

BAB II TEORI DASAR

2.1 Gerakan Massa Tanah dan Batuan

Lereng merupakan permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal[4]. Lereng dapat terbentuk secara alami, misalnya lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia antara lain berupa galian atau timbunan untuk membuat bendungan, tanggul dan kanal sungai serta dinding tambang terbuka.

Gerakan massa batuan atau yang biasa disebut dengan Longsor (*landslide*) adalah gerakan material pembentuk lereng ke arah bawah kaki lereng (*downward*) atau ke arah luar (*outward*) lereng yang biasanya dipengaruhi oleh gravitasi bumi. Material pembentuk lereng tersebut dapat berupa masa batuan induk, lapisan tanah, timbunan buatan manusia atau kombinasi berbagai jenis material tersebut[5].

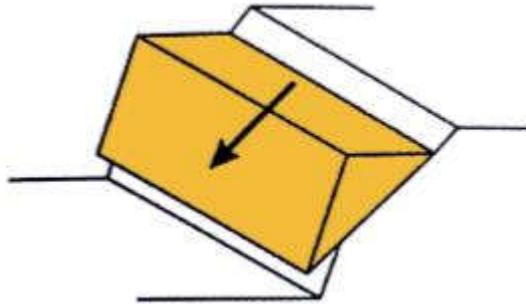
Bencana longsor seringkali menyebabkan korban jiwa, serta kerugian material yang besar. Banyak hal yang dapat menjadi pemicu terjadinya tanah longsor seperti tingkat pelapukan yang tinggi, kecuraman lereng, dan curah hujan yang tinggi. Potensi terjadinya longsor dapat diminimalkan dengan mengenali topologi lereng yang rawan longsor, gejala awal lereng akan bergerak, serta sistem peringatan dini yang efektif[6].

Pada sistem penambangan terbuka, terdapat beberapa jenis longsor yang umum dikenal:

- a. Longsoran Bidang

Longsoran bidang merupakan jenis longsoran yang umumnya jarang terjadi di area pertambangan. Longsoran ini akan sangat mungkin terjadi

jika kondisi lereng menurun. Longsoran ini biasa terjadi apabila terdapat struktur geologi yang berkembang, seperti adanya kekar (*joint*) maupun patahan yang searah dengan bidang gelincirnya. Berikut ini merupakan ilustrasi skema longsoran bidang.



Gambar 2.1 Skema longsoran bidang[5]

b. Longsoran Busur

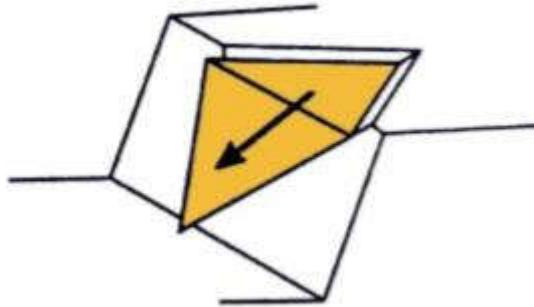
Longsoran busur sering terjadi pada lereng tanah yang memiliki material yang mudah lapuk ataupun lereng-lereng timbunan. Bentuk bidang gelincir pada longsoran ini berupa lengkungan lingkaran yang menyerupai busur bila dilihat dari penampang melintang.



Gambar 2.2 Skema longsoran busur[5]

c. Longsoran Baji

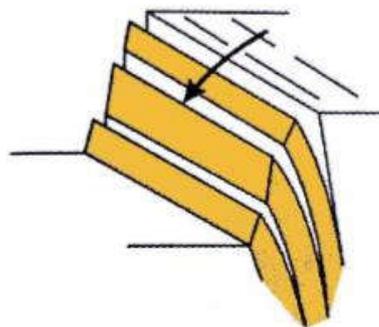
Longsoraji ini serupa dengan longсорan bidang yaitu diakibatkan oleh adanya perkembangan struktur geologi (kekar). Namun longсорan baji ini terjadi akibat terdapatnya dua struktur geologi yang berkembang dan saling berpotongan sehingga membentuk bidang gelincir.



Gambar 2.3 Skema longсорan baji[5]

d. Longсорan Guling

Longсорan guling biasa terjadi pada lereng yang terjal serta pada jenis batuan yang keras, dimana struktur bidang lemahnya berbentuk menyerupai kolom. Longсорan ini terjadi apabila bidang lemah yang terdapat pada lereng memiliki sudut kemiringan yang tegak hingga berlawanan dengan arah kemiringan lereng.



Gambar 2.4 Skema longсорan guling[5]

2.1.1 Pemicu dan Pemacu Gerakan Massa Tanah dan Batuan

Terjadinya gerakan massa tanah dan batuan pasti terdapat faktor pemicu maupun pemacunya. Faktor pemicu gerakan massa tanah merupakan hal-hal yang dapat menginisiasi terjadinya pergerakan sebagian massa tanah di atas bidang longsorannya. Sementara itu, faktor pemacu (pendorong) gerakan tanah dapat didefinisikan sebagai hal-hal yang diberikan pada sesuatu lereng tanah atau batuan sehingga dapat meningkatkan potensi pergerakan tanah dan menyebabkan perubahan posisi.

Terdapat hal-hal yang dapat menjadi pemicu dan pemacu gerakan massa tanah dan batuan. Contoh hal yang dapat menjadi pemicu adanya gerakan massa tanah dan batuan yaitu gempa bumi dan hujan. Sedangkan contoh hal yang dapat menjadi pemacu yaitu adanya pemotongan kaki (*toe*) pada lereng yang akhirnya akan memiliki kecenderungan yang lebih besar untuk bergerak.

Penyebab gerakan massa tanah dan batuan sulit dideteksi jika peristiwa tersebut sudah berlangsung sejak lama. Penyebab gerakan massa tanah dan batuan disebabkan oleh pengaruh eksternal, internal, dan kombinasi keduanya[7,8].

2.1.2 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

Stabilitas pada lereng bergantung pada beberapa faktor. Biasanya sulit untuk menunjukkan penyebab tunggal dari kegagalan suatu lereng yang direpresentasikan dalam bentuk longsor. Secara umum, ini adalah kombinasi dari faktor-faktor tertentu yang dikombinasikan pada satu waktu tertentu untuk menyebabkan adanya suatu kegagalan. Faktor-faktor ini dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

1. Faktor-faktor yang menyebabkan peningkatan tegangan geser (*shear stress*)
2. Faktor-faktor yang mengurangi kekuatan geser (*shear strength*)

Pada peningkatan tegangan geser, faktor utama yang termasuk dalam kategori ini adalah:

1. Meningkatnya jumlah beban pada lereng seperti dalam kasus pembuangan kelebihan material di lereng pembuangan tambang internal.
2. Tekanan dinamis transien dari operasi peledakan, pergerakan peralatan berat pertambangan, dan gempa bumi.
3. Tekanan lateral karena tekanan pori, pelebaran rekahan karena kondisi cuaca yang buruk.
4. Peningkatan aktivitas tektonik yang dapat mengganggu medan tegangan.

Pada pengurangan kekuatan geser, faktor utama yang termasuk dalam kategori ini adalah:

1. Karakteristik material yang melekat atau faktor geologis seperti orientasi dan keberadaan diskontinuitas, keberadaan bahan yang lemah.
2. Penghapusan struktur penahan, erosi tanah karena kondisi hujan atau penurunan muka tanah.
3. Perubahan kekuatan karena pelapukan, seperti kerusakan fisik dari batuan granular yang mengakibatkan berkurangnya kohesi.
4. Perubahan kekuatan internal karena diskontinuitas dan tekanan air pori.
5. Melemahnya lereng karena creep terus menerus.

2.1.3 Kriteria Pergerakan Pergerakan Lereng (*Slidding Control*)

Keruntuhan lereng dapat terjadi meskipun telah dilakukan perencanaan dan penguatan terhadap lereng. Sebelum lereng mengalami keruntuhan, sering kali

lereng menunjukkan tanda-tanda tertentu yang dapat diamati. Oleh karena itu, tanda-tanda ini sebaiknya diperhatikan melalui kegiatan pemantauan agar dapat segera dilakukan penanganan sebelum terjadinya runtuh.

Pemantauan lereng dilakukan untuk memahami perilaku batuan dan mendeteksi adanya kondisi lereng yang tidak stabil serta berpotensi longsor sebagai akibat dari kegiatan penambangan maupun dari kondisi lingkungan. Data-data yang diperoleh dari kegiatan pemantauan kemudian dapat dimodelkan dan dianalisis serta diinterpretasi. Hasil interpretasi yang diperoleh dapat berupa arah dan laju pergeseran lereng, potensi luas atau besar longsor yang akan terjadi, serta perkiraan waktu longsor tersebut akan terjadi.

Klasifikasi pergerakan lereng dibuat untuk memberi ilustrasi berbagai pola pergerakan lereng. Pergerakan lereng ini dapat dilihat seberapa besar pergerakan horizontal[9] dan vertikal[10].

2.2 Getaran Tanah (*Ground Vibration*)

Vibrasi atau getaran merupakan gerakan bolak-balik dalam suatu interval waktu tertentu. Getaran berhubungan dengan gerak osilasi benda atau gerak bolak-balik suatu benda dengan gaya yang berhubungan dengan gerak tersebut. Hampir semua benda yang memiliki massa dan elastisitas mampu bergetar.

Ground vibration adalah gelombang yang bergerak di dalam tanah yang disebabkan oleh adanya sumber energi. Sumber energi dari getaran tersebut dapat berasal dari alam dan buatan manusia. Getaran yang berasal dari alam contohnya yaitu gempa bumi, sedangkan yang berasal dari kegiatan manusia yaitu dari lalu lintas kendaraan, peledakan (*blasting*), dan industri.

Berdasarkan sumbernya, *vibration* dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu:

1. Continuous Vibration

Continuous vibration merupakan getaran yang berlangsung terus-menerus dalam waktu tertentu. Contoh dari *continuous vibration* yaitu getaran mesin, lalu lintas yang stabil, pekerjaan konstruksi yang terus-menerus seperti pengeboran terowongan.

2. *Impuls Vibration*

Impuls vibration merupakan getaran yang meningkat dan menurun dengan cepat, bisa dalam 1 atau beberapa siklus getaran. Contohnya yaitu tumbukan oleh benda yang berat dan ledakan (*blasting*).

3. Intermittent Vibration

Intermittent Vibration merupakan getaran kontinu yang berlangsung terputus-putus atau gerakan impuls yang berlangsung berulang-ulang. Contohnya yaitu kereta api, iringan kendaraan berat, dan pemasangan paku bumi.

2.2.1 Getaran Tanah Akibat Kendaraan

Mekanisme yang dilakukan dengan menggerakkan kendaraan seperti mobil dan truk akan menghasilkan getaran yang disebut juga dengan gaya dinamis yang berhubungan dengan lintasan dan bobot dari kendaraan tersebut. Getaran pada jalan memiliki frekuensi getaran yang berbeda-beda tergantung dari bobot dan kecepatan kendaraan yang melintasinya. Semakin besar bobot kendaraan yang melintasi jalan, maka akan menghasilkan getaran yang lebih besar pula.

Salah satu yang dapat mempengaruhi besarnya tingkat getaran tanah yaitu jumlah kendaraan atau volume lalu lintas yang melewati lintasan. Volume lalu lintas menunjukkan jumlah kendaraan yang melintasi suatu titik pengamatan dalam satu satuan waktu. Volume lalu lintas dapat dihitung dengan menggunakan rumus[12] berikut:

$$q = \frac{n}{t} \quad (2.1)$$

Keterangan:

q = volume lalu lintas yang melalui suatu titik

n = jumlah kendaraan yang melalui titik itu dalam interval waktu pengamatan

t = interval waktu pengamatan

2.2.2 Parameter-Parameter *Ground Vibration*

Parameter *ground vibration* (pergeseran, kecepatan dan percepatan) meliputi amplitudo puncak, durasi, dan *frequency content*.

1. Amplitudo Puncak

Biasanya dalam pengambilan data vibrasi pada area pertambangan, nilai amplitudo puncak yang diperoleh dalam bentuk PPV (*Peak Particle Velocity*). Puncak kecepatan partikel (*Peak Particle Velocity*) adalah laju maksimum gerakan partikel. *Velocity* merupakan ukuran jarak yang bisa ditempuh oleh partikel dalam 1 detik. Selain ada PPV ada pula PPA (*Peak Particle Acceleration*) yang didefinisikan sebagai perubahan kecepatan pergerakan partikel per unit waktu. PPA ini digunakan untuk menentukan puncak gelombang getaran atau intensitas.

Nilai *amax* berkaitan dengan nilai PPA yang dihasilkan dari pengukuran menggunakan alat seismometer berupa Blastmate III. Kesalahan yang biasa terjadi yaitu menggunakan nilai PPA dari hasil pengukuran sebagai nilai *amax*. Kenyataannya nilai *amax* berbeda dengan nilai PPA. Nilai *amax* yang digunakan dalam analisis adalah nilai perkiraan saja. Berikut ini merupakan formula dari perhitungan nilai *amax* berdasarkan nilai PPV yang diperoleh dari pengukuran[13]:

$$amaks (gal) = \frac{2 \times \phi \times PPV \times f}{386.4} \quad (2.2)$$

PPV = Peak Partical Velocity (inch/s)

$$\Phi = 3.14159$$

F = frekuensi (Hz)

2. Frekuensi

Frekuensi merupakan berapa kali partikel bergerak bolak-balik dalam 1 detik. Gerak bolak-balik gelombang ini disebut juga dengan osilasi. Jadi, jumlah osilasi per detik atau siklus per detik yang diukur dalam Hertz (Hz).

3. Durasi Getaran

Durasi getaran merupakan waktu yang dibutuhkan selama getaran berlangsung.

Ketiga faktor ini dipengaruhi oleh berbagai sifat seperti kekuatan batuan, media propagasi, dan lain - lain. Faktor-faktor tersebut menentukan karakteristik getaran untuk peledakan tambang umum, penggalian, dan operasi konstruksi.

2.3 Mekanika Batuan

Mekanika batuan merupakan ilmu pengetahuan yang mempelajari perilaku batuan baik secara teoritis maupun terapan, merupakan cabang ilmu mekanika yang berkenaan dengan sikap batuan terhadap medan-medan gaya pada lingkungannya. Secara umum, mekanika batuan adalah ilmu yang mempelajari sifat dan perilaku batuan bila terhadapnya dikenakan gaya atau tekanan. Aplikasi mekanika batuan di dalam pertambangan biasanya digunakan untuk membuat rancangan dan pelaksanaan operasi penambangan

2.3.1 Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan adalah sifat yang terdapat pada batuan setelah dilakukan pengujian. Pengujian ini dilakukan tanpa adanya unsur pengrusakan. Penentuan sifat fisik batuan ini dilakukan di laboratorium yang terbagi menjadi beberapa bagian. Bagian yang pertama yaitu pembuatan sampel

yang dilakukan di laboratorium dan di lapangan. Bagian kedua yaitu melakukan tahap pengujian dengan menimbang berat sampel dan sifat fisik batuan. Adapun sifat fisik pada batuan meliputi:

1. Bobot Isi

Bobot isi merupakan perbandingan antara berat batuan dengan volume batuan.

2. *Spesific Gravity*

Spesific gravity merupakan perbandingan antara bobot isi dengan bobot isi air.

3. Kadar Air

Kadar air merupakan perbandingan antara berat air yang ada di dalam batuan dengan berat butiran batuan itu sendiri.

4. Porositas

Porositas merupakan perbandingan volume pori-pori atau rongga dalam batuan dengan volume batuan.

2.3.2 Sifat Mekanik Batuan

Batuan memiliki sifat mekanik yang dapat diketahui dengan cara merusak, dimana dalam menentukan sifat mekanik batuan di laboratorium ini dilakukan beberapa pengujian, seperti berikut.

1. Uji Kuat Tekan Uniaksial

- a. Uji Kuat Tekan (*unconfined Compressive Strength Test*)

Uji ini menggunakan mesin tekan (*compression machine*) untuk menekan sampel batuan yang berbentuk silinder dari satu arah (*uniaxial*).

- b. Batas Elastis

Plastisitas merupakan karakteristik batuan yang membuat regangan (*deformasi*) permanen yang besar sebelum batuan tersebut hancur (*failure*). Perilaku batuan dikatakan elastis (*linier* maupun *non linier*) jika tidak terjadi deformasi permanen jika suatu tegangan dibuat nol.

- c. Modulus Young

Modulus Young dapat ditentukan dengan melakukan perbandingan antara selisih tegangan *aksial* dengan regangan aksial.

d. Poisson's Ratio

Poisson's Ratio didefinisikan sebagai harga perbandingan antara regangan lateral dan regangan aksial.

2. Uji Kuat Tarik Tak Langsung

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tarik (*tensile strength*) dari contoh batu berbentuk silinder secara tidak langsung.

3. Uji *Point Load*

Uji *point load* ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan dari sampel batuan secara tak langsung di lapangan. Sampel batuan dapat berbentuk silinder atau tidak beraturan.

4. Uji Triaksial

Uji triaksial merupakan salah satu pengujian yang terpenting dalam mekanika batuan untuk menentukan kekuatan batuan di bawah tekanan triaksial.

Dari hasil uji triaksial dapat ditentukan:

1. *Strength envelope* (kurva intrinsik), yaitu kurva yang menunjukkan kekuatan batuan terhadap tahanan batuan.
2. Kuat geser (*shear strength*), yaitu gaya tahanan internal yang bekerja per satuan luas masa batuan untuk menahan terjadinya runtuh atau kegagalan sepanjang bidang runtuh pada tubuh batuan tersebut.
3. Sudut geser dalam (φ), yaitu sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya.
4. Kohesi (C), yaitu gaya tarik menarik antara partikel dalam batuan, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kekuatan geser

batuan akan semakin besar dengan meningkatnya nilai kohesi batuan tersebut.

2.3.3 Kuat Geser Tanah Menurut Mohr Coloumb

Perilaku tanah dan batuan menjadi hal yang sangat penting dan menarik dalam bidang geoteknik karena dapat berpengaruh terhadap kondisi kekuatan batuan itu sendiri. Perilaku tanah tersebut dapat direpresentasikan ke dalam model hubungan tegangan tanah. Hubungan tegangan tanah dapat ditunjukkan dalam Hukum Mohr. Mohr menyatakan bahwa keruntuhan sebagai akibat dari kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser dan bukan hanya akibat tegangan normal maksimum dan tegangan geser maksimum saja.

Hukum Mohr-Coloumb (lihat Gambar 2.9 dan Gambar 2.10) menyatakan bahwa kekuatan geser tanah (τ) mempunyai hubungan fungsional dengan kohesi tanah (c), dan friksi partikel yang ditunjukkan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.3)$$

Keterangan:

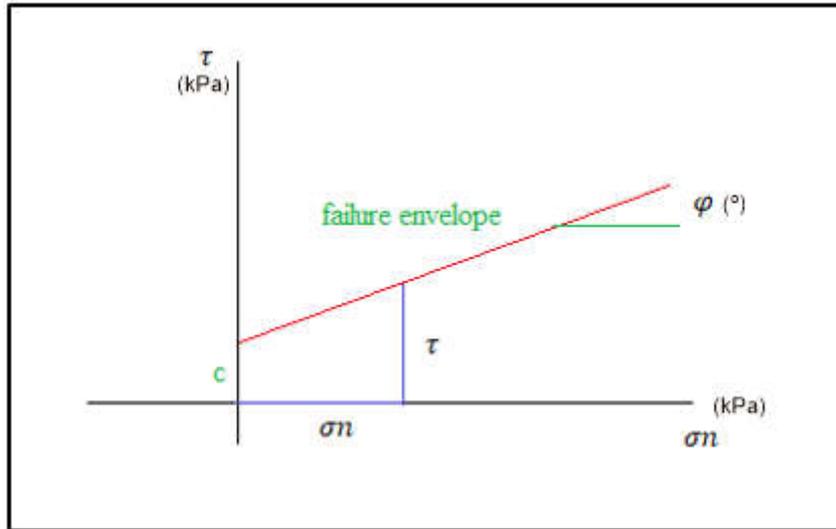
τ = tegangan geser (kPa)

c = kohesi tanah (kPa)

σ_n = tegangan normal (*normal stress*; kPa)

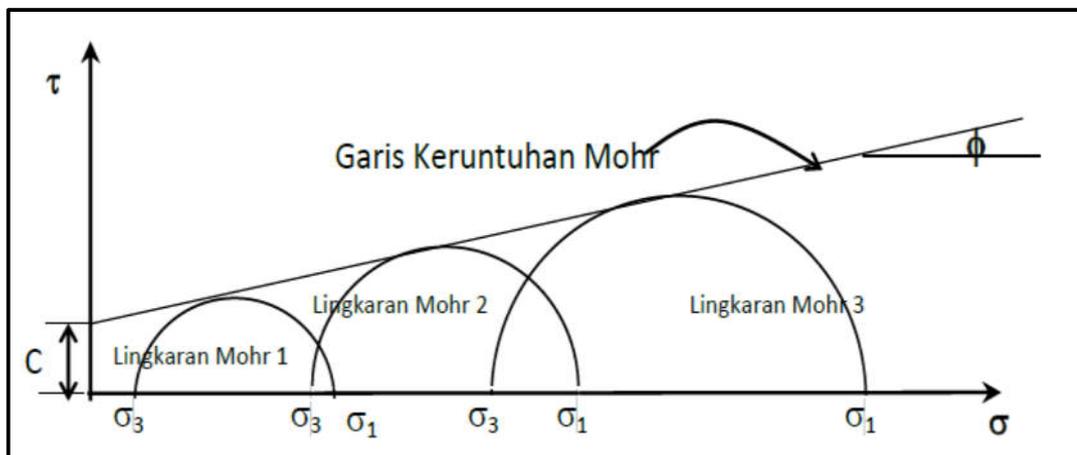
φ = sudut friksi dalam (*internal friction angle*; derajat)

Garis merah pada Gambar 2.9 merupakan garis runtuh atau *failure envelope* yang menjelaskan bahwa jika lingkaran Coulomb menyentuh garis tersebut maka batuan mengalami runtuh.



Gambar 2.9 Kriteria runtuh Mohr[15]

Garis merah merupakan garis runtuh atau *failure envelope*. Sumbu x merupakan tegangan normal (σ_n) dan sumbu y merupakan tegangan geser (τ). Nilai kohesi (c) merupakan titik perpotongan antara garis runtuhuan dengan sumbu tegangan geser.



Gambar 2.10 Lingkaran Mohr dan Kurva Intrinsik Hasil Pengujian Triaksial[16]

2.4 Faktor Keamanan (*Factor of Safety, FoS*) dan Kestabilan Lereng

Stabilitas lereng dalam dunia pertambangan menjadi salah satu faktor yang sangat penting karena hampir semua aktivitas pertambangan akan sangat berpengaruh

terhadapnya, seperti penggalian, penimbunan, pengangkutan, dan peledakan. Aktivitas tersebut akan berpengaruh terhadap kestabilan lereng dan akan berdampak kepada keselamatan pekerja dan kelancaran produksi. Dalam operasi penambangan, masalah kestabilan lereng akan ditemukan pada penggalian tambang terbuka (*open pit* dan *open cut*), tempat penimbunan material buangan (*tailing disposal*), penimbunan bijih (*stockyard*), bendungan, dan infrastruktur lainnya seperti jalan, fondasi jembatan, dan lereng di sekitar fasilitas seperti perumahan[15].

Analisis kemantapan lereng merupakan suatu bagian yang penting untuk mencegah terjadinya gangguan terhadap kelancaran produksi maupun terjadinya bencana yang fatal. Dalam keadaan tidak terganggu (stabil alamiah), tanah atau batuan umumnya berada dalam keadaan seimbang terhadap gaya-gaya yang timbul dari dalam. Kalau misalnya karena sesuatu sebab mengalami perubahan keseimbangan akibat pengangkatan, penurunan, penggalian, penimbunan, erosi atau aktivitas lain, maka tanah atau batuan tersebut akan berusaha mencapai kestabilan atau keseimbangan yang baru.

Metode yang paling umum untuk analisis kestabilan lereng yaitu didasarkan pada syarat keseimbangan. Analisis yang dimaksud yaitu dengan memperhitungkan *Factor of Safety* (FoS) dari kestabilan lereng. Analisis ini membandingkan antara gaya yang diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan terhadap gaya berat dari tanah. Analisis ini bertujuan untuk menentukan apakah lereng tersebut mantap pada batas keamanannya dengan menggunakan analisis keseimbangan, perbandingan antara gaya penahan yang ada serta gaya termobilisasi (gaya penggerak) dapat dibuat.

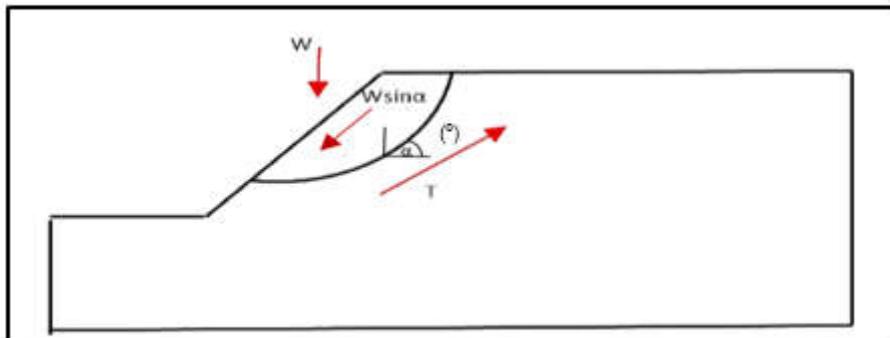
Kestabilan lereng berdasarkan *factor of safety* dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\text{FoS} = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya penggerak}} = \frac{F^*}{F} \quad (2.4)$$

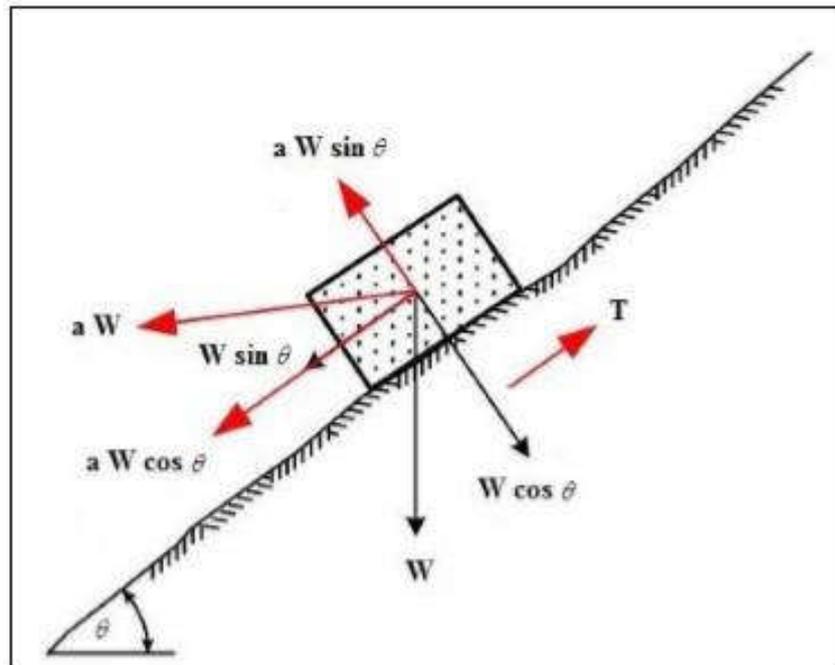
$$\text{FoS} = \frac{\text{Kekuatan geser}}{\text{Kekuatan penggerak}} = \frac{F^*/A}{F/A} = \frac{\tau^*}{\tau} \quad (2.5)$$

Gaya yang menyebabkan ketidakmampuan (gaya penggerak) yaitu berat tanah itu sendiri dan gaya penahan yang berasal dari gaya geser tanah. Pola keruntuhan yang akan terjadi tidak dapat ditentukan dan dipastikan, namun dapat diperkirakan dengan melakukan analisis dan pemodelan. Pada lereng yang homogen, keruntuhan umumnya terjadi pada bidang yang membusur pada area lereng, sedangkan pada lereng heterogen, umumnya longsoran terjadi pada bidang diskontinuitas[1].

Pada perhitungan batas kesetimbangan, dapat diasumsikan bahwa gaya berat ($W \sin \alpha$) yang menyebabkan longsor sama dengan gaya penggerak (τ), seperti terlihat pada gambar 2.11. Sudut α merupakan sudut yang dibentuk oleh bidang gelincir dengan bidang horizontal.



Gambar 2.11 Gaya yang bekerja terhadap lereng[17]



Gambar 2.12 Gaya kesetimbangan batas pada suatu lereng[18]

Gaya penggerak (τ) merupakan berat massa tanah yang ada di atas bidang gelincir dengan arah paralel permukaan bidang gelincir. Kumulatif gaya penggerak dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\text{Gaya Penggerak } (\tau) = W \sin \alpha \quad (2.6)$$

Sementara itu, kekuatan geser merupakan penjumlahan dari kohesi material tanah dengan pengaruh dari beban normal pada permukaan bidang gelincir dan sudut friksi internal.

$$\text{Kekuatan Geser } (\tau^*) = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.7)$$

$$W \sin \alpha = \frac{1}{FoS} (c + \sigma_n \tan \varphi) \quad (2.8)$$

Dimana c merupakan kohesi, σ_n adalah beban normal yang tegak lurus permukaan bidang gelincir, dan φ merupakan sudut friksi internal. Persamaan FoS akan menjadi sebagai berikut,

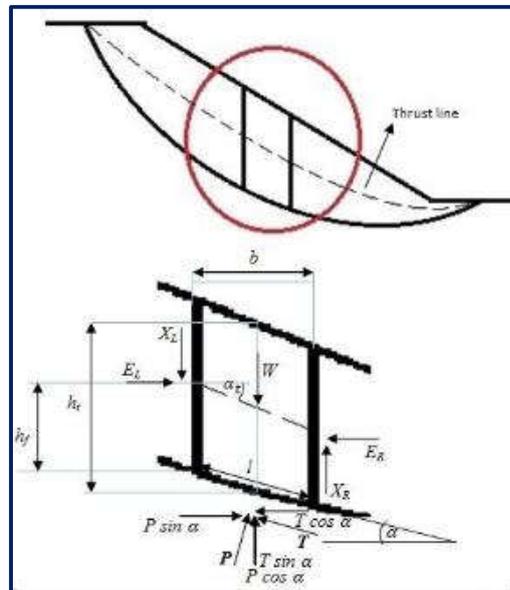
$$FoS = \frac{c + \sigma_n \tan \varphi}{W \sin \alpha} \quad (2.9)$$

Berikut ini merupakan klasifikasi tingkat kestabilan lereng berdasarkan nilai FoS[2]:

- $FoS \geq 1,25$: Lereng dalam kondisi aman (stabil).
- $FoS < 1,07$: Lereng dalam kondisi tidak aman (labil).
- $1,07 < FoS < 1,25$: Lereng dalam kondisi kritis.

2.4.1 Metode Janbu yang Disederhanakan (*Simplified Janbu Method*)

Metode Janbu merupakan metode analisa yang digunakan pada permukaan longsor yang berbentuk *circular* dan *non circular*. Janbu merumuskan persamaan umum kesetimbangan dengan menyelesaikan secara vertikal dan sejajar pada dasar tiap-tiap irisan dengan memperhitungkan kesetimbangan gaya. Metode ini mengasumsikan bahwa gaya normal antar irisan diperhitungkan tetapi gaya geser antar irisan diabaikan atau bernilai nol ($X_L - X_R = 0$). Metode Janbu ini menurunkan angka faktor keamanan dari kesetimbangan horizontal.



Gambar 2.13 Skema perhitungan komponen – komponen gaya yang bekerja pada bidang longsoran circular akibat elemen irisan massa tanah pada Metode Janbu[19]

Dimana W adalah berat irisan dan x adalah jarak mendatar irisan ke pusat radius lingkaran. Gaya penggerak (D_f) keseluruhan dari lereng adalah jumlah dari seluruh irisan, yaitu:

$$D_f = \sum Wx \quad (2.10)$$

karena $x = R \sin \alpha$, maka Persamaan 2.16 dapat dituliskan sebagai berikut,

$$D_f = \sum WR \sin \alpha \quad (2.11)$$

Jika kuat gesek material pada irisan lereng adalah s , maka kekuatan untuk mempertahankan kestabilan pada tiap irisan adalah $\frac{s}{F}$

Jika gaya pada dasar irisan adalah τ maka: $\tau = \frac{sl}{F}$ (2.12)

Pada batuan atau tanah terkadang adanya pengaruh air akan menimbulkan gaya angkat air karena tekanan pori, sehingga analisa kestabilan lereng dilakukan

dalam kondisi tegangan efektifnya. Pada perhitungannya yaitu kekuatan geser untuk menahan kestabilan lereng disimbolkan dengan τ , sedangkan s diganti dengan $c + (\sigma - u) \tan \varphi$, sehingga:

$$\tau = \frac{1}{F} [cl + (p - ul) \tan \varphi] \quad (2.13)$$

Sehingga persamaan FoS menjadi:

$$FoS = \frac{\sum(c.l + (\sigma.l - u.l) \tan \varphi}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.14)$$

$$FoS = \frac{\sum(c.l + (P - u.l) \tan \varphi}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.15)$$

Dimana P merupakan gaya normal antar irisan yang diperoleh dengan menguraikan gaya-gaya yang bekerja pada irisan dalam arah gaya berat (W) atau resultan gaya pada batas vertikal irisan yang bekerja pada arah horizontal.

Selanjutnya gaya normal di dasar tiap-tiap irisan ditentukan dengan menjumlahkan gaya-gaya dalam arah vertikal. Berikut ini merupakan kesetimbangan gaya horizontal:

$$\tau + (E_r - E_l) \cos \alpha = (W - (X_r - X_l)) \sin \alpha \quad (2.16)$$

$$(E_r - E_l) \cos \alpha = (W - (X_r - X_l)) \sin \alpha - \tau \quad (2.17)$$

$$= (W - (X_r - X_l)) \sin \alpha - \frac{1}{F} [cl + (p - ul) \tan \varphi] \sec \alpha \quad (2.18)$$

Maka nilai FoS diformulasikan dengan:

$$FoS = \frac{\sum(c.l + (w - ul) \tan \varphi) \frac{\sec \alpha^2}{1 + \tan \alpha \tan \varphi / F}}{\sum W \tan \alpha} \quad (2.19)$$

Metode Janbu biasanya digunakan untuk menganalisis lereng dengan material berupa timbunan. Lereng dengan material timbunan ini biasanya berkemungkinan akan mengalami longsoran busur. Metode Janbu ini digunakan untuk menganalisis longsoran busur dengan bidang gelincir non sirkular. Agar pengaruh

adanya beban dinamis (getaran) ikut diperhitungkan dalam analisis, dilakukan sedikit modifikasi terhadap rumus *factor of safety* (FoS) Janbu, yaitu dengan menambahkan faktor gempa (F_g) yang didefinisikan sebagai:

$$F_g = \frac{a}{g} \quad (2.20)$$

Keterangan:

a = percepatan yang timbul sehubungan dengan adanya beban dinamis/gempa, dapat berupa a_h yang arah kerjanya horizontal/mendatar atau a_v yang arah kerjanya vertikal.

g = percepatan gravitasi.

2.5 Pemodelan Numerik Pergeseran 3D Menggunakan *FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions)*

Pembebanan yang diakibatkan oleh aktivitas kendaraan berat pertambangan akan mengakibatkan terganggunya keadaan awal *stress*. Pengukuran perubahan regangan dan tegangan yang bekerja saat adanya aktivitas kendaraan berat pertambangan sangat sulit dilakukan dengan pendekatan empiris, maka digunakanlah *numerical modelling* untuk menganalisis tegangan dan regangan karena dinilai lebih efisien. *FLAC3D* dapat digunakan dalam menyelesaikan persamaan gerak baik pada konfigurasi mekanik ataupun termomekanik[20]. Formulasi dalam mekanisme persamaan gerak (*equation of motion*) yang bekerja adalah sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \sigma + \rho_m g = \rho_m \frac{dv}{dt} \quad (2.21)$$

Keterangan:

σ = tensor tegangan total (Pa)

ρ_m = kepadatan rata-rata masa batuan (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

$\frac{dv}{dt}$ = differensial kecepatan per waktu

Tambahan setres dan ketegangan yang berlangsung selama pergerakan dalam waktu tertentu diatur oleh hukum konstitutif elastis maupun elasto-plastik yang dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$\Delta\sigma' = H(\sigma', \dot{\epsilon}, \Delta t) \quad (2.22)$$

Keterangan:

σ' = transpos tensor tegangan total (Pa)

H = fungsi material

$\dot{\epsilon}$ = *infinitesimal strain-rate tensor*

t = waktu (detik).

Dimana σ' merupakan transpos tensor tegangan total, H merupakan fungsi material, $\dot{\epsilon}$ merupakan *infinitesimal strain-rate tensor*, Δt merupakan *time increment*. Persamaan (2.22) berlaku untuk regangan kecil. Pada *FLAC3D* digunakan formulasi regangan besar tetapi dapat dilakukan koreksi tegangan tensor untuk tegangan rotasi.

Teori *infinitesimal strain-rate tensor* merupakan pendekatan matematis untuk deformasi benda padat dan diasumsikan bahwa perpindahan partikel material jauh lebih kecil daripada dimensi *body* yang relevan. Sehingga geometri dan sifat konstitutif material berupa kekuatan dan kekakuan pada setiap titik ruang diasumsikan tidak berubah oleh deformasi. Batas-batas pada *infinitesimal strain-rate* ($\dot{\epsilon}$) dan *infinitesimal strain* (ϵ) dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla V + (\nabla V)^{tr}) \quad \varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^{tr}), \quad (2.23)$$

Keterangan :

$\dot{\varepsilon}$ = *infinitesimal strain-rate tensor*

V = kecepatan (m/s)

ε = *infinitesimal strain*

u = perpindahan (m)

tr = transpos dari tensor

Dalam *FLAC3D*, persamaan kontinum didiskritisasi di dalam ruang menggunakan teknik beda hingga (*finite difference*) orde satu dan pendekatan diskritisasi campuran khusus. Turunan waktu didiskritisasi menggunakan formula beda hingga eksplisit yang mengarah ke persamaan gerak dan diformulasikan sebagai berikut:

$$V_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = V_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{\Delta t}{m} \sum_i F_i^t \quad (2.24)$$

Keterangan :

V_i = kecepatan di-i

t = waktu (*sekon* atau detik)

m = massa

$\frac{\Delta t}{m}$ = differensial waktu per rata-rata (detik)

F_i^t = gaya di-i (N).

Dalam *FLAC3D*, dasar dari perhitungan dinamis eksplisit beralih menjadi penyelesaian persamaan gerak dan persamaan konstitutif *stress-strain* menggunakan waktu yang cukup kecil untuk memastikan stabilitas numerik. Persamaan di atas merupakan solusi terakhir yang dicapai menggunakan solusi

teredam ketika *body* atau model berada dalam kesetimbangan atau *steady-state flow (plastic flow)*, dan gaya yang tidak seimbang berubah menjadi nol.