

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Pemetaan Geologi

Peta Geologi adalah bentuk ungkapan data dan informasi geologi suatu daerah/wilayah/kawasan dengan tingkat kualitas yang bergantung pada skala peta yang digunakan. Peta geologi ini menggambarkan informasi sebaran dan jenis serta sifat batuan, umur, stratigrafi, struktur, tektonika, fisiografi, serta potensi sumberdaya mineral dan energi yang disajikan dalam bentuk gambar dengan warna, simbol dan corak atau gabungan dari ketiganya (Keputusan Menteri Energi dan Sumberdaya Mineral No.1452K/10/MEM/2000).

Beberapa data geologi yang diperlukan dalam analisis kestabilan lereng tambang adalah:

1. Sebaran batuan
2. Tipe mineral pembentuk material lereng
3. Bidang-bidang diskontinuitas dan perlapisan pada lereng

Tipe longsor yang mungkin terjadi sangat dipengaruhi oleh kondisi dari bidang-bidang tak menerus pada daerah yang ditinjau. Selama proses pekerjaan penggalian lereng, kondisi geologi harus dikaji dan desain lereng dapat dimodifikasi ulang apabila ternyata kondisi geologi aktual berbeda dengan data awal, Pada umumnya data geologi yang tersedia biasanya sangat terbatas sehingga dapat menghasilkan beragam interpretasi. Oleh sebab itu, kondisi geologi harus selalu diamati selama pekerjaan berlangsung serta harus dipertimbangkan kemungkinan adanya perubahan rancangan lereng apabila kondisi aktual di lapangan berbeda dengan kondisi geologi yang diasumsikan (data awal) (Arif, 2016).

3.2 Pengeboran Geoteknik

Pengeboran geoteknik dilakukan untuk mengetahui strata atau perlapisan tanah dan batuan dibawah permukaan bumi, jenis serta kondisi tanah dan batuan pada daerah yang akan diteliti.

Hasil pengeboran diteliti akan disusun dalam bentuk *bor-log*. Informasi yang didapat diperoleh dari *bor-log* diantaranya (Didiek Djarwadi, 2012):

1. Elevasi

Elevasi permukaan tanah akan menjadi hitungan kedalaman untuk mengambil contoh (sampel) tanah, melakukan uji SPT (*Standard Penetration Test*), mengetahui muka air tanah dan sebagainya.

2. Kedalaman

Kedalaman lubang bor penting untuk mengetahui pergantian jenis tanah dan batuan dan posisi atau elevasi dimana diperlukan pengambilan contoh tanah dan batuan sesuai dengan rencana kerja dan uji SPT. Pada bor batuan, kedalaman juga diperlukan untuk mendeskripsikan terjadinya anomaly geologi atau munculnya struktur geologi yang kompleks.

3. Deskripsi tanah dan batuan deskripsi tanah

Deskripsi tanah dan batuan dilakukan secara visual dari contoh tana dan batuan yang diperoleh. Akurasi dari deskripsi ini sangat ditentukan oleh profesionalisme dan pengalaman dari bor *master*.

4. Titik pengambilan contoh tanah dan batuan

Pengambilan contoh tanah dan batuan dilakukan dengan interval tertentu. Titik pengambilan contoh tanah dan batuan akan diikat dengan muka tanah titik bor

5. Contoh yang diperoleh (*sample recovery*).

Merupakan panjang contoh tanah dan batuan yang diperoleh dengan suatu metode yang telah teruji. Panjang *sample recovery* tidak terlalu sama dengan

panjang tabung yang digunakan. Oleh karena itu, sebelumnya harus dipersiapkan terlebih dahulu satu tabung dengan panjang yang cukup untuk dapat mengambil keperluan semua uji yang ditetapkan untuk menjaga homogenitas contoh tanah dan batuan.

6. Simbol tanah dan batuan

Simbol diperlukan untuk membedakan jenis tanah dan batuan yang didapatkan dari lubang bor.

7. Penetrasi

Nilai penetrasi mencerminkan nilai SPT terkoreksi (N_{60}), yaitu jumlah pukulan yang diperlukan untuk menembus suatu lapisan tanah setebal 30cm dengan alat uji SPT. Nilai ini akan mencerminkan tingkat kekerasan suatu lapisan tanah.

Metode-metode pengeboran yang dapat dipakai dalam proses pengambilan contoh (*sample*) tergantung pada bermacam-macam faktor antara lain genesa endapan, kedalaman dan tipe batuan.

Untuk endapan aluvial, pengambilan contoh dapat dilakukan dengan bor Bangka (timah aluvial di Bangka, Billiton dan Singkep). Pengeboran dilakukan secara manual dan contoh batuan diambil menggunakan *bailer*.

Untuk endapan primer yang terletak jauh dibawah permukaan, sampling dilakukan dengan pengeboran inti (*diamond drilling*). Contoh batuan yang diperoleh berupa inti (*core*) dan *sludge*. Inti sebagai contoh yang tidak terganggu terdapat dalam *core barrel*, sedangkan *sludge* diampung dipermukaan didalam *sludge tank*.

Pengambilan contoh inti diperoleh dari pengeboran inti. Contoh inti biasanya dibelah dua; satu bagian untuk *assay* dan bagian lainnya untuk dokumentasi geologi. Lubang bor biasanya dialiri fluida untuk mengeluarkan *cutting* dalam bentuk *sludge*. Tingkat ketelitian *drill core* tergantung pada *core recovery* yang didapatkan. Tingkat

ketelitian *cutting* pengeboran relatif lebih rendah, baik kadar (akibat *salting*) maupun posisi kedalaman (akibat *lifting capacity*).

Beberapa kesalahan yang biasa terjadi akibat pengeboran:

1. Inklinasi (kemiringan) kemiringan lubang bor yang tidak sesuai dengan kemiringan lapisan.
2. *Core recovery* yang kurang baik.
3. Pengambilan interval contoh yang kurang sesuai.
4. Kesalahan dalam preparasi contoh.
5. Penanganan *core* yang kurang baik.

3.3 Pengukuran Bidang Diskontinu (Metode *Scanline*)

3.3.1 Jarak Antar Kekar

Jarak pisah antarbidang diskontinu (kekar) adalah jarak tegak lurus antara dua bidang diskontinu yang berurutan sepanjang sebuah garis pengamatan yang disebut *scan-line*, dan dinyatakan sebagai *intact length*. Panjang *scan-line* minimum untuk pengukuran jarak diskontinuiti adalah sekitar 50 kali jarak rata-rata diskontinuiti yang hendak diukur. Namun, menurut (ISRM, 1981) panjang ini cukup sekitar 10 kali, tergantung tujuan. (dilihat pada gambar 3.5).

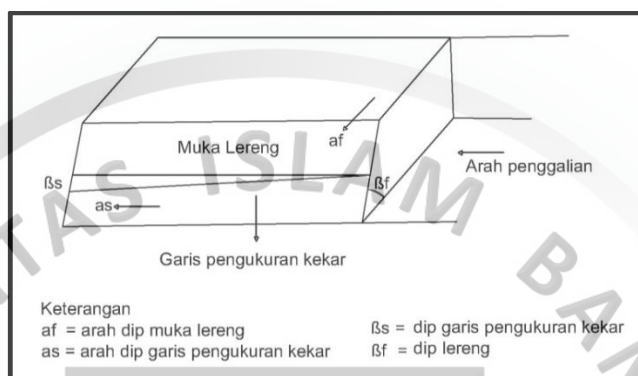
Tabel 3.1
Klasifikasi Jarak Kekar

Deskripsi Jarak	Struktur Bidang Diskontinu	Jarak (mm)
Spasi sangat lebar	Perlapisan sangat tebal	>2000
Spasi lebar	Perlapisan tebal	600-2000
Spasi cukup lebar	Perlapisan sedang (<i>medium</i>)	200-600
Spasi rapat	Perlapisan tipis	60-200
Spasi sangat rapat	Perlapisan sangat tipis	20-60
	Laminasi tebal (batuan sedimen)	6-20
	Laminasi sempit (batuan metamorf dan batuan beku)	6-20
	Berlapis, memiliki belahan (<i>cleavage</i>), struktur perlapisan seperti aliran/ <i>flow</i> (<i>flow-banded</i>), metamorfik, dll	6-20
Spasi sangat rapat sekali (ekstrim)	Perlapisan tipis (batuan sedimen)	<20
	Sangat berfoliasi, memiliki belahan (<i>cleavage</i>) dan stuktur perlapisan aliran/ <i>flow</i> (<i>flow-banded</i>), (batuan metamorf dan batuan beku), dll	<6

Sumber : Attawell, 1993

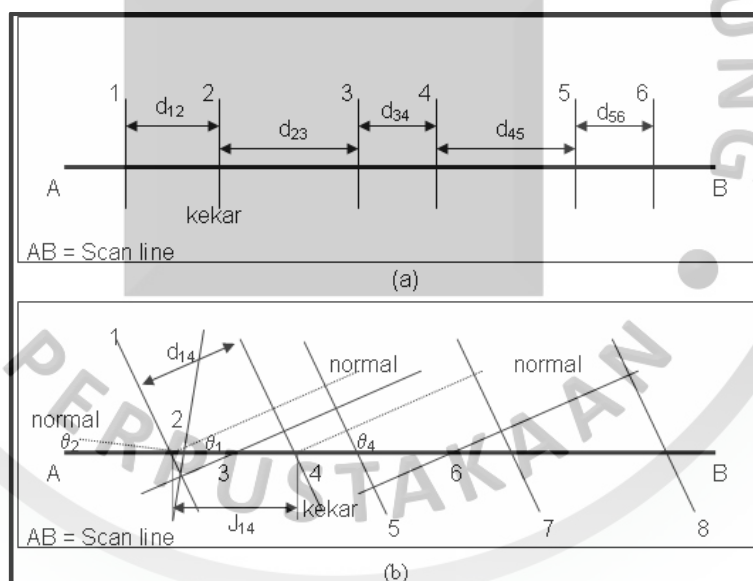
3.3.2 Prosedur Normal Untuk Garis Pengukuran Kekar

Berikut adalah cara pengukuran secara normal untuk melakukan pengukuran kekar pada lereng (dilihat pada gambar 3.1 dan 3.2).



Sumber : Karmadibrata, 1996

Gambar 3.1
Prosedur Normal Untuk Garis Pengukuran Kekar



Sumber : Lama, R.D dan L.P. Gonano, 1976

Gambar 3.2
Pengukuran Jarak Kekar Menggunakan Metode Scanline

3.4 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

3.4.1 Sifat Fisik Batuan

Di dalam setiap batuan memiliki sifat fisik yang berbeda. Sifat yang dimiliki oleh setiap batuan tersebut dapat diuji menggunakan berbagai cara dan metode. Sifat

fisik batuan adalah sifat sifat yang dimiliki oleh suatu batuan sesudah dilakukan pengujian tanpa melakukan pengrusakan pada batuan tersebut. Antara sifat fisik dan mekanik tentulah ada perbedaan maka untuk sifat fisik dari batuan sendiri terdiri antara lain :

1. Porositas

Porositas didefinisikan sebagai perbandingan volume pori-pori (yaitu volume yang ditempati oleh fluida) terhadap volume total batuan. Ada dua jenis porositas yaitu porositas antar butir dan porositas rekahan. Pada kenyataannya, porositas didalam suatu sistem panas bumi sangat bervariasi. Berdasarkan waktu dan cara terjadinya porositas dibagi menjadi dua, yaitu porositas primer dan porositas sekunder. Porositas primer itu sendiri yaitu porositas yang terbentuk bersamaan pada waktu sedimen itu diendapkan, sedangkan porositas sekunder adalah porositas yang terbentuk sesudah batuan sedimen diendapkan atau setelah porositas primer terbentuk. Banyak faktor yang dapat mempengaruhi tingkat porositas suatu batuan. Diantaranya yaitu bentuk butir, keseragaman butir, proses kompaksi selama dan setelah pengendapan.

2. Densitas atau Rapat Massa Batuan

Densitas batuan dari batuan yang berpori adalah perbandingan antara berat terhadap volume (rata-rata dari material tersebut). Densitas spesifik adalah perbandingan antara densitas material tersebut terhadap densitas air pada tekanan dan temperatur yang normal, yaitu kurang lebih 103 kg/m³. Batuan mempunyai sifat-sifat tertentu yang perlu diketahui, dalam mekanika batuan dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu:

- a. Sifat fisik batuan seperti bobot isi "*Specific Gravity*" porositas dan absorpsi "*Void Ratio*".

- b. Sifat mekanika batuan seperti kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, "Poisson`s Ratio".

3. Kadar Air

Kadar air adalah perbandingan antara berat air yang dipakai dengan berat total dari batuan tersebut. Adapun cara penentuan kadar air batuan dengan penduga neutron ini . (alat uji sifat fisik dilihat pada gambar 3.5):

- a. Sebagai suatu teknik yang cepat dalam menguji kadar air batuan di tempat secara tidak langsung pada kedalaman tertentu tanpa terganggu.
- b. Dapat digunakan untuk pemantauan dan analisis statistik, karena dilakukan secara berulang di tempat yang sama.



Foto 3.1
Alat Uji Sifat Fisik Batuan

3.4.2 Kuat Geser Batuan

Kuat geser adalah suatu kemampuan material untuk melawan tegangan geser yang terjadi pada saat menerima beban. Keruntuhan yang terjadi (*shear failure*) bukan karena hancurnya butiran material, tetapi lebih karena adanya gerakan relative antara batuan. Metode pengujian untuk kuat geser ada bermacam-macam, seperti : *Drained Test, Undrained Test, Consolidated Undrained*. Kuat geser ini banyak digunakan dalam analisis stabilitas lereng pada tambang terbuka, analisis stabilitas batuan samping pada lubang bukaan bawah tanah dan lain sebagainya. (alat uji kuat geser residual dilihat pada gambar 3.4)

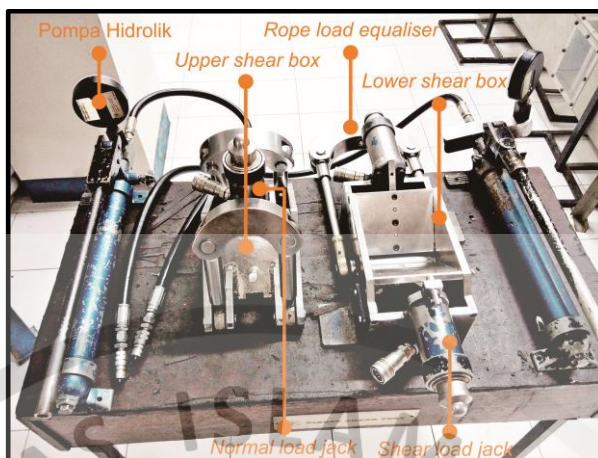


Foto 3.2
Alat Uji Kuat Geser Tidak Langsung

Pengujian untuk mengetahui kekuatan batuan terhadap suatu geseran pada tegangan normal tertentu. Dari hasil pengujian kuat geser ini dapat ditentukan.

1. Garis "*columb's strength*".
2. Nilai kuat geser (*shear strength*) batuan.
3. Sudut gesek dalam (ϕ).
4. Kohesi (c).

Kriteria–kriteria kekuatan geser untuk suatu batuan atau tanah tertentu dapat ditentukan dari hasil–hasil pengujian laboratorium pada contoh tanah dan batuan lapangan yang mewakili. Diperlukan ketelitian dan perhatian yang besar terhadap proses pengambilan contoh, penyimpanan contoh dan perawatan contoh sebelum pengujian, terutama untuk contoh tidak terganggu, dimana struktur tanah dilapangan dan kadar airnya harus dipertahankan, untuk tanah lempung akan timbul akibat kehilangan uji geser langsung.

3.4.3 Kuat Tekan Batuan

Untuk mengetahui sifat mekanik batuan dilakukan beberapa percobaan seperti uji kuat tekan uniaksial, uji kuat tarik, uji triaksial dan uji tegangan insitu. Mekanika batuan sendiri mempunyai karakteristik mekanik yang diperoleh dari penelitian ini adalah kuat tekan batuan (σ_t), kuat tarik batuan (σ_c), *Modulus Young*

(E), Nisbah *Poisson* (ν), selubung kekuatan batuan (*strength envelope*), kuat geser (τ), kohesi (C), dan sudut geser dalam (ϕ). (alat uji kuat tekan dilihat pada gambar 3.5).



Foto 3.3
Alat Uji Kuat Tekan Uniaksial

Tujuan uji kuat tekan uniaksial adalah untuk mendapatkan nilai kuat tekan dari contoh batuan. Nilai tegangan pada saat batuan hancur didefinisikan sebagai kuat tekan uniaksial batuan dan dinyatakan dalam hubungan:

1. Batas elastik = σ_E

Yaitu batas batuan mencapai elastisitas tertinggi sebelum batuan tersebut pecah dengan pembebanan tertentu.

2. *Modulus Young*

Dalam mekanika padat, *Young's modulus* (E) adalah ukuran dari kekakuan dari isotropik bahan elastis. Ia juga dikenal sebagai *young modulus*, modulus elastisitas, modulus elastisitas (modulus *young* walaupun sebenarnya adalah salah satu dari beberapa modulus elastik seperti modulus bulk dan modulus geser) atau tarik modulus. Hal ini didefinisikan sebagai rasio dari *uniaksial stres* atas uniaksial ketegangan dalam kisaran yang stres Hukum *Hooke* berlaku. Hal ini bisa coba ditentukan dari kemiringan dari kurva tegangan-regangan diciptakan

selama uji tarik dilakukan pada sampel material. Didapatkan dari perbandingan antara perbedaan tegangan aksial dengan perbedaan regangan aksial yang di dapatkan dari kurva tegangan-regangan. Dalam menentukan modulus young, dapat ditentukan dari kurva tegangan-regangan dengan beberapa cara yaitu:

a. *Tangent Young's modulus*, E_t .

Tangent Young's modulus ini diukur dari tingkat tegangan = $0,5\sigma_c$ kemudian ditentukan dengan cara tangent.

b. *Average Young's modulus*, E_{av} .

Nilai modulus ini didapatkan dari perbandingan hasil tegangan dan regangan yang berpedoman pada titik potong garis lurus yang ditarik berimpit dengan kurva (garis rata-rata kemiringan atau bagian linier yang terbesar dari kurva)

c. *Secant Young's modulus*, E_s .

Diukur dari tegangan = 0 sampai nilai tegangan tertentu, yang biasanya adalah $50\% \sigma_c$.

3. *Poisson's Ratio*

Poisson's ratio adalah rasio regangan melintang kontraksi untuk perpanjangan regangan membujur ke arah gaya peregangan. Deformasi tarik dianggap positif dan deformasi kompresi dianggap negatif. Definisi rasio *Poisson* berisi tanda minus sehingga bahan normal memiliki rasio positif. *Poisson's ratio*, juga disebut *Poisson*. *Poisson ratio* atau koefisien, biasanya digambarkan sebagai huruf Yunani ν . Teori elastisitas isotropik memungkinkan *Poisson's ratio* dalam rentang dari -1 hingga $1/2$ untuk sebuah benda dengan permukaan bebas tanpa kendala fisik alasannya adalah bahwa untuk material yang akan stabil, yang harus *stiffnesses* positif; bagian terbesar dan geser *stiffnesses* saling berhubungan dengan rumus yang menggabungkan rasio *Poisson*. Objek terkendala pada permukaan dapat memiliki rasio *Poisson* di luar rentang di atas dan menjadi stabil,

yaitu perbandingan antara regangan lateral dengan regangan aksial yang dihitung pada 50% tegangan maksimum (σ_c). Regangan dari sampel batuan baik aksial (ϵ_a) maupun lateral (ϵ_l) selama pengujian berlangsung dapat diukur dengan menggunakan *dial gauge* atau *electric strain gauge*.

3.4.4 Kuat Tarik Batuan

Uji tarik adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan atau material dengan cara memberikan beban gaya yang berlawanan arah. Hasil yang didapatkan dari pengujian tarik sangat penting untuk rekayasa teknik dan desain produk karena menghasilkan data kekuatan material. Pengujian uji tarik digunakan untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara lambat. Sifat mekanis logam yang dapat diketahui setelah proses pengujian ini seperti kekuatan tarik, keuletan dan ketangguhan.

Ada dua metode yang dapat dipergunakan untuk mengetahui kuat tarik contoh batuan di laboratorium, yaitu metode kuat tarik langsung dan metode kuat tarik tak langsung. Metode kuat tarik tak langsung merupakan uji yang paling sering digunakan. Hal ini disebabkan uji ini lebih mudah dan murah daripada uji kuat tarik langsung. Salah satu uji kuat tarik tak langsung adalah *Brazilian test*.

Pengujian tarik sangat dibutuhkan untuk menentukan desain suatu produk karena menghasilkan data kekuatan material. Pengujian tarik banyak dilakukan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan. Karena dengan pengujian tarik dapat diukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara perlahan. Biasanya yang menjadi fokus perhatian adalah kemampuan maksimum bahan tersebut dalam menahan beban. Kemampuan ini umumnya disebut "*Ultimate Tensile Strength*" disingkat dengan UTS, dalam bahasa Indonesia disebut tegangan tarik maksimum.

3.5 Metode Analisis Kestimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

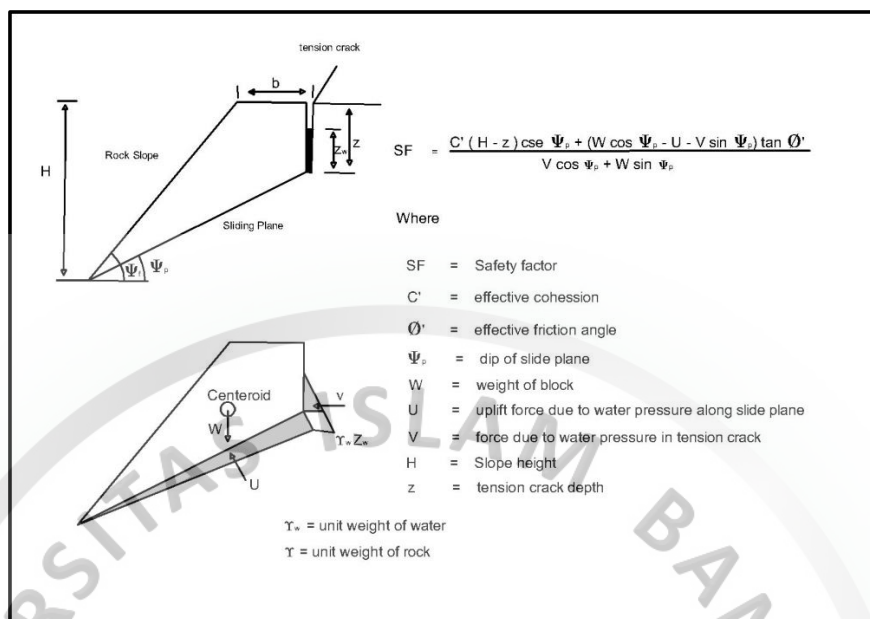
Metode kestimbangan batas merupakan metode yang sangat populer yang digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng tipe gelinciran translasional dan rotasional. Metode ini relatif sederhana, mudah digunakan, serta telah terbukti keandalannya dalam praktek rekayasa selama bertahun-tahun.

Pada metode ini, perhitungan analisis kestabilan lereng hanya menggunakan kondisi kestimbangan statik dan mengabaikan adanya hubungan tegangan-regangan pada lereng. Asumsi lainnya yaitu geometri dari bidang runtuh harus diketahui dan ditentukan terlebih dahulu.

Kondisi kestabilan lereng dalam metode kestimbangan batas dinyatakan dalam indeks faktor keamanan. Faktor keamanan dihitung menggunakan kestimbangan gaya, kestimbangan momen, atau menggunakan kedua kondisi kestimbangan tersebut tergantung metode perhitungan yang dipakai.

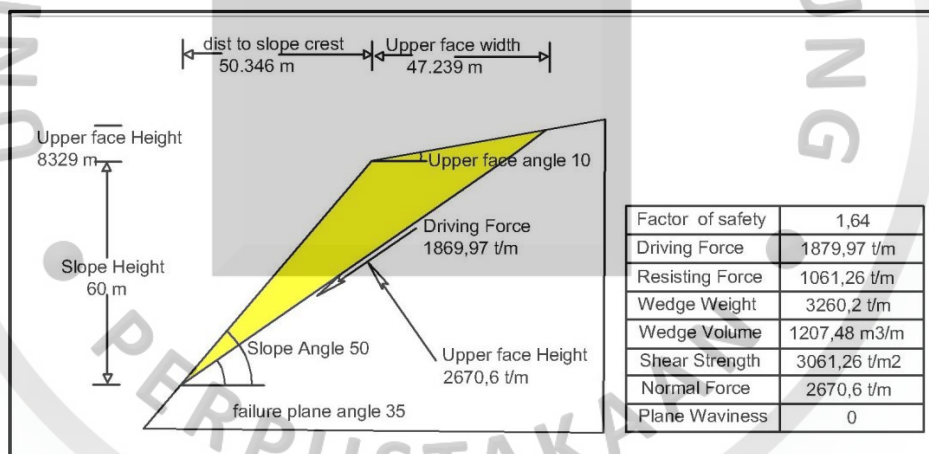
3.5.1 Analisis Longsoran Tipe Translasional

Metode kestimbangan batas telah digunakan secara luas dalam analisis kestabilan lereng yang dikontrol dengan adanya bidang tak menerus yang berupa bidang planar atau baji yang dihasilkan oleh perpotongan dua buah bidang planar. Longsoran diasumsikan terjadi sepanjang bidang planar dan diasumsikan blok massa tidak mengalami rotasi. Faktor keamanan lereng dihitung dengan membandingkan gaya penahan dengan gaya geser yang bekerja sepanjang bidang runtuh. Contoh dari analisis bidang runtuh planar menggunakan metode kestimbangan batas (ditunjukkan pada gambar 3.3 dan 3.4).



Sumber : Hoek dan Bray, 1974

Gambar 3.3
Metode Kestimbangan Batas Untuk Bidang Runtuah Planar



Sumber : Arief, 2007

Gambar 3.4
Contoh Perhitungan Analisis Bidang Runtuah Planar

3.5.2 Analisis Longsoran Tipe Rotasional

Untuk lereng tanah atau lereng batuan lemah, longsoran terjadi umumnya terjadi karena gaya penahan disepanjang bidang runtuah tidak mampu menahan gaya geser yang bekerja. Pada kasus ini biasanya bidang runtuah berupa sebuah busur lingkaran atau berupa bidang lengkung. Metode kestimbangan batas merupakan metode yang sangat populer untuk tipe longsoran tersebut. Secara umum metode

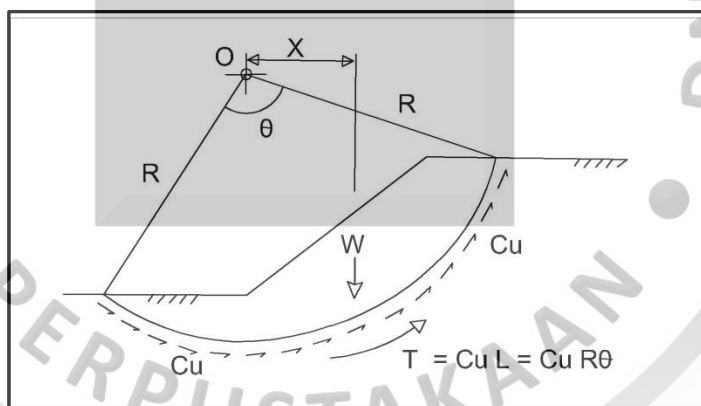
untuk menganalisis longsoran tipe rotasional dapat dibagi 2 yaitu metode massa dan metode irisan.

1. Metode Massa

Pendekatan yang digunakan dalam metode ini ialah massa di atas bidang runtuh dianggap sebagai sebuah benda kaku, bidang runtuh dianggap berupa sebuah busur lingkaran dan parameter kekuatan geser hanya ditentukan oleh kohesi. Metode ini sangat cocok digunakan pada lereng material lempung.

Faktor keamanan lereng merupakan perbandingan antara momentum penahan dengan momentum guling, yang dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (dilihat pada gambar 3.5).

$$F = \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen Guling}} = \frac{CuR^2\phi}{Wx}$$



Sumber : Fredlund, Krahn, Pufahl, 2004

Gambar 3.5
Metode Massa

2. Metode Irisan

Salah satu karakteristik metode irisan yaitu geometri dari bidang gelinciran harus ditentukan atau diasumsikan terlebih dahulu. Untuk menyederhanakan perhitungan, bidang runtuh biasanya dianggap berupa sebuah busur lingkaran, gabungan busur lingkaran dengan garis lurus, atau gabungan dari beberapa garis lurus.

3.6 Metode Analisis Kontinum (*Continuum Method*)

Suatu massa batuan dapat dianggap kontinu jika masuk pada salah satu kategori berikut (Franklin dan Dusseault, 1989):

1. Massa batuan dari kekar (kekar sangat sedikit dan formasi batuan sangat massif).
2. Kekar yang terdapat pada massa batuan sama kuatnya dengan batuan utuh (*Intact rock*) karena kekar tersebut kasar, tidak kontinu, dan terpisah dengan jarak yang lebar.
3. Kekar yang terdapat pada massa batuan terkuat akibat tekanan yang dipengaruhi oleh kedalaman.
4. Kekar pada massa batuan sangat dekat hingga dapat diuji dalam skala laboratorium yang sangat besar dalam pengujian lapangan.

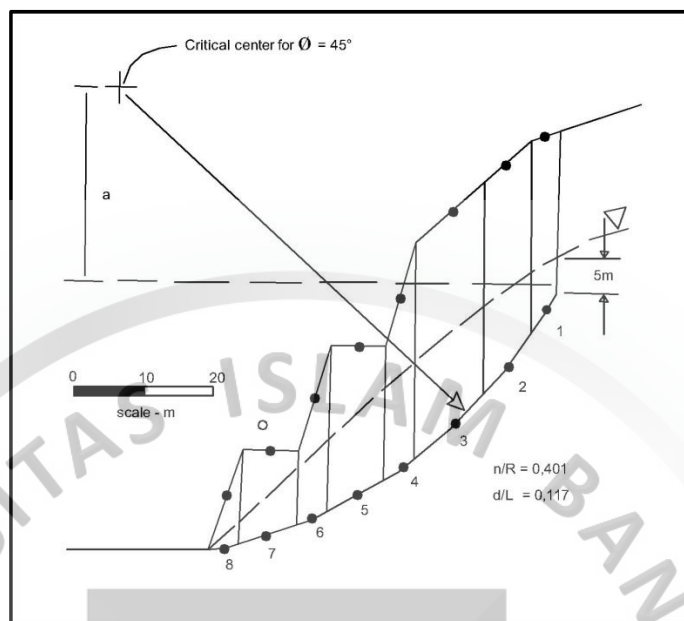
Metode kontinum sangat cocok digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng tanah, lereng batuan yang massif dan lereng batuan yang sangat intensif.

Pada metode kontinum tidak ada bidang runtuh actual yang terbentuk, akan tetapi dengan mempertimbangkan konsentrasi tegangan geser pada model, lokasi bidang runtuh dapat ditentukan.

Analisis kestabilan lereng dengan metode kontinum dapat dilakukan dengan menggunakan 2 metode.

3.6.1 Metode Beda Hingga (*Finite-difference Method*)

Metode beda hingga dibuat berdasarkan pembagian domain kedalam sejumlah simpul yang paling berkaitan dimana sistem persamaan diferensial pengaturannya diterapkan, sistem persamaan diferensial pengaturannya yaitu persamaan kondisi kesetimbangan, hubungan tegangan-regangan dan hubungan regangan-perpindahan. Contoh penggunaan metode hingga (dilihat pada gambar 3.6).



Sumber : itasca Consulting Group, 2002

Gambar 3.6

Analisis Kestabilan Lereng Dengan Menggunakan Metode Beda Hingga

3.6.2 Metode Elemen Hingga (*Finite-Element Method*)

Pada metode elemen hingga, domain dari daerah yang akan dianalisis dibagi kedalam jumlah zona yang lebih kecil yang dinamakan elemen. Elemen-elemen tersebut dianggap saling berkaitan pada sejumlah titik simpul. Perpindahan pada titik simpul dihitung terlebih dahulu, kemudian dengan sejumlah fungsi diinterpolasi yang diasumsikan perpindahan pada sembarang titik dapat dihitung berdasarkan nilai perpindahan pada titik-titik simpul, selanjutnya regangan yang terjadi pada setiap elemen dihitung berdasarkan besarnya perpindahan pada masing-masing titik simpul. Berdasarkan nilai regangan tersebut dapat dihitung tegangan yang bekerja pada setiap elemen.

Terdapat 2 pendekatan yang umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode elemen hingga yaitu:

1. Metode Pengurangan Kekuatan Geser (*Strength Reduction Method*)

Prinsip metode ini ialah kekuatan geser material nilainya dikurangi secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Pengurangan parameter kohesi (C) dan sudut gesek (θ) dapat dinyatakan sebagai persamaan sebagai berikut:

$$C_f = \frac{c}{SRF}$$

$$\phi_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{SRF}\right)$$

Keterangan : SRF = Faktor reduksi kekuatan geser. Faktor keamanan F sama besarnya dengan nilai SRF pada saat tepat terjadi keruntuhan

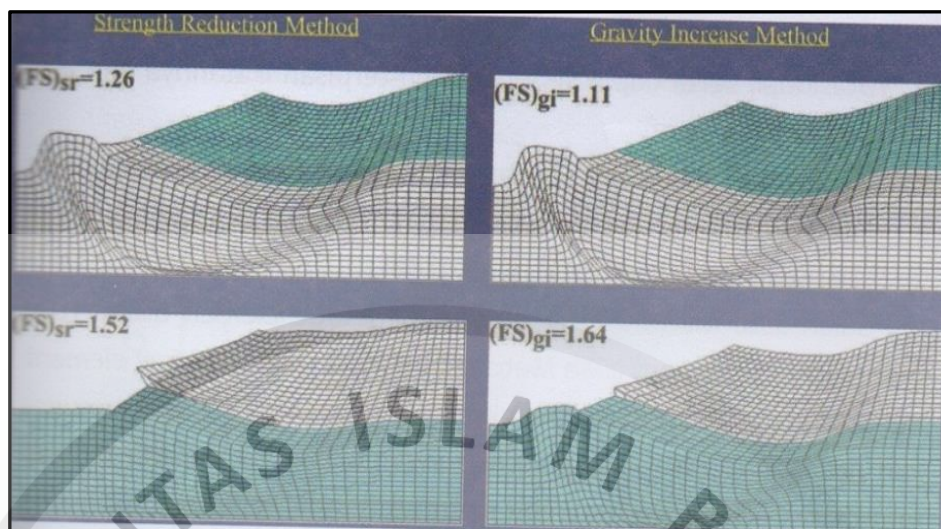
2. Metode Penambahan Gravitasi (*Gravity Increase Method*)

Prinsip dari metode penambahan gravitasi yaitu nilai gravitasi diaikan secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng, faktor keamanan dalam pendekatan ini didefinisikan sebagai berikut:

$$(FS)_{gt} = \frac{g_{limit}}{g_{actual}}$$

Keterangan : g_{actual} = konstanta gravitasi (9.81 KN/m³)
 g_{limit} = nilai gravitasi yang tepat menyebabkan terjadi keruntuhan pada lereng

(Gambar 3.7) merupakan contoh hasil analisis kestabilan lereng dengan metode elemen hingga dengan menggunakan kedua pendekatan tersebut.



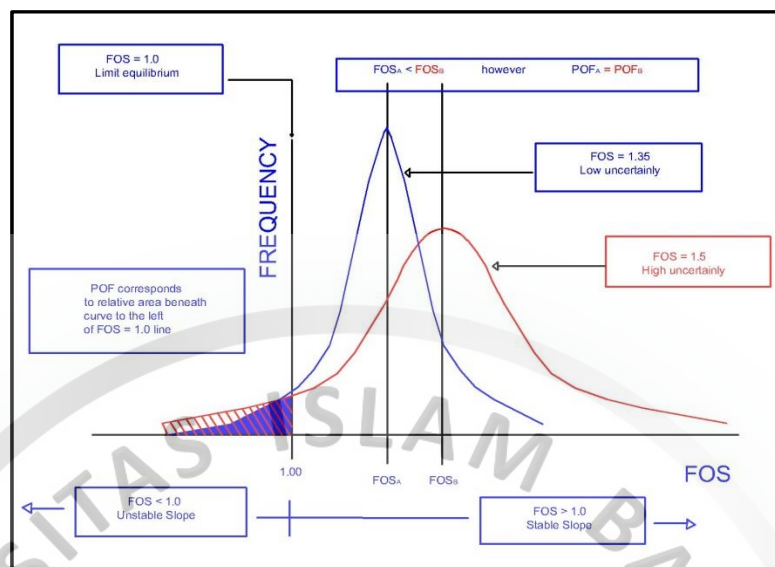
Sumber : Swan dan Seo, 1999

Gambar 3.7
Analisis Kestabilan Lereng Material Pasir dan Lempung dengan Metode
Elemen Beda Hingga

3.7 Konsep Probabilitas Kelongsoran (PK)

Stabilitas suatu lereng secara sederhana diindikasikan dengan nilai Faktor Keamanan (FK) yang merupakan rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak. Dalam ranah probabilitas, kedua input parameter, baik gaya penahan maupun gaya penggerak, merupakan fungsi dari variabel acak yang berdistribusi probabilitas. Dengan mengombinasikan keduanya, probabilitas kelongsoran akan didapatkan.

Konsep dasar sederhana dari probabilitas (kemungkinan) longsor suatu lereng dengan menggambarkan FK sebagai fungsi variable acak yang berdistribusi probabilitas. Probabilitas Kelongsoran (PK) dihitung sebagai rasio antara area pada distribusi FK ,1 dibagi dengan total area pada kurva distribusi probabilitas.



Sumber : Tapia et al, 2007

Gambar 3.8
Konsep Probabilitas Kelongsoran

SRK Consulting (2010) membuat hubungan sederhana untuk kriteria probabilitas kelongsoran pada lereng tambang (dilihat pada tabel 3.2)

Tabel 3.2
Kriteria PK Pada Lereng Tambang

Jenis Lereng	Dampak Longsoran	FK (min) (Statik)	FK (min) Dinamis	PK _{max} P[FK<1]
Tunggal/Jenang (<i>bench</i>)	Low – High	1.1	NA	25 – 50%
Multi Jenjang (<i>Intercamp</i>)	Low	1.15 – 1.2	1	25 %
	Medium	1.2	1	20 %
	High	1.2 – 1.3	1.1	10 %
Keseluruhan (<i>Overall</i>)	Low	1.2 – 1.3	1	15 -20 %
	Medium	1.3	1.05	5 – 10 %
	High	1.5	1.1	≤ 5%

Sumber : SRK Consulting, 2010

3.8 Metode Perhitungan Probabilitas Kelongsoran *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

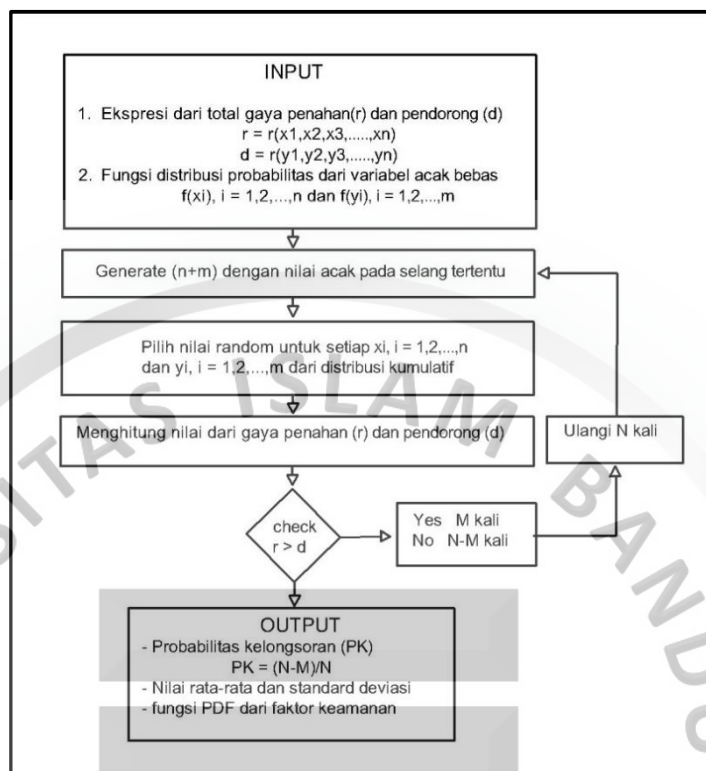
batas nilai FK merupakan rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak, dimana masing-masing parameter merupakan fungsi dari variabel acak yang bersifat tak tentu (*uncertain*) dan berdistribusi probabilitas tertentu, oleh karena itu, penggunaan simulasi Monte Carlo sangat cocok untuk menyelesaikan masalah ketidakpastian pada nilai FK hingga akhirnya akan didapatkan nilai probabilitas kelongsoran.

Tahapan perhitungan probabilitas kelongsoran dengan metode Monte Carlo menurut Wyllie dan Mah, (2004) adalah sebagai berikut:

1. Estimasi distribusi probabilitas pada setiap variabel acak input parameter kestabilan lereng (misalnya normal, lognormal)
2. Men-*generate* nilai acak (random) untuk setiap parameter jika berdistribusi seragam menggunakan interval 0 dan 1 yang dikalikan dengan *range* tiap parameter (*range* antara nilai maksimum dan minimum). Untuk setiap fungsi yang lain 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:

$$PK = \frac{N-M}{N}$$

Metode ini memerlukan simulasi hingga ribuan kali guna menghasilkan suatu perhitungan statistic yang valid. Tahapan simulasi (dilihat pada gambar 3.12). Setelah simulasi Monte Carlo selesai dijalankan dan didapatkan angka acak nilai nilai faktor keamanan, langkah selanjutnya ialah membuat distribusi frekuensi relative dari distribusi relatif nilai faktor keamanan hingga penggambaran data dalam bentuk histogram frekuensi relatif, kemudian didekati dan diasumsikan dengan fungsi kerapatan probabilitas atau distribusi teoritik yang sesuai.



Sumber : Athanasiou-Grivas, 1980

Gambar 3.9

Flow Chart Simulasi Monte Carlo Guna Perhitungan PK

3.9 Perubahan Arah Penambangan

Arah kemajuan tambang memegang peranan penting dalam melaksanakan operasi penambangan, Arah kemajuan penambangan ini dapat menentukan besarnya suatu tonase, kadar yang sesuai dengan kondisi geologi yang memungkinkan untuk dapat dilakukan kegiatan penambangan yang paling menguntungkan. Banyak hal yang akan terkena dampak apabila terbaikannya arah pentuan kemajuan tambang yaitu sasaran produksi yang tidak terpenuhi, kadar tidak sesuai dengan yang diharapkan, serta kondisi geologi yang tidak memungkinkan dilakukannya kegiatan penambangan, dan pada akhirnya akan berdampak pada operasi penambangan yang tidak produktif dan efisien. Beberapa hal ini dapat ditentukan untuk mendapatkan arah penambangan sehingga menghasilkan penambangan yang produktif dan efisien:

1. Letak kedalaman dan bentuk endapan

Dalam menentukan arah kemajuan tambang harus memperhatikan letak, kedalaman dan bentuk endapan bahan galian yang akan ditambang. Apakah bahan galian tersebut masih mungkin untuk dilakukan penambangan yang produktif dan efisien.

2. Kadar Endapan

Kadar endapan bahan galian akan sangat berpengaruh terhadap arah kemajuan tambang, bahan galian yang memiliki kadar rendah menyebabkan kegiatan penambangan tidak produktif dan efisien karena kadar endapan lebih rendah dari yang diharapkan sedangkan kadar yang tinggi masih memungkinkan untuk dilakukan pencampuran dengan endapan yang berkadar rendah yang akan menjadikan kegiatan penambangan produktif dan efisien.

3. Pencampuran (*Blending*)

Dalam kegiatan penambangan umumnya akan menemui endapan bahan galian yang mempunyai kadar bervariasi, endapan yang berkadar tinggi akan ditambang dan endapan kadar rendah akan ditinggalkan. Untuk mengatasinya maka dilakukan pencampuran antara endapan kadar tinggi dengan kadar rendah untuk didapatkan kadar yang diharapkan. Dengan ditambangnya endapan kadar rendah maka tonase bahan galian yang akan ditambang akan lebih produktif dan efisien.