

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Kelongsoran Lereng

Longsor merupakan pergerakan massa batuan atau tanah yang menggelincir karena pengaruh secara langsung dari gaya gravitasi (West, 1995). Jadi, longsor terjadi akibat terganggunya kestabilan lereng tersebut sehingga mengalami pergerakan untuk mencapai kesetimbangan. Hoek dan Bray (1981) menyebutkan kestabilan lereng akan tercapai jika gaya penahan longsor lebih besar daripada gaya penggerak longsor

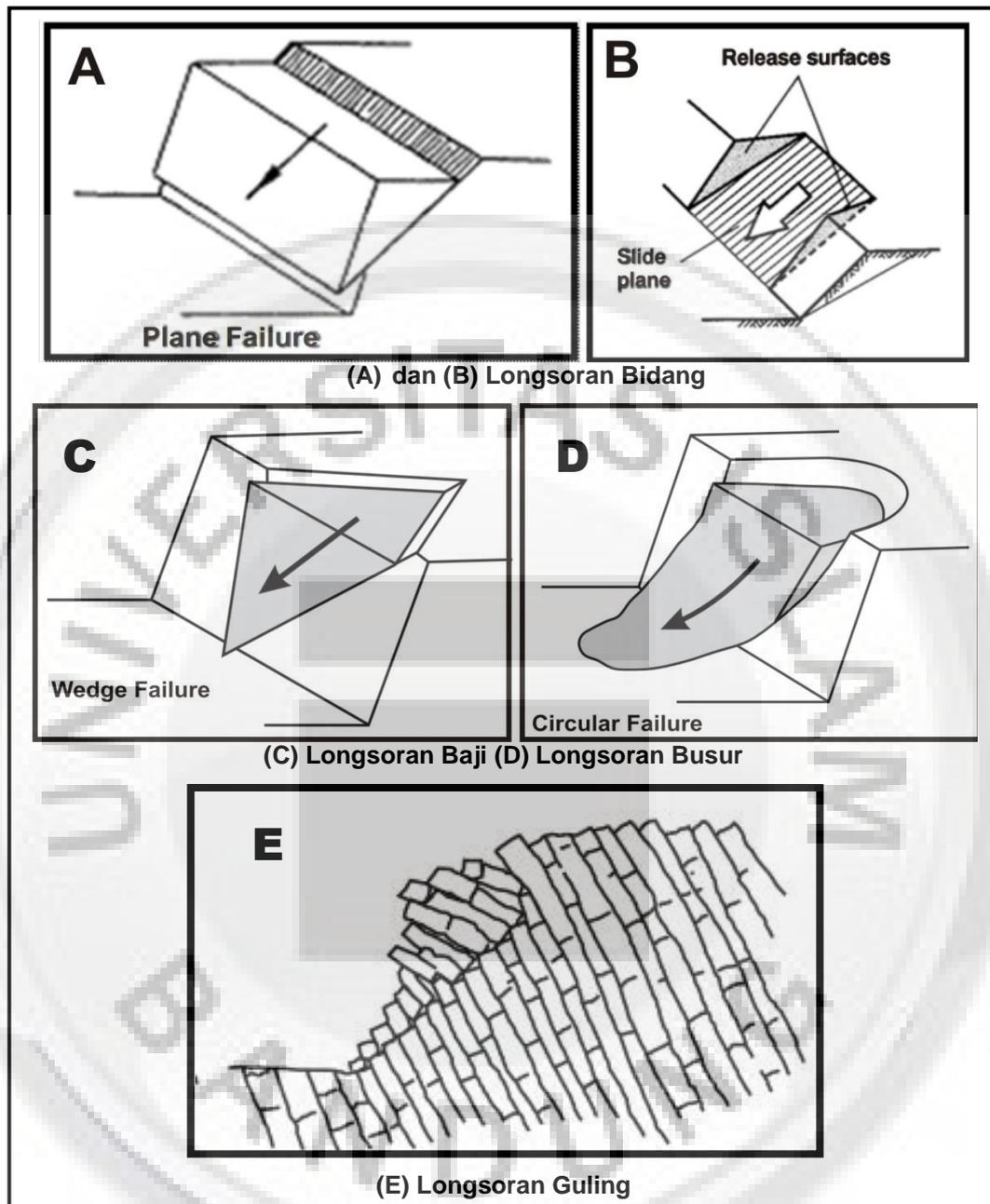
Ada beberapa jenis longsor yang umum dijumpai pada massa batuan (Gambar 3.1) di tambang terbuka (Hoek and Bray, 1981) yaitu :

a) Longsor Bidang (*plane failure*)

Longsor bidang merupakan suatu longsor batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang dianggap rata. Bidang luncur tersebut dapat berupa sesar, rekahan (*joint*) maupun bidang perlapisan batuan.

b) Longsor Baji (*wedge failure*)

Longsor ini hanya dapat terjadi pada batuan yang mempunyai lebih dari satu bidang lemah yang saling berpotongan membentuk baji. Dalam kondisi yang sangat sederhana longsor baji terjadi pada sepanjang garis potong kedua bidang lemah tersebut.



Gambar 3.1 Jenis Longsor (Hoek & Bray, 1981)

c) Longsor Guling (*toppling failure*)

Longsor guling terjadi pada lereng terjal untuk batuan yang keras dengan bidang-bidang lemah tegak atau hampir tegak dan arahnya berlawanan dengan arah kemiringan lereng.

d) Longsoran Busur (*circular failure*)

Longsoran busur merupakan longsoran yang paling umum terjadi di alam, terutama pada tanah dan batuan yang telah mengalami pelapukan sehingga hampir menyerupai tanah. Pada batuan yang keras longsoran busur hanya dapat terjadi jika batuan tersebut sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidang-bidang lemah (rekahan) dengan jarak yang sangat rapat kedudukannya. Pada tanah pola strukturnya tidak menentu sehingga bidang gelincir bebas terbentuk dengan mencari posisi yang paling kecil hambatannya.

3.2 Kestabilan Lereng

Kemantapan atau kestabilan suatu lereng tergantung pada besarnya gaya penahan dan gaya penggerak yang terdapat pada bidang gelincirnya. Gaya penahan adalah gaya yang menahan terjadinya suatu longsoran sedangkan gaya penggerak merupakan gaya yang menyebabkan terjadinya longsoran. Kestabilan suatu lereng dapat dinyatakan dengan nilai Faktor Keamanan (FK) yang merupakan perbandingan antara gaya penahan dengan gaya penggerak. (Bagus Wiyono, 2006)

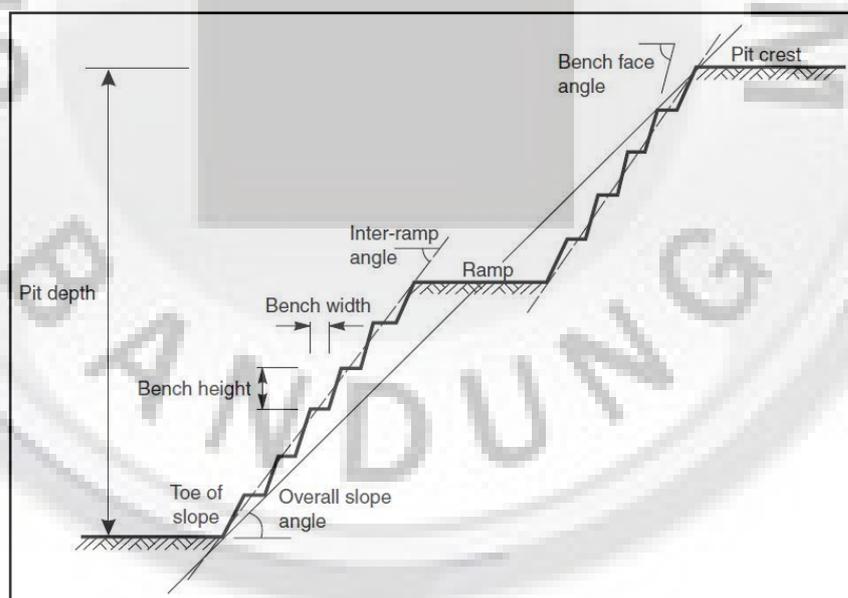
Banyak faktor yang berpengaruh terhadap stabilitas atau kelongsoran lereng, yang menurut penulis (Gde Suratha), dapat dikelompokkan menjadi 5 faktor utama, yaitu sebagai berikut.

- a) Geometri lereng, yaitu tinggi dan kemiringan lereng.
- b) Sifat fisik-mekanik, kekuatan (terutama kuat geser) dan bobot isi massa batuan pembentuk lereng.

- c) Orientasi umum struktur diskontinuitas massa batuan lereng terhadap orientasi muka lereng bukaan tambang.
- d) Adanya air tanah di dalam massa batuan lereng.
- e) Faktor luar sistem lereng, berupa beban luar dan atau getaran (gempa bumi dan akibat peledakan tambang)

3.2.1 Geometri Lereng

Geometri lereng merupakan ukuran yang menyatakan tinggi, lebar dan besar kemiringan lereng dan azimuth dari dinding tersebut seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.2. Semakin tinggi dan semakin tajam sudut kemiringan lereng akan semakin berpotensi menyebabkan longsor (Hoek dan Bray, 1981).



Gambar 3.2 Geometri Lereng Pada Tambang Terbuka (Hoek dan Bray, 1981)

3.2.2 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Sifat keteknikan batuan akan menentukan kekuatan massa batuan, sifat keteknikan batuan terdiri dari sifat indeks dan sifat mekanik. Sifat indeks

merupakan sifat khas yang dimiliki batuan yang terbentuk akibat proses pembentukan batuan. Sifat mekanik menunjukkan tingkat kekuatan dan tingkat deformabilitas batuan (Read dan Stacey, 2009)

Sifat indeks/fisik batuan yang sangat mempengaruhi stabilitas lereng yaitu bobot isi (*unit weight*) yang didapatkan dari perkalian antara densitas dan gravitasi bumi untuk menentukan gaya berat yang mendorong lereng untuk longsor. Sedangkan untuk sifat mekanik batuan dalam konteks slope stability, kekuatan massa batuan yang paling berperan adalah kuat geser. yang mempunyai parameter kohesi c , tegangan normal σ , tekanan air (pada pori atau joint) u , dan sudut geser dalam, ϕ . Rumus: $S = c + (\sigma - u) \tan \phi$.

Anggapan ini sesuai dengan "Teori *failure criteria Griffith*" yang dianggap paling populer dalam *Rock Mechanics* dewasa ini, yang menyatakan bahwa, stabilitas material dalam keadaan terbebani secara tidak langsung akan membangun keseimbangan antara *strain energy* dan *surface energy* pada *microcracks* dan struktur material. Jika strain bertambah sampai menyebabkan ketidak-seimbangan energi, maka *microcracks* akan berkembang, dan *fractures* akan terbentuk. Pada mulanya, teori ini menganggap bentuk *microcracks* adalah *elliptics*, sehingga ketika material dikenai beban tekan, maka akan terjadi *tension fractures* akibat dari konsentrasi *stress* pada ujung-ujung *microcracks*. Dari sini kemudian disimpulkan bahwa, kriteria *failure* berkenaan dengan *shear stress* (*in term of shear stress*) pada permukaan bidang geser (*failure*), dengan τ , σ , σ_t masing-masing adalah *shear stress*, *normal stress* pada bidang geser, dan *uniaxial tensile strength*.

Penelitian Murrell yang mengembangkan teori Griffith menyimpulkan bahwa, untuk aplikasinya di dalam batuan, teori ini berhubungan dengan kriteria *failure* “Mohr” dengan hubungan sebagai dalam rumus berikut:

$$\tau^2 = 4 \sigma_t^2 - 4 \sigma_t (\sigma) \dots\dots\dots (1)$$

Dalam hal ini :

τ : *Shear Stress* (kg/cm²) ;

σ : *Normal Stress* (kg/cm²) ;

σ_t : *Uniaxial Tensile Strength* (kg/cm²).

Asumsi dasar yang digunakan adalah menganggap massa batuan bersifat *brittle*. Material *brittle* yang terbebani akan mengalami *failure* melalui bidang pecah (*fractured*) bila dikenai stress sama atau sedikit saja melewati nilai *yield stress*-nya.

Massa batuan pembentuk lereng bisa terdiri dari satu atau beberapa jenis material yang mempunyai parameter geoteknik berbeda-beda. Oleh karena itu, dalam menganalisis stabilitas lereng harus dengan jelas terlebih dahulu mendefinisikan model lereng yang akan dianalisis. Parameter geoteknik yang diinputkan harus mewakili seluruh model termasuk sudah mengakomodasikan semua jenis material yang berbeda-beda tersebut.

Untuk material tanah atau batuan lunak, parameter kuat geser dapat diperoleh dari uji kuat geser langsung dan uji triaksial di laboratorium, atau uji lapangan. Perlu diperhatikan penggunaannya dikaitkan dengan perkiraan model bentuk *sircular* bidang longsor. Pada bagian bidang longsor yang agak/mendekati mendatar maka lebih tepat menggunakan parameter kuat

geser hasil uji geser langsung, sedangkan pada bagian bidang longsor yang agak tegak /mendekati vertikal, parameter hasil triaksial test yang lebih tepat.

Analisis stabilitas lereng untuk batuan yang keras dan terkekarkan, parameter kuat geser yang diperhitungkan adalah kuat geser pada bidang diskontinuitas. Parameter kuat gesernya diperoleh dari uji *direct shear test* melalui bidang pecah atau diskontinuitasnya, menggunakan *shear box test*.

3.2.3 Orientasi Umum Struktur Diskontinuitas

Struktur geologi merupakan gambaran arsitektur permukaan bumi akibat deformasi batuan oleh gaya tektonik (Thompson dan Turk,1997). Struktur geologi akibat gaya tektonik akan menghasilkan patahan, lipatan dan kekar. Adanya struktur geologi menghasilkan bidang lemah yang dapat berpotensi menyebabkan longsor (West, 1995). Jenis-jenis bidang lemah antara lain kekar, sesar, *shear zone*, bidang perlapisan dan foliasi (West, 1995).

Yang dimaksud dengan Orientasi Bidang Diskontinuitas (OBD) adalah arah umum dan kemiringan (dip) bidang-bidang struktur dibandingkan dengan arah dan kemiringan lereng bukaan tambang.

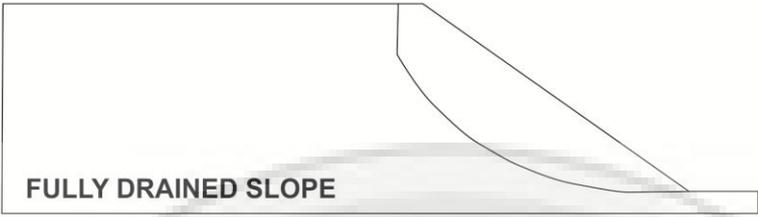
Sebagai ilustrasi ekstrim, bila OBD se arah atau mendekati arah lereng, dan DIP nya lebih landai daripada DIP-lereng, maka dikatakan bahwa, secara langsung OBD berpengaruh terhadap stabilitas lereng. Dalam kenyataannya di lapangan, yang sering dijumpai adanya 2 atau 3 set bidang diskontinuitas yang saling berpotongan membentuk potensi longsoran baji (*wedge failure*). Dalam praktiknya, pengaruh OBD ini yang pertama kali harus dianalisis dan dicari solusinya.

Namun, jika OBD tidak berpengaruh langsung terhadap stabilitas lereng, seperti misalnya, arah OBD berlawanan dengan arah lereng, maka analisis dilanjutkan dengan mempertimbangkan ke 4 faktor lainnya.

3.2.4 Adanya Air Tanah di Dalam Massa Batuan Lereng

Air tanah di dalam massa batuan lereng, mempunyai 3(tiga) pengaruh terhadap stabilitas lereng. Dua sebagai pengaruh langsung, yaitu dapat mengurangi kekuatan geser massa batuan lereng karena tegangan normal efektif berkurang akibat tekanan air pori atau air pada cracks, dan beban lereng yang mendorong kelongsoran bertambah besar akibat beratnya karena densitas massa batuan basah meningkat. Pengaruh tidak langsung adanya air tanah dapat berupa sebagian batuan menurun kekuatannya bila kena air (alterasi, atau progradif berubah). Atau pada sistem lereng yang mengandung bidang diskontinuitas, adanya air dapat menjadi pelicin untuk mendorong terjadinya geseran.

Umumnya pada kebanyakan tambang terbuka, termasuk tambang batubara yang ada air tanahnya, faktor air tanah ini sering berperan besar dalam kelongsoran lereng. Berikut merupakan pembagian lereng berdasarkan kondisi air tanah seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.3.

GROUNDWATER FLOW CONDITION	CHART NUMBER
 <p>FULLY DRAINED SLOPE</p>	1
 <p>SURFACE WATER 8x SLOPE HEIGHT BEHIND TOP OF SLOPE</p>	2
 <p>SURFACE WATER 4x SLOPE HEIGHT BEHIND TOE OF SLOPE</p>	3
 <p>SURFACE WATER 2x SLOPE HEIGHT BEHIND TOP OF TOE</p>	4
 <p>SATURATED SLOPE SUBJECTED TO HEAVY SURFACE RECHARGE</p>	5

Gambar 3.3 Kondisi Air Tanah pada Lereng (Hoek & Bray, 1981, dengan modifikasi)

3.2.5 Faktor Luar Sistem Lereng

Faktor luar yang berpengaruh terhadap stabilitas lereng dapat berupa beban statik dan beban dinamik. Beban statik, antara lain; di bagian belakang Crest lereng ditempatkan alat-alat berat tambang, lokasi setling

pond, dan lain-lain. Beban dinamik, dapat berupa getaran gempa bumi dan atau akibat peledakan yang kurang terkontrol, dan lain-lain.

3.3 Klasifikasi Massa Batuan dengan Sistem RMR

Klasifikasi massa batuan digunakan sebagai alat dalam menganalisis kemantapan lereng yang menghubungkan antara pengalaman di bidang massa batuan dengan kebutuhan pemantapan di berbagai kondisi lapangan yang dibutuhkan. Namun demikian, penggunaan klasifikasi massa batuan tidak digunakan sebagai pengganti perancangan rinci.

Pada dasarnya pembuatan klasifikasi massa batuan bertujuan (Bieniawski, 1989) :

- a) Mengidentifikasi parameter-parameter penting yang mempengaruhi perilaku massa batuan.
- b) Membagi formasi massa batuan kedalam grup yang mempunyai perilaku sama menjadi kelas massa batuan.
- c) Memberikan dasar-dasar untuk pengertian karakteristik dari setiap kelas massabatuan.
- d) Menghubungkan pengalaman dari kondisi massa batuan di satu lokasi dengan lokasi lainnya.
- e) Mengambil data kuantitatif dan pedoman untuk rancangan rekayasa (engineering)
- f) Memberikan dasar umum untuk kemudahan komunikasi diantara para insinyur dan geologiwan.

Dengan menggunakan klasifikasi massa batuan akan diperoleh paling tidak tiga keuntungan bagi perancangan kemantapan lereng yaitu (Bieniawski, 1989) :

- a) Meningkatkan kualitas hasil penyelidikan lapangan dengan data masukan minimum sebagai parameter klasifikasi.
- b) Memberikan informasi/data kuantitatif untuk tujuan rancangan
- c) Penilaian rekayasa dapat lebih baik dan komunikasi lebih efektif pada suatu proyek.

Salah satu sistem klasifikasi yang aplikasinya cukup luas adalah *Rock Mass Rating* (RMR) system. Sistem RMR adalah sistem pengelompokan kualitas massa batuan dengan cara memberi bobot atau rating pada parameter-parameter dasar batuan yang diamati (Tabel 3.1). Terdapat 5 (lima) parameter utama yang harus dikumpulkan untuk mendukung klasifikasi sistem RMR, yaitu :

- a) *Strength of Intact Rock* (Kekuatan Batuan Utuh)

Data ini dapat diperoleh melalui uji kuat tekan di laboratorium, dan juga melalui penyelidikan/pengamatan di lapangan. Kekuatan batuan di lapangan diperkirakan dengan penentuan *index strength*, yaitu dengan menggunakan pisau lipat atau palu geologi pada batuan, mengacu pada standar ISRM (Tabel 3.2). Data ini dapat diperoleh dari inti bor maupun dari pemetaan permukaan.

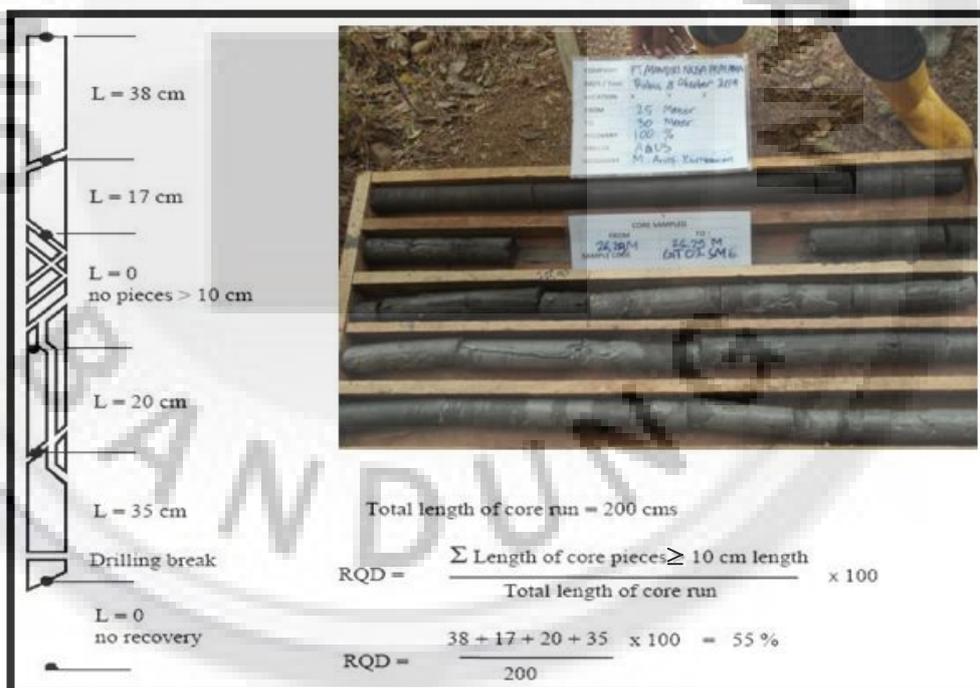
- b) RQD (*Rock Quality Designation*)

RQD adalah modifikasi dari *Recovery* pengeboran untuk menggambarkan kualitas batuan dalam kaitannya dengan *fracture*

alamiah. Semakin banyak *fracture* dalam batuan, maka RQD akan semakin rendah. RQD ditentukan dari inti lubang bor, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$RQD = \frac{\sum \text{panjang core} \geq 10\text{cm}}{\text{Total Length of Core Run}} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

Jika data pengeboran kurang, RQD dapat ditentukan dari pemetaan di permukaan dengan cara membentangkan tali sepanjang lapisan ber*fracture* dan diusahakan tegak lurus dengan arah *fracture* yang dominan (Laubscher, 1977) kemudian dilakukan perhitungan RQD seperti dalam lubang bor, simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Simulasi Perhitungan RQD (After Deere, 1989, dengan modifikasi)

c) *Spacing of Discontinuities* (Spasi *joint*)

Dari inti bor, spasi *joint* ditentukan dengan cara menghitung banyaknya *fracture* dalam satu run pengeboran, yaitu dengan cara panjang run dibagi banyaknya *fracture*. Dari pemetaan permukaan,

spasi *joint* dapat juga ditentukan dengan cara membagi panjang tali sepanjang pengamatan dibagi banyaknya *fracture* sepanjang tali tersebut.

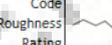
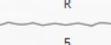
d) *Condition of Discontinuities* (Kondisi *joint*)

Kondisi *joint* yang diamati adalah kemenerusan *joint* (*persistence/length*), lebar rekahan (*separation*), kekasaran bidang (*roughness*), kekerasan dan lebar material isian (*gauge/infilling material*), dan kondisi pelapukan bidang (*weathering*). Klasifikasi pelapukan *joint* sebagaimana pada Tabel 3.3. Jika terdapat lebih dari satu set *joint*, rating RMR dihitung berdasarkan kondisi *joint* dengan jarak antar *joint* yang paling dominan (Goodman, 1989). Namun untuk keperluan karakterisasi tetap harus mempertimbangkan kondisi set *joint* yang lain untuk memeriksa set *joint* mana yang menimbulkan resiko paling tinggi atau total rating paling rendah.

e) *Groundwater Condition* (Kondisi air tanah)

Air tanah mempunyai pengaruh yang besar pada perilaku massa batuan. Adanya air yang mengisi *joint* akan meningkatkan tekanan hidrostatik sehingga mempengaruhi desain tambang. Untuk perhitungan RMR, parameter air tidak dapat diperoleh di lubang bor, karena untuk sistem ini yang diperlukan adalah kondisi air di lereng tambang, dengan kategori : *completely dry* (kering), *damp* (lembab), *wet* (basah), *dripping* (menetes), dan *flowing* (mengalir).

Tabel 3.1 RMR System (Bieniawski, 1989)

NO.	PARAMETER	RANGE OF VALUE							
		Extremely Strong	Very Strong	Strong	Medium Strong	Weak	Very Weak	Extremely Weak	
1	Strength of intact rock	Term Code Value Rating	Extremely Strong R6 >250 MPa 15	Very Strong R5 100 - 250 MPa 12	Strong R4 50 - 100 MPa 7	Medium Strong R3 25 - 50 MPa 4	Weak R2 5-25 Mpa 2	Very Weak R1 1-5 Mpa 1	Extremely Weak R0 < 1 Mpa 0
2	RQD	Term Code Value Rating	Excellent Quality E 90% - 100% 20	Good Quality G 75% - 90% 17	Fair Quality F 50% - 75% 13	Poor Quality P 25% - 50% 8	Very Poor Quality VP < 25% 3		
3	Spacing of Discontinuities	Term Code Value Rating	Very Wide VW > 2 m 20	Wide W 0.6 - 2 m 15	Moderate M 200 - 600 mm 10	Close C 60 - 200 mm 8	Very Close VC < 60 mm 5		
4	Condition of discontinuities								
	a) Discontinuity length (persistence)	Term Code Value Rating	Very Low VL < 1 m 6	Low L 1-3 m 4	Medium M 3-10 m 2	High H 10-20 m 1	Very High VH > 20m 0		
	b) Separation (aperture)	Term Code Value Rating	None N 0 mm 6	Very tight joint VT < 0.1 mm 5	Tight joint T 0.1-1.0 mm 4	Moderately Open Joint M 1-5 mm 1	Open Joint O > 5 mm 0		
	c) Roughness	Term Code Value Rating	Very Rough VR  6	Rough R  5	Slightly Rough SR  3	Smooth SM  1	Slickensided SL  0		
	d) Infilling (gouge)	Term Code Value Rating	None N 0 mm 6	Hard filling < 5mm H<5 4	Hard filling > 5 mm H>5 2	Soft filling < 5mm S<5 2	Soft filling > 5mm S>5 0		
	e) Weathering	Term Code Value Rating	Unweathered UW 6	Slightly Weathered SW 5	Moderately Weathered MW 3	Highly weathered HW 1	Decomposed D 0		
5	Ground Water*)	Term Code Value Rating	Dry D 15	Slightly Moist SM 10	Occasional seepage OS 7	Frequent seepage FS 4	Abundant seepage AS 0		

Tabel 3.2 Klasifikasi Kekuatan Batuan Berdasarkan Nilai UCS (Wyllie dan Mah, 2004)

STRENGTH	CODE	Deksripsi	Identifikasi Lapangan
>250 Mpa	R6	Sangat Kuat Sekali	Percontoh hanya berupa chip menggunakan palu geologi.
100 - 250 Mpa	R5	Sangat Kuat	Percontoh membutuhkan banyak pukulan palu geologi untuk memecahkannya
50 - 100 Mpa	R4	Kuat	Percontoh membutuhkan lebih sekali pukulan palu geologi untuk memecahkannya
25 - 50 Mpa	R3	Kuat Menengah	Percontoh dapat dipecahkan melalui sekali pukulan palu geologi
5 - 25 Mpa	R2	Lemah	Dapat dikelupas menggunakan pisau secara hati-hati, titik lekukan dangkal menggunakan palu geologi
1 - 5 Mpa	R1	Sangat Lemah	Hancur dipukul menggunakan palu geologi dan dapat dikelupas menggunakan pisau
0.25 - 1 Mpa	R0	Sangat Lemah Sekali	Dapat ditusuk menggunakan kuku tangan

Tabel 3.3 Klasifikasi Kondisi Pelapukan (ISRM, 1981)

TERM	CODE	DEFINITION
<i>Terdekomposisi / Sangat Terlapukan Sekali</i>	<i>D</i>	<i>Batuan berubah warna dan terdekomposisi dalam kondisi gembur dengan bagian terluar berupa tanah</i>
<i>Sangat Terlapukan</i>	<i>HW</i>	<i>Perubahan warna mulai meluas pada batuan dan batuan tersebut mulai gembur</i>
<i>Terlapukan Menengah</i>	<i>MW</i>	<i>Terjadi sedikit perubahan warna untuk lebih dari 20% pada bagian diskontinuitas. Area diskontinuitas terisi oleh material alterasi yang pada bagian terbuka dapat diamati batas butirnya.</i>
<i>Mulai Terlapukan</i>	<i>SW</i>	<i>Terjadi perubahan warna untuk sejauh 20% pada diskontinuitas batuan</i>
<i>Tidak Terlapukan</i>	<i>UW</i>	<i>Tidak ada tanda-tanda batuan terlapukan : rock fresh ; crystal bright</i>

Setelah pembobotan menggunakan RMR dilakukan, maka dapat ditentukan kelas massa batuan yang diamati dengan menggunakan Tabel 3.4. Selain kelas, dapat ditentukan juga beberapa parameter mekanik batuan.

Tabel 3.4 Kelas Beserta Parameter Massa Batuan (Bieniawski, 1989)

Class No.	V	IV	III	II	I
<i>RMR</i>	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
<i>Description</i>	Very poor	Poor	Fair	Good	Very good
<i>Cohesion (KPa)</i>	<100	100-200	200-300	300-400	>400
<i>Friction Angle (degree)</i>	<15	15-25	25-35	35-45	>45

3.4 Menaksir Kekuatan Massa Batuan dengan *Geological Strength Index (GSI)*

GSI adalah sebuah tabel panduan untuk mengukur tingkat kekuatan massa batuan berdasarkan penampakan visual lereng. Metode ini dikembangkan oleh Hoek dan Brown. Metode ini terus mengalami modifikasi sehingga dihasilkan dua tabel indeks kekuatan massa batuan untuk jenis batuan yang sifatnya umum (Gambar 3.5) dan heterogen (Gambar 3.6).

Untuk kategori batuan heterogen, Gambar 3.7 s/d 3.10 dapat dijadikan panduan untuk mempermudah identifikasi tipikal batuan setiap katagori.

Rock Type: <input type="text" value="General"/> <input type="button" value="OK"/>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		60	50		
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			40		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					20
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Gambar 3.5 GSI Untuk Tipe Batuan Umum (General) (Rocscience, 2010)

Rock Type: Flysch		GSI Selection: 50		OK		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES									
COMPOSITION AND STRUCTURE						VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR					
	A. Thick bedded, very blocky sandstone The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.					70									
							50								
C, D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.															
→ Means deformation after tectonic disturbance															

Gambar 3.6 GSI Untuk Tipe Batuan Heterogen (*Flysch*) (Rocscience, 2010)



Perlapisan batupasir yang tebal. Catatan, struktural longsoran dapat terjadi apabila kemiringan lapisan terjal

Batupasir dengan sisipan batulanau. Struktural longsoran dengan skala kecil yang dapat terjadi ketika kemiringan lapisan terjal

Gambar 3.7 Massa Batuan Kategori A dan B (Hoek dan Brown, 1981, dengan modifikasi)



Gambar 3.8 Massa Batuan Kategori C dan D (Hoek dan Brown, 1981, dengan modifikasi)



Gambar 3.9 Massa Batuan Kategori E dan F (Hoek dan Brown, 1981, dengan modifikasi)



Gambar 3.10 Massa Batuan Kategori G dan H (Hoek dan Brown, 1981, dengan modifikasi)

Untuk menentukan parameter massa batuan dengan pendekatan Mohr-Coulomb, maka Hoek bersama Rocscience mengembangkan sebuah perangkat lunak (software) yang disebut *RocLab* untuk menentukan Kohesi (c_M) dan Sudut geser dalam (ϕ_M) massa batuan yang dapat digunakan untuk analisis kestabilan lereng menggunakan Metode Kestimbangan Batas (LEM). Selain itu dapat dihasilkan juga dihasilkan modulus deformasi massa batuan (E_M), dimana parameter ini digunakan untuk analisis menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM).

3.5 Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Kestimbangan Batas

Analisis kesetimbangan batas merupakan metode analisis kesetimbangan dari massa yang berpotensi bergerak dengan membandingkan gaya penggerak dan gaya penahan sepanjang bidang gelincir longsor. Perbandingan kedua gaya tersebut akan menghasilkan

nilai faktor keamanan (FK) lereng, yang kondisi batas kesetimbangan akan dicapai saat nilai $FK = 1$ (de Vallejo dan Ferrer, 2011).

Perhitungan stabilitas (faktor keamanan) lereng dengan metode Bishop, pada prinsipnya adalah menghitung besarnya kekuatan geser yang tersedia untuk menahan longsoran (sliding) dibandingkan dengan besarnya tegangan geser yang bekerja sepanjang bidang longsor (Gambar 3.11).

$$F = \frac{\text{Shear strength available to resist sliding}}{\text{Shear stress mobilized along failure surface}} \dots\dots\dots (3)$$

Harga perbandingan ini disebut faktor keamanan lereng F , dimana persamaan matematikanya adalah sebagai berikut :

$$F = \frac{1}{\sum W \cdot \sin \alpha} \sum \left[c' \cdot b + W(1 - r_u) \tan \phi \cdot \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{F}} \right] \dots\dots\dots (4)$$

Dalam hal ini :

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/m^2) ;

b : Lebar *slice* (m) ;

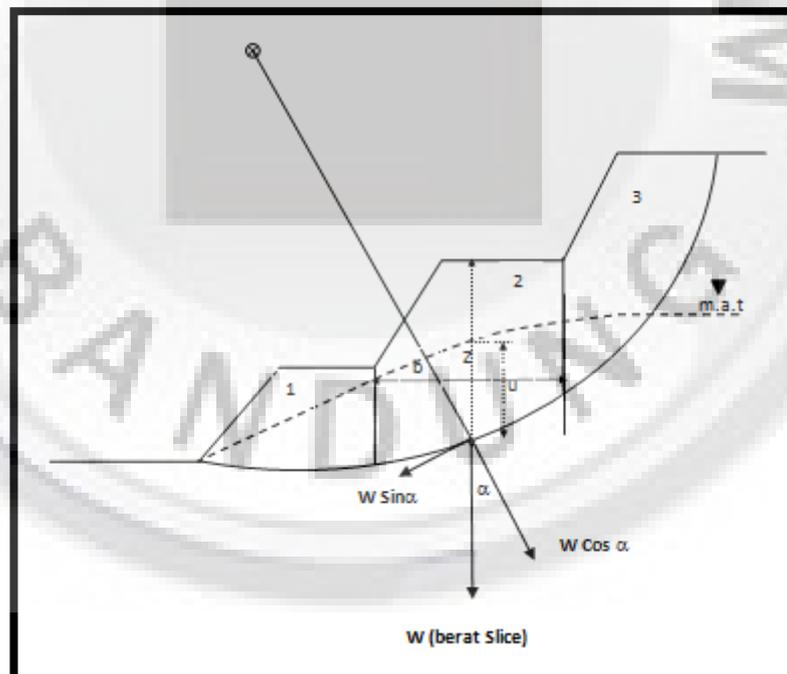
r_u : Nilai banding tekanan pori (*pore pressure ratio*) ;

ϕ : Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$).

Rumus ini dikenal dengan rumus Bishop. Terlihat bahwa sebelah kiri maupun kanan dari persamaan di atas mengandung F . Untuk menghitung

harga F , kita harus melakukan pengulangan (iterasi), yaitu kita pilih suatu perkiraan harga F awal (F coba), dan dimasukkan pada ruas kanan persamaan, kemudian dihitung dan diperoleh harga F pada ruas kiri. Hasil perhitungan ini dimasukkan kembali pada ruas kanan dan begitu seterusnya (beberapa kali), sampai didapatkan hasil nilai F pada ruas kiri mendekati sama dengan F input pada ruas kanan. Biasanya iterasi 2 – 3 kali sudah mendapatkan hasil F yang mendekati sama.

Perhitungan tersebut demikian jika dilakukan secara manual, namun dewasa ini sudah banyak metode perhitungan Bishop dibuat dalam program komputer, seperti *Slide*, *Slope*, dan lain-lain. Sehingga simulasi dan perhitungan faktor keamanan lereng dapat dilakukan dengan lebih baik



Gambar 3.11 Analisis Stabilitas Lereng Metode Bishop (Bishop, 1971, dengan modifikasi)

Nilai FK pada suatu lereng merupakan nilai terkecil hasil perhitungan pada semua bidang gelincir yang berpotensi menghasilkan longsor pada lereng tersebut.

Metode kesetimbangan batas dapat diklasifikasikan menjadi 2, yakni:

1. Metode analisis yang menggunakan total blok atau total massa
2. Metode analisis dengan menggunakan massa yang dibagi menjadi beberapa irisan (*slices*).

3.6 Simulasi

Simulasi merupakan suatu model pengambilan keputusan dengan mencontoh atau mempergunakan gambaran sebenarnya dari suatu sistem kehidupan dunia nyata tanpa harus mengalaminya pada keadaan yang sesungguhnya (Hasan, 2002).

Dengan mencontoh atau menduplikasi keadaan yang sebenarnya ini memungkinkan pengambil keputusan untuk melakukan suatu eksperimen terhadap sistem dan prediksi tingkah laku dan hasilnya berdasarkan input berbagai parameter dan aturan. Di samping itu, pengambilan keputusan juga dapat menganalisis berbagai performa sistem dan memilih keputusan yang optimal untuk jangka waktu yang panjang.

Simulasi digunakan apabila suatu kasus atau masalah nyata model matematikanya tidak dapat dibentuk atau metode atau rumus yang tersedia tidak dapat dipakai.

Jenis-jenis simulasi yaitu :

- a) Simulasi Analog

- b) Simulasi Matematik
- c) Simulasi Monte Carlo

3.7 Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo dipopulerkan oleh beberapa peneliti yakni: Stanislaw Ulam, Enrico Fermi, John von Neumann dan, Nicholas Metropolis pada tahun 1946. Simulasi Monte Carlo adalah proses menurunkan secara acak nilai variabel tidak pasti secara berulang-ulang untuk mensimulasikan suatu model. Metode Monte Carlo merupakan teknik stokastik dan probabilistik yang dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang.

Metode ini digunakan jika suatu sistem mengandung elemen yang mengikut sertakan faktor kemungkinan, model yang digunakan adalah model Monte Carlo. Dasar dari simulasi Monte Carlo adalah percobaan elemen kemungkinan dengan menggunakan sampel *random* (acak). Metode ini terbagi dalam 5 tahapan:

- a) Membuat distribusi kemungkinan untuk variabel penting
- b) Membangun distribusi kemungkinan kumulatif untuk tiap-tiap variabel di tahap pertama
- c) Menentukan interval angka *random* untuk tiap variabel
- d) Membuat angka *random*
- e) Membuat simulasi dari rangkaian percobaan

Simulasi Monte Carlo, yang berasal dari sampling statistik, pertama kali disampaikan oleh Metropolis dan Ulam dalam jurnal yang berjudul *The*

Monte Carlo Method, Journal of the American Statistical Association, Vol.44, No.247, 1949, pg. 335-341 (Yeh & Sun, 2013: 784, 795).

Beberapa keuntungan metode Monte Carlo yakni sederhana, lebih fleksibel dalam menggabungkan suatu varietas distribusi probabilitas yang cukup besar tanpa banyak penafsiran, dan kemampuan untuk memodelkan korelasi di antara *variable* dengan mudah. Umumnya analisis stabilitas lereng dengan metode kesetimbangan batas menggunakan simulasi Monte Carlo untuk menghitung probabilitas kelongsoran.

Pembangunan model Simulasi Monte Carlo didasarkan pada probabilitas yang diperoleh data historis sebuah kejadian dan frekuensinya (Cahyo, 2008: 13) :

$$P_i = f_i/n \dots\dots\dots (5)$$

Dalam hal ini :

P_i : Probabilitas kejadian I ;

f_i : Frekuensi kejadian I ;

n : Jumlah frekuensi semua kejadian.

Simulasi Monte Carlo adalah pengambilan sampel dengan menggunakan bilangan - bilangan acak (*random numbers*) dengan prinsip kerja adalah membangkitkan bilangan - bilangan acak atau sampel dari suatu variabel acak yang telah diketahui distribusinya, sehingga seolah - olah dapat diperoleh data dari lapangan, atau dengan kata lain Simulasi Monte Carlo meniru kondisi lapangan secara numerik.

3.8 Analisis Probabilistik Monte Carlo dalam Metode Kestimbangan Batas

Fungsi distribusi probabilitas menggambarkan penyebaran suatu variabel acak yang digunakan untuk memperkirakan nilai probabilitas kemunculan suatu parameter. Fungsi distribusi probabilitas memiliki sifat-sifat penyebaran yang khas dan unik yang menjadikan fungsi yang satu akan berbeda dengan fungsi yang lainnya. Tetapi hal ini tidak menutup kemungkinan bahwa suatu fungsi distribusi merupakan turunan dari fungsi yang lainnya.

Dalam suatu paket program data yang menggunakan Metode Kestimbangan Batas (*Limited Equilibrium Method*) yaitu *Rocscience Slide ver. 6.0* terdapat suatu cara analisis probabilistik Monte Carlo yang di dalamnya dapat mensimulasikan beberapa parameter geoteknik (sudut geser dalam, *density*, *cohesion*, dll.) sampai 10.000 sampel, dengan hasil analisis (*output*) berupa histogram atau berupa kurva dengan parameter yang dapat ditentukan.

Dalam metode kestimbangan batas dapat menunjukkan beberapa nilai yaitu :

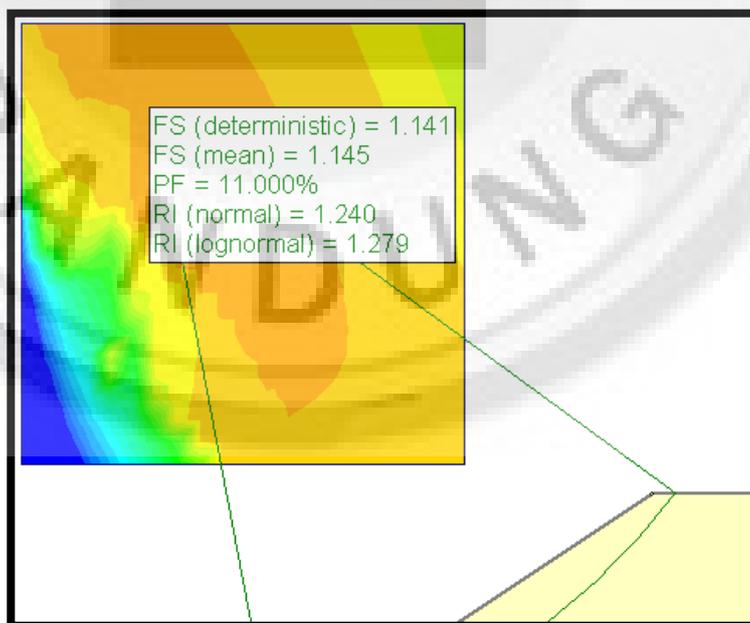
1. FS, *Safety Factor* yaitu nilai faktor keamanan, diperoleh dari Analisis Probabilistik. Ini hanyalah faktor keamanan rata-rata, dari semua faktor keselamatan.
2. PF, *Probability Failure* yaitu persentase dari jumlah data dengan hasil $FS < 1$ (*failure*) yang dibagi dengan seluruh sampel. Ambang Batas FK dan PK sebagaimana yang dapat dilihat pada Tabel 3.5.

$$PF = \frac{\text{Number Failed}}{\text{Number Samples}} \times 100 \% \dots\dots\dots (6)$$

Tabel 3.5 Ambang Batas Nilai FK & PK Lereng Tambang Terbuka (SRK, 2010)

Jenis Lereng	Dampak Longsoran	FK min (statik)	FK min (dinamik)	PK max P [FK < 1]
Tunggal / Jenjang (Bench)	Low-High	1.1	NA	25-50%
Multi Jenjang (Interramp)	Low	1.15-1.2	1.0	25%
	Medium	1.2	1.0	20%
	High	1.2-1.3	1.1	10%
Keseluruhan (Overall)	Low	1.2-1.3	1.0	15-20%
	Medium	1.3	1.05	5-10%
	High	1.5	1.1	≤ 5%

3. RI, *Reilability Index* yaitu ukuran lain yang umum digunakan stabilitas lereng, setelah analisis probabilistik. RI merupakan indikasi dari jumlah standar deviasi yang memisahkan faktor keamanan dari faktor keamanan kritis (FK=1). RI dapat dihitung dengan asumsi baik distribusi Normal atau Lognormal hasil faktor keamanan (Gambar 3.12).



Gambar 3.12 Model Analisis Probabilistik pada Metode Keseimbangan Batas (Rockscience, 2010)

Dalam hal ini :

- FS (deterministic) : Nilai FK pada model yang ditampilkan.
- FS (mean) : Nilai FK pada model dengan rata-rata dari banyak data yang di simulasikan.
- PF : Besar kemungkinan kelongsoran dari model.
- RI (normal) : Indikasi dari jumlah standar deviasi yang memisahkan faktor keamanan dari faktor keamanan kritis secara normal.
- RI (lognormal) : Indikasi dari jumlah standar deviasi yang memisahkan faktor keamanan dari faktor keamanan kritis secara lognormal.