

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Prinsip Dasar Analisis Kestabilan Lereng

Kestabilan lereng, baik lereng alami maupun lereng buatan manusia, dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dinyatakan secara sederhana sebagai gaya-gaya penahan dan gaya-gaya penggerak yang bertanggung jawab terhadap kestabilan lereng tersebut. Pada kondisi gaya penahan terhadap longsor lebih besar dari gaya penggerak, lereng tersebut akan berada dalam kondisi yang stabil (aman). Namun, apabila gaya penahan terhadap longsor lebih kecil dari gaya penggerak, lereng tersebut tidak stabil dan akan terjadi longsor. Sebenarnya, longsor merupakan suatu proses alami yang terjadi untuk mendapatkan kondisi kestabilan lereng yang baru (keseimbangan baru), dimana gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak.

Faktor yang berpengaruh terhadap stabilitas atau kelongsoran lereng, menurut penulis (Suratha, 1994) dapat dikelompokkan menjadi 5 faktor utama, yaitu sebagai berikut :

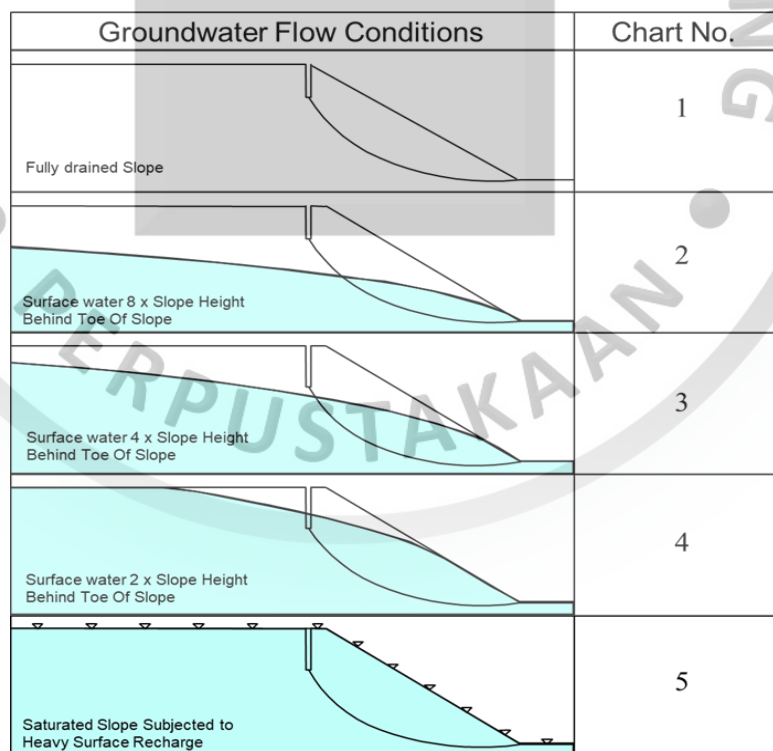
a. Geometri lereng

Hal ini berpengaruh pada stabilitas lereng dengan parameter diantaranya meliputi tinggi, lebar, sudut kemiringan lereng dll seperti pada Gambar 3.3.

b. Sifat fisik dan sifat mekanik.

Sifat fisik yang mempengaruhi kemantapan lereng adalah bobot isi, *density*, porositas dan kandungan air. Sifat mekanik yang juga mempengaruhi kemantapan lereng diantaranya kuat tekan, kuat tarik, kuat geser, kohesi dan sudut geser.

- c. Arah umum struktur diskontinuitas massa batuan lereng terhadap orientasi muka lereng bukaan tambang. Struktur batuan yang sangat mempengaruhi kemantapan lereng adalah bidang sesar, perlapisan dan rekahan. Struktur batuan tersebut merupakan bidang lemah dan sekaligus sebagai tempat merembesnya air.
- d. Faktor luar sistem lereng,
Faktor ini dapat berupa beban luar (sarana prasarana tambang) dan getaran (gempa bumi atau akibat peledakan tambang).
- e. Air tanah
Dalam massa batuan pada lereng secara kajian hidrogeologi memiliki nilai dan kemampuan untuk menyangkan dan mengalirkan air yang berpengaruh terhadap kondisi sifat fisik dan material bahan galian.



Sumber : "Rock Slope Engineering" (Hoek, 1981)

Gambar 3. 1
Tipikal kondisi muka air tanah

3.2 Penyelidikan Geoteknik

Dalam penyelidikan geoteknik untuk mendapatkan data yang lengkap dan representatif dari suatu kegiatan geoteknik tambang harus direncanakan dengan baik. Penyelidikan ini dilakukan untuk mendapatkan sifat fisik dan sifat mekanik batuan yang mewakili kondisi batuan di lokasi penyelidikan.

Kegiatan utama dalam penyelidikan geoteknik untuk mendukung desain tambang terbuka adalah "Pengeboran Geoteknik". Hal ini dilakukan pada area yang belum atau sudah tersingkap (terbuka), seiring dengan akan dibuka penggalian penambangan, pengeboran geoteknik permukaan bertujuan untuk mendapatkan data informasi tambahan tentang kondisi massa batuan di lapangan sehingga diketahui input parameter kekuatan batuan yang nanti akan digunakan ketika pemodelan dan analisis geoteknik.

Pada tanah atau batuan dalam keadaan tidak terganggu (alamiah) telah bekerja tegangan - tegangan vertikal, horizontal dan tekanan air pori. Ketiga hal di atas mempunyai peranan penting dalam membentuk kestabilan lereng. Sedangkan tanah atau batuan sendiri mempunyai sifat mekanik asli tertentu, seperti sudut geser dalam (*angle of internal friction*), gaya kohesi dan bobot isi yang juga sangat berperan dalam menentukan kekuatan batuan/tanah dan juga mempengaruhi kemantapan lereng. Oleh karena itu dalam usaha melakukan analisis kemantapan lereng harus diketahui dengan pasti sistem tegangan yang bekerja pada tanah atau batuan dan juga sifat-sifat fisik aslinya. Data tersebut kemudian dianalisis kekuatan tanah atau batuan tersebut jika dilakukan penggalian atau penimbunan. Baru kemudian bisa ditentukan geometri dari lereng yang diperbolehkan atau cara-cara lain yang berguna untuk membantu agar lereng tersebut menjadi stabil.

3.3 Deskripsi Bor Geoteknik

Pada pengeboran geoteknik deskripsi bor ditujukan untuk mendapatkan data dan informasi tentang kondisi fisik, mekanik dan karakterisasi massa batuan. Deskripsi geoteknik inti bor biasanya bersamaan dengan kegiatan *Sampling* geoteknik. Kegiatan *Sampling* bertujuan untuk mendapatkan sampel tidak terganggu untuk kemudian diuji di laboratorium geomekanik agar diperoleh sifat fisik dan sifat mekanik batuan utuh yang mewakili lokasi tersebut.

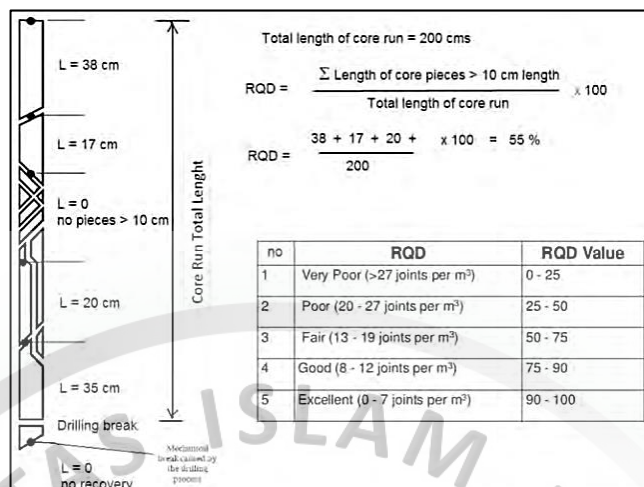
Beberapa teknik dan tatacara deskripsi telah dikembangkan dan distandarkan, diantaranya adalah standar ISRM (*International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*) yang berkaitan dengan perilaku fisik dan mekanik batuan serta massa batuan. Salah satu sistem klasifikasi yang telah digunakan cukup luas untuk bidang geoteknik adalah sistem *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989). Sistem ini mengelompokkan kualitas massa batuan dengan cara memberi pembobotan atau *rating* terhadap parameter - parameter dasar batuan yang diamati. Terdapat 5 (lima) parameter utama yang dikumpulkan untuk mendukung klasifikasi sistem ini, yaitu :

a) *Strength of Intact Rock* (kekuatan batuan utuh)

Data kekuatan batuan utuh dapat diperoleh melalui uji kuat tekan di laboratorium, dan dapat juga melalui penyelidikan/pengamatan di lapangan. Kekuatan batuan di lapangan diperkirakan dengan penentuan *strength index*.

b) RQD (*Rock Quality Designation*)

RQD dimaksudkan untuk mengetahui sampai sejauh mana batuan di bawah permukaan telah mengalami retakan alami. Semakin tinggi nilai RQD maka batuan diindikasikan sebagai semakin masif, sebaliknya jika nilai RQD kecil, maka batuan di bawah permukaan telah mengalami pengkekar, rekahan dan remukan yang cukup intens. RQD ditentukan dari sample bor dengan teknik pengukuran dan contoh perhitungannya seperti (Gambar 3.2) berikut :



Sumber : "The RQD index in practice" (Deere, 1989)

Gambar 3. 2
Teknik pengukuran RQD

c) *Spacing of Discontinuities* (Jarak Antar Kekar)

Dari inti bor, spasi kekar ditentukan dengan cara menghitung banyaknya kekar dalam satu *run* pengeboran, yaitu dengan cara panjang *run* dibagi banyaknya kekar.

d) *Condition of Discontinuities* (Kondisi Bidang Diskontinyu)

Kondisi kekar yang diamati adalah kemenerusan kekar (*persistence/length*), lebar rekahan (*separation*), kekasaran bidang (*roughness*), kekerasan dan lebar material isian (*gouge/infilling material*), dan kondisi pelapukan bidang kekar (*weathering*).

e) *Groundwater Condition* (Kondisi Air Tanah)

Air tanah memiliki pengaruh yang besar pada perilaku massa batuan. Air yang mengisi kekar akan meningkatkan tekanan hidrostatik sehingga mempengaruhi kestabilan lereng. Dalam perhitungan RMR, yang dimaksud dengan kondisi air tanah adalah ada atau tidaknya airtanah yang keluar dari dinding lereng dan bukan dari lubang bor. Jenis kategori kondisi air tanah meliputi *compeletely dry* (sangat kering), *damp* (lembab), *wet* (basah), *dripping* (menetes), dan *flowing* (mengalir).

3.4 Sifat Fisik Dan Sifat Mekanik Batuan

Sifat fisik dan sifat mekanik batuan merupakan faktor utama yang mempengaruhi proses yang terjadi didalam massa batuan setelah batuan tersebut digali pada suatu kegiatan penambangan.

3.4.1 Sifat Fisik

Sifat fisik batuan merupakan suatu sifat yang dimiliki batuan yang dapat diukur atau dapat dipersepsikan tanpa mengubah identitas yang dimiliki oleh suatu batuan. Sifat fisik disini bisa berupa sifat intensif ataupun sifat ekstensif yang mengandung arti masing - masing, pada sifat intensif merupakan sifat yang tidak memiliki ketergantungan pada ukuran dan jumlah materi pada suatu batuan, sedangkan pada sifat ekstensifnya bergantung kepada ukuran dan juga jumlah materi pada suatu batuan tersebut. Pada geoteknik, "sifat fisik batuan dapat di tentukan dengan pengujian, meliputi bobot isi asli (*natural density*), bobot isi kering (*dry density*), bobot isi jenuh (*saturated density*), berat jenis semu (*apparent specific gravity*), porositas (*n*) dan *void ratio* (*e*)" (Rai, 2013).

- Bobot Isi (*Density*)

Bobot isi akan mempengaruhi besarnya beban pada permukaan bidang longsor, sehingga semakin besar bobot isi maka gaya penggerak yang menyebabkan lereng longsor akan semakin besar.

- Bobot isi asli (*natural density*)

$$\rho_n = \frac{W_n}{W_w - W_s} \dots \dots \dots (3.1)$$

- Bobot isi kering (*dry density*)

$$\rho_d = \frac{W_o}{W_w - W_s} \dots \dots \dots (3.2)$$

- Bobot isi jenuh (*saturated density*)

$$\rho_s = \frac{W_w}{W_w - W_s} \dots \dots \dots (3.3)$$

- Porositas (n)

Porositas berkaitan dengan ukuran butir batuan karena berpengaruh terhadap rongga pada batuan tersebut, sehingga batuan atau tanah yang mempunyai porositas besar akan banyak menyerap air maka bobot isinya menjadi lebih besar, sehingga akan memperkecil kemantapan lereng.

$$n = \frac{W_w - W_o}{W_w - W_s} \times 100\% \dots \dots \dots (3.4)$$

Keterangan :

W_n : Berat contoh asli

W_w : Berat contoh jenuh

W_s : Berat contoh jenuh tergantung dalam air

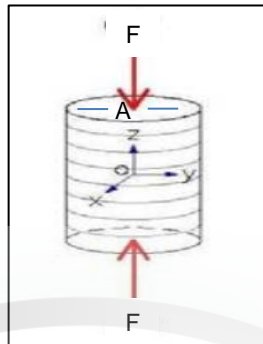
W_o : Berat contoh kering

3.4.2 Sifat Mekanik

Sifat Mekanik batuan merupakan sifat yang berkaitan tentang karakteristik, perilaku respon massa batuan akibat adanya perubahan keseimbangan medan gaya disekitarnya baik dari aktivitas manusia maupun alamiah. Karakteristik mekanik suatu batuan diperoleh dari pengujian meliputi kuat tekan batuan (σ_c), kuat geser (τ) sehingga menghasilkan nilai kekuatan batuan, *modulus young*, *nisbah poisson*, kohesi (C), dan sudut gesek dalam (ϕ).

- Kuat Tekan (σ_c)

Kuat tekan pada batuan merupakan jumlah tegangan maksimum yang dapat ditanggung suatu sampel batuan (*core*) pada permukaan/penampangnya sesaat sebelum contoh tersebut hancur. Hal dilakukan untuk mengetahui klasifikasi kekuatan dan karakterisasi batuan utuh (Wijaksana, 2017).



Sumber: Wijaksana, 2017

Gambar 3. 3
Ilustrasi Kuat Tekan

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (3.5)$$

Keterangan :

σ_c : Kuat tekan (Pa)

F : Gaya tekan (N)

A : Luas Permukaan bidang tekan (m²)

- Sudut Gesek Dalam (ϕ)

Sudut gesek dalam adalah komponen kuat geser batuan atau tanah akibat geseran antara partikel (Das, 2010).

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \dots \dots \dots (3.8)$$

Keterangan :

ϕ : Sudut gesek dalam (°)

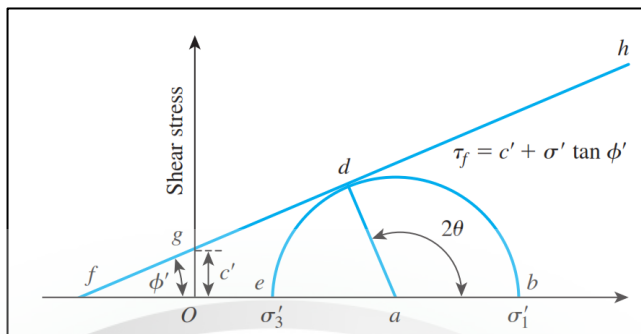
σ_1 : Tegangan efektif maksimum saat batuan runtuh (Pa)

σ_3 : Tegangan efektif minimum saat batuan runtuh (Pa)

- Kohesi (c)

Kohesi adalah kuat geser batuan atau tanah akibat gaya tarik antar partikel.

Semakin besar kohesi dan sudut geser dalam, maka kekuatan geser batuan atau tanah akan semakin besar juga (Das, 2010).



Sumber: "Principles of Geotechnical Engineering" (Das, 2017)

Gambar 3. 4
keruntuhan dan lingkaran mohr-coloumb

$$c' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)}{2 \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)} \dots\dots\dots(3.7)$$

Keterangan :

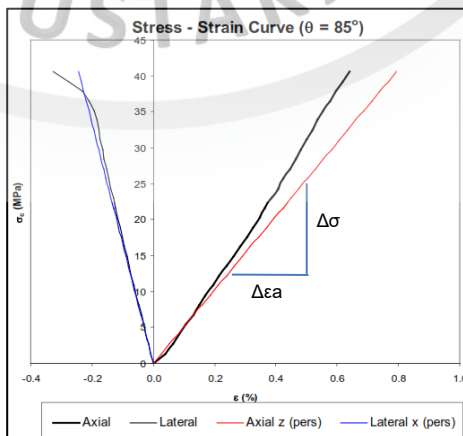
c : Kohesi (Pa)

σ₁ : Tegangan efektif maksimum saat batuan runtuh (Pa)

σ₃ : Tegangan efektif minimum saat batuan runtuh (Pa)

- Modulus Young (E)

Modulus Young adalah kemampuan batuan untuk mempertahankan kondisi elastisitasnya, pada contoh batuan yang diberi gaya tekan akan mengalami beberapa tahapan deformasi yakni deformasi elastic dan deformasi plastik (Wijaksana, 2017).



Sumber: Wijaksana, 2017

Gambar 3. 5
Grafik hubungan tegangan dan regangan

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_a} \dots\dots\dots(3.9)$$

Keterangan :

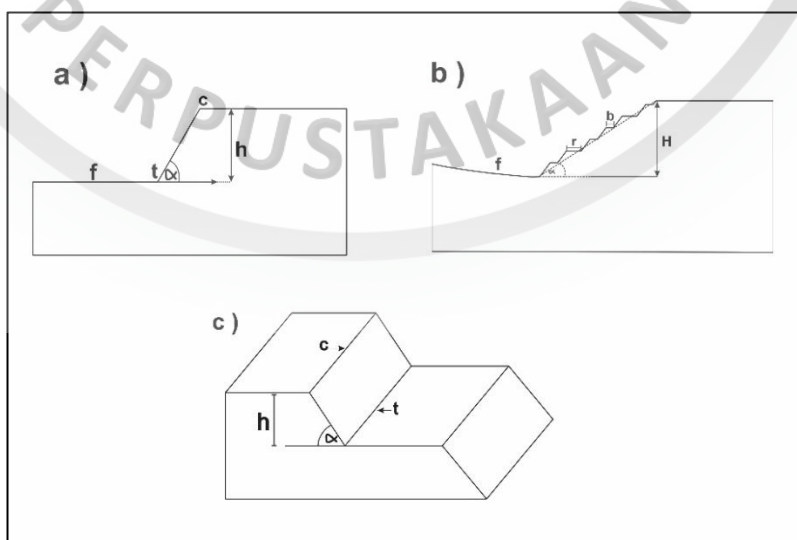
E : Modulus young (Pa)

$\Delta\sigma$: Beda tegangan (Pa)

$\Delta\epsilon_a$: Beda regangan aksial (%)

3.5 Rancangan Lereng Tambang

Lereng merupakan bagian permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horisontal. Lereng dapat terbentuk secara alamiah karena proses geologi atau dibuat oleh kegiatan manusia seperti lereng tambang dan timbunan. Lereng tambang terdiri dari susunan tangga yang dibuat untuk menunjang aktivitas penambangan endapan bahan galian untuk mendapatkan material bahan galian di lokasi tersebut. Jenjang ini direncanakan sebagai ruang kegiatan penambangan terbuka sehingga dapat menambang dalam level kedalaman tertentu. Adapun unsur-unsur suatu jenjang pada Gambar 3.3 sebagai berikut :



Sumber : Analisis Kemantapan Lereng (Sulistijo,2002)

Gambar 3. 6
Unsur-Unsur Suatu Jenjang (a) lereng tunggal, (b) lereng keseluruhan, dan (c) lereng tampak 3D

Keterangan :

- h = Tinggi jenjang
- α = Sudut lereng
- t = *Toe* lereng
- c = *Crest* lereng
- f = Lantai (*floor*)
- r = Ramp
- b = Berm

3.5.1 Lereng Galian Tambang

Lereng galian Tambang merupakan lereng yang terbentuk akibat aktivitas manusia dalam penggalian material tambang. Parameter yang mempengaruhi kestabilan lereng tambang yaitu sudut gesek dalam, berat satuan batuan, tekanan air pori dan geometri lereng. Tujuan dari rancangan galian adalah untuk menentukan tinggi dan sudut kemiringan lereng yang optimum sehingga lereng tetap stabil dalam jangka waktu yang diinginkan. Lamanya kondisi kestabilan lereng yang harus dipenuhi ditentukan oleh apakah galian bersifat permanen atau sementara, pekerjaan perawatan yang dirancang pada lereng serta pemantauan kondisi kestabilan yang dipasang pada lereng.

Lereng galian dapat dibuat dengan sudut kemiringan tunggal maupun menggunakan sudut kemiringan yang bervariasi sesuai dengan tipe material yang digali. Misalnya untuk lereng yang terdiri dari material tanah dan batuan, sudut kemiringan lereng batuan dapat dibuat lebih terjal daripada lereng tanah. Penggalian lereng juga dapat dilakukan secara berjenjang dengan menggunakan *berm* untuk setiap interval ketinggian. Apabila penggalian dilakukan secara berjenjang maka harus dilakukan analisis untuk kestabilan lereng secara keseluruhan maupun lereng tunggal pada setiap jenjang.

Bentuk longsor yang terjadi pada galian dengan material yang homogen biasanya berupa sebuah busur lingkaran. Untuk galian pada material yang tidak homogen bentuk longsorannya akan dipengaruhi oleh distribusi kekuatan geser dalam lereng dan biasanya bidang runtuhnya bukan berupa sebuah busur lingkaran. Kondisi kestabilan lereng galian akan bervariasi dari waktu ke waktu baik pada saat proses konstruksi maupun setelah pekerjaan konstruksi selesai. Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan tekanan air pori, tegangan geser dan pembebanan pada lereng yang mengakibatkan perubahan kekuatan geser material.

3.5.2 Lereng Timbunan Tambang

Lereng Timbunan merupakan lereng yang terbentuk akibat aktivitas manusia untuk menimbun material yang telah digali. Parameter yang mempengaruhi kestabilan timbunan yaitu: sudut gesek dalam, berat satuan tanah, tekanan air pori dan geometri lereng. Analisis kestabilan lereng timbunan biasanya lebih mudah dan mempunyai ketidakpastian yang lebih rendah dari pada lereng alami dan galian. Hal ini disebabkan karena material yang digunakan untuk timbunan dapat dikontrol dengan baik.

Tekanan air pori yang diakibatkan oleh rembesan akan mengurangi kestabilan timbunan, seringkali dalam analisis diasumsikan muka air tanah berada pada permukaan lereng dan rembesan sejajar dengan permukaan lereng. Kondisi ini biasanya terjadi pada hujan yang sangat deras dan lama. Kestabilan timbunan akan berfluktuasi selama proses konstruksi dilakukan dan juga setelah konstruksi selesai. Hal ini diakibatkan karena perubahan kekuatan geser material pada timbunan yang disebabkan oleh perubahan tekanan air pori dan perubahan beban yang bekerja pada timbunan.

Kestabilan lereng timbunan akan berkurang apabila tinggi timbunan dinaikkan karena lereng akan semakin tinggi dan beban pada pondasi juga bertambah. Sebagai

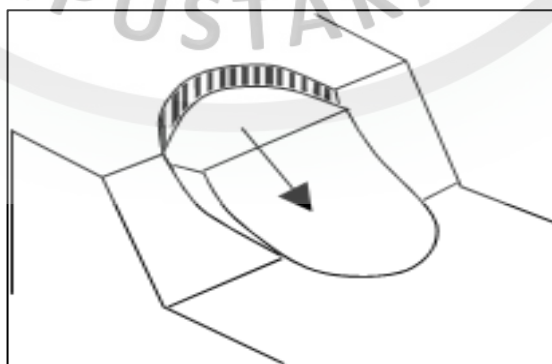
akibatnya maka kestabilan jangka pendek atau kestabilan pada akhir konstruksi timbunan biasanya merupakan kondisi kestabilan yang paling kritis dan lebih menentukan daripada kestabilan jangka panjang. Setelah timbunan selesai dibuat maka faktor keamanan akan bertambah seiring dengan bertambahnya umur timbunan karena adanya konsolidasi pada timbunan dan berkurangnya tekanan air pori sehingga kekuatan geser timbunan akan bertambah.

3.6 Jenis-Jenis Longsoran Pada Lereng Tambang

Lereng tambang yang tidak stabil akan mengalami longsoran sampai lereng tersebut menemukan kestimbangan yang baru dan menjadi stabil. Jenis-jenis longsoran yang sering terjadi pada lereng tambang adalah longsoran busur, longsoran bidang, longsoran baji, dan longsoran guling serta longsoran kombinasi dari keempat jenis longsoran yang telah disebutkan sebelumnya (longsoran kompleks).

3.6.1 Longsoran Busur (*Circular Failure*)

Longsoran jenis ini banyak terjadi pada lereng tanah dan batuan lapuk atau sangat terkekarkan di lereng timbunan. Bentuk bidang gelincir pada longsoran busur bila digambarkan pada penampang melintang (Gambar 3.7) memperlihatkan skema longsoran busur.

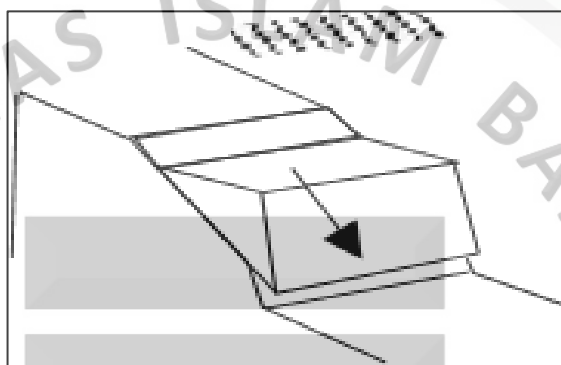


Sumber : "Rock Slope Engineering" (Hoek, 1981)

Gambar 3.7
Skema longsoran busur

3.6.2 Longsoran bidang (*Planar Failure*)

Longsoran bidang (Gambar 3.5) relative jarang terjadi. Namun, jika ada dua kondisi yang menunjang terjadinya longsoran bidang, longsoran yang terjadi mungkin akan lebih besar (secara volume) daripada longsoran lain. Longsoran ini disebabkan oleh adanya adanya struktur geologi yang berkembang, seperti kekar(*joint*) ataupun patahan yang dapat menjadi bidang gelincir.

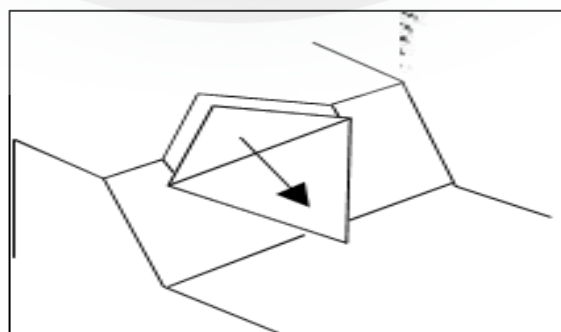


Sumber : "Rock Slope Engineering" (Hoek, 1981)

Gambar 3. 8
Skema longsoran bidang

3.6.3 Longsoran Baji (*Wedge Failure*)

Longsoran baji merupakan jenis longsoran yang sering terjadi di lapangan. Sama halnya dengan longsoran bidang, longsoran baji juga diakibatkan oleh adanya struktur geologi yang berkembang. Perbedaan pada longsoran baji adalah adanya dua struktur geologi yang berkembang dan saling berpotongan. Contoh skema longsoran baji dapat dilihat pada (Gambar 3.6)

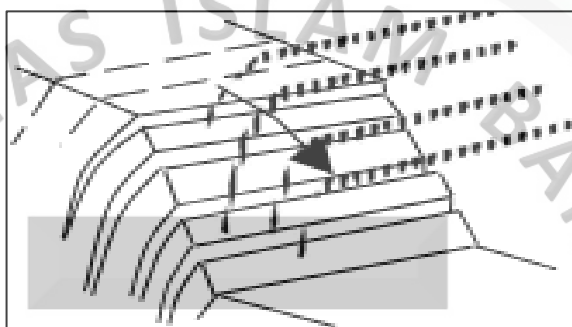


Sumber : "Rock Slope Engineering" (Hoek, 1981)

Gambar 3. 9
Skema longsoran baji

3.6.4 Longsor Guling (*Toppling Failure*)

Longsor guling (Gambar 3.7) umumnya terjadi pada lereng yang terjal dan pada batuan yang keras, dimana struktur bidang lemahnya berbentuk kolom. Longsor guling ini dapat terjadi apabila bidang-bidang lemah yang terdapat pada lereng mempunyai kemiringan yang berlawanan dengan kemiringan lereng.



Sumber : "Rock Slope Engineering" (Hoek, 1981)

Gambar 3. 10
Skema longsor guling

3.7 Kestabilan Lereng yang Dipengaruhi Kegiatan Peledakan

Getaran yang dihasilkan dari aktivitas peledakan dapat mempengaruhi kestabilan lereng tambang. Ketika ledakan terjadi, gelombang seismic yang timbul akan menghasilkan gangguan pada massa batuan dan merambat dalam bentuk gelombang tekan maksimum (*stress wave peak*) pada area yang dekat dengan sumber ledakan melebihi kekuatan tarik batuan sehingga batuan hancur dan menghasilkan zona hancuran (*crushed zones*), zona rekahan (*fracture zones*), atau *blasting damage*.

Sementara itu, pada area yang jauh dari sumber ledakan di mana gelombang tekan maksimumnya lebih kecil dari kekuatan tarik batuan, ledakan menghasilkan gelombang tegangan elastis, gelombang seismic, getaran elastis dari partikel batuan yang akan menyebabkan kerusakan pada batuan dan dapat mengakibatkan ketidakstabilan lereng.

Selain menghasilkan efek hancuran pada batuan yang dinyatakan sebagai *disturbance factor* (D), energi dari proses peledakan juga menghasilkan gelombang seismik yang mereambat dibawah permukaan bumi yang dikenal dengan getaran tanah. Getaran tanah yang dihasilkan akan mempengaruhi kemantapan lereng karena getaran tanah tersebut akan menambah gaya pendorong lereng yang dapat memicu terjadinya kelongsoran (Arif, 2016).

3.8 Mekanika Longsoran

Sifat-sifat material yang relevan dengan kemantapan lereng adalah sudut geser dalam (ϕ), kohesi (C) dan berat jenis batuan (γ). Tegangan geser yang dibutuhkan sehingga batuan tersebut retak dan bergeser, akan bertambah sesuai pertambahan tegangan normal. Pada grafik (Gambar 3.8) hal ini berhubungan secara linier membentuk suatu garis yang membentuk sudut sebesar ϕ terhadap horizontal. Sudut inilah yang dinamakan sudut geser dalam. Bila tegangan normal dibuat nol dan kemudian batuan diberikan tegangan geser sampai batuan tersebut mulai retak, maka harga tegangan geser yang dibutuhkan pada saat batuan mulai adalah merupakan harga kohesi (C) dari batuan tersebut. Hubungan tegangan geser (τ) dan tegangan normal (σ) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots(3.10)$$

Keterangan :

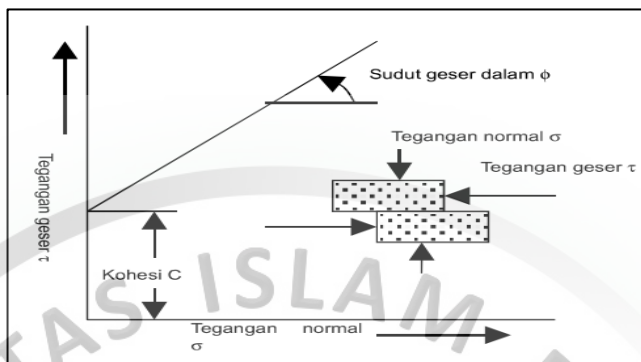
c : Kohesi (Pa)

σ_n : Tegangan normal (Pa)

ϕ : Sudut gesek dalam ($^\circ$)

Massa seberat W yang berada dalam keadaan setimbang diatas suatu bidang yang membentuk sudut ψ terhadap horizontal. Gaya berat yang mempunyai arah

vertikal dapat diuraikan pada arah sejajar dan tegak lurus bidang miring cenderung menyebabkan benda untuk menggelincir adalah $w \sin \psi$.



Sumber : "Rock Mechanics Design" (Bieniawski, 1984)

Gambar 3. 11

Hubungan antar tegangan geser dengan tegangan normal

Sedangkan komponen gaya yang tegak lurus bidang dan merupakan gaya yang menahan benda untuk menggelincir adalah $w \cos \psi$ atau gaya normal. Gaya normal dapat dituliskan sebagai :

$$\sigma_n = \frac{W \cdot \cos \psi}{A} \dots\dots\dots(3.11)$$

Dimana :

A : Luas dasar benda (m²)

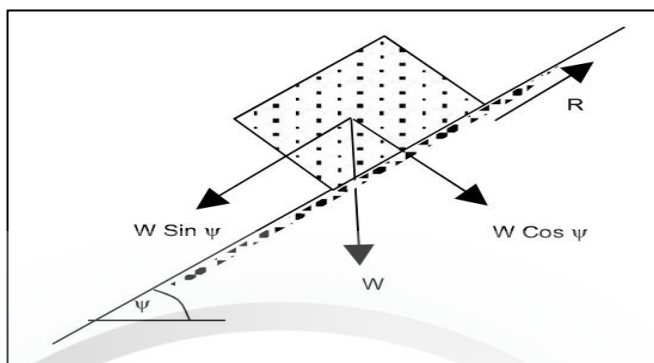
ψ : Sudut kemiringan (°)

Diasumsikan bahwa tegangan geser di definisikan oleh persamaan (3.10) dan disubstitusikan tegangan normal dari persamaan 2, dihasilkan persamaan :

$$\tau = c + \frac{W \cdot \cos \psi}{A} \cdot \tan \phi \dots\dots\dots(3.12)$$

Benda dalam kondisi batas kesetimbangan apabila gaya yang menyebabkan benda tergelincir tepat sama dengan gaya yang menahan benda atau dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$W \sin \psi = c \cdot A + W \cos \psi \tan \phi \dots\dots\dots(3.13)$$



Sumber : *Rock Mechanics Design* (Bieniawski, Z. T., 1984)

Gambar 3. 12
Keseimbangan benda diatas bidang miring

3.9 Analisis Stabilitas Lereng Metode Keseimbangan Batas

Metode kestimbangan batas merupakan metode yang sangat populer digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng tipe gelinciran translasional dan rotational. Metode ini relatif sederhana, mudah digunakan, serta telah terbukti kendalanya dalam praktik rekayasa bertahun-tahun. Perhitungan analisis kestabilan lereng hanya menggunakan kesetimbangan statik dan mengabaikan adanya hubungan tegangan - regangan pada lereng. Asumsi lainnya, yaitu geometri dari bentuk bidang runtuh, harus diketahui dan ditentukan terlebih dahulu.

Kondisi kestabilan lereng tambang dengan menggunakan metode kestetimbangan batas dinyatakan dalam indeks faktor keamanan yang dihitung menggunakan kesetimbangan gaya, kesetimbangan momen, atau menggunakan kedua kondisi kesetimbangan tersebut.

Metode keseimbangan batas dapat dinyatakan dengan persamaan-persamaan keseimbangan dari satu atau beberapa blok yang diasumsikan tidak terdeferformasi dan mengurangi gaya - gaya yang tidak diketahui reaksi dari bagian stabil massa batuan atau gaya antara blok, khususnya gaya geser yang bekerja pada permukaan longsor yang dipilih sebelumnya. Dalam metode ini, lereng dibagi dalam beberapa segmen dengan pusat gaya di titik tertentu, kemudian menganalisis gaya

yang berkerja pada lereng, saat terjadi longsor dan setiap bagian pada kondisi keseimbangan statis.

Metode bishop ini menggunakan kesetimbangan gaya dalam arah vertical dan kesetimbangan momen pada pusat lingkaran bidang glicir. Metode ini digunakan pada longsor busur dengan material penyusun lereng memiliki karakteristik yang tidak homogen sepanjang lereng dan longsor busur tidak melewati kaki lereng dan umumnya kondisi seperti itu dilakukan analisis menggunakan metode ini. Dalam metode ini gaya geser antar bidang diasumsikan nol. Memastikan bahwa tegangan normal efektif pada dasar setiap bidang irisan selalu positif, pengaruh tegangan perlu diperhitungkan dalam analisis. Faktor keamanan dengan metode ini dirumuskan sebagai berikut :

$$FS = \frac{(\sum X / (1 + \frac{Y}{FS}))}{(\sum Z + Q)} \dots \dots \dots (3.14)$$

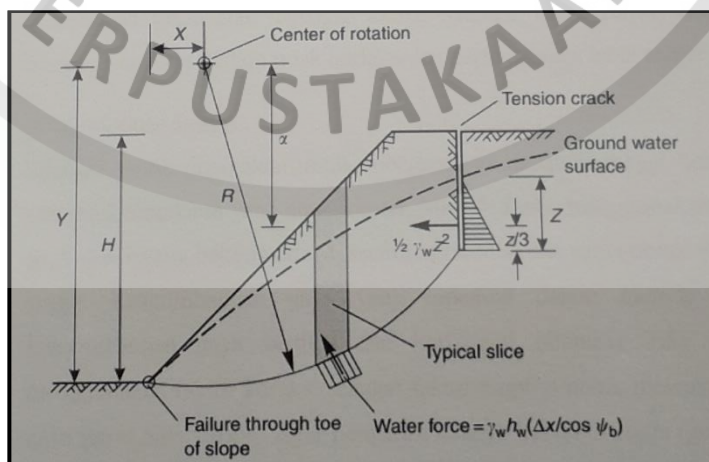
Dimana :

$$X = [C + (\gamma_r h - \gamma_w h_w) \tan \phi] (\Delta x / \cos \psi_b) \dots \dots \dots (3.15)$$

$$Y = \tan \psi_b \tan \phi \dots \dots \dots (3.16)$$

$$Z = \gamma_r h \Delta x \sin \psi_b \dots \dots \dots (3.17)$$

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 (\alpha / R) \dots \dots \dots (3.18)$$



Sumber: Analisis Kemantapan Lereng (Sulistijo, 2002)

Gambar 3. 13
Pemodelan irisan metode bishop pada lereng

3.10 Kriteria Stabilitas Lereng

3.10.1 Faktor Keamanan

Faktor keamanan lereng (FK) atau SF (*safety factor*), adalah angka perbandingan kekuatan geser (*shear strength*) massa batuan yang dapat dikerahkan untuk menahan lereng tidak longsor dengan tegangan geser (*shear stress*) yang bekerja pada bidang longsor karena gaya beratnya untuk mendorong lereng itu longsor. Secara teoritis menurut (Hoek & Bray, 1981) $FK > 1,25$ adalah stabil dan $FK < 1,25$ adalah longsor dan tepat $FK = 1,25$ tergolong kondisi kritis. Namun, mempertimbangkan banyak faktor ketidakpastian yang terjadi dalam membuat model lereng, input parameter geoteknik, dan lain sebagainya, serta risiko yang akan dihadapi jika terjadi kelongsoran lereng, maka kriteria stabilitas yang umumnya digunakan pada tambang berdasarkan Kepmen. 1827 sebagai berikut (Tabel 3.1) :

Tabel 3. 1
Kriteria ambang batas nilai FK dan PK pada lereng tambang

Jenis Lereng	Dampak Longsoran	FK _{min} Statik	FK _{min} Dinamik	PK _{maks}
Tunggal/Jenjang (<i>Bench</i>)	Rendah Tinggi	1,1	NA	25-50%
Multi Jenjang (<i>Interramp</i>)	Rendah	1,15 – 1,2	1	25%
	Sedang	1,2	1	20%
	Tinggi	1,2 -1,3	1,1	10%
Keseluruhan (<i>Overall</i>)	Rendah	1,2-1,3	1	15-20%
	Sedang	1,3	1,05	5-10%
	Tinggi	1,5	1,1	<5%

Sumber: *Open Pit Design* (Peter Stacey, 2009)

Faktor kewanaman lereng timbunan sampai saat ini belum ada nilai yang direkomendasikan untuk material waste tambang. Sedangkan dalam praktiknya, tumpukan material waste bagi tambang harus didesain dan direncanakan dengan baik karena akan membentuk lereng yang cukup tinggi. Oleh karena itu, harus tetap ada cara pendekatan untuk menaksir atau memperkirakan faktor keamanan tersebut,

dengan mempertimbangkan banyak faktor ketidakpastian yang terjadi dalam membuat model lereng, input parameter geoteknik, serta risiko yang akan dihadapi jika terjadi kelongsoran lereng, dan lain sebagainya. maka faktor keamanan yang digunakan diatas nilai faktor keamanan lereng tambang yaitu $FK > 1,2$ dan $PK < 5\%$.

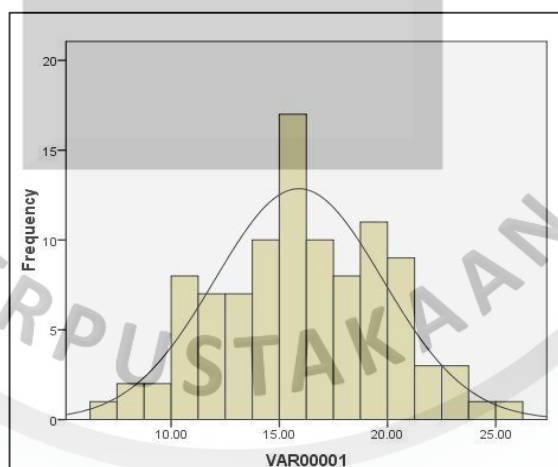
3.10.2 Probabilitas Kelongsoran

Pada era 1990-an analisis perancangan berbagai macam bangunan tanah serta analisis kemantapan lereng didasarkan pada analisis model secara deterministik. Namun, terdapat ketidakpastian dalam estimasi faktor keamanan yang dihitung secara deterministik tersebut (Giani, 1992). Ketidakpastian yang pertama disebabkan oleh variabilitas special dari material penyusun lereng ketidakpastian dalam pengukuran (*properties measurement*). Ketidakpastian yang berikutnya terkait dengan tingkat kepercayaan (*reability*) dari hipotesis yang digunakan dalam pemodelan perilaku massa batuan.

Pendekatan probabilitas dikenalkan oleh (Lumb, 1987) sebagai konsep analisis. Berbeda dengan cara deterministik yang hanya menggunakan satu nilai properti tanah tertentu yang dianggap mewakili, konsep probabilitas menggunakan seluruh data karakteristik tanah yang ada untuk mengakomodasi setiap variasi yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, metode ini dapat mengakomodasi ketidak pastiaan yang terkait dengan stratigrafi, karakteristik tanah atau batuan, dan bahkan metode analisis yang digunakan. Hasil akhir metode ini berupa probabilitas terjadinya longsor.

Stabilitas suatu lereng secara sederhana diindikasikan dengan nilai faktor kemanan (FK) yang merupakan rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak. Dalam ranah probabilitas, kedua input parameter, baik gaya penahan dan gaya penggerak, merupakan fungsi dari dua variable acak yang berdistribusi probabilitas. Dengan mengkombinasikan keduanya, probabilitas kelongsoran akan didapatkan.

Berikut ini dijelaskan perhitungan PK berdasarkan metode kesetimbangan batas dengan simulasi Monte Carlo. Simulasi Monte Carlo merupakan metode yang banyak digunakan pada analisis probabilitas. Metode ini sangat berguna dalam pemecahan permasalahan yang berkaitan dengan variabel acak. Selain sederhana, metode ini juga lebih fleksibel dalam menggabungkan suatu varietas distribusi probabilitas yang cukup besar tanpa banyak penafsiran serta memiliki kemampuan untuk memodelkan korelasi diantara variabel dengan mudah (Hammah dan Yacoub, 2009). Pada metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) nilai FK merupakan rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak, dimana masing-masing parameter merupakan fungsi dari variabel acak yang bersifat tak tentu (*uncertain*) dan berdistribusi probabilitas tertentu. Oleh karena itu, penggunaan simulasi monte carlo sangat cocok untuk menyelesaikan permasalahan ketidakpastiaan pada nilai FK hingga akhirnya akan didapatkan nilai probabilitas kelongsoran.



Sumber: "Statistik Uji Normalitas" (Cahyono, 2015)

Gambar 3. 14

Histogram uji normalitas dan kurva distribusi normal

Sebelum perhitungan probabilitas metode monte carlo perlu melakukan penetapan suatu distribusi statistik pada data tersebut. Uji distribusi normal termasuk salah satu uji statistik untuk mengukur apakah data kita memiliki distribusi normal sehingga dapat dipakai dalam statistik parametrik seperti probabilitas monte carlo. Uji

distribusi data yang dipakai adalah cara Kolmogorov-Smirnov yang umum untuk menghitung jarak antara fungsi distribusi empiris sampel dan fungsi distribusi kumulatif. Pengujian statistik distribusi data untuk mempermudah proses pengerjaannya dapat dibantu dengan menggunakan *software* dari IBM SPSS.

Tahapan perhitungan probabilitas kelongsoran dengan metode monte carlo menurut (Wyllie, 2004) adalah sebai berikut:

1. Estimasi distribusi probabilitas pada setiap variabel acak input parameter kestabilan lereng (misalnya normal atau lognormal).
2. Men-Generate nilai acak (random) untuk setiap parameter jika berdistribusi uniform menggunakan interval 0 dan 1 yang dikalikan dengan range tiap parameter (antara nilai maksimum dan minimum). Untuk setiap fungsi yang diperlukan distribusi kumulatif pada setiap variabel acaknya.
3. Menghitung masing-masing nilai gaya penahan dan gaya penggerak, kemudian menghitung berapa (M) kali kemunculan nilai gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak.
4. Ulangi proses tersebut sebanyak N kali ($N > 100$) kemudian hitung probabilitas kelongsoran dengan persamaan sebagai berikut :

$$PK = \frac{N - M}{N} \dots\dots\dots(3.19)$$