

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Geoteknik Tambang

Geoteknik tambang merupakan pengaplikasian teknologi yang diterapkan kepada bumi (Holtz, 1981). Geoteknik tambang biasanya diaplikasikan pada material yang ditemukan pada permukaan ataupun dekat dengan permukaan bumi. Pada geoteknik, material-material pada bumi ini dapat berupa *soil* dan *rock*. *Soil* menurut pengertian geoteknik merupakan material *loose agglomerate* dari mineral atau material organik dan sedimen yang ditemukan di atas *bedrock*, di mana *soil* dapat mudah hancur menjadi partikel mineral atau organik satuannya. Sedangkan *rock* memiliki nilai kohesi dan gaya molekular yang kuat yang mampu mempertahankan partikel-partikelnya tetap menyatu (Holtz, 1981 dan Giani, 1992).

Dalam disiplin ilmu yang lain, pengertian dari kedua penyusun bumi tersebut dapat berbeda-beda, namun pada bidang geoteknik definisi yang digunakan adalah seperti yang sudah sebelumnya dijelaskan. Inti dari mempelajari geoteknik adalah dengan memahami karakteristik bagaimana perilaku material-material tersebut (Arif, 2015).

Geoteknik memiliki peranan yang sangat penting dalam dunia pertambangan. Geoteknik berperan dalam menganalisis stabilitas lereng tambang. Fungsi utama stabilitas lereng adalah untuk mendapatkan lereng yang aman dalam pertambangan Sistem *Open Pit*. Selain itu pada stabilitas lereng di pertambangan terbuka sangat berhubungan dengan penggalian dan penimbunan material yang dilakukan. Stabilitas lereng menyangkut persoalan keselamatan manusia (pekerja), keamanan peralatan serta produksi (Zakaria, 2009).

3.2 Pengeboran Geoteknik dan Pengambilan Conto Inti (*Core Sampling*)

Pengeboran secara umum dapat berarti membuat lubang. Dalam bidang geoteknik, pengeboran dilakukan untuk mengetahui strata atau susunan perlapisan tanah dan batuan dibawah permukaan bumi. Selain itu dilakukan untuk mengetahui jenis, serta kondisi tanah dan batuan pada daerah yang akan diteliti. Gambar pengeboran geoteknik dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.



Sumber : Wyllie dan Mah, 2004

Gambar 3.1
Pengeboran Geoteknik

Penyajian data pengeboran geoteknik akan disusun dalam bentuk *logbor*. Informasi yang dapat diperoleh pada *logbor*, menurut Djarwadi pada tahun 2012 antara lain elevasi, kedalaman, deskripsi tanah dan batuan, titik pengambilan conto tanah dan batuan, conto, simbol tanah dan batuan (litologi) dan penetrasi. Berikut merupakan informasi yang dapat diambil dari suatu *logbor*.

1. Elevasi

Elevasi atau ketinggian disajikan dalam satuan mdpl, di mana elevasi pada pengeboran geoteknik menunjukkan ketinggian dari *collar* lubang bor yang dilakukan. Di mana elevasi dari permukaan tanah tempat pengeboran geoteknik dilakukan akan dijadikan hitungan kedalaman conto, melakukan uji SPT

(*Standard Penetration Test*), mengetahui kedalaman muka air tanah, dan sebagainya.

2. Kedalaman

Kedalaman lubang bor dapat berfungsi untuk mengetahui pergantian jenis tanah atau batuan juga untuk mengetahui posisi/kedalaman serta elevasi jenis tanah atau batuan tertentu. Kedalaman juga dapat berfungsi sebagai acuan untuk melakukan pengambilan contoh tanah atau batuan yang sesuai dengan rencana kerja. Selain itu dapat dilakukn untuk pengujian SPT (*Standard Penetration Test*). Selain itu, kedalaman juga dapat berfungsi untuk mengetahui suatu anomaly geologi atau munculnya struktur geologi yang kompleks pada suatu batuan.

3. Deskripsi Tanah dan Batuan

Deskripsi tanah dan batuan dilakukan secara megaskopis dari contoh yang diperoleh. Keakuratan dari deskripsi yang dilakukan sangat dipengaruhi oleh profesionalisme dan pengalaman dari bor *master*.

4. Titik Pengambilan Contoh Tanah dan Batuan

Pengambilan contoh pada tanah atau batuan dilakukan dengan interval tertentu. Titik pengambilan contoh ini diikat dengan elevasi muka tanah titik bor dan kemiringan atau kedudukan dari tanah atau batuan tersebut.

5. Contoh yang Diperoleh

Contoh yang diperoleh (*core recovery*) merupakan panjang contoh tanah atau batuan yang diperoleh dengan suatu metode yang telah teruji. Panjang dari *core recovery* tidak akan selalu sama dengan panjang tabung bor yang digunakan, oleh karenanya diperlukan persiapan tabung dengan panjang yang cukup untuk menampung *core* keperluan semua uji yang akan dilakukan, hal tersebut bertujuan untuk menjaga homogenitas dari contoh tanah dan batuan.

6. Simbol Tanah dan Batuan (Litologi)

Simbol ini diperlukan untuk membedakan jenis dari tanah dan batuan yang didapatkan dari kegiatan pengeboran geoteknik.

7. Penetrasi

Penetrasi merupakan nilai yang mencerminkan tingkat kekerasan suatu lapisan tanah. Nilai penetrasi mencerminkan nilai SPT (*Standard Penetration Test*) terkoreksi (N_{60}) yang diartikan sebagai jumlah pukulan yang diperlukan untuk menembus suatu lapisan tanah setebal 30 cm dengan alat uji SPT (*Standard Penetration Test*).

Pemilihan metode pengeboran dipengaruhi oleh beberapa macam faktor, antara lain genesa endapan yang akan di bor, kedalaman target endapan, tipe batuan, keadaan topografi dan sebagainya.

Penangan pada lubang bor biasanya akan dilakukan pembersihan, yaitu dengan mengalirkan fluida agar *cutting* keluar dalam bentuk *sludge* dan kemudian ditampung di permukaan dalam *sludge tank*. Tingkat ketelitian dari *drill core* yang dilakukan sangat tergantung pada *core recovery* yang didapatkan. Biasanya, tingkat ketelitian *cutting* pengeboran akan relatif rendah, baik kadar (akibat *salting*) ataupun posisi kedalaman (akibat *lifting capacity*).

Terdapat beberapa kesalahan yang mungkin terjadi terkait dari kegiatan pengeboran, antara lain:

1. Inklinasi (kemiringan) dari lubang bor tidak sesuai dengan kemiringan lapisan.
2. *Core recovery* kurang baik.
3. Penentuan interval pengambilan conto yang tidak sesuai.
4. Kesalahan preparasi conto.
5. Penanganan *core* kurang baik.

Pengambilan conto inti (*core sample*) diperoleh dari pengeboran inti. Conto ini biasanya akan disimpan sementara pada *core barrel* yang diberi label keterangan mengenai kedalaman dan nama lubang bor. Sampel kemudian akan dibagi menjadi dua searah dengan arah pengeboran, di mana satu bagian akan digunakan sebagai *assay* sedangkan satu bagian lainnya digunakan untuk dokumentasi geologi. Selain itu beberapa *core* akan diambil dan digunakan sebagai sampel yang nantinya akan dilakukan pengujian di laboratorium untuk menghasilkan data berupa data sifat fisik dan mekanik dari batuan. Pemilihan ini dilakukan dengan mengacu pada perbedaan litologi, karakteristik batuan, perbedaan *inferred strength* serta potensi air asam tambang. proses *sampling* ini biasanya dilakukan secara khusus dan teliti untuk mendapatkan sampel yang layak uji. Berikut merupakan prosedur yang dilakukan dalam *sampling* geoteknik.

1. Pengambilan sampel dilakukan pada setiap perubahan litologi, perbedaan kekuatan batuan serta karakteristik lain yang terdeskripsi. Ukuran sampel yang diuji minimal harus memiliki panjang 3 kali diameter atau kurang lebih 20 cm.
2. Sampel kemudian akan dibungkus dengan plastik kedap udara (*wrap*) dan kemudian dilapisi oleh *aluminium foil* untuk mencegah terjadinya kontak dengan udara. Kontak ini akan mudah merubah karakteristik dari batuan terutama pada batuan logam. Beri label informasi pada tiap sampel yang meliputi nama *borehole*, nama *rig*, kode sampel, kedalaman dan panjang sampel, serta litologi *top* dan *bottom* dari sampel.
3. Terakhir sampel dibungkus dengan *plastic roll* dan busa agar dapat menahan guncangan yang mungkin terjadi selama mobilisasi sampel. Terakhir sampel dimasukkan ke dalam pipa PVC dan ditutup dengan dop yang kedap air dan diberi label.

Berikut merupakan gambar dari conto inti bor (**Gambar 3.2**).



Sumber : Wyllie dan Mah, 2004

Gambar 3.2
Conto Inti Bor

3.3 Uji Geomekanika Laboratorium

Pengujian geomekanika di laboratorium bertujuan untuk mendapatkan data sifat fisik dan mekanik dari conto. Namun sebelum dilakukan pengujian, conto batuan biasanya akan dilakukan preparasi.

3.3.1 Preparasi Conto Batuan

Preparasi conto dilakukan agar sesuai dengan syarat-syarat pengujian. Preparasi dilakukan dengan cara meng-*coring* blok batuan (jika sampel batuan berbentuk blok) dan dibentuk menjadi silinder dengan diameter antara lain 50 – 70 mm dengan tinggi dua kali dari diameter tersebut ($L/D = 2$) (SNI, *International Society for Rocks Mechanic* dan *American Society for Testing and Material*). Untuk sampel yang sudah dalam bentuk silinder ketika akan diuji maka dilakukan pemotongan hingga ukuran sesuai dengan syarat yang disebutkan diatas.

Setelah sampel berukuran sesuai dengan syarat kemudian sampel akan di haluskan dan diratakan dengan ampelas, baik secara manual ataupun dengan alat *polishing machine*. Terakhir dilakukan pengukuran final dengan alat ukur akurat seperti jangka sorong atau micrometer sekrup.

Proses preparasi batuan dapat dilihat pada **Gambar 3.3**.



Sumber: Irwandy Arif, 2016

Gambar 3.3
Proses Preparasi dari Blok Batuan

3.3.2 Pengujian Sifat Fisik Batuan

Pengujian sifat fisik bertujuan untuk mendapatkan karakteristik fisik asli sampel tanpa diberi gaya apapun, dan telah ditetapkan oleh *International Society for Rock Mechanics* pada tahun 1981. Pengujian sifat fisik ini berguna sebagai data pendukung dari batuan yang akan diuji. Apabila sifat fisik batuan yang diuji menghasilkan nilai atau angka yang tidak seragam maka dapat diindikasikan jika kekuatan batuan tidak merata atau dengan kata lain sampel memiliki karakteristik yang bervariasi (heterogen).

Pengujian sifat fisik akan menghasilkan data berupa:

1. Bobot isi asli (*natural unit weight*)
2. Bobot isi kering (*dry unit weight*)
3. Bobot isi jenuh (*saturated unit weight*)
4. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*)
5. Berat jenis sejati (*true specific gravity*)
6. Kadar air asli (*natural water content*)
7. Kadar air jenuh (*absorption*)
8. Derajat kejenuhan (*degree of saturation*)
9. Porositas (n)
10. *Void ratio* (e)

Pengujian yang dilakukan untuk memperoleh data sifat fisik batuan dapat dilakukan dalam beberapa tahap di mana hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan data awal mengenai sampel, yaitu:

1. Penimbangan massa batuan natural yang belum diberi perlakuan apapun (W_n).
2. Penjenuhan batuan dengan menggunakan desikator selama 24 jam lalu ditimbang (W_w).
3. Penimbangan massa batuan jenuh yang tergantung di dalam air (W_s).
4. Pengeringan conto batuan di dalam oven selama 24 jam pada suhu kurang lebih 90°C . Timbang massa batuan kering (W_o).
5. Menghitung volume batuan tanpa pori-pori: $W_o - W_s$
6. Menghitung volume batuan total: $W_w - W_s$

Setelah prosedur pengujian sifat fisik dilakukan, kemudian untuk mendapatkan nilai sifat-sifat fisik batuan dilakukan perhitungan sebagai berikut:

1. Bobot Isi Asli (*Natural Unit Weight*)

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

2. Bobot Isi Kering (*Dry Unit Weight*)

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

3. Bobot Isi Jenuh (*Saturated Unit Weight*)

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

4. Berat Jenis Semu (*Apparent Specific Gravity*)

$$\frac{W_o}{W_w - W_s} \times \text{bobot isi air} \dots\dots\dots(3.4)$$

5. Berat Jenis Sejati (*True specific Gravity*)

$$\frac{W_o}{W_o - W_s} / \text{ bobot isi air} \dots \dots \dots (3.5)$$

6. Kadar Air Asli (*Natural Water Content*)

$$\frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100\% \dots \dots \dots (3.6)$$

7. Kadar Air Jenuh (*Absorption*)

$$\frac{W_w - W_o}{W_o} \times 100\% \dots \dots \dots (3.7)$$

8. Derajat Kejenuhan (*Degree of Saturation*)

$$\frac{W_n - W_o}{W_w - W_o} \times 100\% \dots \dots \dots (3.8)$$

9. Porositas (n)

$$n = \frac{W_w - W_o}{W_w - W_s} \times 100\% \dots \dots \dots (3.9)$$

10. Void Ratio (e)

$$e = \frac{n}{1-n} \dots \dots \dots (3.10)$$

3.3.3 Pengujian Sifat Mekanik Batuan

Pengujian sifat mekanik bertujuan untuk mendapatkan karakteristik mekanik asli sampel saat diberi gaya, dan telah ditetapkan oleh *International Society for Rock Mechanics* pada tahun 1981. Pengujian sifat mekanik pada sampel inti bor untuk keperluan geoteknik biasanya dilakukan sesuai kebutuhan, salah satunya yaitu uji kuat geser.

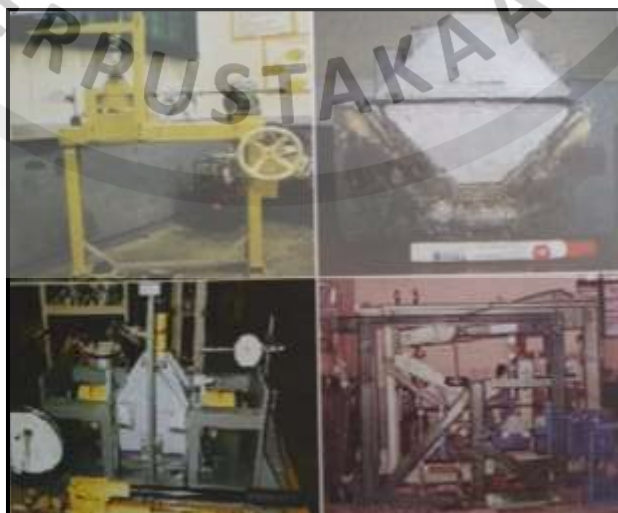
Semua massa batuan memiliki suatu bidang yang diskontinyu, seperti kekar, bidang perlapisan, ataupun sesar. Pada kedalaman batuan yang dangkal, di mana tingkatan tegangan yang berlaku atau bekerja pada batuan sangat rendah atau

dapat diabaikan nilai kuatnya, deformasi ataupun runtuh yang terjadi pada batuan utuh (*intact rock*) dan massa batuan lebih banyak dan cenderung dikendalikan oleh luncuran yang terjadi pada bidang dikontinyu dan juga oleh sifat fisik butiran batuan utuh diantara bidang dikontinyu yang ada.

Kasus-kasus tersebut dapat ditemukan dalam pembuatan lereng pada kegiatan tambang terbuka. Oleh karena itu, untuk mencegah deformasi atau runtuh yang mungkin terjadi, dibutuhkan parameter-parameter dari kuat geser batuan, yaitu kohesi (c) dan sudut gesek dalam (Φ), di mana kedua parameter tersebut dapat dicari dengan menjalankan pengujian kuat geser langsung di laboratorium.

Kuat geser batuan merupakan perlawanan atau reaksi yang terjadi pada batuan ketika tegangan diberikan, di mana reaksi ini akan bekerja disepanjang bidang geser dalam batuan, yang mana akan dipengaruhi oleh karakteristik intrinsik dan faktor eksternal. Untuk mengetahui kuat geser suatu batuan pada tegangan normal perlu diuji kuat geser di mana dapat digunakan minimal sampel sebanyak 4 buah.

Dibawah merupakan salah satu alat pengujian kuat geser (**Gambar 3.4**).



Sumber : Irwandy Arif, 2016

Gambar 3.4
Alat Pengujian Kuat Geser

Adapun parameter yang dapat diketahui melalui uji kuat geser langsung batuan adalah sebagai berikut:

1. Kurva intrinsik (*Strength envelope*)
2. Kuat geser (*Shear strength*)
3. Sudut gesek dalam (Φ)
4. Kohesi (c), dan
5. Tegangan normal (σ_n)

Rumus – rumus yang digunakan dalam pengujian kuat geser batuan antara lain sebagai berikut :

1. Tegangan Normal

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \dots\dots\dots (3.14)$$

2. Kuat Geser

$$S = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (3.15)$$

Keterangan :

S = Kuat Geser (kg/cm^2)

N = Beban Normal (kg)

A = Luas Permukaan Bidang Geser (cm^2)

P = Pembebanan Geser (kg)

Parameter yang di dapat dari pengujian kuat geser langsung batuan dapat berguna dalam analisis kestabilan suatu lereng, yaitu untuk menemukan nilai kohesi dan sudut gesek Dalam dengan menggunakan kurva *shear stress* terhadap *shear displacement*. Kemudian kedua nilai tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan nilai kuat geser. Kriteria kuat geser yang paling banyak digunakan merupakan kriteria Mohr-Coulomb yang dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$S = \sigma_n \cdot \text{Tan } \phi + C \dots\dots\dots (3.16)$$

Keterangan :

σ_n = Tegangan Normal (kg/cm^2)

ϕ = Sudut Gesek Dalam

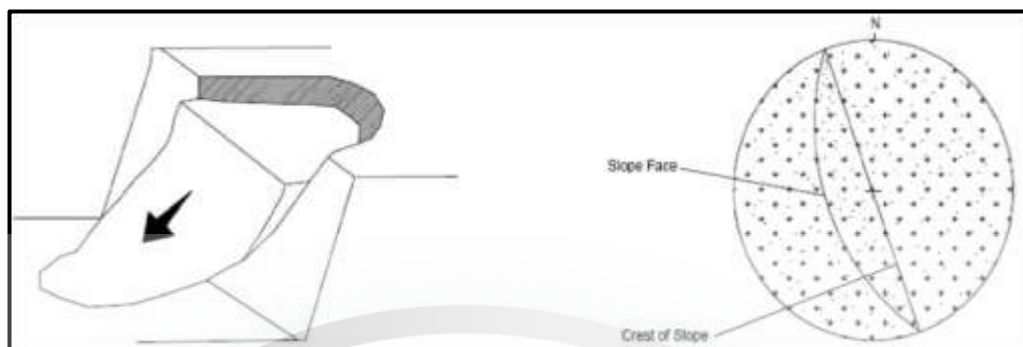
C = Kohesi

3.4 Kelongsoran Lereng

Longsoran secara istilah dapat diartikan sebagai gerakan tanah dan batuan yang terjadi pada lereng. Menurut West tahun 1995 longsoran merupakan pergerakan massa batuan atau tanah yang menggelincir karena pengaruh secara langsung dari gaya gravitasi. Longsoran tidak akan terjadi apabila gaya penahan longsor lebih besar dari gaya penggeraknya (Hoek dan Bray, 1981).

Terdapat beberapa jenis longsoran yang mana sangat dipengaruhi oleh karakteristik material dan struktur yang terbentuk, namun pada endapan batubara longsoran busur (*circular failure*) merupakan longsoran yang umum terjadi.

Longsoran busur dapat terjadi pada lereng yang terkekarkan atau sangat lapuk (Lihat **Gambar 3.5**). Bentuk longsoran ini berupa busur atau sirkular bial digambarkan pada penampang melintang. Longsoran ini umum terjadi pada lereng bermaterial tanah karena pada tanah memiliki struktur yang tidak menentu dan terlapukkan. Bidang gelincir dapat terbentuk dengan mencari posisi yang paling kecil hambatannya. Longsoran busur dapat terjadi pada material atau massa batuan yang tidak saling mengunci (*not interlocked*). Berikut merupakan gambaran dari longsoran busur pada lereng dan stereografisnya.



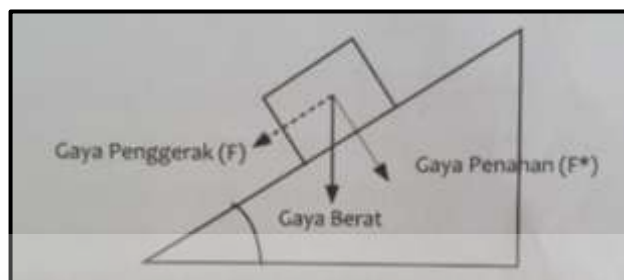
Sumber : Hoek dan Bray, 1981

Gambar 3.5
Skema Longsoran Busur

3.5 Kestabilan Lereng

Kestabilan atau kemantapan suatu lereng, baik alami ataupun buatan, sangat besar dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dinyatakan secara sederhana sebagai gaya penggerak dan gaya penahan pada bidang gelincirnya. Pada keadaan gaya penahan yang lebih besar daripada gaya penggerak, maka lereng tersebut akan berada pada keadaan yang stabil. Namun apabila gaya penggerak yang lebih besar daripada gaya penahan, maka lereng tersebut tidak stabil dan mungkin untuk terjadinya longsoran. Sebenarnya, longsoran merupakan proses yang alami di mana lereng membentuk kestabilannya sendiri yang baru yaitu keadaan gaya penahan lebih besar dari gaya penggeraknya. Skema kestabilan lereng dapat dilihat pada **Gambar 3.6**.

Tingkat kestabilan lereng dinyatakan dengan nilai Faktor Keamanan (*Safety Factor*) atau disingkat menjadi FK. Faktor keamanan diperlukan pada suatu lereng yang digunakan sebagai acuan kemantapan lereng untuk mencegah terjadinya longsoran (Arif, 2016).



Sumber : Irwandy Arif, 2016

Gambar 3.6
Faktor Keamanan Sederhana

Apabila nilai FK untuk suatu lereng lebih besar dari 1,0 (gaya penahan > gaya penggerak), lereng tersebut dalam keadaan stabil. Namun jika nilai FK lebih kecil dari 1,0 (gaya penahan < gaya penggerak), lereng tersebut berada dalam keadaan tidak stabil dan mungkin untuk terjadi longsor (Arif, 2016). Jika dirumuskan, penjelasan diatas dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$F = \frac{\text{Shear strength available to resist sliding}}{\text{Shear stress mobilized along failure surface}} \dots\dots\dots(3.22)$$

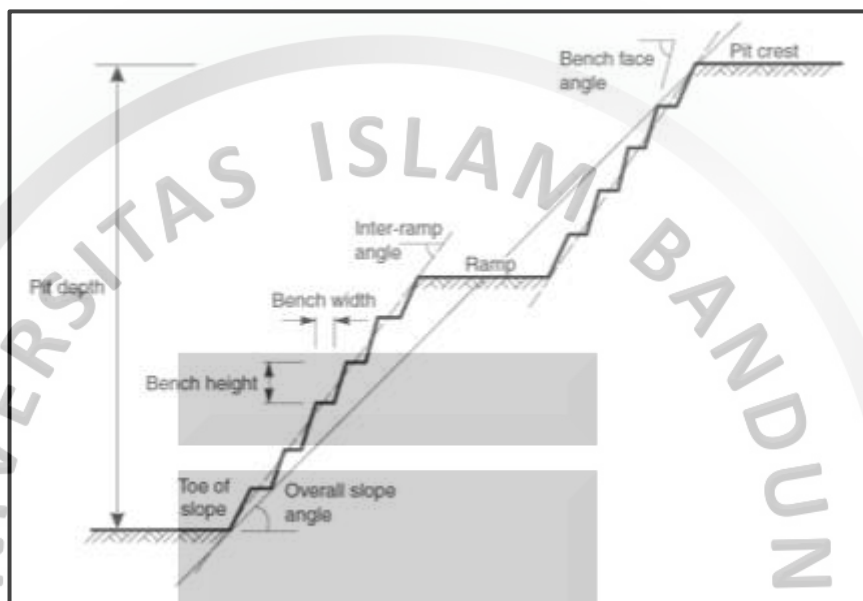
Terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng dan dapat dikelompokkan menjadi 5 faktor utama, yaitu:

3.5.1 Geometri Lereng

Geometri lereng merupakan ukuran yang dinyatakan dengan tinggi dan besar kemiringan lereng. Keduanya sangat mempengaruhi kestabilan suatu lereng. Perubahan tinggi lereng yang semakin tinggi akan menyebabkan lereng semakin tidak stabil karena semakin tingginya gaya penggerak di banding gaya penahan yang tetap konstan, begitu juga dengan kemiringan lereng di mana semakin tinggi sudut kemiringan lereng maka gaya penggerak akan semakin tinggi di banding gaya penahannya yang tetap konstan. Dalam kegiatan penambangan sudut kemiringan lereng yang besar akan memberikan keuntungan yang lebih tinggi dibanding sudut yang kecil karena jumlah penggalian yang harus dilakukan semakin sedikit. Oleh karenanya geometri lereng harus menggunakan tinggi dan kemiringan se-efisien

mungkin dan se-menguntungkan mungkin namun dengan lereng yang masih dalam keadaan stabil.

Berikut merupakan gambar dari komponen-komponen lereng pada tambang terbuka (**Gambar 3.7**).



Sumber : Hoek dan Bray, 1981

Gambar 3.7
Komponen-Komponen Lereng Pada Tambang Terbuka

3.5.2 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Sifat fisik dan mekanik yang dimiliki oleh suatu batuan tidak akan sama dengan batuan lainnya sehingga kemampuan lereng dalam menahan beban akan berbeda pula. Sifat fisik dan sifat mekanik tanah atau batuan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng karena faktor ini sangat berhubungan dengan besar kecilnya nilai kuat geser (Supandi, 2013). Sifat fisik dan sifat mekanik ini didapat dari sampel batuan dari hasil pengeboran geoteknik dan dilakukan uji geomekanika di laboratorium. Dari seluruh hasil yang didapat dari uji geomekanika di laboratorium, tidak seluruh data digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng. Data-data yang diperlukan untuk analisis kestabilan lereng, antara lain:

1. Bobot Isi Batuan

Bobot isi merupakan perbandingan antara berat material dengan volume material yang dinyatakan dalam satuan berat per volume (Supandi, 2013). Bobot isi batuan akan mempengaruhi besarnya beban pada lereng, sehingga jika semakin besar bobot isi batuan maka gaya penggerak yang terbentuk pada lereng akan semakin besar dan menyebabkan lereng semakin tidak stabil. Bobot isi batuan didapatkan dari hasil pengujian sifat fisik di laboratorium. Data yang digunakan adalah bobot isi asli (*natural unit weight*) dan bobot isi jenuh (*saturated unit weight*).

2. Kohesi dan Sudut Gesek Dalam

Kohesi merupakan kekuatan tarik menarik antar partikel butiran batuan yang dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas, sedangkan sudut gesek dalam merupakan sudut rekahan yang terbentuk jika suatu batuan dikenakan tegangan yang melebihi tegangan gesernya (Supandi, 2013). Kohesi dan sudut gesek dalam akan mempengaruhi besarnya gaya penahan pada lereng, sehingga jika semakin besar nilai kohesi dan sudut gesek dalam maka gaya penahan yang terbentuk pada lereng akan semakin besar dan menyebabkan lereng semakin stabil. Kedua data ini didapatkan dari hasil pengujian sifat mekanik di laboratorium. Data tersebut didapatkan dengan beberapa cara sesuai pengujian yang dilakukan yaitu di antaranya uji kuat tekan triaksial (*triaxial compressive strength test*) dan uji kuat geser (*direct shear strength test*).

3.5.3 Orientasi Umum Diskontinuitas

Struktur geologi merupakan gambaran arsitektur permukaan bumi akibat deformasi batuan oleh gaya tektonik (Thompson dan Turk, 1997). Struktur geologi akan menghasilkan lipatan, kekar dan patahan yang sangat mempengaruhi

stabilitas lereng. Struktur ini akan menghasilkan bidang lemah yang dapat berpotensi menyebabkan longsor. Bidang-bidang lemah ini antara lain kekar, sesar, *shear zone*, bidang perlapisan dan foliasi (West, 1995).

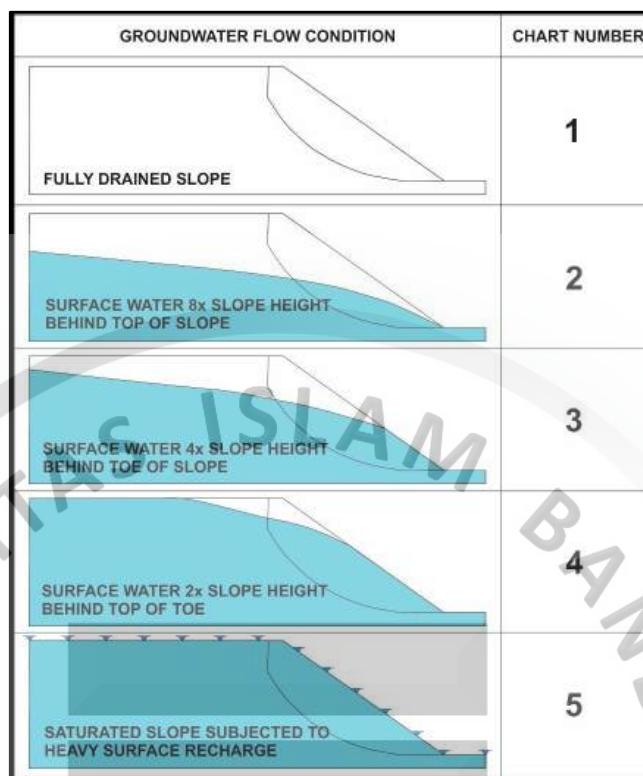
Secara umum, dari bidang-bidang lemah yang telah disebutkan di atas, perlapisan batuan pada suatu lereng, sesar dan kekar merupakan faktor yang paling umum ditemukan dan mempengaruhi kestabilan lereng paling besar. Sebagai contoh, bidang-bidang lemah yang memiliki kedudukan searah atau hampir searah dengan kedudukan lereng dan memiliki kemiringan yang lebih landau dari kemiringan lereng maka kestabilan lereng akan semakin lemah.

3.5.4 Air Tanah dalam Massa Batuan

Air tanah dalam massa batuan memiliki pengaruh terhadap stabilitas lereng. Terdapat 3 pengaruh terhadap stabilitas lereng. Dua pengaruh langsung pertama air tanah dalam massa batuan terhadap kestabilan lereng adalah pertama air tanah dapat mengurangi kekuatan geser massa batuan yang mengurangi tegangan normal efektif dan menyebabkan tekanan air pori atau air pada *cracks*. Kedua adalah air tanah dalam massa batuan menyebabkan berat massa lereng semakin besar. Pengaruh tidak langsung dari air tanah dalam massa batuan terhadap kestabilan lereng adalah air tanah dapat menurunkan kekuatan massa lereng (teralterasi atau progresif berubah).

Berikut merupakan pembagian kondisi air tanah dalam massa batuan lereng (lihat **Gambar 3.8**) dan dibedakan menjadi kondisi yang dibedakan, yaitu:

1. Kondisi 1 = Lereng kering.
2. Kondisi 2 = Tinggi muka air tanah 2/10 tinggi lereng.
3. Kondisi 3 = Tinggi muka air tanah 6/10 tinggi lereng.
4. Kondisi 4 = Tinggi muka air tanah 8/10 tinggi lereng.
5. Kondisi 5 = Lereng jenuh.



Sumber : Hoek dan Bray, 1981

Gambar 3.8
Kondisi Air Tanah Pada Lereng

3.5.5 Faktor Luar Sistem Lereng

Faktor luar yang berperan dalam kestabilan lereng dapat berupa beban, baik beban statis atau beban dinamis. Beban statis merupakan beban diam yang berada pada lereng seperti bangunan pada belakang *crest* lereng, dan lain sebagainya. Beban dinamis merupakan beban yang bergerak, seperti beban akibat getaran gempa bumi atau akibat getaran peledakan, dan lain sebagainya.

3.6 Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Kesetimbangan Batas

Metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) merupakan metode yang sangat populer digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng tipe gelinciran dan rotasional (Arif, 2016). Metode ini salah satu metode yang mudah digunakan, sederhana dan telah terbukti keandalannya dalam praktik rekayasa geoteknik selama bertahun-tahun.

Setelah geometri dari bidang gelincir ditentukan, massa yang dibatasi oleh busur kemudian dibagi menjadi irisan-irisan. Hal tersebut bertujuan untuk mempertimbangkan adanya variasi kekuatan geser dan tekanan air pori sepanjang bidang runtuh (Arif, 2015). Selanjutnya adalah menghitung data-data yang berada pada tiap irisan dan nilai FK dapat ditentukan dengan menghitung menggunakan persamaan kesetimbangan.

Metode irisan dapat dibedakan menjadi 2 kategori yang dikelompokkan berdasarkan kondisi kesetimbangan yang dipenuhi (Arif, 2016), yaitu di antaranya:

1. Metode yang tidak memenuhi semua kondisi kesetimbangan gaya dan momen. Metode yang menggunakan kondisi ini adalah Metode Irisan Biasa, Metode Bishop Yang Disederhanakan (*simplified bishop method*) dan Metode Janbu Yang Disederhanakan (*simplified janbu method*).
2. Metode yang memenuhi semua kondisi kesetimbangan gaya dan momen. Metode yang menggunakan kondisi ini adalah Metode Spencer, Metode Morgenstern-Price dan Metode Kesetimbangan Batas Umum (*generalized limit equilibrium method*).

Terdapat sejumlah variasi dari metode irisan yang disebabkan oleh perbedaan asumsi, di antaranya yaitu ditunjukkan pada **Tabel 3.1** dan **Tabel 3.2**.

Perhitungan FK dengan metode kesetimbangan batas harus dilakukan pada sejumlah bidang runtuh hingga diperoleh suatu bidang runtuh kritis yang merupakan bidang runtuh yang menghasilkan FK terkecil. Penentuan bidang runtuh terkecil ini dapat dilakukan dengan *try and error* atau menggunakan metode optimasi.

Dari berbagai variasi metode irisan yang telah disebutkan, Metode Bishop merupakan salah satu metode yang banyak digunakan.

Tabel 3.1
Asumsi-Asumsi Tiap Metode Irisan

Metode	Asumsi
Irisan Biasa (Fellenius)	Resultan gaya antar-irisan sama dengan nol dan bekerja dengan permukaan runtuh
Bishop yang Disederhanakan	Gaya geser antar-irisan sama dengan nol ($X=0$)
Janbu yang Disederhanakan	Gaya geser antar-irisan sama dengan nol ($X=0$). Faktor koreksi digunakan sebagai faktor sempiris untuk memasukkan efek dari gaya geser antar-irisan
Lowe-Karafiath	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan sama dengan rata-rata dari kemiringan permukaan lereng dan kemiringan bidang runtuh
<i>Corps of Engineer</i>	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan besarnya sama dengan: <ul style="list-style-type: none"> - Kemiringan permukaan lereng, atau - Kemiringan dari kaki bidang runtuh ke puncak bidang runtuh
Spencer	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan adalah sama untuk semua irisan
Morgenstern-Price	Kemiringan gaya geser antar-irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan
Keseimbangan Batas Umum	Sudut gaya antar-irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan

Sumber: John Krahn, 2004

Tabel 3.2
Kondisi Keseimbangan yang Dipenuhi

Metode	Keseimbangan Gaya		Keseimbangan Momen
	Vertikal	Horizontal	
Irisan Biasa (Fellenius)	Tidak	Tidak	Ya
Bishop yang Disederhanakan	Ya	Tidak	Ya
Janbu yang Disederhanakan	Ya	Ya	Tidak
Janbu yang Umum	Ya	Ya	Tidak
Lowe-Karafiath	Ya	Ya	Tidak
<i>Corps of Engineer</i>	Ya	Ya	Tidak
Spencer	Ya	Ya	Ya
Morgenstern-Price	Ya	Ya	Ya
Keseimbangan Batas Umum	Ya	Ya	Ya

Sumber: John Krahn, 2004

Metode ini diperkenalkan oleh A. W. Bishop. Metode Bishop digunakan untuk menganalisis bidang gelincir (*slip surface*) yang memiliki bentuk lingkaran atau busur. Dalam metode ini, diasumsikan jika gaya-gaya normal yang bekerja pada tiap irisan berpusat di alas irisan dan dapat ditentukan dengan menguraikan gaya-gaya yang bekerja pada irisan vertikal ataupun normal. Metode ini menganggap jika gaya-gaya yang bekerja pada irisan memiliki resultan nol pada arah vertikal (Bishop, 1955).

Dengan memperhitungkan seluruh keseimbangan gaya pada irisan maka rumus untuk Faktor Keamanan (FK) pada Metode Bishop dapat diperoleh sebagai berikut (Anderson dan Richards, 1987):

$$FK = \frac{[c' \cdot \beta + (N - u\beta) \tan \phi]}{W \cdot \sin \alpha} \dots \dots \dots (3.23)$$

Keterangan :

- c = Kohesi tanah
- β = Panjang segmen tanah
- N = Gaya normal total pada irisan
- ϕ = Sudut gesek dalam
- W = Berat segmen tanah
- α = Sudut kemiringan lereng

Pada kegiatan analisis kemantapan lereng terdapat dua nilai FK yang dapat dihasilkan yaitu FK_{statis} dan $FK_{dinamis}$. FK_{statis} merupakan Faktor Keamanan suatu lereng tanpa mempertimbangkan beban luar sistem lereng. Beban-beban ini dapat berupa beban dari kegempaan pada lokasi atau pembebanan akibat proses peledakan. Sedangkan $FK_{dinamis}$ merupakan Faktor Keamanan suatu lereng yang mempertimbangkan beban luar sistem lereng. $FK_{dinamis}$ merupakan FK yang umumnya digunakan sebagai acuan karena nilai yang dihasilkan dari $FK_{dinamis}$ ini

merupakan nilai keamanan yang menunjukkan keadaan terburuk dibandingkan dengan FK_{statis} .

3.7 Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Probabilitas

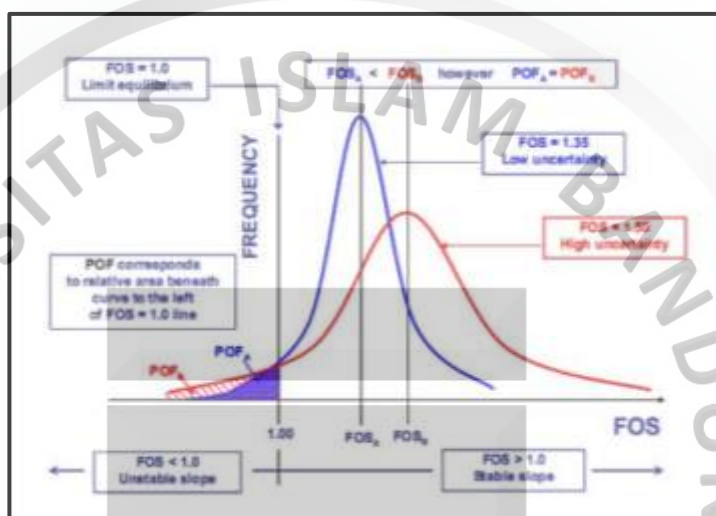
Probabilitas Kelongsoran (PK) atau *probability of failure* adalah indikator stabilitas lereng berbasis pendekatan statistik. Pada stabilitas lereng FK merupakan rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak, namun dalam Probabilitas Kelongsoran, kedua input parameter tersebut merupakan fungsi dari variabel acak yang berdistribusi probabilitas. Probabilitas Kelongsoran sendiri akan didapat dengan mengkombinasikan keduanya. (Arif, 2016).

Pada kegiatan analisis Probabilitas Kelongsoran terdapat dua nilai PK yang dapat dihasilkan yaitu PK_{statis} dan $PK_{dinamis}$. PK_{statis} merupakan Probabilitas Kelongsoran suatu lereng tanpa mempertimbangkan beban luar sistem lereng. Beban-beban ini dapat berupa beban dari kegempaan pada lokasi atau pembebanan akibat proses peledakan. Sedangkan $PK_{dinamis}$ merupakan probabilitas keongsoran suatu lereng yang mempertimbangkan beban luar sistem lereng. $PK_{dinamis}$ merupakan PK yang umumnya digunakan sebagai acuan karena probabilitas yang dihasilkan dari $PK_{dinamis}$ ini merupakan probabilitas yang menunjukkan keadaan terburuk dibandingkan dengan PK_{statis} .

3.7.1 Konsep Probabilitas Kelongsoran

Pada **Gambar 3.10** dibahas mengenai konsep sederhana dari probabilitas (kemungkinan) longsor suatu lereng dengan menggambarkan nilai FK sebagai fungsi variabel acak yang berdistribusi probabilitas. PK dihitung sebagai rasio antara area pada distribusi $FK < 1$ dibagi dengan total area pada kurva distribusi probabilitas.

Metode ini merupakan suatu pendekatan yang mempertimbangkan sebuah variasi yang ada pada parameter masukan yang menghasilkan nilai FK tertentu. Hal ini didasarkan bahwa seluruh nilai masukan acak tersebut memiliki peluang yang sama dalam menghasilkan FK tertentu akibat adanya ketidakpastian dari seluruh parameter masukan.



Sumber: Tapia et al., 2007

Gambar 3.10
Konsep Probabilitas Kelongsoran

Secara garis besar, klasifikasi dampak kelongsoran (*consequence*) pada lereng terbuka terdiri atas :

1. Kelongsoran Lereng Keseluruhan (*Global Failure*), merupakan longsor yang dapat membahayakan keselamatan pekerja dan keberlangsungan tambang. Longsor ini memerlukan waktu rehabilitasi cukup lama, mengganggu jadwal produksi dan pemenuhan kontak penjualan.
2. Kelongsoran Multi Jenjang (*Interramp Failure*), yaitu longsor yang terjadi pada lebih dari satu jenjang, dan kadangkala merusak jalan angkut.
3. Kelongsoran Tunggal/Jenjang (*Bench Failure*), yaitu kelongsoran lereng hanya mempengaruhi operasi produksi di sekitar jenjang yang longsor.

3.7.2 Input Parameter Estimasi Probabilistik

Dalam input estimasi probabilistik, terdapat parameter statistik yang harus terpenuhi dan diketahui nilainya, parameter statistik yang dilakukan antara lain rata-rata, relatif minimum, relatif maksimum, standar deviasi dan normalitas data.

Penentuan rata-rata, standar deviasi, relatif minimum dan relatif maksimum dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Rata-Rata} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \dots\dots\dots(3.24)$$

$$\text{Relatif Maksimum} = X_{\max} - (\text{Rata-Rata}) \dots\dots\dots(3.25)$$

$$\text{Relatif Minimum} = (\text{Rata-Rata}) - X_{\min} \dots\dots\dots(3.26)$$

$$\text{Standar Deviasi} = \sqrt{\frac{\sum (X - (\text{rata-rata}))^2}{(n-1)}} \dots\dots\dots(3.27)$$

Keterangan:

X₁ = Nilai Data ke-1

N = Jumlah Data

X_{max} = Nilai Data paling Maksimum

X_{min} = Nilai Data paling Minimum

Input masukkan metode probabilistik membutuhkan parameter normalitas data dan dapat dicari melalui uji normalitas. Uji normalitas dilakukan untuk untuk mengkarakterisasi distribusi data karena ada hakikatnya data di alam memiliki variasi dan tidak bisa dianggap semua homogen. Kemudian karakter data diperoleh dalam bentuk jenis distribusi, nilai rata-rata dan standar deviasi (Masagus, dkk, 2018).

Uji normalitas yang dilakukan mengacu pada hasil distribusi data yang ditunjukkan dari grafik distribusi data, jika data memiliki distribusi yang tidak normal maka dilakukan pengujian uji normalitas menggunakan metode Kolmogorov

Smirnov, sedangkan jika data distribusi yang dilakukan menghasilkan distribusi yang normal maka dilakukan pengujian menggunakan metode Shapiro Wilk.

1. Metode Kolmogorov Smirnov

Metode Kolmogorov Smirnov menggunakan data dasar yang belum diolah dalam tabel distribusi frekuensi. Data ditransformasikan dalam nilai Z untuk dapat dihitung luasan kurva normal sebagai probabilitas kumulatif normal. Signifikasi Metode Kolmogorov-Smirnov menggunakan tabel pembanding Kolmogorov-Smirnov. Adapun persyaratan data yang dianalisis menggunakan metode ini, yaitu :

- a. Data berskala interval atau *ratio* (kuantitatif).
- b. Data tunggal / belum dikelompokkan pada tabel distribusi frekuensi.
- c. Data untuk n besar maupun n kecil.
- d. Distribusi data tidak normal.

2. Metode Shapiro Wilk

Metode Shapiro Wilk menggunakan data dasar yang belum diolah dalam tabel distribusi frekuensi. Data diurutkan, kemudian dibagi dalam dua kelompok untuk dikonversi dalam Shapiro Wilk. Dapat juga dilanjutkan transformasi dalam nilai Z untuk dapat dihitung luasan kurva normal. Adapun persyaratan data yang dianalisis menggunakan metode ini, yaitu :

- a. Data berskala interval atau *ratio* (kuantitatif).
- b. Data tunggal / belum dikelompokkan pada tabel distribusi frekuensi.
- c. Data dari sampel random.
- d. Distribusi data normal.

3.7.3 Metode Perhitungan Probabilitas Kelongsoran

Metode yang paling banyak digunakan pada analisis kelongsoran dengan probabilitas adalah metode Monte Carlo. Metode ini sangat berguna dalam

pemecahan permasalahan yang berkaitan dengan variabel acak. Metode ini merupakan metode yang sederhana, yang mana lebih fleksibel dalam menggabungkan suatu varietas distribusi probabilitas yang cukup besar tanpa banyak penafsiran serta memiliki kemampuan untuk memodelkan korelasi di antara variabel dengan mudah (Hammah dan Yacoub, 2009). Pada metode kesetimbangan batas nilai FK merupakan rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak, di mana masing-masing parameter merupakan fungsi dari variabel acak yang bersifat tak tentu (*uncertain*) dan berdistribusi probabilitas tertentu. Oleh karenanya simulasi Monte Carlo sangat cocok digunakan untuk menyelesaikan permasalahan ketidakpastian pada nilai FK hingga akhirnya akan didapatkan nilai Probabilitas Kelongsoran.

Tahapan perhitungan Probabilitas Kelongsoran dengan metode Monte Carlo menurut Wyllie dan Mah (2004) yaitu sebagai berikut:

1. Penentuan distribusi probabilitas pada setiap variabel acak yang digunakan untuk input parameter kestabilan lereng (contoh: normal, lognormal)
2. Men-*generate* atau memunculkan nilai acak (*random*) untuk setiap parameter jika berdistribusi *uniform* 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:

$$PK = \frac{N-M}{M} \dots \dots \dots (3.28)$$

Metode ini memerlukan simulasi hingga ribuan kali guna menghasilkan suatu perhitungan statistik yang valid.

3.8 Kriteria Kemantapan Lereng

Kriteria kemantapan lereng merupakan kriteria yang menjadi acuan apakah suatu lereng dapat dianggap stabil atau tidak. Terdapat banyak kriteria kemantapan lereng yang banyak digunakan, namun Kriteria Kemantapan Lereng berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM Tahun 2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik merupakan salah satu yang menjadi acuan di Indonesia. Kriteria ini menggunakan 4 jenis variabel yang dipertimbangkan yaitu jenis lereng, FK_{statis} , FK_{dinamis} , dan PK. Adapapun kriteria ini dapat dilihat pada gambar berikut (**Gambar 3.11**).

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (Consequences of Failure/ CoF)	Kriteria dapat diterima (Acceptance Criteria)		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (Min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (min)	Probabilitas Longsor (Probability of Failure) (maks) PoF ($FK \leq 1$)
Lereng tunggal	Rendah a.d.	1,1	Tidak ada	25-50%
	Tinggi			
Lereng ter-ramp	Rendah	1,15-1,2	1,0	25%
	Menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

Sumber: Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827, 2018

Gambar 3.11
Kriteria Nilai FK dan PK yang Dapat Diterima