

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Rekayasa Geoteknik

Rekayasa geoteknik merupakan aplikasi rekayasa teknologi yang diterapkan kepada bumi (Holtz, 1981). Dalam mempelajari geoteknik, akan selalu berkaitan dengan material alam seperti tanah dan batuan. Untuk keperluan teknik, tanah diartikan sebagai lepasan aglomerasi mineral, material organik dan sedimen dengan cairan dan gas yang mengisi rongga (Das, 2002), sedangkan batuan adalah kumpulan dari bermacam mineral yang kompak (Giani, 1992).

Dalam dunia pertambangan, ilmu geoteknik memiliki peran yang penting untuk menjaga kelancaran kegiatan pertambangan. Geoteknik pada tambang terbuka diperlukan diantaranya dalam perancangan desain lereng yang aman serta pembangunan infrastruktur tambang seperti *stockpile*, *disposal*, jalan *hauling*, dll.

Perencanaan desain lereng tambang yang aman akan menunjang terhadap kelancaran kegiatan penambangan. Perencanaan ini dilakukan dengan melewati tahapan penyelidikan geoteknik yang dimulai dari pemetaan geoteknik, pengambilan sampel, pengujian sampel di laboratorium, lalu pengolahan data sampai didapatkan rekomendasi geometri lereng yang optimal.

Dalam Keputusan Menteri Pertambangan No.555.K/26/MPE/1995, disebutkan bahwa objek kestabilan lereng meliputi lereng-lereng penambangan aktif maupun bekas tambang, lereng penimbunan bijih, lereng penimbunan tanah pucuk dan tanah buangan (*waste*), penimbunan *tailing* serta lereng sekitar konstruksi seperti bangunan jalan tambang.

3.2 Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan tekanan atau beban yang berada di atasnya tanpa menyebabkan keruntuhan dan penurunan (Bowles, 1984). Kemampuan tersebut tergantung pada nilai karakteristik sifat fisik dan mekanik tanah seperti bobot isi, kohesi dan sudut geser dalam. Semakin tinggi nilai tersebut maka semakin tinggi kekuatan daya dukung tanah. Tujuan dilakukannya analisis daya dukung tanah yaitu untuk menentukan daya dukung tanah yang diijinkan dengan mempertimbangkan faktor keamanan bagi pondasi. Metode yang sering digunakan dalam analisis ini yaitu metode *Terzaghi*.

Pada tahun 1948, *Terzaghi* mempopulerkan rumus daya dukung tanah yang diperhitungkan dalam keadaan daya dukung batas (*ultimate bearing capacity, q_{ult}*) yang merupakan suatu batas nilai daya dukung yang apabila dilampaui akan menyebabkan keruntuhan pada tanah (*failure*). Oleh karena itu, daya dukung yang diizinkan (*allowable bearing capacity, q_{all}*) harus lebih kecil dibanding nilai daya dukung batasnya (q_{ult}). Nilai q_{ult} tergantung pada nilai kekuatan geser yang dimiliki tanah, dan nilai q_{all} harus melibatkan Faktor Keamanan (FK= 2 s.d 5).

Dalam analisis daya dukung tanah, ada 3 jenis fondasi yang dapat direncanakan. Menurut *Terzaghi*, jenis kapasitas daya dukung tanah untuk beberapa jenis fondasi diantaranya (Zakaria, 2006) :

- a. Fondasi Lajur/Menerus : $q_{ult} = c.Nc + q.Nq + 0,5 \gamma B Ny$ (1)
- b. Fondasi Segi Empat : $q_{ult} = 1,2 c.Nc + q.Nq + 0,4 \gamma B Ny$ (2)
- c. Fondasi Lingkaran : $q_{ult} = 1,2 c.Nc + q.Nq + 0,3 \gamma B Ny$ (3)

Keterangan :

q_{ult} = *ultimate bearing capacity* (ton/m²)

c = kohesi (ton/m²)

q = $\gamma \times D$ (bobot isi tanah x kedalaman)

B = dimensi atau diameter fondasi (m)

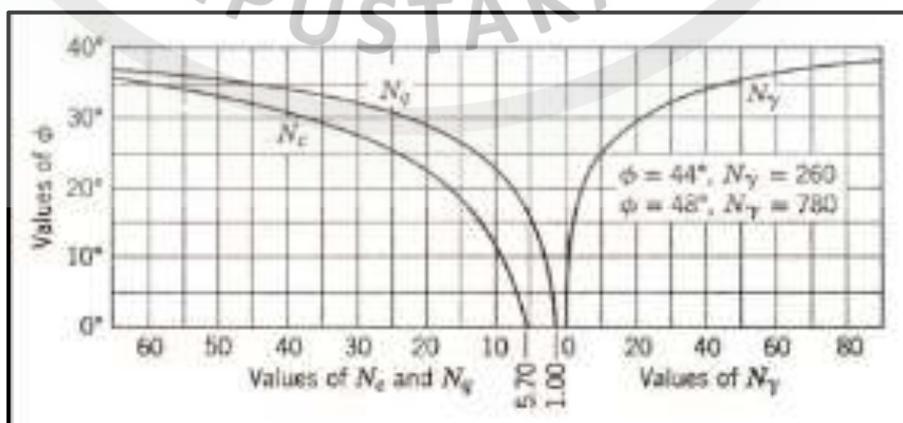
N_c, N_q, N_y = Faktor daya dukung tanah yang bergantung pada nilai ϕ .

Nilai N_c, N_q dan N_y adalah faktor daya dukung tanah (*bearing capacity factors*) yang besarnya tergantung dari sudut geser tanah. Rumus daya dukung tanah Terzaghi diatas berlaku pada kondisi "*general shear failure*" yang terjadi pada tanah padat atau agak keras, yaitu karena desakan pondasi bangunan pada tanah, maka mula-mula terjadi penurunan kecil, tetapi bila desakan bertambah sampai melampaui batas daya dukung tanah ultimit, maka akan terjadi penurunan yang besar dan cepat, dan tanah di bawah pondasi akan mendesak tanah sekitarnya ke samping dan menyebabkan tanah tersebut terdesak naik ke atas permukaan tanah.

Pada lapisan tanah yang agak lunak atau kurang padat, karena desakan pondasi bangunan pada tanah, maka akan tampak adanya penurunan yang besar sebelum terjadi keruntuhan pada keseimbangan tanah di bawah pondasi. Kondisi ini disebut "*local shear failure*". Untuk kondisi ini rumus daya dukung tanah Terzaghi harus diberi reduksi pada kohesinya yaitu :

$$c' = 2/3 c \quad \dots \dots \dots (4)$$

Nilai faktor daya dukung Terzaghi (N_c, N_q dan N_y) yang ditentukan oleh besar sudut geser dalam dapat kita lihat pada Gambar 3.1.



Sumber : Zakaria (2006)

Gambar 3.1
Nilai Faktor Daya Dukung Tanah Menurut Terzaghi (1984)

3.3 Kestabilan Lereng

Dalam operasi kegiatan penambangan, masalah kestabilan lereng akan ditemukan pada penggalian terbuka (*open pit*), tempat penimbunan material buangan (*disposal*), penimbunan bijih (*stockyard*), bendungan dan infrastruktur lainnya seperti jalan, jembatan dan lereng di sekitar fasilitas seperti perumahan (Suryatono, 2003).

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor. Secara sederhana, faktor-faktor tersebut dapat dinyatakan sebagai gaya penahan dan gaya penggerak. Apabila kondisi gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak, maka lereng tersebut dalam kondisi stabil (aman). Namun, apabila kondisi gaya penggerak lebih besar dari gaya penahan maka lereng tersebut menjadi tidak stabil.

Untuk menyatakan tingkat kestabilan suatu lereng, dikenal istilah Faktor Keamanan (FK). Nilai FK sendiri didapatkan dari perbandingan antara gaya penahan dengan gaya penggerak. Apabila nilai yang dihasilkan lebih dari 1 maka lereng tersebut stabil, sedangkan bila kurang dari 1 maka lereng tersebut dikatakan tidak stabil.

$$FK = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}} \dots\dots\dots (5)$$

Secara lebih rinci, perhitungan FK pada lereng yang dipengaruhi oleh muka air tanah adalah sebagai berikut (Zakaria, 2009) :

$$FK = \frac{c.L + \tan \emptyset \cdot (W \cdot \cos \alpha - \mu \times l)}{W \cdot \sin \alpha} \dots\dots\dots (6)$$

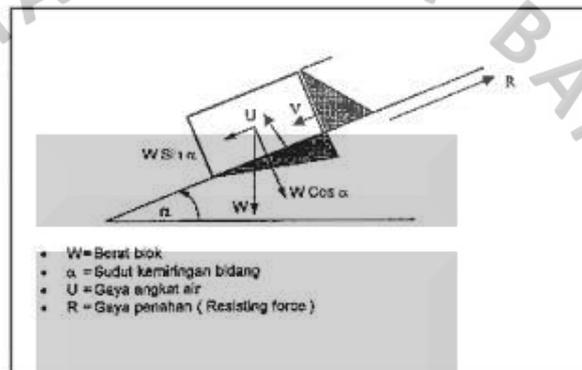
Sedangkan perhitungan FK untuk lereng yang tidak dipengaruhi oleh muka air tanah adalah sebagai berikut (Zakaria, 2009) :

$$FK = \frac{c.L + \tan \emptyset \cdot (W \cdot \cos \alpha)}{W \cdot \sin \alpha} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana :

c = kohesi material (kN/m²)

- L = jumlah panjang bidang gelincir (m)
 \emptyset = sudut geser dalam ($^{\circ}$)
 W = luas tiap bidang sayatan (m^2) x bobot isi tanah (γ , kN/m^3)
 α = sudut bidang gelincir ($^{\circ}$)
 μ = tekanan air pori (kN/m^2)
 l = panjang bidang gelincir setiap sayatan (m)
 $\mu \times l$ = tekanan pori di setiap sayatan (kN/m)



Sumber : Zakaria, 2009

Gambar 3.2
Faktor Keamanan Lereng

Kestabilan lereng pada tambang merupakan suatu hal yang harus direncanakan dan didesain secara tepat. Karena jika lereng yang terbentuk dari kegiatan penambangan tidak stabil, maka akan mengganggu terhadap kegiatan penambangan sehingga produksi pun terganggu.

Faktor-faktor yang dapat berpengaruh terhadap kestabilan lereng, diantaranya (Karyono, 2004) :

1. Sifat fisik dan mekanik tanah atau batuan penyusun lereng
2. Geometri lereng, yaitu tinggi dan kemiringan lereng
3. Struktur geologi, berupa orientasi umum diskontinuitas terhadap lereng
4. Kondisi muka air tanah dalam massa batuan lereng
5. Iklim

6. Faktor dari luar, berupa beban alat atau getaran akibat gempa bumi atau kegiatan peledakan

3.3.1 Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

Sifat fisik dan mekanik tanah merupakan faktor penting yang sangat mempengaruhi kestabilan lereng tambang. Sifat fisik yang digunakan dalam menganalisa kestabilan lereng adalah bobot isi tanah (γ), sedangkan sifat mekanik yang digunakan adalah kuat geser yang dinyatakan dengan parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Kuat geser tanah ini akan berperan sebagai gaya penahan yang mencegah terjadinya kelongsoran pada lereng.

a. Bobot Isi (γ)

Bobot isi (*unit weight*) merupakan nilai perbandingan antara berat suatu massa tanah dengan volumenya (kN/m^3) yang didapatkan dari hasil pengujian sifat fisik sampel di laboratorium. Nilai ini akan menentukan besarnya beban yang mendorong lereng untuk longsor. Nilai bobot isi batuan untuk analisa kestabilan lereng terdiri dari 3 parameter yaitu nilai bobot isi batuan pada kondisi asli (γ_n), kondisi kering (γ_d) dan bobot isi pada kondisi basah (γ_w).

Berikut adalah rumus untuk mencari bobot isi material, setelah dilakukan perhitungan dimensi dan penimbangan berat sampel, di antaranya :

$$\text{Bobot isi asli } (\gamma_n) = \frac{W_n}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{Bobot isi kering } (\gamma_d) = \frac{W_o}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Bobot isi basah } (\gamma_w) = \frac{W_w}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan :

W_n : Berat sampel asli (gram).

W_w : Berat sampel jenuh (gram).

W_o : Berat sampel kering (gram).

W_s : Berat jenuh dalam air (gram).

b. Kohesi (c)

Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel dalam batuan, yang dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas (kN/m^2). Nilai kohesi berbanding lurus dengan sudut geser batuan. Bila kuat gesernya semakin besar, maka semakin besar pula harga kohesi dari tanah tersebut. Ini berarti tanah dengan kohesi yang besar dapat dibuat lereng dengan kemiringan yang lebih besar untuk nilai keamanan yang sama. Nilai kohesi diperoleh dari pengujian laboratorium yaitu melalui pengujian kuat geser langsung (*Direct Shear Test*) dan pengujian kuat tekan triaksial (*Triaxial Test*).

Nilai kohesi dari hasil pengujian triaksial adalah titik perpotongan sumbu tegangan geser dengan selubung lingkaran *Mohr-Coulomb* yang merupakan kuat geser efektif puncak (*effective peak strength*). Sedangkan nilai kohesi dari hasil uji kuat geser, diperoleh dari perpotongan sumbu tegangan geser dengan tegangan normal kuat geser batuan.

c. Sudut Geser Dalam (ϕ)

Sudut geser dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam terbentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang dikenakan terhadapnya.

Hubungan antara kohesi dengan sudut geser dalam dapat menentukan nilai kekuatan geser tanah (τ) pada suatu material yang dikemukakan oleh *Mohr-Coulomb*. Sebagaimana dapat dilihat pada rumus berikut :

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \dots\dots\dots (11)$$

Dimana :

τ = Tegangan geser (kN/m^2)

c = Kohesi (kN/m^2)

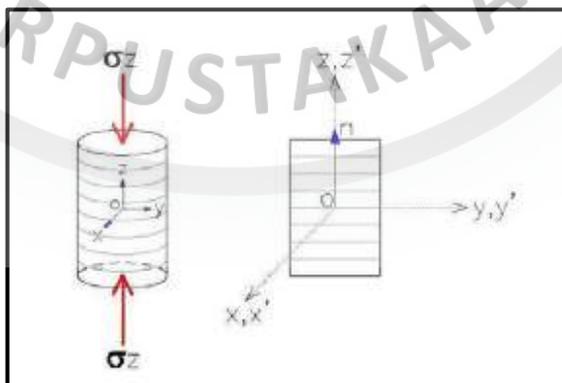
σ = Tegangan normal (kN/m^2)

Φ = Sudut geser dalam ($^\circ$)

d. Kuat Tekan (σ_c)

Salah satu metode uji laboratorium untuk mengetahui nilai kuat tekan adalah uji kuat tekan *uniaxial*. Perbandingan antara tinggi dan diameter percontoh (l/D) mempengaruhi nilai kuat tekan batuan. Untuk pengujian kuat tekan secara umum digunakan perbandingan $L=2D$. L adalah *length* atau panjang dari sampel sedangkan D adalah diameter dari sampel batuan yang akan diuji.

Pengujian dilakukan menggunakan alat mesin tekan *compression machine* yang menekan sampel berbentuk silinder, pengujian ini memberikan tegangan hanya dari satu arah yaitu pada sumbu utamanya. Oleh karena itu, tegangan pada kedua sumbu lainnya sama dengan nol. Sumbu z dianggap sebagai sumbu utama yang tegak lurus terhadap bidang, sedangkan sumbu x dan y adalah sumbu yang sejajar bidang (Gambar 3.3).



Sumber : Wijaksana, 2017.

Gambar 3.3
Tegangan yang Bekerja Pada Sampel Uji Kuat Tekan

Nilai kuat tekan batuan dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (12)$$

Keterangan :

σ_c = kuat tekan (N/m²)

F = gaya yang diberikan (N)

A = luas permukaan (m²)

e. Modulus Young (E)

Modulus *young* atau modulus elastisitas adalah nilai perbandingan antara tegangan dengan regangan dari suatu batuan selama gaya yang bekerja tidak melampaui batas elastisitasnya, dinyatakan dalam satuan N/m² atau *pascal*. Nilai modulus *young* ini menjelaskan elastisitas tarik atau kecenderungan suatu benda untuk berubah bentuk ketika tegangan diberikan pada benda tersebut. Nilai modulus *young* batuan bervariasi dari satu batuan pada daerah geologi tertentu dengan batuan dari daerah geologi lainnya karena adanya perbedaan dalam hal formasi batuan atau mineral pembentuknya. Semakin keras batuan, maka semakin besar nilai elastisitas karena lebih tahan terhadap tegangan.

Berikut adalah rumus mencari nilai modulus *young* :

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L} \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan :

E = modulus *young* (N/m²)

σ = tegangan (N/m²)

e = regangan

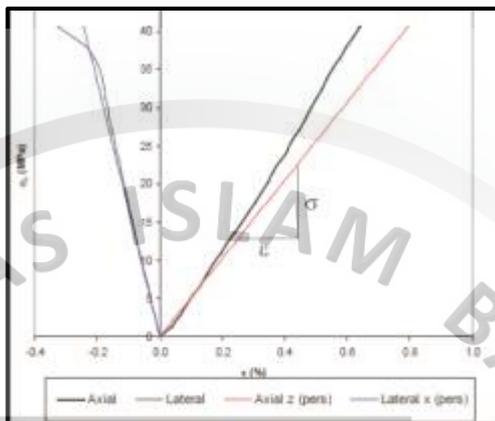
F = gaya (N)

A = luas (m²)

ΔL = penambahan panjang (m)

L = panjang awal (m)

Hubungan tegangan dengan regangan untuk mencari nilai modulus *young* dapat dilihat pada kurva di bawah (Gambar 3.4)

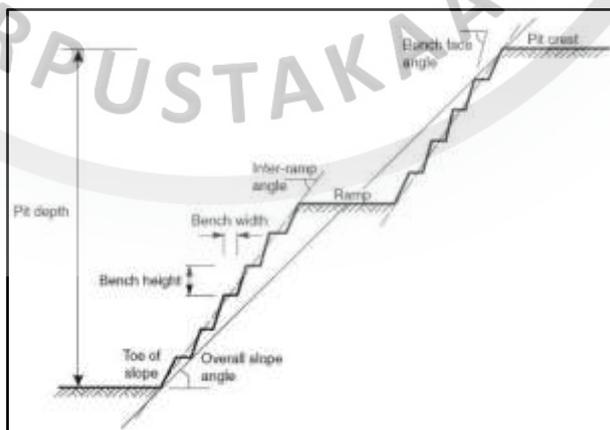


Sumber : Wijaksana, 2007

Gambar 3.4
Kurva Tegangan-Regangan

3.3.2 Geometri Lereng

Geometri lereng yang dapat mempengaruhi kestabilan lereng meliputi tinggi lereng, kemiringan lereng dan lebar berm, baik itu lereng tunggal (*single slope*) maupun lereng keseluruhan (*overall slope*). Semakin tinggi dan semakin tajam sudut kemiringan lereng akan semakin berpotensi menyebabkan longsor (Hoek dan Bray, 1981).



Sumber: Hoek & Bray, 1981

Gambar 3.5
Geometri Lereng Tambang Terbuka

3.3.3 Orientasi Umum Diskontinuitas

Bidang diskontinuitas merupakan bidang yang memisahkan batuan menjadi bagian yang terpisah. Menurut Priest (1983), bidang diskontinu adalah setiap bidang lemah yang terjadi pada bagian yang memiliki kuat tarik paling lemah dalam batuan. Keterjadian bidang diskontinu tidak terlepas dari masalah perubahan *stress* (tegangan), temperatur, *strain* (regangan), mineralisasi dan rekristalisasi yang terjadi pada suatu massa batuan dalam waktu yang panjang.

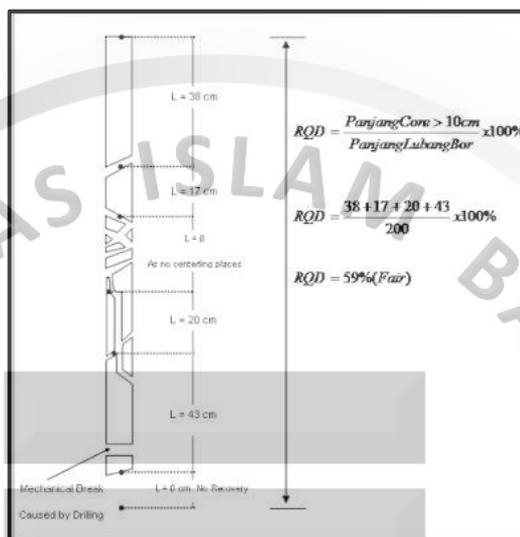
Struktur geologi dan diskontinuitas pada batuan adalah bidang-bidang lemah yang akan mengurangi tingkat kekuatan geser batuan dan implikasi utamanya adalah meningkatkan peluang terjadinya longsor pada lereng. Dengan adanya bidang lemah tersebut, maka batuan yang awalnya utuh akan berubah menjadi massa batuan dengan kekuatan lebih kecil dari sebelumnya. Menurut Hencher (1987), struktur geologi dan diskontinuitas pada batuan yang berhubungan dengan geoteknik pada kestabilan lereng adalah kekar, sesar, batas litologi, bidang perlapisan, serpihan dan orientasi mineral.

Dalam kegiatan analisa bidang diskontinu, dikenal istilah orientasi bidang diskontinu. Orientasi bidang diskontinu (OBD) adalah kedudukan umum bidang diskontinu yang dinyatakan dalam arah dan kemiringan (*dip*). Apabila OBD memiliki arah yang sama atau mendekati arah lereng dan *dip*-nya lebih landai, maka dapat dikatakan bahwa OBD akan berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Namun, apabila OBD memiliki arah yang berlawanan dengan arah lereng, maka OBD tidak akan mempengaruhi terhadap kestabilan lereng.

Diskontinuitas pada batuan berkaitan dengan *Rock Quality Design* (RQD). Bidang diskontinu yang banyak menandakan tingginya intensitas kekar dan sesar pada batuan yang mengakibatkan rendahnya nilai RQD. RQD adalah modifikasi dari *recovery* pengeboran yang menggambarkan kualitas batuan dalam kaitannya dengan

fracture alamiah seperti sesar. Semakin banyak fracture dalam batuan, maka semakin rendah nilai RQD. Nilai RQD dapat ditentukan dari perhitungan berikut :

$$RQD = \frac{\sum \text{Panjang core } \geq 10\text{cm}}{\text{Panjang run}} \dots\dots\dots (14)$$



Sumber : Deere, 1969

Gambar 3.6
Penentuan Nilai RQD Batuan

Hubungan antara indeks RQD dengan kualitas dari batuan adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1
Hubungan Indeks RQD dengan Kualitas Batuan

RQD (%)	Kualitas Batuan
< 25	Sangat jelek
25-50	Jelek
50-75	Sedang
75-90	Baik
90-100	Sangat baik

Sumber : Deere, 1969

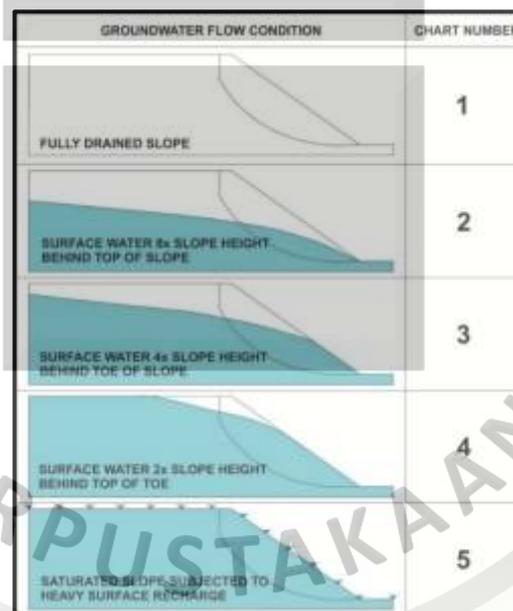
3.3.4 Kondisi Muka Air Tanah

Kondisi muka air tanah (MAT) dalam massa batuan atau tanah dapat berpengaruh terhadap kekuatan dari batuan tersebut. Semakin tinggi MAT pada lereng maka semakin jenuh kondisi lereng tersebut. Kondisi lereng yang jenuh mengakibatkan tekanan air pori pada cracks batuan semakin besar sehingga nilai

tegangan normal efektif menurun yang berimbas pada kekuatan geser batuan yang ikut menurun. Semakin kecil nilai kuat geser maka semakin besar kemungkinan terjadinya kelongsoran.

Selain nilai tegangan normal yang berkurang, kondisi lereng dengan MAT jenuh akan mengakibatkan semakin besarnya beban yang harus diterima oleh lereng karena densitas batuan yang meningkat. Oleh karena itu, pada lereng dengan kondisi jenuh perlu dilakukan penanganan yang khusus karena cukup rawan untuk terjadi longsor dibandingkan dengan lereng yang tidak jenuh (kering).

Berikut pada Gambar 3.4 adalah gambaran dari lereng dengan berbagai kondisi MAT yang berbeda pada tambang terbuka.



Sumber: Hoek & Bray, 1981

Gambar 3.7
Kondisi Muka Air Tanah Pada Lereng

3.3.5 Faktor Dari Luar

Faktor dari luar adalah faktor yang berasal dari luar akibat kegiatan manusia berupa beban. Beban tersebut dibagi menjadi 2 yaitu beban statik dan dinamik. Beban statik merupakan beban tidak bergerak seperti penempatan *settling pond*, alat

berat tambang, dll. Sedangkan beban dinamik berupa getaran akibat gempa bumi, peledakan atau kegiatan pemuatan alat berat yang melintas pada lereng.

3.4 Kelongsoran Lereng

Kelongsoran lereng merupakan proses perpindahan massa tanah atau batuan secara alami dari tempat yang tinggi ke tempat yang rendah. Hal ini terjadi karena pengaruh gravitasi dan tanah yang kehilangan kesetimbangan daya dukungnya, longsor tersebut akan berhenti jika telah mencapai kesetimbangan baru.

Pada dasarnya, dalam keadaan alamiah tanah dan batuan berada pada keadaan yang seimbang terhadap gaya-gaya yang bekerja padanya, baik gaya dari dalam maupun luar. Namun, jika tanah dan batuan mengalami perubahan keseimbangan akibat penggalian, erosi atau aktivitas lain, maka tanah dan batuan tersebut secara alamiah akan berusaha untuk mencapai kestimbangan baru dengan melalui proses degradasi atau pengurangan beban dalam bentuk longsor.

Terzaghi (1967) dan *Brunsdan* (1979) selanjutnya membagi penyebab gerakan massa tanah (longsor) sebagai penyebab eksternal dan internal. Penyebab tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2
Penyebab Gerakan Massa Tanah dan Batuan

No	Penyebab Eksternal	Penyebab Internal
1	Perubahan geometri lereng (pemotongan kaki lereng, perubahan sudut, panjang, dll)	Longsor, progresif (mengikuti ekspansi lateral, perekahan dan erosi)
2	Pembebasan beban (erosi penggalian)	Pelapukan
3	Pembebanan (penambahan material, penambahan tinggi)	Erosi <i>seepage</i>
4	<i>Shock</i> dan vibrasi	
5	Penurunan permukaan air	
6	Perubahan kelakuan air (hujan)	

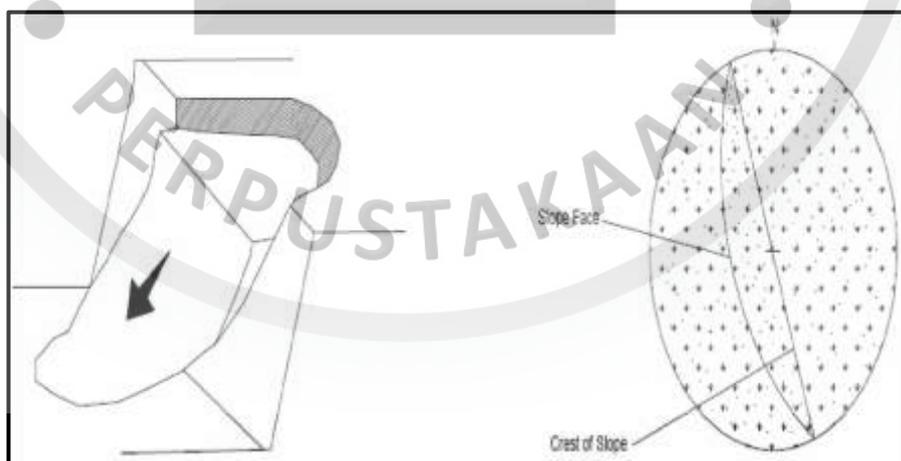
Sumber : Arif, Irwandy. 2015

Jenis longsor yang sering terjadi pada lereng tambang diantaranya adalah longsor busur, longsor bidang, longsor baji dan longsor guling.

3.4.1 Longsor Busur (*Circular Failure*)

Longsor busur merupakan longsor yang sering terjadi pada lereng tanah. Namun juga dapat terjadi pada lereng batuan keras yang sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidang lemah yang sangat rapat sehingga tidak dapat diketahui kedudukannya.

Longsor ini terjadi sepanjang bidang luncur yang berbentuk seperti busur. Longsor busur akan terjadi jika partikel individu pada suatu tanah atau massa batuan sangat kecil dan tidak saling mengikat. Oleh karena itu, batuan yang lapuk cenderung mempunyai sifat seperti tanah. Tanda pertama longsor busur biasanya berupa suatu rekahan tarik permukaan atas atau muka lereng, kadang-kadang disertai menurunnya sebagian permukaan atas lereng yang berada di samping rekahan. Penurunan tersebut akhirnya akan menyebabkan longsor busur pada lereng (Gambar 3.8).



Sumber : Hoek & Bray, 1981

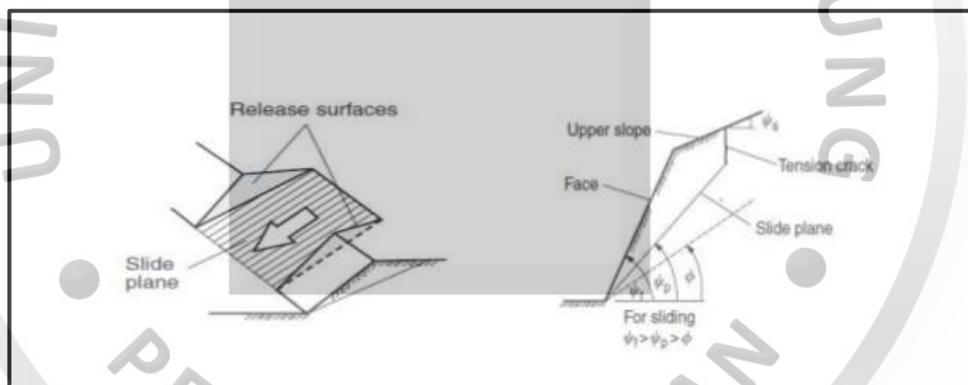
Gambar 3.8
Longsor Busur

3.4.2 Longsor Bidang (*Plane Failure*)

Longsor bidang merupakan jenis longsor yang jarang terjadi, namun jika terjadi dapat mengakibatkan longsor yang besar daripada longsor lain.

Longsor ini terjadi di sepanjang bidang luncur yang dianggap rata, bidang tersebut dapat berupa rekahan, sesar, maupun bidang perlapisan batuan (Gambar 3.9). Syarat-syarat terjadinya longsor bidang (Hoek & Bray, 1981) adalah sebagai berikut :

- Arah bidang luncur sejajar atau mendekati sejajar terhadap arah bidang permukaan lereng dengan perbedaan maksimal 20° .
- Kemiringan bidang permukaan lereng harus lebih besar dari bidang luncur ($\psi_f > \psi_p$).
- Kemiringan bidang luncur lebih besar daripada sudut geser dalam. ($\psi_p > \phi$)
- Terdapatnya bidang bebas yang merupakan batas lateral dari massa batuan yang longsor.



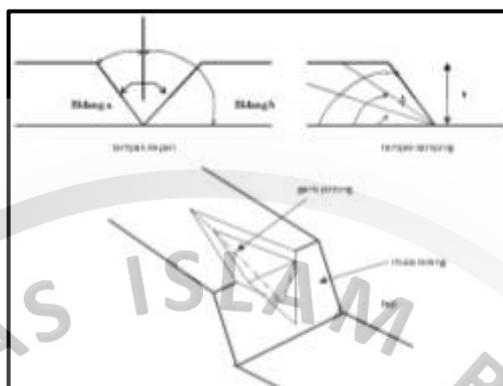
Sumber : Hoek & Bray, 1981

Gambar 3.9
Longsor Bidang

3.4.3 Longsor Baji (*Wedge Failure*)

Longsor baji adalah jenis longsor yang diakibatkan oleh adanya struktur geologi yang berkembang dan saling memotong pada lereng tersebut. Sudut perpotongan antara bidang lemah tersebut lebih besar dari sudut geser dalamnya. Bidang lemah ini dapat berupa bidang sesar, rekahan maupun bidang perlapisan. Longsor baji ini dapat dibedakan menjadi dua tipe longsor yaitu longsor tunggal (*single sliding*) dan longsor ganda (*double sliding*). Untuk longsor

tunggal, luncuran terjadi pada salah satu bidang, sedangkan untuk longsoran ganda luncuran terjadi pada kedua bidang.

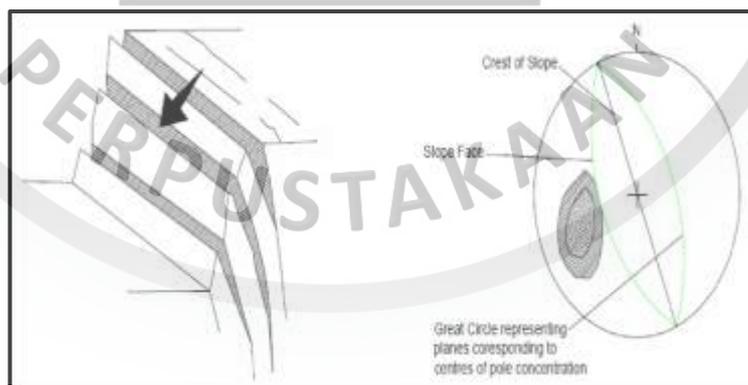


Sumber : Hoek & Bray, 1981

Gambar 3.10
Longsoran Baji

3.4.4 Longsoran Guling (*Toppling Failure*)

Longsoran guling merupakan longsoran yang biasanya terjadi pada lereng batuan keras dan memiliki sudut yang terjal dengan bidang lemah yang tegak atau hampir tegak dan arahnya berlawanan dengan arah kemiringan lereng. Longsoran ini berbentuk blok atau bertingkat. Kondisi untuk menggelincir atau meluncur ditentukan oleh sudut geser dalam dan kemiringan bidang luncurnya.



Sumber : Hoek & Bray, 1981

Gambar 3.11
Longsoran Guling

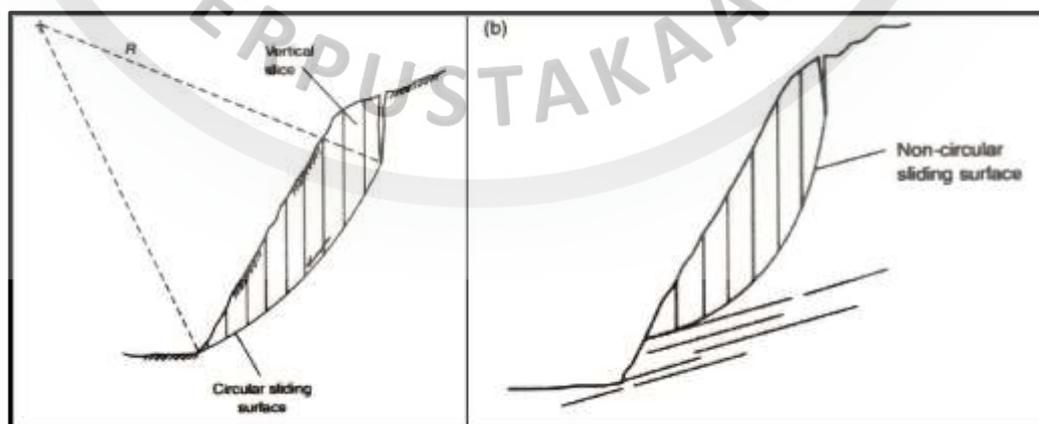
3.5 Analisis Kestabilan Lereng Dengan Metode Kestimbangan Batas

Analisis kestabilan lereng dilakukan untuk menilai tingkat kestabilan suatu lereng. Terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan tergantung dari data yang

tersedia, *software* computer yang ada, tingkat ketelitian yang diperlukan dan hasil (*output*) yang dibutuhkan. Semakin detail data yang digunakan sebagai parameter geoteknik maka semakin bagus hasil yang akan diperoleh.

Beberapa metode analisis yang sering digunakan diantaranya metode analitik, metode grafik atau diagram, metode proyeksi stereografis, metode kesetimbangan batas dan metode numerik. Setiap metode tersebut memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing dan dapat dipilih salah satu metode yang dibutuhkan sesuai keperluan para *engineer* geoteknik.

Salah satu metode yang sering digunakan dalam analisis lereng yang memiliki material tanah dengan longsor busur adalah metode kesetimbangan batas. Metode kesetimbangan batas atau *Limit Equilibrium Method* (LEM) merupakan metode yang menggunakan prinsip kesetimbangan gaya, kesetimbangan momen, atau gabungan dari keduanya untuk mendapatkan nilai faktor keamanan (FK) lereng. Metode ini terlebih dahulu mengasumsikan kelongsoran yang dapat terjadi. Terdapat dua asumsi bidang kelongsoran yang dapat dianalisa dengan metode ini yaitu bidang kelongsoran berbentuk *circular* dan bidang kelongsoran berbentuk *non-circular* (Gambar 3.12)



Sumber : Bishop, 1955

Gambar 3.12
Bidang Longsor *Circular* dan *Non-Circular*

Perhitungan dengan metode kesetimbangan batas dilakukan dengan membagi tanah yang berada dalam bidang longsor menjadi irisan-irisan sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.13, oleh karena itu metode ini juga disebut dengan metode irisan (*method of slice*). Berbagai solusi yang berbeda untuk metode irisan ini telah dikembangkan dari dulu oleh para ahli geoteknik mulai dari *Fellenius*, *Bishop*, *Morgenstern-Price*, *Sarma*, dll. Perbedaan antara cara yang satu dengan yang lainnya tergantung pada kesetimbangan batas dan asumsi kekuatan gaya kekuatan antar irisan (*interslice force*) yang diperhitungkan.

Metode kesetimbangan batas dengan cara *Fellenius* merupakan cara yang paling sederhana, pada cara ini semua gaya antar irisan diabaikan dan hanya memperhitungkan kesetimbangan momen. *Bishop* kemudian mengembangkan cara yang lebih kompleks dengan memasukan gaya yang bekerja di sekitar bidang irisan namun tetap melakukan perhitungan dengan kesetimbangan momen. *Janbu* mengembangkan metode yang mirip dengan metode *Bishop*, perbedaannya adalah metode *Janbu* diturunkan dari kesetimbangan gaya horizontal.

Pada perhitungan stabilitas lereng dengan metode *Bishop*, prinsipnya adalah menghitung besarnya kekuatan geser material lereng yang menahan longsor dibandingkan dengan besarnya tegangan geser yang bekerja sepanjang bidang longsor (rumus 15).

$$F = \frac{\text{Shear Strength available to resist sliding}}{\text{Shear stress mobilized along failure surface}} \dots\dots\dots (15)$$

Sedangkan untuk persamaan matematikanya adalah sebagai berikut :

$$F = \frac{1}{\sum W \cdot \sin a} \sum \left[c'b + W (1 - ru) \cdot \tan \phi \cdot \frac{\sec a}{1 + \frac{\tan \phi \cdot \tan a}{F}} \right] \dots\dots\dots (16)$$

Keterangan :

F = Faktor Keamanan.

W = Berat segmen (ton).

α = sudut yang dibentuk pada bidang gelincir pertemuan antara garis tengah setiap *slice* dengan jari-jari sumbu bidang gelincir ($^{\circ}$).

c' = kohesi (ton/m²).

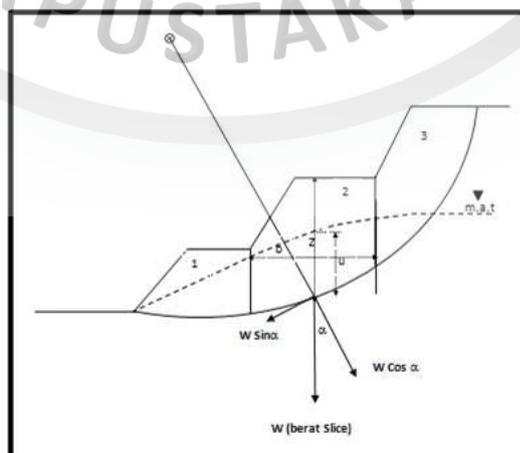
b = Lebar *slice* (m).

r_u = Nilai banding tekanan pori (*pore pressure ratio*).

ϕ = sudut geser dalam ($^{\circ}$).

Seluruh parameter di atas adalah parameter yang akan mempengaruhi terhadap nilai FK yang dihasilkan. Semakin tinggi nilai kohesi dan sudut geser dalam, maka semakin besar nilai FK yang dihasilkan. Gambaran parameter tersebut pada lereng dapat dilihat pada Gambar 3.13.

Cara perhitungan nilai kestabilan lereng dengan rumus *Bishop* dilakukan dengan cara pengulangan (iterasi). Pertama tentukan suatu nilai perkiraan F awal dan masukkan pada ruas kanan rumus, kemudian dihitung sehingga diperoleh nilai F pada ruas kiri. Hasil perhitungan tersebut kemudian dimasukkan kembali ke ruas kanan dan dicoba lagi sampai didapatkan nilai F ruas kiri yang sama atau mendekati dengan F pada ruas kanan.



Sumber : Bishop, 1971

Gambar 3.13
Metode Irisan Bishop

Perhitungan tersebut dilakukan secara manual. Pada zaman sekarang sudah banyak digunakan *software* computer yang mendukung untuk melakukan perhitungan tanpa harus dihitung secara manual seperti *slide*, *phase2*, dll. Sehingga perhitungan analisis kestabilan lereng dapat dilakukan dengan lebih cepat.

3.6 Metode Probabilitas Kelongsoran (PK)

Probabilitas merupakan suatu nilai yang digunakan untuk mengukur tingkat kemungkinan terjadinya suatu kejadian yang acak, atau bisa didefinisikan juga dengan peluang atau kemungkinan sesuatu akan terjadi. Pada saat ini, metode probabilitas sudah sering digunakan dalam berbagai disiplin ilmu termasuk ilmu pertambangan. Dalam pertambangan, metode probabilitas digunakan untuk mengetahui satu nilai yang dapat mewakili dari berbagai kumpulan data yang ada. Dengan memasukan metode ini dalam analisis kestabilan lereng, dapat diketahui nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) yang menjadi parameter lain selain Faktor Keamanan (FK) dalam menentukan kestabilan suatu lereng.

Dalam analisis data dengan metode probabilitas, dikenal istilah fungsi distribusi. Fungsi distribusi menggambarkan penyebaran suatu variabel acak yang digunakan untuk nilai probabilitas kemunculan suatu parameter. Fungsi distribusi ini memiliki sifat penyebaran yang khas sehingga membedakan antara satu fungsi dan lainnya. Dari yang diketahui, ada lebih dari 60 jenis fungsi distribusi yang ada saat ini (Tse, 2009). Pada penelitian ini digunakan 3 fungsi distribusi teoritis yang dianggap mewakili sifat-sifat distribusi dari variabel acak sifat fisik dan mekanik batuan yaitu distribusi normal, lognormal dan gamma.

1. Distribusi Normal

Distribusi normal atau biasa disebut distribusi *Gauss* merupakan fungsi distribusi probabilitas yang paling banyak digunakan dalam berbagai analisis

statistika. Distribusi normal dipengaruhi oleh dua parameter, yaitu *mean* (μ) dan standar deviasi (σ). *Mean* menentukan lokasi pusat statistik dan standar deviasi menentukan lebar dari kurva normal. Suatu data membentuk distribusi normal jika jumlah data di atas dan di bawah mean adalah sama.

Secara umum, fungsi distribusi normal adalah sebagai berikut :

$$f(X) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \dots\dots\dots (17)$$

Keterangan :

σ = standar deviasi

e = nilai ketetapan eksponensial (2,71828)

μ = *mean*

π = *phi* (3,14)

x = nilai peubah acak normal

Distribusi normal memiliki bentuk kurva yang simetris antara sisi kiri dan kanannya sehingga disebut juga dengan kurva lonceng.

2. Distribusi Lognormal

Dalam teori probabilitas, distribusi lognormal adalah distribusi variabel acak yang memiliki logaritma yang tersebar normal. Distribusi lognormal mengikuti hukum distribusi normal, karena distribusi lognormal diperoleh dari transformasi variabel acak pada fungsi distribusi normal. Fungsi distribusi lognormal adalah sebagai berikut :

$$f(X) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots (18)$$

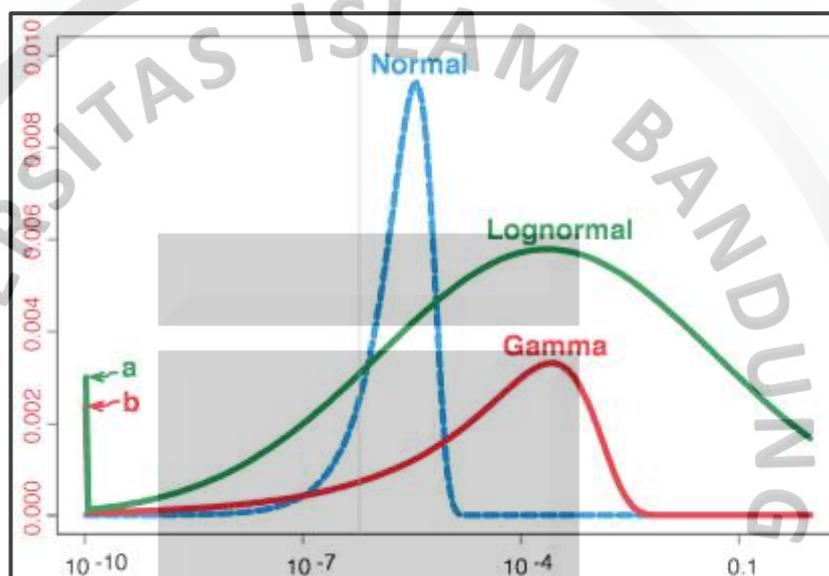
3. Distribusi Gamma

Distribusi gamma adalah distribusi fungsi padat yang sering digunakan dalam teori realibilitas dan teori antrian. Distribusi gamma berasal dari fungsi gamma yang

sudah dikenal luas dalam bidang matematika. Fungsi gamma tersebut adalah sebagai berikut :

$$f(X) = \frac{x^{a-1} e^{-x/\beta}}{\beta^a \Gamma(a)} ; x > 0 \dots\dots\dots (19)$$

Bentuk kurva distribusi normal, lognormal dan gamma dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Sumber : Anonim, 2014

Gambar 3.14
Kurva Normal, Lognormal dan Gamma

3.6.1 Pemilihan Distribusi

Distribusi fungsi yang digunakan harus melalui pengujian terlebih dahulu untuk menentukan apakah distribusi tersebut dapat digunakan atau tidak. Ada beberapa metode pengujian yang dapat dipilih diantaranya *Chi-Square method*, *Kolmogrov-Smirnof (K-S) method*, dan *Anderson-Darling method*. Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah *K-S method*. Dasar dari metode ini adalah membandingkan antara distribusi frekuensi teoritis dan kumulatif, apabila nilai perbedaan kedua frekuensi tersebut lebih kecil dari nilai kritis maka distribusi dapat diterima.

Pemilihan jenis fungsi distribusi menurut *Kolmogrov-Smirnof* dipilih menggunakan metode *Akaike Information Criterion* (AIC) dan *Bayesian Information Criterion* (BIC). AIC dan BIC adalah suatu nilai yang menggambarkan jumlah parameter model yang digunakan, semakin besar nilai tersebut maka semakin tinggi jumlah parameter yang dapat dihitung sehingga distribusi tersebut yang akan dipilih.

3.6.2 Probabilitas Kelongsoran (PK)

Probabilitas kelongsoran (PK) adalah tingkat kemungkinan suatu lereng berpotensi longsor akibat nilai dari satu atau lebih parameter geoteknik yang menyimpang dari perhitungan faktor keamanan lereng (Kepmen 1827 Thn 2018). Metode ini melakukan suatu pendekatan yang mempertimbangkan seluruh variasi data yang ada pada parameter masukan yang akan menghasilkan nilai FK tertentu. Hal ini didasarkan bahwa setiap parameter masukan acak tersebut memiliki peluang yang sama untuk mewakili karakteristik masing-masing parameter.

Klasifikasi dampak longsor secara garis besar dibedakan menjadi 3, yaitu :

1. Kelongsoran Lereng Keseluruhan (*Global Failure*)

Longsor yang dapat membahayakan keselamatan para pekerja dan keberlangsungan tambang. Longsor ini memerlukan waktu rehabilitasi cukup lama, mengganggu jadwal produksi dan kegiatan penjualan;

2. Kelongsoran Multi Jenjang (*Inter-ramp Failure*)

Longsor yang terjadi pada lebih dari 1 jenjang dan kadang merusak jalan angkutan tambang;

3. Kelongsoran Tunggal (*Bench Failure*)

Kelongsoran lereng hanya mempengaruhi operasi produksi sekitar jenjang yang longsor.

Adanya probabilitas kelongsoran menyebabkan perlu adanya suatu penentuan ambang batas nilai PK untuk kestabilan tambang terbuka. Beberapa

peneliti telah mendefinisikan ambang batas nilai PK seperti *Priest & Brown* (1983) dan *Pine* (1992), namun acuan tersebut masih bersifat umum untuk seluruh jenis lereng. *SRK Consulting* (2010) mengeluarkan nilai ambang batas PK lereng pada beberapa kategori lereng yang dapat dijadikan acuan dalam desain lereng (Tabel 3.2).

Pada Tabel 3.3 dapat diketahui nilai ambang batas untuk setiap jenis lereng. Misalnya lereng *overall* dengan dampak kelongsoran yang tinggi tidak boleh memiliki nilai PK yang lebih dari 5%, jika lebih maka lereng tidak stabil. Untuk pengklasifikasian dampak longsoran dibagi menjadi rendah, sedang dan tinggi. Resiko rendah bila diatas lereng tidak terdapat fasilitas perkantoran, bengkel, pabrik pengolahan atau fasilitas lainnya yang memungkinkan karyawan terkumpul. Sebaliknya resiko tinggi bila diatas lereng terdapat fasilitas-fasilitas tersebut.

Tabel 3.3
Kriteria PK Untuk Lereng Tambang

Jenis Lereng	Dampak Longsoran	FK (min) (Statik)	FK (min) (Dinamik)	PK (max) P [FK < 1]
Tunggal/Jenang (<i>Bench</i>)	Low-High	1,1	NA	25 – 50 %
Multi Jenjang (<i>Interramp</i>)	Low	1,15 – 1,2	1,0	25 %
	Medium	1,2	1,0	20 %
	High	1,2 – 1,3	1,1	10 %
Keseluruhan (<i>Overall</i>)	Low	1,2 – 1,3	1,0	15 – 20 %
	Medium	1,3	1,05	5 – 10 %
	High	1,5	1,1	≤ 5 %

Sumber : *SRK Consulting, 2010*

Adanya variasi pada parameter masukan desain lereng mengakibatkan variasi nilai FK yang didapat, yang menjadi dasar dalam menentukan PK lereng. Namun tidak jarang parameter masukan tersebut memiliki jumlah data yang terbatas, sehingga diperlukan suatu cara untuk memperbanyak data (*sampling method*) sesuai

dengan karakter data. Salah satu cara yang bisa digunakan untuk menentukan probabilitas kelongsoran adalah metode *Monte Carlo*.

3.6.3 Simulasi *Monte Carlo*

Simulasi *Monte Carlo* adalah metode yang banyak digunakan pada analisis probabilitas. Metode ini sangat berguna dalam pemecahan masalah yang berkaitan dengan variabel acak. Metode ini relatif sederhana dan lebih fleksibel dalam menggabungkan suatu varietas distribusi probabilitas yang cukup besar tanpa banyak penafsiran serta memiliki kemampuan untuk memodelkan kolerasi diantara variabel dengan mudah (Hammah dan Yacoub, 2009).

Pada metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) nilai FK merupakan rasio perbandingan antara gaya penahan dengan gaya penggerak, dimana masing-masing parameter merupakan fungsi dari variabel acak yang bersifat tak tentu dan berdistribusi probabilitas tertentu. Maka dari itu, penggunaan simulasi *Monte Carlo* cocok digunakan untuk menyelesaikan permasalahan ketidakpastian pada nilai FK untuk mendapatkan nilai probabilitas kelongsoran.

Tahapan perhitungan probabilitas kelongsoran dengan metode *Monte Carlo* menurut Wylie 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 *uniform* menggunakan interval 0 dan 1 yang dikalikan dengan range tiap parameter (antara nilai maksimum dan minimum). Untuk setiap fungsi yang n 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:

$$PK = \frac{N-M}{N} \dots\dots\dots (20)$$

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

