (P_0) sehingga $P_{eff} = P_0$, yang besarnya akan naik dengan cepat dan turun secara eksponensial terhadap waktu, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.9. Akibatnya kerusakan pada batuan dapat dikendalikan dengan meredam tekanan efektif melalui penggunaan volume lubang ledak yang berbeda (lebih besar) dibandingkan dengan volume bahan peledak, terutama pada variasi diameternya yang dikenal dengan *decoupled*.



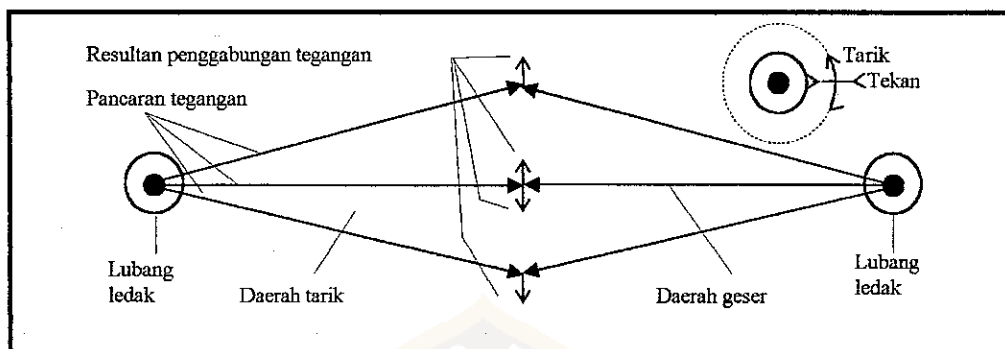
Gambar 2.9 Pembangkitan tekanan dinamik P pada dinding lubang bor sebagai fungsi waktu akibat dari peledakan (Italesplosivi, 1990)

2.7 *Controlled Blasting Pre-splitting*

Peledakan *controlled blasting* terdiri dari enam metode (Italesplosivi, 1990) yaitu *smooth blasting*, *cushion blasting*, *buffer blasting*, *line drilling*, *pre-splitting* dan *fracture controlled*. *Pre-splitting* adalah metode *controlled blasting* yang paling tepat digunakan pada peledakan jenjang (lereng tambang) untuk membatasi rekahan hasil peledakan produksi.

Tujuan dari *pre-splitting* hampir sama dengan tujuan umum dari *controlled blasting*, yaitu untuk mencapai distribusi energi hasil peledakan yang lebih baik serta mengurangi *tegangan*, rekahan dan retakan balik (*back break*) pada batuan yang diledakan, dicapai dengan menyusun, mengisi dan meledakan secara khusus pada setiap lubang tembak agar ledakannya dapat dikendalikan serta berbeda dari jenis peledakan yang lainnya. Namun pada *pre-splitting* terdapat tujuan lain yang lebih khusus yaitu hanya untuk membuat rekahan di antara lubang perimeter yang berdekatan untuk membatasi penyebaran rekahan

secara radial pada daerah penggalian (Lizotte, 1994), dengan arti lain hanya untuk membuat potongan agar kontur hasil peledakan dapat lebih halus dan mencegah *back break*, kondisi penyebaran tegangan di sekitar lubang tembak *pre-splitting* dijelaskan pada gambar 2.10.

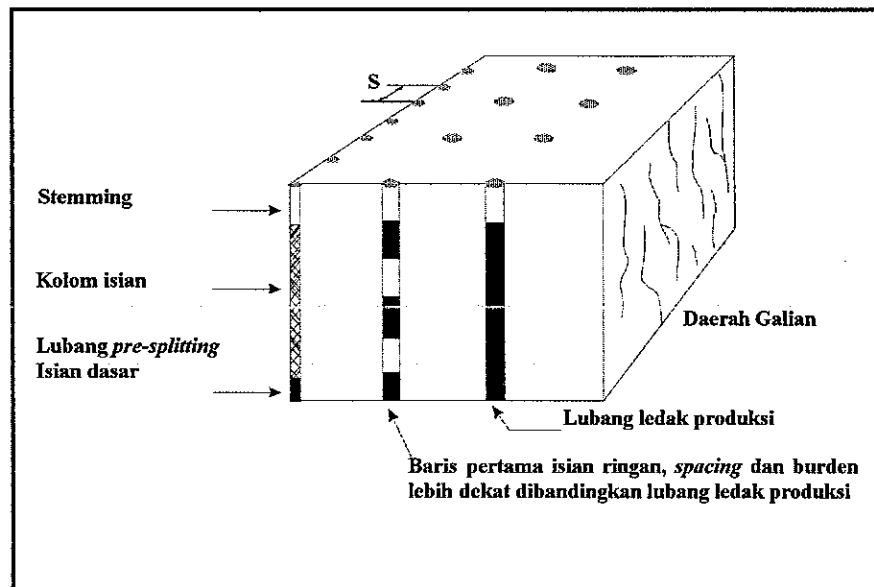


Gambar 2.10 Distribusi tegangan pada *pre-splitting* (Samhudi, 1994)

Berikut ini adalah ciri-ciri dari *pre-splitting*, yaitu :

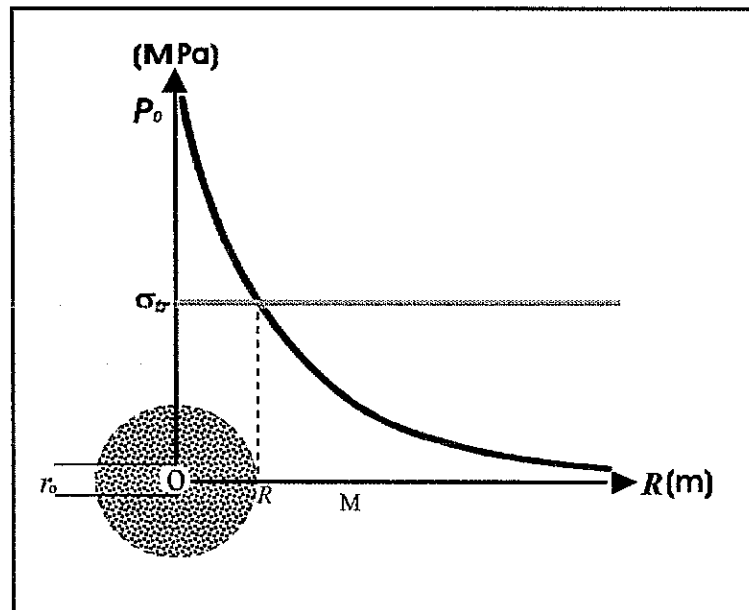
1. Memiliki *spacing* di antara lubang tembak yang lebih dekat dibandingkan dengan spasing pada lubang tembak untuk produksi.
2. Pengisian lubang tembak secara *decoupled* ($\sigma_f \geq 2 \sigma_c$).
3. Diledakan dengan selang waktu antara lubang ledak yang sesingkat mungkin (bersamaan) atau bila tidak memungkinkan, digunakan *micro delay*.
4. Diledakan sebelum ledakan untuk produksi.

Perpindahan bongkahan batuan karena proses peledakan tidak diharapkan pada *pre-splitting*, hal ini berbeda dengan peledakan untuk produksi. Kondisi penyusunan lubang tembak untuk *pre-splitting* dijelaskan pada gambar 2.11.



Gambar.2.11 Kondisi penyusunan lubang ledak *pre-splitting* (Lizotte, 1994 *op. cit.* McKown, 1984)

Pada *pre-splitting* akan terbentuk gelombang kejut yang menyebar secara radial akibat penggabungan serta peningkatan tegangan yang melampaui kekuatan batuan dari peledakan dua lubang tembak secara bersamaan. Di dalam lubang tembak akan terjadi peningkatan tekanan efektif secara mendadak hingga mencapai harga maksimum pada P_0 kemudian menurun seiring dengan waktu seperti pada gambar 2.9. Tekanan (*pressure*) yang diteruskan kepada batuan dalam bentuk tegangan (*stress*) berlangsung pada periode yang sangat singkat yaitu 1ms, mengakibatkan tegangan tekan (*compress stress*) pada batuan dengan segera akan berubah menjadi tegangan tarik (*tensile stress*). Pada radius yang dekat dengan lubang tembak, besar tegangan akan lebih besar dibandingkan dengan kekuatan batuan terhadap tegangan tarik, sehingga batuan tersebut akan pecah. Pecahan tersebut akan memiliki radius sejauh $O R$ seperti yang dilukiskan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak di sekitar lubang ledak (Italesplosivi, 1990)

Pada titik R (pada batas diantara batuan yang pecah dan batuan yang tidak pecah) harga tegangan yang diteruskan pada batuan (P) akan sama dengan harga kekuatan batuan terhadap tegangan tarik (σ_{tr}). Seiring dengan bertambahnya jarak dari lubang tembak O , maka harga tegangan (P) akan berkurang sesuai persamaan (Italesplosivi, 1990) :

$$P = P_0 \frac{r_0}{R} \quad (2.6)$$

dengan P adalah harga tegangan yang diteruskan pada batuan, P_0 adalah harga tekanan pada dinding lubang bor (MPa), r adalah jari-jari lubang tembak (m) dan R adalah jarak dimana P dihitung dari pusat lubang tembak (m).