

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

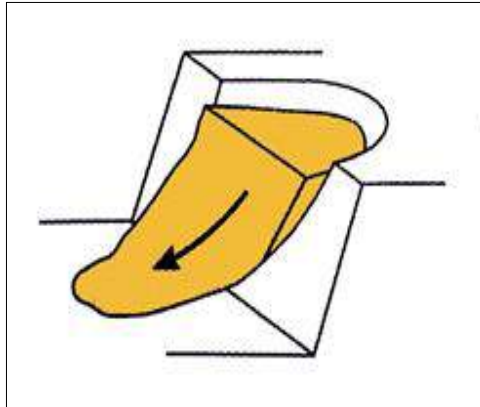
#### **2.1 Gerakan Massa Tanah dan Batuan**

Pertambangan terbuka (*open pit*) merupakan salah satu cara yang digunakan dalam eksploitasi endapan mineral atau bijih. Proses pertambangan dengan menggunakan sistem ini akan membentuk suatu cekungan dan penimbunan pada suatu bagian lereng. Penimbunan lereng tersebut akan mengalami gangguan kestabilan jika tidak sesuai dengan kriteria stabil. Penyelidikan geoteknik pada pertambangan *open pit* dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan lereng terhadap kerentanan longsor. Kelongsoran yang terjadi pada pertambangan umumnya longsor tipe busur dengan volume longsor cukup besar dan dapat mengganggu aktivitas penambangan. Bencana gerakan massa tanah dan batuan (longsor) seringkali menyebabkan korban jiwa serta kerugian material yang sangat besar. Tingkat pelapukan yang tinggi, kecuraman lereng, dan curah hujan yang tinggi menjadi pemicu terjadinya bencana longsor. Potensi terjadinya longsor dapat diminimalkan dengan mengenali topologi lereng yang rawan longsor, gejala awal lereng akan bergerak, serta sistem peringatan dini yang efektif (Apriyono, 2009).

Suatu lereng pertambangan yang tidak stabil dapat mengalami longsor sampai lereng tersebut menemukan keseimbangan yang baru, hingga menjadi stabil kembali (Arif, 2016). Terdapat beberapa macam longsor yang dapat terjadi pada lereng pertambangan antara lain longsor busur, longsor bidang, longsor baji, serta longsor guling.

##### **1. Longsor Busur (*Circular Failure*)**

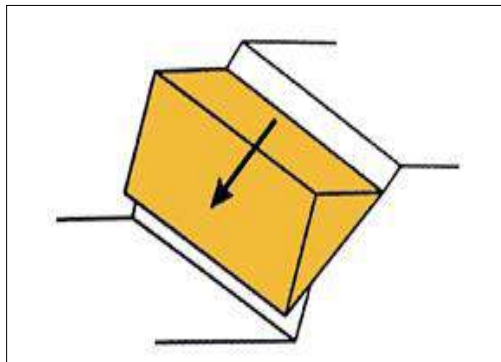
Longsor jenis ini banyak terjadi pada lereng batuan lapuk seperti pada batuan sedimen atau sangat terkekalkan dan di lereng-lereng timbunan. (Arif, 2016). Bentuk bidang gelincir jenis longsor ini berupa lengkungan lingkaran dan menyerupai busur bila dilihat dari penampang melintang yang terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema longsoran busur (Arif, 2016)

## 2. Longsoran Bidang (*Plane Failure*)

Longsoran bidang atau *plane failure* merupakan jenis longsoran yang jarang terjadi di area pertambangan. Longsoran jenis ini banyak terjadi pada lereng batuan yang cenderung keras seperti pada batuan beku namun, longsoran ini sangat mungkin terjadi apabila terdapat kondisi yang menunjang. Longsoran ini biasa terjadi apabila terdapat struktur geologi yang berkembang seperti kekar (*joint*) maupun patahan (Arif, 2016). Bidang gelincir longsoran tersebut searah terhadap struktur geologi yang terlihat pada Gambar 2.2.

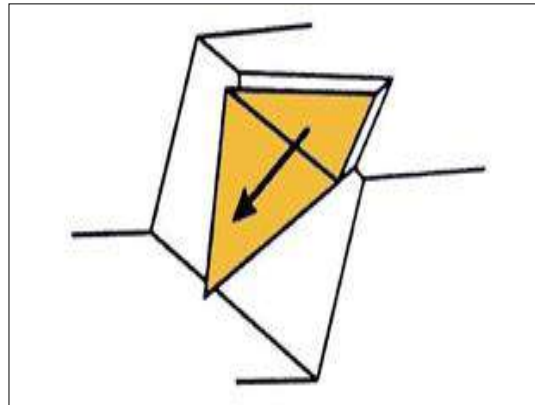


Gambar 2.2 Skema longsoran bidang (Arif, 2016)

## 3. Longsoran Baji (*Wedge Failure*)

Longsoran baji atau *wedge failure* merupakan jenis longsoran yang disebabkan oleh perkembangan struktur geologi seperti kekar (*joint*) maupun patahan (Arif, 2016). Longsoran jenis ini banyak terjadi pada lereng batuan yang cenderung keras seperti pada batuan beku. longsoran baji terjadi akibat terdapatnya dua struktur

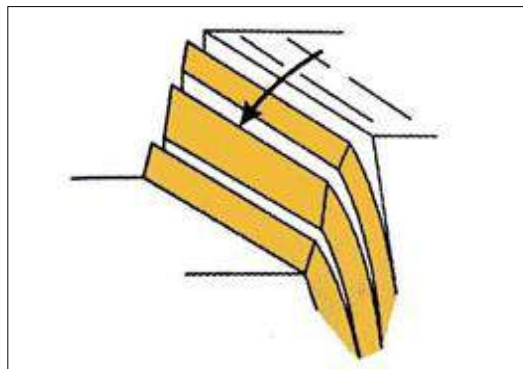
geologi yang berkembang dan saling berpotongan sehingga membentuk bidang gelincir yang terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema longsoran baji (Arif, 2016)

#### 4. Longsoran Guling (*Toppling Failure*)

Longsoran guling terjadi pada permukaan lereng yang terjal serta pada jenis batuan yang keras seperti batuan beku sehingga struktur bidang lemahnya berbentuk menyerupai kolom atau blok (Arif, 2016). Longsoran ini terjadi apabila bidang lemah yang terdapat pada lereng memiliki sudut kemiringan yang tegak hingga berlawanan dengan arah kemiringan lereng yang terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema longsoran guling (Arif, 2016)

## 2.2 Pemicu dan Pemacu Gerakan Massa Tanah dan Batuan

Pemicu berarti hal-hal yang menggerakkan sesuatu yang berakibat membahayakan, sedangkan pemacu bisa didefinisikan sebagai hal-hal yang diberikan pada sesuatu hingga mengalami perubahan. Pemicu dan pemacu longsor melibatkan

pergerakan massa tanah dan batuan yang disebabkan adanya penyebab internal maupun penyebab eksternal seperti yang terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penyebab gerakan massa tanah dan batuan (Terzaghi dan Peck, 1967 dan Brunsten dan Prior, 1984)

No	Penyebab eksternal	Penyebab Internal
1	Perubahan geometri lereng (pemotongan kaki lereng, erosi, perubahan sudut kemiringan, panjang, dll).	Longsoran (mengikuti ekspansi lateral, pergerakan dan erosi).
2	Pembebanan beban (erosi, penggalian).	Pelapukan.
3	Pembebanan (penambahan material, penambahan tinggi).	Erosi <i>seepage</i> ( <i>solution</i> , pemipaan).
4	<i>Shock</i> dan vibrasi (buatan, gempa bumi, dll).	
5	Penurunan permukaan air.	
6	Perubahan aktivitas air (hujan, tekanan pori, dll).	

### 2.3 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

Pada dasarnya sebuah lereng yang curam adalah kondisi paling tidak stabil, namun tidak menutup kemungkinan bahwa suatu lereng yang landai tidak mengalami peristiwa longsor. Berikut faktor-faktor yang menyebabkan ketidakstabilan secara umum diklasifikasikan (Dunn dkk, 1992):

- a. Peningkatan *shear stress* yang dapat disebabkan oleh:
  - 1) Meningkatnya jumlah beban pada lereng seperti dalam kasus pembuangan kelebihan material pada lereng.
  - 2) Tekanan dinamis transien dari aktivitas *blasting*, pergerakan peralatan pertambangan berat, dan gempa bumi.
  - 3) Tekanan aksial akibat tekanan pori dan pelebaran retak karena kondisi cuaca yang buruk.
  - 4) Peningkatan aktivitas tektonik yang dapat mengganggu medan stress.

b. Pengurangan *shear stress* yang dapat disebabkan oleh:

- 1) Karakteristik material yang melekat atau faktor geologis seperti orientasi dan keberadaan diskontinuitas dan keberadaan material tanah dan batuan yang lemah.
- 2) Pengurangan struktur penahan dan erosi tanah karena kondisi hujan atau penurunan muka air tanah.
- 3) Perubahan kekuatan karena pelapukan, seperti kerusakan fisik dari batu granular yang mengakibatkan berkurangnya nilai kohesi material lereng.
- 4) Perubahan kekuatan internal karena diskontinuitas dan tekanan air pori
- 5) Melemahnya lereng secara terus menerus.

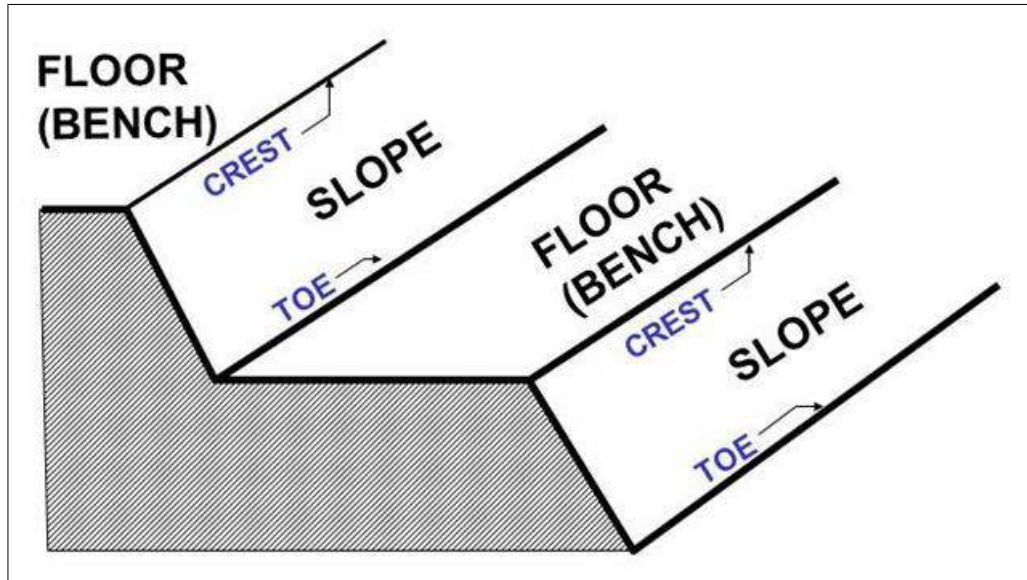
Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan dan studi menyeluruh tentang keruntuhan lereng, maka nilai rentang FoS dapat dikategorikan intensitas kelongsorannya berdasarkan klasifikasi (Bowles, 1984) yang terlihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Hubungan nilai FoS lereng dan Keadaan lereng (Bowles,1984)

Nilai FoS	Indikasi Lereng
< 1.07	Labil
1.07 - 1.25	Kritis
> 1.25	Tidak Stabil stabil

#### **2.4 Kriteria Pergerakan *Sliding Control* pada *Highwall***

*Highwall* merupakan lereng tertinggi pada pertambangan *open pit*. *Highwall* adalah dinding tambang pada sisi kemiringan batubara terdalam yang terdiri dari *slope* dan *bench* (Hustrulid dan Kuchta 1995). Kelongsoran dapat terjadi pada *highwall* atau *lowwall*. Kelongsoran lebih didominasi pada *highwall* karena tegangan *highwall* akibat perubahan beban dan kondisi bidang lemah. Pergerakan lereng pada pertambangan *open pit* dapat dipengaruhi oleh *blasting* yang umumnya diamati dalam pergerakan vertikal dan horizontal.



Gambar 2.5 Bagian – bagian *highwall* (Hustrulid dan Kuchta 1995).

Pengamatan pergerakan lereng pada permukaan (*surface monitoring*) dilakukan untuk mengetahui pergerakan suatu lereng pada suatu lokasi secara berkelanjutan. Pengamatan tersebut dilakukan untuk memperkirakan kecepatan pergeseran lereng per satuan waktu berdasarkan kriteria pergeseran lereng yang ditunjukkan oleh Tabel 2.3 dan Tabel 2.4.

Tabel 2.3 Kriteria pergerakan pergeseran horizontal lereng oleh Zavodni (2001) dan Sullivan (2007)

Penulis	Pengukuran Kecepatan (Pergeseran/waktu)	Deskripsi
Zavodni (2001)	0.1 mm/hari (0.004 mm/jam)	Respon Awal
	< 17 mm/hari (0.71 mm/jam)	Tidak ada kegagalan yang diharapkan dalam 24 jam.
	< 15 mm/hari (0.63 mm/jam)	Tidak ada kegagalan yang diharapkan dalam waktu 48 jam.
	> 50 mm/hari (2.1 mm/jam)	Mengindikasikan kegagalan bertahap (keruntuhan total diperkirakan dalam 48 hari).
	> 100 mm/hari (4.2 mm/jam)	<i>Clear area mining</i> (perubahan geometri lereng dan kecepatan pergeseran secara bertahap ).
	150 mm/hari (6.25 mm/jam)	<i>Clear area mining</i> (penyusutan geometri lereng).

Sullivan (2007)	0.1 - 0.25 mm/hari (0.004 - 0.01 mm/jam)	Pergerakan kemiringan karena pergeseran perpindahan pada struktur geometri lereng.
	0.25 - 0.5 mm/hari ( 0.01 - 0.02 mm/jam)	Kemungkinan terjadi <i>failure</i> .
	1 mm/hari (0.004 mm/jam)	Peluang kegagalan yang tinggi.
	> 1.0 mm/hari (> 0.04 mm/jam)	Pergerakan keruntuhan sebelum terjadi longsoran.

Dengan mengetahui nilai kecepatan pergerakan lereng per satuan waktu maka dapat ditentukan tipe longsoran yang dapat terjadi. Berbagai jenis longsoran (*landslide*) berdasarkan pergerakan secara vertikal suatu lereng dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Litbang Pekerjaan Umum, 2005) :

#### 1. Longsoran rayapan (*creep*)

Longsoran rayapan (*creep*) merupakan jenis longsoran yang sulit untuk diidentifikasi. Tipe longsoran ini memiliki ciri gerakan masa pembentuk lereng yang bergerak lambat dan tidak cukup kuat untuk mengalirkan kumpulan atau fragmen material pembentuk lereng.

#### 2. Longsoran gelinciran (*slides*)

Longsoran gelinciran (*slides*) merupakan tanah longsor dengan tipe luncuran yang memiliki ciri gerakan berupa kumpulan atau fragmen dari massa (tanah dan batuan) menuju ke arah bawah, sehingga menyebabkan perpindahan massa yang terlihat pada permukaan lereng. Tipe longsoran ini merupakan jenis tipe longsoran yang terjadi akibat getaran hebat dari suatu pemicu, contohnya adalah gempa bumi dan *blasting*. Akibat pemicu ini, kestabilan dari sebuah lereng akan terganggu hingga menyebabkan material pembentuk lereng kehilangan momentum untuk mempertahankan bentuk aslinya.

#### 3. Aliran (*flow*)

Longsoran aliran (*flow*) merupakan jenis aliran tanah longsor yang terjadi karena perubahan dari struktur kepadatan dari sebuah lereng. Perpindahan massa tanah atau batuan terjadi karena perubahan intensitas air pada lereng. Perubahan intensitas air tersebut akan menjadikan material pembentuk lereng berubah menjadi jenuh

karena bercampur dengan air kemudian material jenuh atau lumpur membawa kumpulan dan fragmen-fragmen pembentuk lereng mengalir bersama.

Tabel 2.4 Kriteria pergerakan lereng secara vertikal (Litbang Pekerjaan Umum, 2005)

Tipe Gerakan	Klasifikasi Kecepatan	Ukuran	Tingkat Kerusakan
Rayapan ( <i>creep</i> )	Sangat lambat	< 0.3 m/5 tahun	Tidak perlu dikhawatirkan
	Lambat	0.3 m/5 tahun - 1.5 m/tahun	Perlu dikhawatirkan
Gelincir (rotasi dan translasi)	Lambat	1.5 m/tahun - 1.5 m/bulan	Timbul sedikit kerusakan
	Menengah	1.5 m/bulan - 1.5 m/hari	Kerusakan sedang
	Cepat	1.5 m/hari - 0.3 m/menit	Kerusakan serius
Aliran cepat	Sangat cepat	0.3 m/menit - 3 m/detik	Kerusakan sangat serius
	Amat sangat cepat	3m/detik - 100m/detik	Kerusakan hancur total

## 2.5 Getaran dan Gelombang

Getaran (vibrasi) merupakan gerakan bolak-balik secara periodik yang selalu melewati keseimbangan. Titik setimbang adalah kedudukan benda pada saat tidak mengalami getaran. Kedudukan tersebut terletak pada dua titik terjauh bila benda tersebut bergetar. Gelombang merupakan gejala perambatan gangguan pada suatu medium. Perambatan tidak disertai dengan perpindahan tempat yang permanen dari materi-materi medium, tetapi membentuk suatu gerakan bolak-balik sehingga gelombang dapat bergerak dan berpindah tempat. *Blasting* pada operasional pertambangan akan menghasilkan *ground vibration* yang melibatkan gelombang pada bawah permukaan.

### 2.5.1 Getaran Tanah (*Ground Vibration*)

Getaran tanah (*ground vibration*) terjadi apabila pada zona elastis memiliki tegangan yang lebih kecil dari kekuatan material yang terlibat sehingga hanya menyebabkan perubahan bentuk dan volume. Bentuk dan volume akan kembali pada keadaan semula setelah tegangan yang bekerja berkurang sesuai dengan sifat



elastis material. Perambatan tegangan dalam keadaan elastis akan menimbulkan gelombang getaran. *Ground vibration* merupakan gelombang yang bergerak di dalam tanah karena adanya sumber energi. Getaran tersebut pada batas tinggi tertentu dapat menyebabkan terjadinya kerusakan struktur disekitar lokasi *blasting*. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi getaran beserta prinsip getaran *blasting* adalah sebagai berikut :

#### 1. Faktor yang mempengaruhi getaran

*Ground vibration blasting* dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu faktor yang dapat dikontrol dan yang tidak dapat dikontrol. Variabel-variabel yang tidak dapat dikontrol adalah faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan oleh kemampuan manusia, hal ini disebabkan karena proses secara alamiah. Faktor yang tidak dapat dikontrol adalah faktor alamiah seperti keadaan geologi dan mekanika batuan.

Faktor yang dapat dikontrol yang mempengaruhi *ground vibration* adalah:

##### a. Jumlah muatan bahan peledak per waktu tunda

Besarnya getaran yang dihasilkan *blasting* dipengaruhi oleh jumlah muatan total bahan peledak per waktu tunda. Intensitas *ground vibration* akan bergantung pada jumlah berat bahan peledak maksimal yang akan meledak bersamaan pada interval waktu. Semakin besar muatan bahan peledak per waktu tunda maka parameter getaran yang dihasilkan akan semakin meningkat.

##### b. Jarak dari lokasi *blasting*

Jarak dari titik *blasting* memberikan pengaruh besar terhadap parameter getaran yang dihasilkan, seperti muatan maksimal bahan peledak per waktu tunda. Semakin dekat suatu titik pengukuran getaran ke titik *blasting*, maka parameter getaran yang terukur akan semakin besar.

##### c. Waktu tunda (*delay period*)

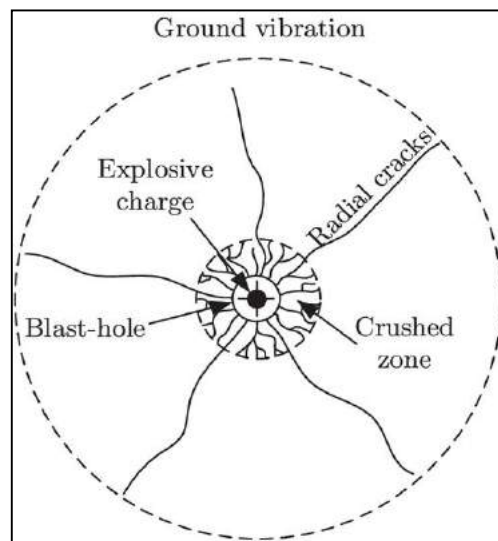
Interval waktu tunda antar lubang ledak sangat mempengaruhi tingkat getaran yang dihasilkan. Jika interval waktu tunda semakin besar, maka kemungkinan jumlah bahan peledak yang dianggap meledak bersamaan akan makin kecil, sehingga tingkat getaran yang dihasilkan akan semakin kecil.

## 2. Prinsip getaran peledakan (*blasting*)

*Blasting* akan menghasilkan getaran atau gelombang seismik. Pada umumnya *blasting* bertujuan untuk memecahkan batuan keras. *Blasting* membutuhkan energi yang cukup sehingga dapat melebihi atau melampaui kekuatan batuan atau melampaui batas elastis batuan.

### 2.5.2 Gelombang Akibat *Blasting*

Gelombang hasil aktivitas *blasting* merambat dalam bentuk bola yang memiliki gelombang P yang merupakan gelombang dominan dan mengakibatkan retakan pada batuan. (Farnfield dkk, 1993). *Blasting* yang dilakukan terdiri dari beberapa titik lubang *blasting* (*blast hole*) yang akan diledakkan secara bergantian dalam selang waktu beberapa milidetik sehingga terjadinya tumpang tindih gelombang. Penjalaran gelombang yang diakibatkan *blasting* berasal dari *blast hole* yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Penjalaran gelombang hasil *blasting* (Farnfield dkk., 1993)

Getaran akibat *blasting* memiliki aliran energi yang sama dengan aliran gelombang seismik. Getaran *blasting* memiliki puncak amplitudo yang lebih rendah dan frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan gempa bumi (Siskind, 2005) :

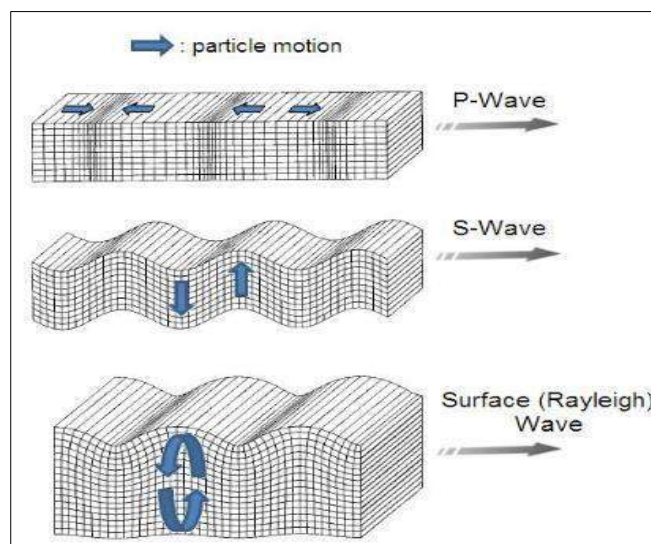
#### 1. Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan gelombang yang mendeskripsikan penjalaran energi melalui bumi yang padat. Salah satunya adalah *ground vibration* akibat

*blasting*. Gelombang seismik dibagi menjadi dua, yaitu gelombang badan dan gelombang permukaan. Kedua gelombang ini akan terlihat jelas pada perekaman seismogram.

a. Gelombang badan (*body wave*)

Gelombang badan merambat melalui medium massa batuan dan menembus ke bagian dalam batuan. Gelombang badan akan merambat keluar membentuk bola sampai mereka bertemu dengan suatu bidang kontak. Gelombang badan terdiri atas gelombang primer dan gelombang sekunder. Gelombang longitudinal (gelombang P) menghasilkan gerakan partikel dalam arah rambat yang sejajar terhadap arah rambatnya, gelombang geser (gelombang S) menghasilkan gerak tegak lurus terhadap arah rambat. Gelombang permukaan menghasilkan gerakan partikel baik dalam arah propagasi tegak lurus maupun paralel (Chen dkk, 2012) yang ditunjukkan oleh gambar 2.7.

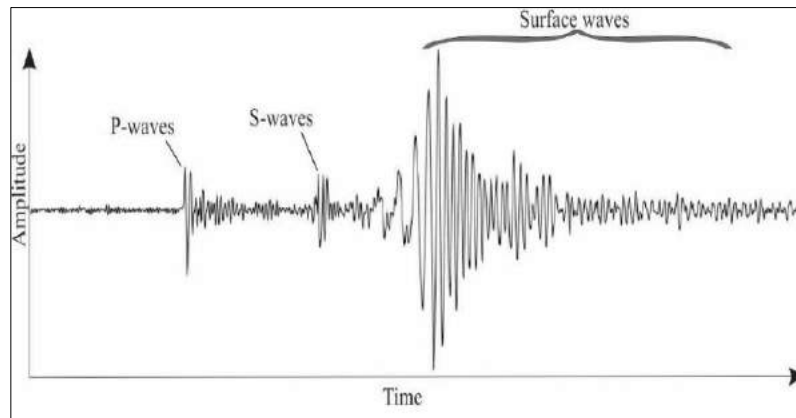


Gambar 2.7 Variasi gerak partikel dan jenis gelombang (Bhasin dkk, 2013)

b. Gelombang permukaan (*surface wave*)

Gelombang permukaan merupakan gelombang seismik yang merambat secara paralel ke permukaan bumi tanpa adanya penyebaran energi ke dalam interior bumi. Gerakan gelombang ini memiliki energi yang menurun terhadap kedalaman. Gelombang permukaan terdiri dari gelombang *love* dan gelombang *rayleigh* yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Gelombang *Love* terbentuk karena interferensi konstruktif dari pantulan-pantulan gelombang seismik pada permukaan bebas.

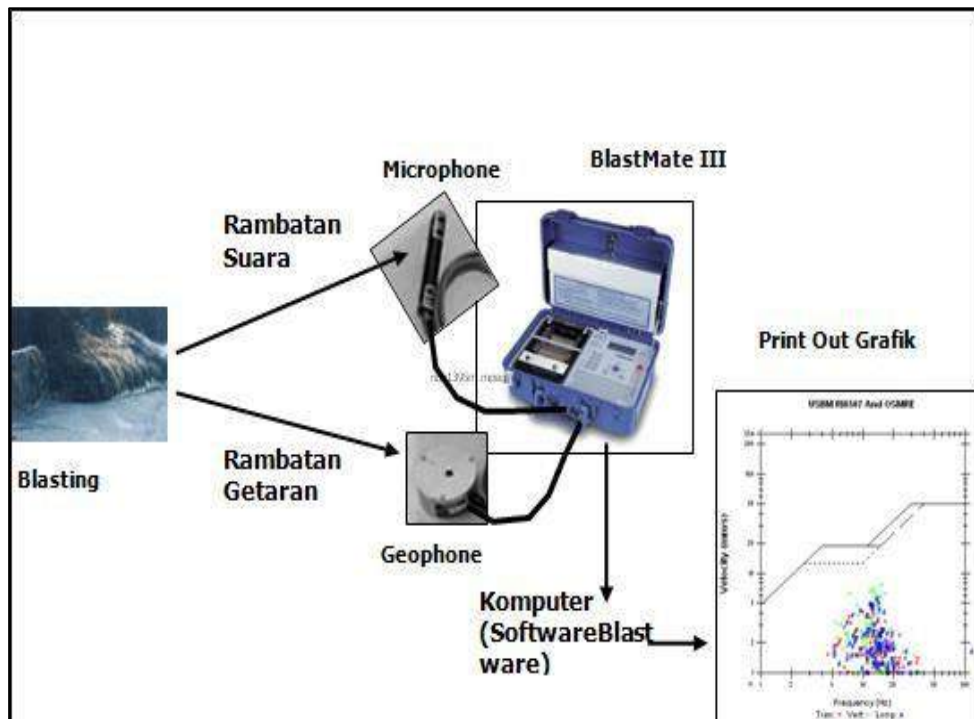
Sedangkan gelombang *rayleigh* (*Groundroll*) merupakan gelombang yang merambat di permukaan dengan pergerakan partikel yang menyerupai elips dan bergerak mundur.



Gambar 2.8 Perbedaan umum ketiga jenis gelombang yang dipantau dari jarak jauh dari lubang ledakan (Chen dkk, 2012)

## 2.6 Parameter-Parameter Getaran (Vibrasi)

Getaran tanah yang dihasilkan *blasting* dapat diperkirakan dengan menghubungkan hasil pengukuran *ground vibration* dengan parameter-parameter *blasting* yang mempengaruhinya. Parameter-parameter tersebut berupa jarak dari lokasi *blasting*, *Peak Particle Velocity* (PPV), *Peak Particle Acceleration* (PPA), percepatan maksimum (*amaks*), *displacement* dan jumlah bahan peledak yang meledak secara bersamaan. Ketika *blasting* berlangsung akan dihasilkan getaran yang memiliki nilai kecepatan puncak (PPV), percepatan (PPA) yang merupakan percepatan puncak dan frekuensi pada saat peledakan. Aktivitas *blasting* akan menyebabkan perpindahan massa tanah dan batuan (*displacement*) yang jika dalam skala besar dapat mengakibatkan longsor yang besar. Untuk mengetahui atau mengontrol parameter getaran yang dihasilkan maka dapat diprediksi dengan menentukan nilai *scaled distance* pada peledakan.



Gambar 2.9 Rambatan *monitoring* gelombang akibat *blasting* oleh *seismograf* (Pasang, 2013)

Gelombang yang ditangkap oleh *seismograf* adalah getaran mekanis dari kegiatan peledakan diterima oleh sensor *geophone* kemudian diubah menjadi getaran listrik, lalu diproses menjadi bentuk *numeric* dan disimpan di dalam memori alat yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Data tersebut dapat dilihat secara mendetail melalui perangkat komputer. Sedangkan untuk prinsip kerja *seismograf* pada *Blastmate III* yaitu mengubah masukan yang berupa getaran tanah menjadi gaya pegas atau sinyal listrik sehingga diperoleh keluaran berupa *seismogra* atau angka yang dapat dibaca pada monitor.

#### 1. *Scaled Distance* (SD)

Cara efektif dan efisien untuk mengontrol getaran yaitu dengan menggunakan nilai SD. Hal tersebut memungkinkan *engineering* menentukan jumlah bahan peledak yang diperlukan atau jarak aman untuk muatan bahan peledak yang jumlahnya telah ditentukan. Nilai SD yang besar akan lebih aman, karena semakin jauh jaraknya akan lebih aman dibandingkan dengan jarak yang lebih dekat. Secara matematis, SD dapat di rumuskan sebagai berikut :

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}} \quad (2.1)$$

Keterangan :

SD = *Scaled Distance* (m/kg)

D = Jarak muatan maksimal terhadap lokasi pengamatan (m).

W = Muatan bahan peledak maksimal per periode tunda (kg).

Pelemahan *ground vibration* dalam komponen kecepatan puncak dan intensitas getaran udara dievaluasi berdasarkan nilai SD.

Faktor SD untuk pergerakan tanah sebagai berikut :

$$\text{Square-root scaled distance (SRSD)} = D/W \quad (2.2)$$

Keterangan :

SRSD = *Square-root scaled distance* (m/kg)

D = Jarak muatan maksimal terhadap lokasi pengamatan (m).

W = Muatan bahan peledak maksimal per periode tunda (kg).

*Scaled distance* melibatkan faktor-faktor penting yang dapat meningkatkan intensitas *ground vibration* dan getaran udara sebagai penurunan sebanding dengan jarak dan berbanding terbalik dengan berat bahan peledak dalam satu kali tunda.

## 2. *Peak Particle Velocity* (PPV)

PPV merupakan kecepatan maksimal yang digunakan untuk menghitung besarnya getaran pada suatu titik *blasting* yang tergantung pada jarak lokasi tersebut dari pusat *blasting* dan dari jumlah bahan peledak yang dipakai per periode (*delay*). Dalam menentukan besarnya PPV yang dihasilkan pada *blasting* maka dapat ditentukan persamaan sebagai berikut :

$$PPV = k \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-\alpha} \quad (2.3)$$

Keterangan :

PPV = *Peak Particle Velocity* (mm/s)

k,  $\alpha$  = Konstanta yang harganya dapat dicari pada *software Blastware*

D = Jarak muatan maksimal terhadap lokasi pengamatan (m)

W = Muatan bahan peledak maksimal per periode tunda (kg)

### 3. Frekuensi Getaran

Frekuensi getaran merupakan banyaknya jumlah gelombang dalam per satuan waktu pada aktivitas *blasting*. Getaran yang bergerak melalui batuan akan mempertahankan frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah sebagai media transmisi. Parameter-parameter lainnya bergantung pada sifat kekuatan batuan, jenis medium dan urutan *blasting* (Cording, 1967) yang dijelaskan oleh Tabel 2.5.

### 4. Percepatan Getaran (*amaks*)

Percepatan getaran merupakan laju pada saat terjadi perubahan kecepatan partikel. Percepatan pada *blasting* merupakan gaya statik seismik vertikal dan horizontal. Gaya seismik yang diperhitungkan hanya melibatkan arah horizontal sedangkan arah vertikal dianggap sama dengan nol. Nilai *amaks* berbeda dengan nilai PPA dari hasil pengukuran *ground vibration blasting*.

Hubungan antara *amaks* dan PPA dinyatakan dalam persamaan (Lucca dan Frank, 2003)

$$amaks = z (PPA) \quad (2.4)$$

Keterangan :

*amaks* = Percepatan Getaran Horizontal Maksimum ( $\text{mm/s}^2$ )

z = koefisien dari respons analisis

PPA = *Peak Particle Acceleration* ( $\text{mm/s}^2$ )

(1 Gal =  $10 \text{ mm/s}^2$ )

Hubungan antara *amaks* dan PPA juga dinyatakan dalam persamaan :

$$amaks = \frac{2 \times \pi \times PPA \times f}{386,4} \quad (2.5)$$

Keterangan :

*amaks* = Percepatan Getaran Horizontal Maksimum (Gal)

$\pi$  = 3,14159

PPV = *Peak Particle Velocity* (mm/s)

f = Frekuensi dari respons getaran (Hz)

Tabel 2.5 Skala dari tipe parameter *blasting* (Cording, 1967)

Parameter	Skala
<i>Displacement</i>	10 <sup>-4</sup> sampai 10 <sup>4</sup> mm
PPV	10 <sup>-4</sup> sampai 10 <sup>3</sup> mm/s
PPA	10 sampai 10 <sup>5</sup> mm/s <sup>2</sup>
<i>Pulse Duration</i>	0.5 sampai 2 s
Panjang Gelombang	30 sampai 1500 m
Frekuensi	0.5 sampai 200 Hz

### 5. *Displacement*

Perubahan kedudukan atau letak suatu material yang berpindah karena adanya pemicu gerakan. Formulasi *displacement* dinyatakan dalam persamaan :

$$U(t) = A \sin (\omega t) \quad (2.6)$$

Keterangan :

U = *displacement* (m)

A = Amplitudo (m)

$\omega$  = percepatan sudut

t = *time* (detik)

Dimana persamaan  $\omega$  dinyatakan dalam persamaan :

$$\omega = 2\pi f \quad (2.7)$$

$\omega$  = percepatan sudut

$\pi = 3,14159$

f = frekuensi (Hz)



## 2.7 Mekanika Batuan

Mekanika batuan merupakan salah satu cabang disiplin ilmu geomekanika yang mempelajari sifat-sifat mekanik batuan dan massa batuan. Disiplin ilmu mekanika batuan memiliki peran yang besar dalam operasional pertambangan, seperti pemboran, penggalian, *blasting* dan pekerjaan lainnya. Untuk mengetahui sifat-sifat mekanika batuan dan massa batuan dilakukan berbagai macam uji coba di laboratorium dan di lapangan secara langsung (*insitu*). Batuan mempunyai sifat-sifat tertentu yang dikelompokkan menjadi dua, yaitu sifat fisik batuan dan sifat mekanik batuan.

### 2.7.1 Sifat Fisik Batuan

Sifat-sifat fisik batuan diindikasikan dengan adanya susunan kimia tertentu yang membentuk susunan kristal yang teratur pada bahan padat batuan yang terbentuk di alam (Kramadibrata, 2000). Sifat batuan merupakan sifat yang terdapat pada batuan setelah :

#### a. Bobot Isi

Bobot isi merupakan perbandingan antara berat batuan dengan volume batuan. Berdasarkan sifatnya, bobot isi dibagi menjadi 3 bagian, yaitu:

1) Bobot asli, yaitu perbandingan antara berat batuan asli dengan volume batuan.

$$\text{Bobot isi asli} = \frac{W_n}{W_w - W_s} \quad (2.6)$$

Keterangan :

$W_n$  = Berat asli (natural)

$W_w - W_s$  = Volume sampel total

2) Bobot jenuh, yaitu perbandingan berat batuan jenuh dengan volume batuan.

$$\text{Bobot isi jenuh} = \frac{W_w}{W_w - W_s} \quad (2.7)$$

Keterangan :

$W_w$  = Berat jenuh

$W_w - W_s$  = Volume sampel total

3) Bobot kering, yaitu perbandingan berat batuan kering dengan volume batuan.

$$\text{Bobot isi kering} = \frac{W_o}{W_w - W_s} \quad (2.8)$$

Keterangan :

$W_w - W_s$  = Volume sampel total

$W_o$  = Berat kering

#### b. Densitas Batuan

Densitas spesifik (*specific gravity*) adalah perbandingan antara densitas material tersebut terhadap densitas air pada tekanan dan temperatur yang normal.

#### c. Kadar Air

Kadar air merupakan perbandingan antara berat air yang ada di dalam batuan dengan berat butiran batuan itu sendiri yang terbagi menjadi:

1) Kadar air asli, yaitu perbandingan antara berat air asli yang ada dalam batuan dengan berat butiran batu itu sendiri dalam satuan %.

$$\text{Kadar air asli} = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100\% \quad (2.9)$$

Keterangan :

$W_n$  = Berat asli (natural)

$W_o$  = Berat kering

2) Kadar air jenuh, yaitu perbandingan antara berat air jenuh yang ada dalam batuan dengan berat butiran batuan itu sendiri dalam satuan persen (%).

#### d. Porositas

Porositas merupakan perbandingan volume pori-pori atau rongga dalam batuan dengan volume batuan.

$$\text{Porositas (n)} = \frac{W_w - W_0}{W_w - W_s} \times 100\% \quad (2.10)$$

Keterangan :

$W_w - W_s$  = Volume sampel total

$W_0$  = Berat kering

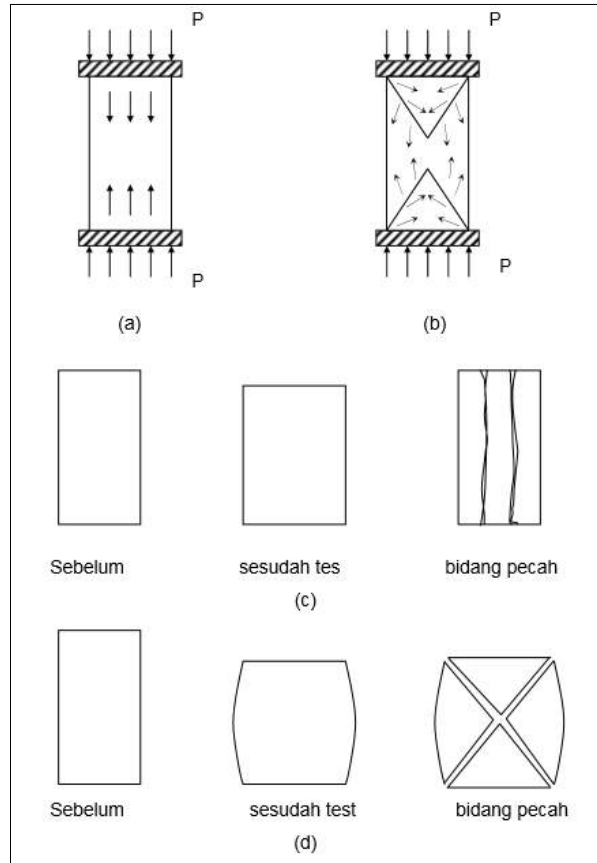
$W_w$  = Berat jenuh

### 2.7.2 Sifat Mekanik Batuan

Untuk menentukan sifat mekanik dari suatu batuan, dilakukan pengujian di laboratorium dengan menentukan karakteristik dari sifat mekanik batuan.

#### a. Uji Kuat Tekan Uniaksial (*Unconfined Compressive Strength*)

Uji kuat tekan uniaksial ini menggunakan mesin tekan untuk menekan contoh batuan yang berbentuk silinder, balok atau prisma dari satu arah (uniaksial) hingga bidang batuan pecah (Kramadibrata, 2000). Penyebaran tegangan pada sampel batuan secara teoretis adalah searah dengan gaya yang dikenakan pada sampel tersebut. Tetapi pada kenyataannya arah tegangan tidak searah dengan gaya yang dikenakan pada sampel tersebut karena ada pengaruh dari plat penekan mesin tekan pada alat uji uniaksial yang menghimpit sampel, sehingga pecahan tidak terbentuk seperti bidang pecah yang searah dengan gaya tetapi berbentuk kerucut *cone* yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Penyebaran tegangan didalam percontoh batu (a) teoretis dan (b) eksperimen, (c) Bentuk pecahan teoretis dan (d) Bentuk pecahan eksperimen (Kuswanto dan Wacono, 2006)

### 1) Modulus Elastis

Modulus elastisitas adalah ukuran yang digunakan untuk mengukur objek atau ketahanan batuan dalam mengalami deformasi elastis ketika gaya diterapkan pada batuan tersebut.

- Regangan

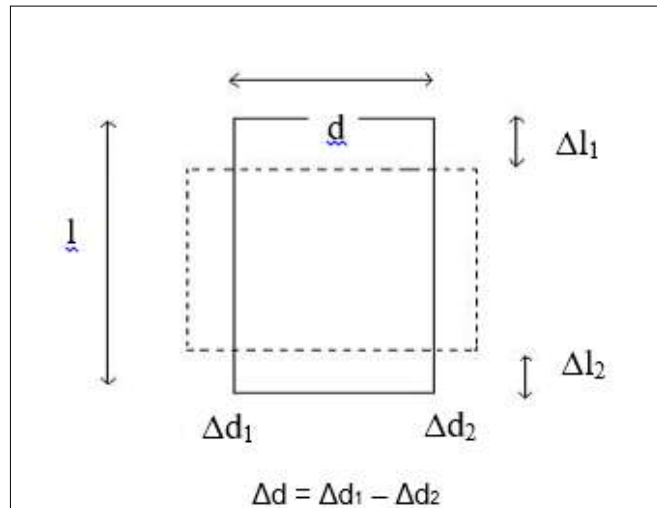
Regangan merupakan perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang awalnya. Pertambahan panjang tersebut terletak pada ujung *sample* dan pada setiap bagian batang *sample* yang memiliki perbandingan yang sama. Pertambahan panjang tersebut merupakan perubahan bentuk yang terjadi dalam arah lateral ( $\Delta d$ ) dan aksial ( $\Delta l$ ) yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, sehingga terjadi perubahan secara volumetrik. Perubahan bentuk arah lateral terhadap diameter disebut regangan lateral dan perubahan bentuk arah aksial terhadap tinggi disebut

regangan aksial serta perubahan bentuk secara volumetrik disebut regangan volumetrik (Kramadibrata, 2000).

$$\text{Regangan lateral } (\epsilon_l) = \frac{\Delta d}{d} \quad (2.11)$$

$$\text{Regangan aksial } (\epsilon_a) = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.12)$$

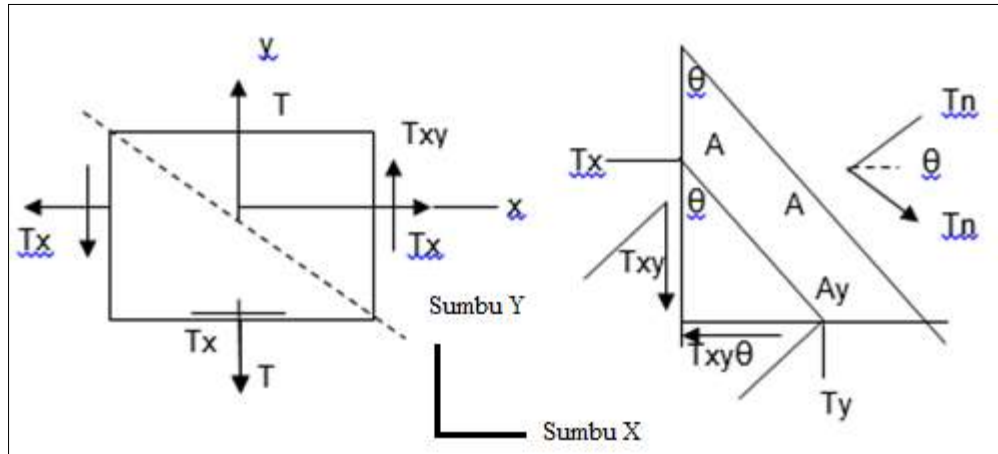
$$\text{Regangan volumetrik } (\epsilon_v) = \epsilon_a + 2 \epsilon_l \quad (2.13)$$



Gambar 2.11 Kondisi batuan yang menerima beban (Kuswanto dan Wacono, 2006)

- Tegangan

Tegangan merupakan perbandingan antara gaya tarik yang dikerjakan pada suatu batuan dengan luas penampangnya. Apabila gaya yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan, maka *stress* yang demikian dikatakan sebagai tegangan normal. Sedangkan jika gaya yang bekerja sejajar terhadap permukaan dapat dikatakan sebagai tegangan geser (*shear stress*). Pada Gambar 2.12 memperlihatkan diagram tegangan yang bekerja pada bidang berbentuk segi empat dalam dua dimensi dengan sumbu x dan y. Bidang miring memiliki gaya normal yang membuat sudut  $\theta$  terhadap sumbu x tegangan normal  $T_n$  dan tegangan geser  $t_{nt}$  yang nilainya merupakan fungsi dari  $T_x$ ,  $T_y$  dan  $T_{xy}$  yang bekerja pada bidang-bidang yang tegak lurus terhadap sumbu x dan y (Kramadibrata, 2000).



Gambar 2.12 Diagram tegangan pada bidang miring (Kuswanto dan Wacono, 2006)

$$A_x = A_n \cos \theta \quad (2.14)$$

$$A_y = A_n \sin \theta \quad (2.15)$$

Keterangan:

$A_x$  = Luas penampang bidang yang tegak lurus sumbu x

$A_y$  = Luas penampang bidang yang tegak lurus sumbu y

$A_n$  = Luas penampang bidang miring

$$T_n = \frac{T_x + T_y}{2} + \frac{T_x - T_y}{2} \cos 2\theta + T_{xy} \sin 2\theta \quad (2.16)$$

Keterangan :

$T_n$  = tegangan normal

$T_x$  = tegangan yang bekerja pada bidang yang tegak lurus terhadap sumbu x

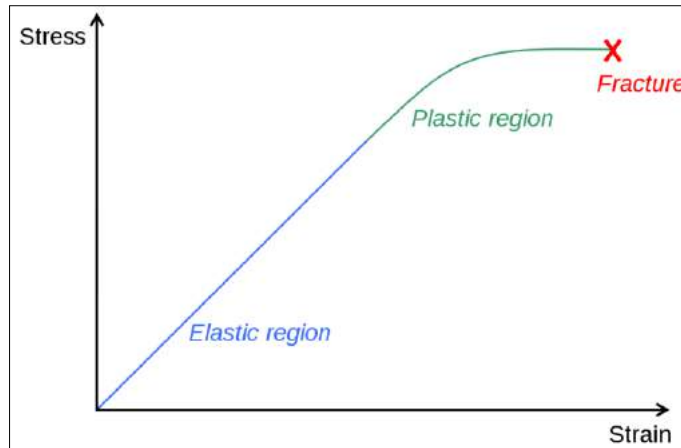
$T_y$  = tegangan yang bekerja pada bidang yang tegak lurus terhadap sumbu y

$T_{xy}$  = tegangan yang bekerja pada bidang yang tegak lurus terhadap sumbu x dan y.

- Modulus Young

Modulus Young merupakan perbandingan antara tegangan dengan regangan suatu batuan selama gaya yang bekerja tidak melampaui batas elastisitasnya. Besar nilai modulus elastisitas dapat ditentukan sebagai perbandingan antara *strain* aksial dengan selisih *strain* aksial, yang diambil pada perbandingan tertentu pada grafis *strain* aksial dihitung pada rata-rata kemiringan kurva dalam kondisi linear, atau

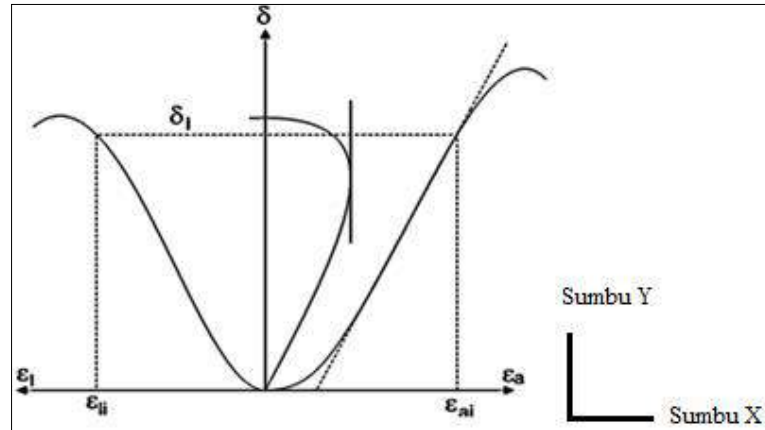
bagian linear yang terbesar di kurva sehingga didapat nilai modulus elastisitas rata-rata dalam hubungan (Kramadibrata, 2000) yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Jika pada suatu material diberi beban yang melebihi kekuatan material itu sendiri maka akan terjadi deformasi, yaitu deformasi plastis jika bentuk pada material tidak dapat kembali ke keadaan semula dan deformasi elastis jika bentuk pada material dapat kembali ke keadaan semula.



Gambar 2.13 Kurva perbandingan antara *strain* pada sumbu-X dengan *stress* pada sumbu-Y  
(Kuswanto dan Wacono, 2006)

- Nisbah Poisson (*Poisson Ratio*)

*Poisson ratio* merupakan perbandingan negatif antara regangan lateral dan regangan aksial. *Poisson ratio* menunjukkan adanya pemanjangan ke arah lateral akibat adanya tegangan dalam arah aksial. Nilai *poisson ratio* didapatkan dari perbandingan antara regangan lateral dan regangan aksial pada kondisi tegangan sebesar  $\sigma_i$ . Harga tegangan ( $\sigma_i$ ) yang diukur pada titik singgung antara grafik tegangan volumetrik dengan garis sejajar sumbu tegangan aksial ketika regangan grafik volumetrik mulai berubah arah (Kuswanto dan Wacono, 2006) yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Pengambilan nilai  $\epsilon_{ai}$  dan  $\epsilon_{li}$  (Kuswanto dan Wacono, 2006)

Keterangan :

$\epsilon_{ai}$  = Tegangan aksial awal pada sumbu-X

$\epsilon_{aj}$  = Tegangan aksial akhir pada sumbu-X

$\epsilon_{li}$  = Tegangan lateral awal pada sumbu-X

$\epsilon_{lj}$  = Tegangan lateral akhir pada sumbu-X

$\delta_1$  = Pertambahan atau pengurangan panjang akhir pada sumbu-Y

$\delta$  = Pertambahan atau pengurangan panjang awal pada sumbu-Y

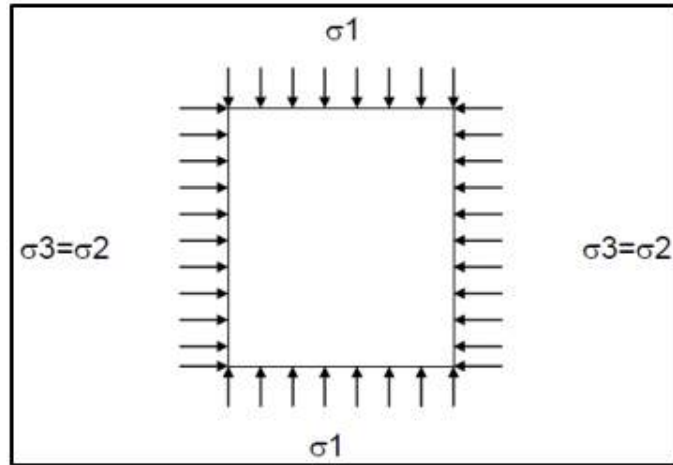
Titik singgung tersebut diproyeksikan tegak lurus sumbu tegangan aksial didapat nilai  $\sigma_i$ . Melalui titik  $\sigma_i$  buat garis tegak lurus ke sumbu tegangan aksial, sehingga memotong kurva regangan aksial dan lateral. Kemudian masing-masing titik potong tersebut diproyeksikan tegak lurus ke sumbu regangan aksial dan lateral sehingga didapatkan nilai  $\epsilon_{aj}$  dan  $\epsilon_{lj}$ . Sehingga dari nilai-nilai tersebut dapat ditentukan besarnya poisson ratio dalam hubungan sebagai berikut :

$$v = \frac{\epsilon_{li}}{\epsilon_{ai}}, \quad \text{pada tegangan } \sigma_i \quad (2.17)$$

#### b. Uji Triaksial

Uji triaksial merupakan pengujian yang terpenting dalam mekanika batuan untuk menentukan kekuatan batuan di bawah tekanan triaksial. Contoh yang digunakan berbentuk silinder dengan syarat-syarat sama pada pengujian kuat tekan seperti pada Gambar 2.15.





Gambar 2.15 Kondisi tekanan pada pengujian triaksial (Kuswanto dan Wacono, 2006)

Hasil pengujian triaksial berupa *strength envelope* (kurva intrinsik), yaitu kurva yang menunjukkan kekuatan batuan terhadap tahanan batuan yang berada di atasnya dengan kohesi dan sudut geser dalam sebagai parameter keruntuhan batuan. Berdasarkan kurva hasil pengujian triaksial tersebut dapat ditentukan parameter kekuatan batuan seperti :

- Kuat geser (*shear strength*)

Kuat geser merupakan gaya tahanan internal yang bekerja per satuan luas massa batuan untuk menahan keruntuhan atau kegagalan sepanjang bidang runtuh dalam massa batuan tersebut.

- Sudut geser dalam ( $\phi$ )

Sudut geser dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya.

- Kohesi (C)

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antara partikel dalam batuan, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi batuan akan semakin besar jika kekuatan gesernya makin besar.

## 2.8 Mekanisme Pecahnya Batuan

Batuan yang diberikan gangguan internal maupun eksternal pada besar kekuatan tertentu akan mengalami pecahnya batuan (Jimeno, 1995). Proses mekanisme pecahnya batuan dibagi berdasarkan tiga tahap, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16 yaitu :

### 1. Proses Pemecahan Tahap Pertama

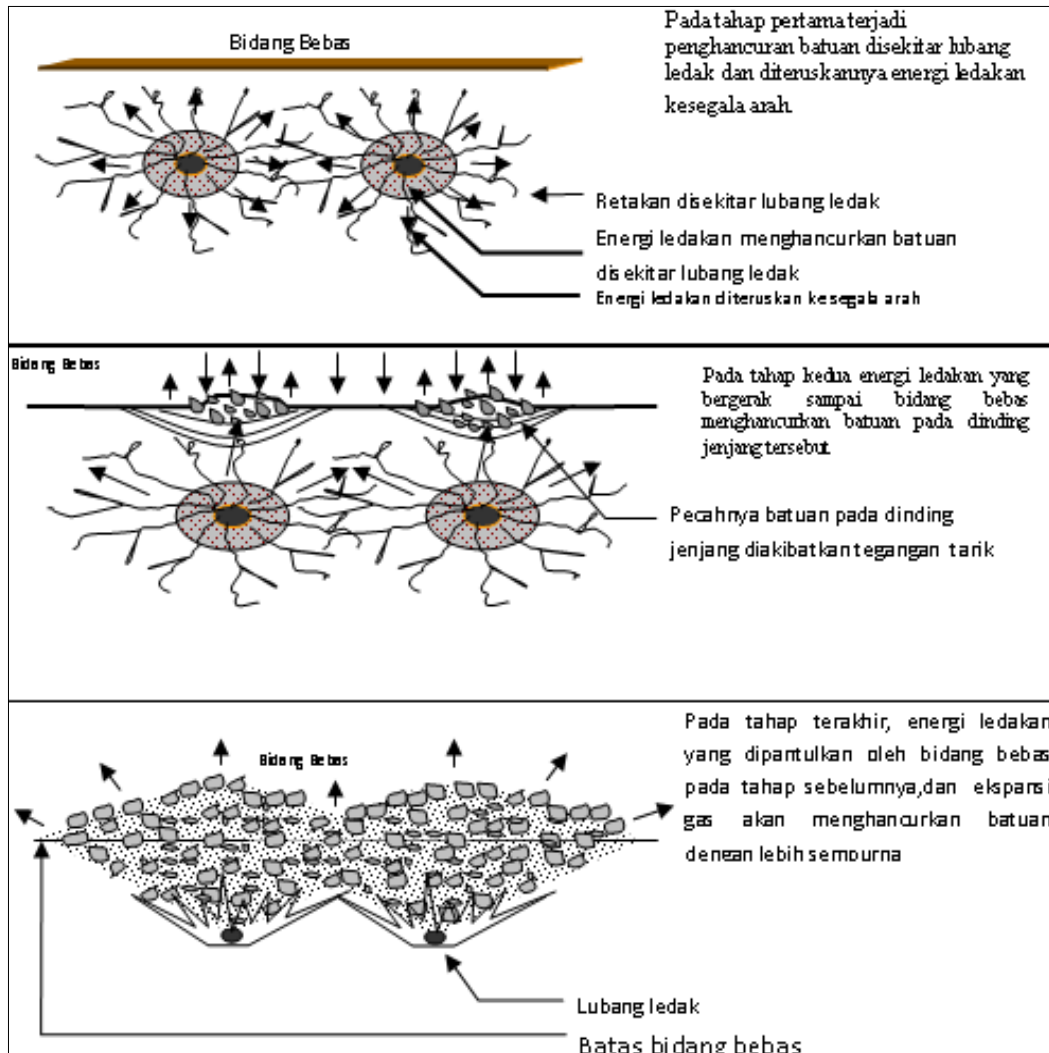
Ketika bahan peledak meledak, tekanan tinggi yang dihasilkan bahan peledak akan menghancurkan batuan didaerah sekitar lubang tembak. *Shock wave* yang merambat meninggalkan lubang tembak akan mengakibatkan tekanan tangensial (*tangential stress*) yang menimbulkan rekahan radial (*radial crack*) yang menjalar dari daerah lubang tembak.

### 2. Proses Pemecahan Tahap Kedua

*Shock wave* yang mencapai bidang bebas akan dipantulkan. Tekanan pada batuan akan turun dengan cepat dan akan berubah menjadi negatif serta menimbulkan gelombang tarik (*tension wave*) yang merambat kembali di dalam batuan.

### 3. Proses Pemecahan Tahap Ketiga

Jika massa batuan di depan lubang tembak gagal mempertahankan posisinya dan bergerak kedepan maka tegangan tekan (*compression stress*) tinggi yang berada dalam batuan akan dilepaskan (*unloaded*), sebagai akibatnya akan timbul tegangan tarik yang besar di dalam massa batuan.



Gambar 2.16 Proses pecahnya batuan akibat *blasting* (Jimeno, 1995)

## 2.9 Kriteria Mohr Coulomb

Kriteria keruntuhan Mohr Coulomb menjelaskan bahwa keruntuhan terjadi akibat adanya kombinasi kritis antara stress normal dan stress geser seperti yang terlihat pada Gambar 2.17. Kriteria Mohr Coulomb didefinisikan sebagai berikut :

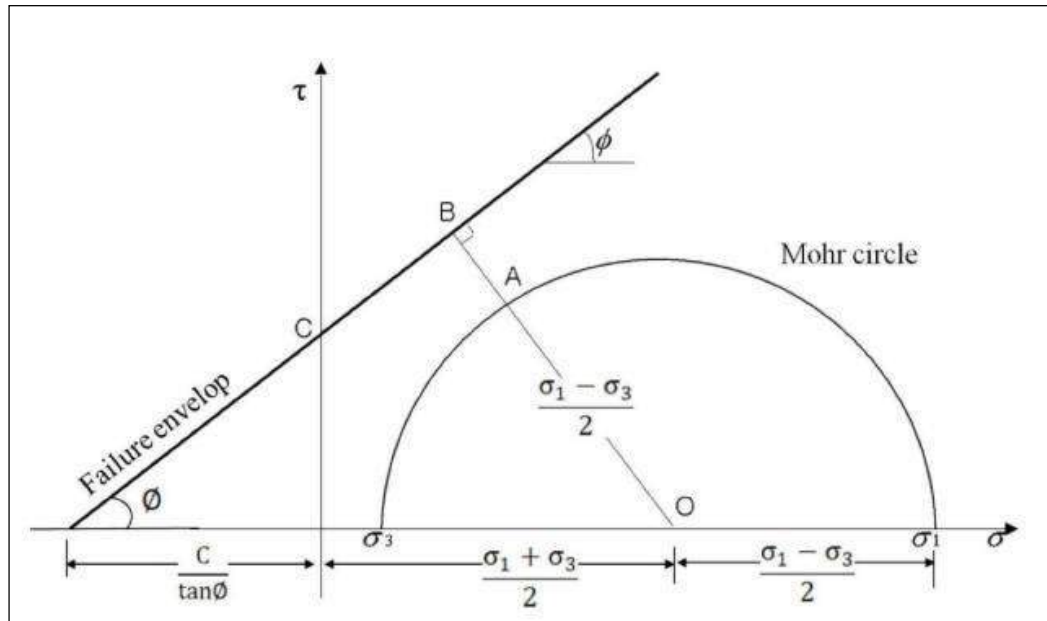
$$\tau = c + \sigma_n \tan \theta \quad (2.18)$$

Keterangan :

$\tau$  = stress geser ( $\text{kN/m}^2$ )

$c$  = kohesi ( $\text{kN/m}^2$ )

$\sigma_n$  = stress normal (kN/m<sup>2</sup>)  
 $\theta$  = sudut geser dalam (°)



Gambar 2.17 Lingkaran Mohr dan kurva intrinsik hasil pengujian triaksial (Das, 1993)

Keterangan :

$\tau$  = stress geser (kN/m<sup>2</sup>)

$c$  = kohesi (kN/m<sup>2</sup>)

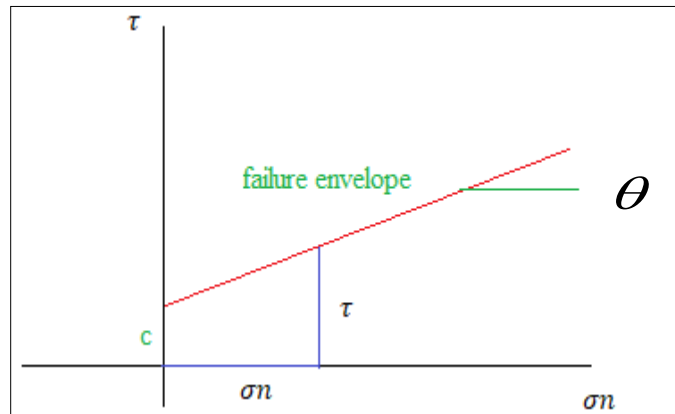
$\sigma$  = stress normal (kN/m<sup>2</sup>)

$\phi$  = sudut geser dalam (°)

OB = jarak dari titik mana saja dari strain geser dengan *failure envelope*

OA = jari – jari lingkaran *mohr*

Parameter yang diukur untuk menentukan tingkat keruntuhan pada suatu batuan diantaranya nilai tegangan geser, kohesi, tekanan normal dan sudut geser dalam. Nilai tersebut memiliki perbedaan di setiap jenis litologi batuan penyusun suatu bidang. Nilai parameter – parameter tersebut didapatkan dari hasil uji laboratorium sifat fisika dan mekanika batuan.



Gambar 2.18 Kriteria Mohr Coulomb (Das, 1988)

FoS ditentukan berdasarkan jarak dari titik pusat lingkaran Mohr ke garis kekuatan batuan (kurva intrinsik) dibagi dengan jari-jari lingkaran Mohr. FoS menyatakan perbandingan keadaan kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja pada batuan tersebut. Dalam penentuan tingkat kestabilan suatu bidang dapat dilihat dari nilai tegangan yang berada di atas atau di bawah garis keruntuhan (*failure envelope*), seperti yang terlihat pada Gambar 2.18. Tegangan yang berada di bawah garis keruntuhan dalam keadaan stabil. Sedangkan keruntuhan terjadi ketika tegangan menyentuh atau melewati garis keruntuhan Mohr Coulomb.

## 2.10 Konsep Nilai *Factor of Safety* Lereng

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat dinyatakan secara sederhana sebagai perbandingan rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak yang bertanggung jawab terhadap kestabilan lereng tersebut. Jika kondisi gaya penahan terhadap beban longsor lebih besar dari gaya penggerak, maka lereng tersebut akan berada dalam kondisi yang stabil (aman). Tetapi apabila gaya penahan lebih kecil dari gaya penggerak, lereng tersebut tidak stabil dan akan berpotensi terjadi longsor.

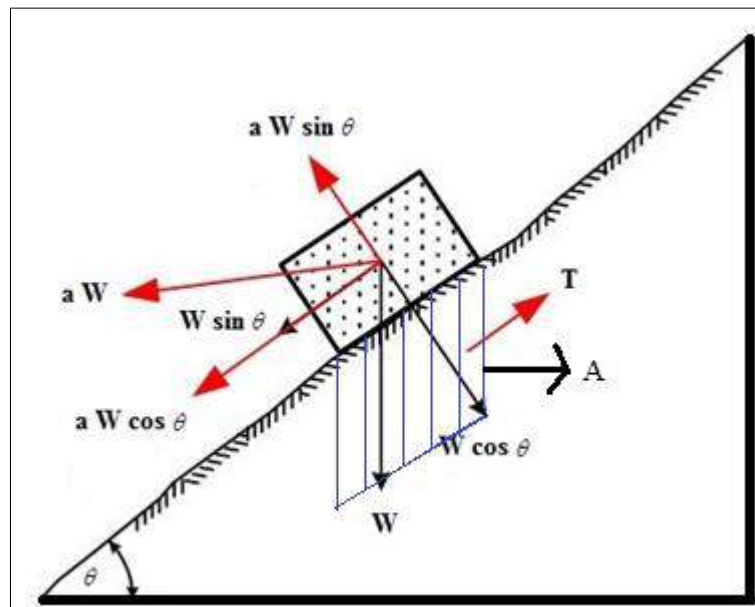
Untuk menyatakan tingkat kestabilan suatu lereng, dikenal dengan istilah FoS yang diperlukan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng untuk mencegah bahaya longsor. Pada dasarnya perhitungan FoS merupakan perbandingan antara gaya yang mendorong dan gaya yang menahan pada tubuh lereng.

Kestabilan lereng berdasarkan FoS dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{FoS} &= \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya penggerak}} \\
 &= \frac{F^*}{F} \\
 &= \frac{\text{Kekuatan geser}}{\text{Gaya penggerak}} \\
 &= \frac{F^*/A}{F/A} \\
 &= \frac{\tau^*}{\tau}
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Keterangan :

- $F^*$  = gaya penahan (kN/m<sup>2</sup>)
- $F$  = gaya penggerak (kN/m<sup>2</sup>)
- $\tau^*$  = kekuatan geser (kN/m<sup>2</sup>)
- $\tau$  = gaya penggerak (kN/m<sup>2</sup>)
- $A$  = luasan area bidang (m<sup>2</sup>)



Gambar 2.19 Gaya kesetimbangan batas pada suatu lereng (Arif, 2016)

Pada perhitungan kesetimbangan batas, dapat diasumsikan bahwa gaya berat ( $W \sin \alpha$ ) yang menyebabkan longsor sama dengan gaya penahan ( $T$ ), seperti yang

terlihat pada gambar 2.19. Sudut  $\theta$  merupakan sudut yang dibentuk oleh bidang gelincir dengan bidang horizontal.

$$\text{Kekuatan Geser} = c + \sigma_n \tan \theta \quad (2.20)$$

$$\sigma_n = \frac{(W \cos \alpha - m.a \sin \alpha)}{A} \quad (2.21)$$

Sehingga akan diperoleh persamaan kesetimbangan sebagai berikut:

$$W \sin \alpha = T \quad (2.22)$$

$$W \sin \alpha = T(\text{gaya geser})A \quad (2.23)$$

$$W \sin \alpha = \frac{1}{\text{FoS}} (c A + \sigma_n \tan \theta) \quad (2.24)$$

Dengan perhitungan lebih rinci didapatkan FoS sebagai berikut:

$$\text{FoS} = \frac{c.A + \sigma_n .A.tan \theta}{W \sin \alpha} = \frac{c.A + W \cos \theta}{W \sin \alpha} \quad (2.25)$$

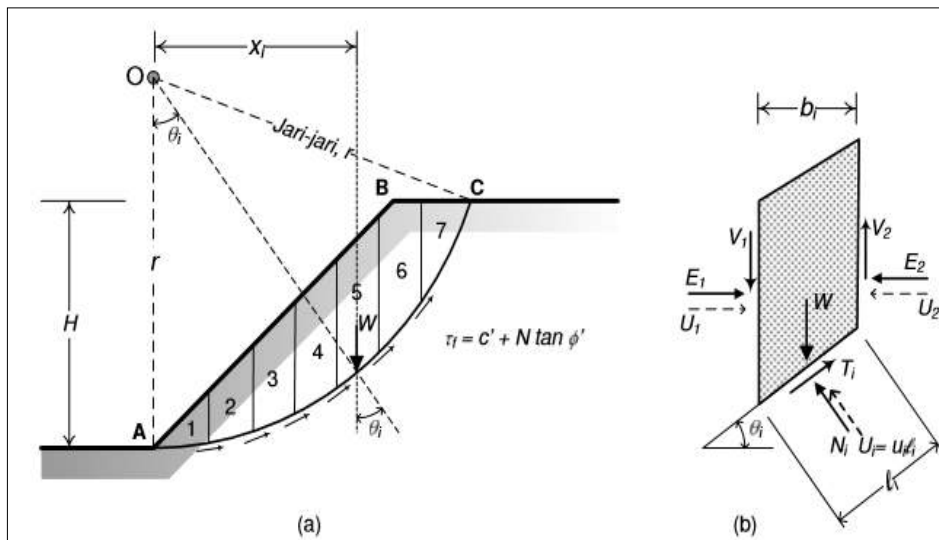
Keterangan :

- c = kohesi (kN/m<sup>2</sup>)
- A = luasan bidang lereng (m<sup>2</sup>)
- $\sigma_n$  = tekanan normal (kN/m<sup>2</sup>)
- W = beban pada lereng (N/m)
- $\theta$  = sudut geser dalam (°)
- a = percepatan maksimum (Gal)

## 2.11 Metode Bishop Disederhanakan (*Simplified Bishop Method*)

Metode Bishop Disederhanakan (*Simplified Bishop Method*) menganggap bahwa gaya-gaya geser di samping irisan adalah sama dan saling berlawanan arah,  $V_1 = V_2$ . Tetapi gaya-gaya normal pada irisan tidak sama besarnya,  $E_1 \neq E_2$ . Gaya -

gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan pada arah vertikal memiliki resultan nol (Hardiyatmo, 2010).



Gambar 2.20 Gaya-gaya yang bekerja pada irisan (Hardiyatmo, 2010)

Titik lingkaran longsor kritis dari *Simplified Bishop Method*, biasanya mendekati dengan hasil pengamatan di lapangan. Metode ini mengasumsikan bahwa bidang longsor berbentuk busur (lingkaran) dan dibagi menjadi beberapa irisan. Semakin banyak irisan yang dihitung maka semakin tinggi tingkat ketelitiannya yang terlihat pada Gambar 2.20.

Perhitungan Nilai *Factor of Safety* melibatkan parameter yang diukur untuk menentukan tingkat keruntuhan pada suatu batuan diantaranya nilai tegangan geser, kohesi, tekanan normal dan sudut geser dalam. Kemudian untuk Perhitungan nilai FoS dengan pengaruh eksternal *blasting* melibatkan masukan parameter *seismic load*.

Persamaan nilai FoS tanpa pengaruh eksternal *blasting*:

$$\text{FoS} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \theta'] \left( \frac{1}{\cos \theta (1 + \tan \theta \tan \theta' / \text{FoS})} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta} \quad (2.26)$$

Untuk nilai FoS dengan pengaruh eksternal *blasting*, maka :



$$FoS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \theta'] \left( \frac{1}{\cos \theta (1 + \tan \theta \tan \theta' / FoS)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} (W_i \sin \theta + seismicload)} \quad (2.27)$$

Dimana :

FoS = *Factor of Safety*

C' = kohesi tanah efektif

$\theta'$  = sudut gesek dalam

b<sub>i</sub> = lebar irisan ke – i

W<sub>i</sub> = lebar irisan tanah ke – i

$\theta$ <sub>i</sub> = sudut geser dalam

u<sub>i</sub> = tekanan air pori pada irisan ke – i

*Seismic load* = amaks (Gal)

Persamaan (2.26) dan (2.27) memuat variabel FoS pada bagian kiri dan kanan persamaan. Dalam perhitungannya dengan menggunakan nilai iterasi dengan cara memasukan nilai FoS di sebelah kiri hasilnya harus sama dengan nilai FoS sebelah kanan. Kemudian untuk menentukan nilai FoS dengan pengaruh esksernal *blasting* dapat dilakukan perhitungan dengan formulasi persamaan

## 2.12 Rekayasa Geoteknik

Geoteknik bertujuan untuk kepentingan manusia dalam mencapai keberhasilan pembangunan fisik infrastruktur yang kuat dan aman dari ancaman kerusakan. Rekayasa geoteknik dipengaruhi banyak hubungan yang disebabkan oleh perilaku alamiah dari material tanah dan batuan. Material tersebut mengandung banyak material yang berbeda. Tanah dan batuan merupakan material heterogen yang memiliki sifat material yang bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lain. Pentingnya tambahan koreksi empiris agar hasil yang diperoleh mendekati sebenarnya. Perilaku material tanah dan batuan dikontrol oleh keadaan geologi, pengaruh air, panas, getaran baik secara alami akibat adanya peristiwa alam seperti gempa bumi maupun getaran yang dihasilkan oleh aktivitas *blasting* pada pertambangan *open pit*.

### 2.13 Analisis Numerical Modelling FLAC3D

FLAC3D merupakan perangkat lunak pemodelan *finite element* yang memungkinkan untuk melakukan segala macam analisis deformasi tingkat lanjut yang mempertimbangkan hubungan tekanan dengan tegangan. *Finite Element Method* merupakan metode yang menyelesaikan suatu masalah dengan cara membagi obyek analisa menjadi bagian - bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan daerah.

Pembebanan yang dihasilkan oleh aktivitas *blasting* akan mengakibatkan terganggunya keadaan awal *stress* di kedua arah yaitu arah lateral dan arah aksial. Aktivitas *blasting* akan menghasilkan *stress* baru yang mengakibatkan deformasi yang ditunjukkan. Untuk mengukur perubahan regangan dan tegangan yang bekerja pada *highwall* sangat sulit dilakukan dengan menggunakan pendekatan empiris. Oleh karena itu, *numerical modelling* telah banyak digunakan untuk analisis tegangan dan regangan karena kesederhanaan dan efisiensinya. Penggunaan *numerical modelling* akan memiliki hasil perkiraan yang memenuhi kondisi lapangan dengan kondisi kompleks. Saat menjalankan kode FLAC3D, formulasi dalam mekanisme persamaan gerak (*equation of motion*) yang bekerja adalah :

$$\nabla \cdot \sigma + \rho m \cdot g = \rho m \frac{dv}{dt} \quad (2.28)$$

Keterangan :

$\sigma$  = Tensor tegangan total (Pa)

$\rho m$  = Kepadatan rata – rata massa batuan (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

$\frac{dv}{dt}$  = Differensial kecepatan per waktu

Pergerakan bekerja secara iteratif berdasarkan hukum *stress-strain*. *Stress-strain* tambahan yang dihasilkan selama pergerakan dalam waktu tertentu diatur oleh sifat dasar elastis atau elasto-plastik, yang dapat ditulis dalam formulasi sebagai berikut :

$$\Delta \sigma^t = \mathbf{H}(\sigma^t, \dot{\epsilon} \Delta t) \quad (2.29)$$

Keterangan :

- $\sigma^t$  = Transpos tensor tegangan total
- $H$  = Fungsi material
- $\dot{\epsilon}$  = *Infinitesimal strain-rate* tensor
- $t$  = Waktu (detik)

Dimana  $H$  merupakan fungsi material,  $\dot{\epsilon}$  merupakan *infinitesimal strain-rate* tensor dan  $\Delta t$  merupakan *time increment*. Persamaan (2.29) berlaku untuk regangan kecil. FLAC3D menggunakan formulasi regangan besar tetapi dapat dilakukan koreksi tegangan tensor untuk tegangan rotasi.

Dalam mekanika kontinum, teori *Infinitesimal strain* merupakan pendekatan matematis untuk deformasi benda padat di mana perpindahan partikel material diasumsikan jauh lebih kecil daripada dimensi *body* yang relevan. Sehingga geometri dan sifat konstitutif material (seperti kekuatan dan kekakuan) pada setiap titik ruang dapat diasumsikan tidak berubah oleh deformasi. *Infinitesimal strain-rate* ( $\dot{\epsilon}$ ) dan *Infinitesimal strain* ( $\epsilon$ ) memiliki batas yang dinyatakan dalam persamaan :

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} (\nabla V + (\nabla V)^{tr}) \quad \epsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^{tr}) \quad (2.30)$$

Keterangan:

- $\dot{\epsilon}$  = *Infinitesimal strain-rate* tensor
- $V$  = Kecepatan (m/s)
- $\epsilon$  = *Infinitesimal strain*
- $u$  = Perpindahan (m)
- tr = Transpos dari tensor

Dimana tr menunjukkan transpos dari tensor. Dalam FLAC3D, persamaan kontinum didiskritisasi dalam ruang menggunakan *finite difference* urutan pertama dan pendekatan diskritisasi campuran khusus. Dalam pendekatan ini, *finite difference* diturunkan dengan menggunakan elemen laju regangan konstan bentuk tetrahedral, yang kemudian disalut untuk membentuk elemen zona akhir. Teknik

*overlay* diperlukan untuk menyediakan lebih banyak mode deformasi selama aliran plastik. Derivatif waktu didiskritisasi menggunakan formulasi beda hingga eksplisit, yang mengarah ke bentuk persamaan gerak berikut:

$$V_i\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = V_i\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t}{m} \sum_i F_i^t \quad (2.31)$$

Keterangan :

$V_i$  = Kecepatan di-i

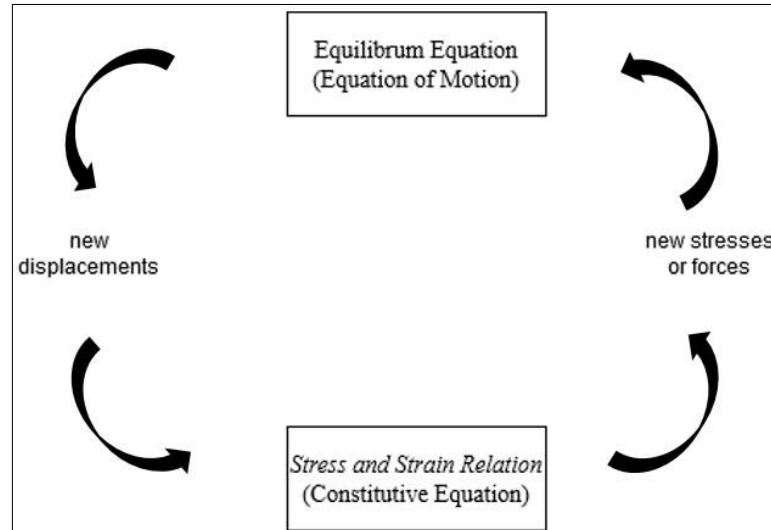
$t$  = Waktu (detik)

$\frac{\Delta t}{m}$  = Differensial waktu per rata – rata (detik)

$F_i^t$  = Gaya di-i (N)

Dimana  $V$  menunjukkan kecepatan nodal,  $m$  adalah massa nodal yang terpusat dan  $F$  adalah kekuatan nodal. Dalam FLAC3D, perhitungan dinamis eksplisit dasar beralih antara penyelesaian persamaan gerak dan persamaan konstitutensi *stress-strain* menggunakan *step* waktu yang cukup kecil untuk memastikan stabilitas numerik. Dalam satu *step* waktu, persamaan gerak pertama kali digunakan untuk menghitung kecepatan baru berdasarkan kecepatan dan gaya sebelumnya. Kecepatan nodal kemudian digunakan untuk menurunkan laju regangan dan tegangan baru, yang pada gilirannya digunakan untuk memperbarui vektor gaya. Persamaan (2.31) merupakan solusi akhir ketika *body* atau model berada dalam kesetimbangan atau *steady-state flow (plastic flow)*, dan gaya yang tidak seimbang menjadi nol.

FLAC3D memanggil persamaan gerak dan hubungan konstitutif untuk menggambarkan deformasi dari masalah yang diberikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.21. Estimasi kecepatan dan perpindahan dari gaya dan tegangan diperkirakan menggunakan persamaan gerak dinamis. Beban dinamis bervariasi dengan cepat dalam besarnya, arah, atau posisi terhadap waktu.



Gambar 2.21 Calculation cycle of FLAC3D program

FLAC3D dalam menjalankan pemodelan menggunakan bahasa pemrograman *built-in*, FISH (FLACish) yang memungkinkan pengguna untuk mendefinisikan variabel dan fungsi baru sehingga pengguna dapat menyesuaikan analisis sesuai dengan kebutuhan.