

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Pendahuluan**

Dalam prospeksi tambang, objek terpenting yang harus diperhatikan adalah bukaan tambang. Dalam hal ini, rekayasa geoteknik untuk lereng bukaan tambang (kestabilan lereng) sangat berperan penting untuk permasalahan produksi, keekonomisan desain, keselamatan dan keamanan variabel-variabel sekitar tambang. Bukaan tambang ini ditetapkan saat setelah memodelkan dari bahan galian, memodelkan pit dengan rekomendasi kemiringan jenjang tunggal maupun seluruh yang optimum (d disesuaikan dengan standar berdasarkan peraturan perundangan yg ada). Selain itu, bukaan tambang ini perlu ditinjau secara berkala atau kontinyu kestabilan lerengnya dari mulai membuka lahan untuk produksi, saat produksi, maupun saat reklamasi dan penutupan tambang. Namun sebelum itu, penyelidikan terhadap lereng mengenai sifat fisik maupun mekanik batuan serta arah orientasi struktur geologi seperti kekar, diperlukan.

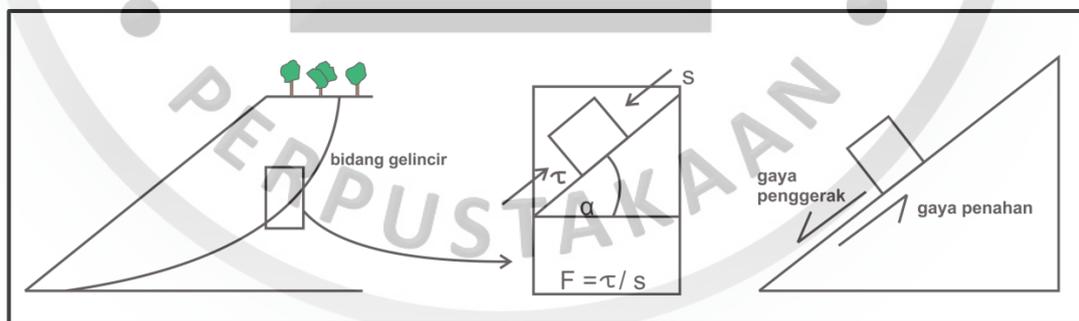
Permasalahan lereng produksi atau timbunan ini dapat dianalisis kestabilannya dengan meninjau dari sifat fisik, mekanik material penyusun lereng serta faktor lainnya seperti struktur yang ada di lereng tersebut yang dapat menyebabkan kemasifan atau kekompakan batuananya berkurang dikarekan terdapat celah-celah atau ruang kosong yang menyebabkan lereng mengalami pergerakan entah itu longsor, runtuh, nendatan, amblesan, rayapan,

aliran maupun gerakan kompleks atau kombinasi dari pergerakan-pergerakan yang ada.

### 3.2 Analisis Stabilitas Lereng

Untuk menganalisis kemungkinan pergerakan material penyusun lereng (stabilitas lereng), ada dikenal istilah faktor keamanan lereng (FK) atau *safety factor* (*SF*). Faktor keamanan ini dinyatakan dengan sebuah nilai, dimana nilai ini nantinya didapatkan dari hasil perbandingan antara seberapa besar nilai gaya yang menahan lereng dari gaya penggerak yang muncul dari sebagian atau seluruh material lereng itu sendiri yang bergerak ke bawah menuju bidang bebas. Nilai ini sangat diperlukan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng untuk mencegah pergerakan material lereng seperti longsor pada umumnya. Menurut Arif (2016) secara umum FK dapat dinyatakan dengan rumus :

$$FK = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya penggerak}} \dots\dots\dots (3.1)$$



Sumber : Lesmana, 2019.

**Gambar 3.1**  
**Hubungan Antara Gaya Penggerak dan Gaya Penahan**

Berdasarkan dari rumus umum perhitungan nilai faktor keamanan, ada faktor-faktor yang mempengaruhi nilai dari FK, yaitu :

### 3.2.1 Sifat Fisik

Sifat fisik batuan ini berguna sebagai data pendukung dari batuan yang akan mempengaruhi nilai kekuatan dari batuan tersebut serta pengklasifikasiannya apakah tergolong sebagai batuan yang masif (baik) atau tidak masif (buruk). Apabila jika hasil dari pengujian ini menunjukkan ketidakseragaman nilai maka distribusi kekuatan batuan tersebut tidak merata, sehingga dapat dikatakan kekuatan pada batuan yang diuji tersebut bervariasi atau heterogen. Selain itu sifat fisik ini juga merupakan sebagai salah satu input parameter untuk pemodelan lereng keseluruhan maupun tunggal. Yang termasuk sifat fisik massa batuan yaitu sebagai berikut :

1. Bobot asli batuan (*natural density*)

Bobot asli batuan ini merupakan nilai yang dihasilkan dari perbandingan antara berat batuan dengan volume batuan yang dinyatakan dalam satuan berat per volume (*Supandi, 2013*). Bobot asli batuan ini berkaitan dengan beban pada permukaan longsor. Jika semakin besar nilai bobot batuan maka beban pada lereng atau permukaan longsor akan semakin besar, karena beban ini akan memperbesar gaya penggerak pada lereng dan mempengaruhi nilai faktor keamanannya. Secara rumus dinyatakan sebagai berikut (*Arif, 2016*) :

$$\gamma_n = \frac{W_n}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (3.2)$$

Keterangan :

$\gamma_n$  = bobot asli batuan ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$W_n$  = berat asli (gr)

$W_w - W_s$  = volume sampel total ( $\text{cm}^3$ )

### 3.2.2 Sifat Mekanik

Data sifat mekanik batuan ini merupakan data yang sangat berpengaruh dalam menentukan kekuatan, karakteristik dan klasifikasi batuan itu sendiri, karena data ini didapatkan dari hasil pengujian batuan di laboratorium menggunakan peralatan pengujian. Hasil pengujian ini berdampak pada kekuatan batuan dan faktor keamanan yang dihasilkan nantinya dari pemodelan. Berikut di bawah ini hasil pengujian mekanik yang digunakan sebagai input parameter pemodelan :

#### 1. Kuat Geser

Kekuatan batuan yang berperan pada lereng untuk tetap aman dari pergerakan longsor atau kestabilan lereng adalah kuat geser batuan.

Kuat geser batuan ini berfungsi sebagai gaya yang melawan atau menahan penyebab kelongsoran yang ditimbulkan dari beban batuan itu sendiri atau sifat fisiknya. Nilai kuat geser ini dapat ditentukan oleh rumus atau pengujian laboratorium. Secara rumus dituliskan sebagai berikut (*Arif, 2016*):

$$\tau = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (3.3)$$

Keterangan :

$\tau$  = Kuat Geser (kg/cm<sup>2</sup>)

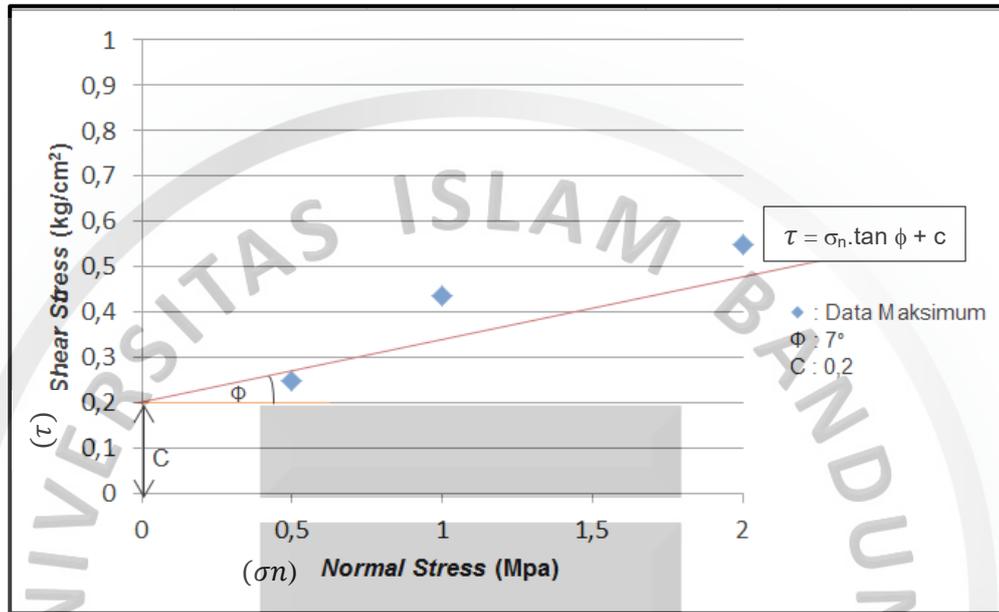
F = Pembebanan Geser (kg)

A = Luas Permukaan Bidang Geser (cm<sup>2</sup>)

Dari nilai kuat geser maksimum yang didapatkan dari pengujian maupun dari rumus di atas kemudian nilai kuat geser ini dapat dibandingkan terhadap tegangan normal masing-masing. Dari perbandingan tersebut maka akan didapatkan nilai parameter kohesi

dan sudut geser dalam. Maka secara rumus dapat dituliskan persamaan (Arif, 2016) :

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi + c \dots\dots\dots (3.4)$$



Sumber : Wijaksana, 2019.

**Gambar 3.2**  
**Grafik Hubungan Antara Kuat Geser, Kohesi dan Sudut Gesek Dalam**

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} \dots\dots\dots (3.5)$$

Keterangan :

$\sigma_n$  = Tegangan Normal (kg/cm<sup>2</sup>)

$\phi$  = Sudut Geser Dalam (°)

$c$  = Kohesi (N/m<sup>2</sup>)

$F_n$  = Beban Normal (kg)

Kohesi dan sudut gesek dalam dicari nilainya karena digunakan sebagai salah satu input parameter untuk pemodelan lereng geoteknik. Nilai kohesi dipakai agar mengetahui seberapa besar kekuatan tarik menarik antar partikel butiran batuan yang dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas yang mana berpengaruh terhadap kekuatan batuan pada

lereng. Sedangkan nilai sudut gesek dalam dipakai agar mengetahui seberapa besar sudut rekahan yang terbentuk jika batuan pada lereng yang diteliti dikenakan tegangan yang melebihi tegangan gesernya (Supandi, 2013). Semakin besar nilai keduanya maka kekuatan geser batuan akan semakin besar. seperti yang sudah disebutkan di atas bahwa semakin besar nilai kuat geser batuan maka gaya penahan semakin besar sehingga nilai faktor keamanan lereng akan semakin stabil.

## 2. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan nilai yang menunjukkan kemampuan batuan dalam memertahankan kondisi elastisitasnya. Nilai ini didapatkan dari kemiringan kurva tegangan-regangan pada bagian yang linier karena pada saat itulah contoh batuan mengalami deformasi elastik. Secara rumus nilai ini dapat ditulis dengan (Arif, 2016) :

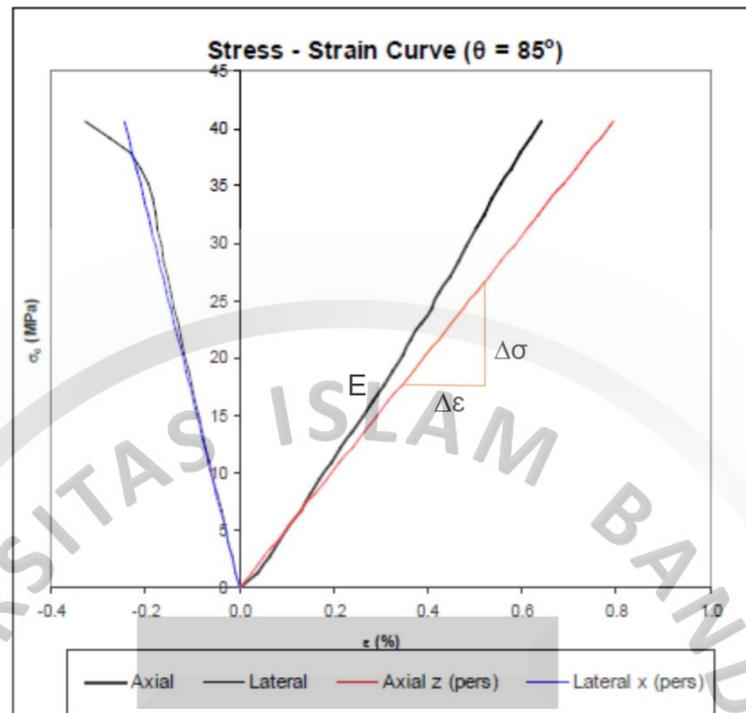
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a} \dots\dots\dots (3.6)$$

Keterangan :

E = Modulus Elastisitas (MPa)

$\Delta\sigma$  = Beda Tegangan (MPa)

$\Delta\varepsilon_a$  = Beda Regangan Aksial (%)



Sumber : Wijaksana, 2017.

**Gambar 3.3**  
**Grafik Tegangan-Regangan Serta Kurva Modulus Young**

### 3. Nisbah Poisson

Nilai yang dihasilkan dari perbandingan antara regangan lateral terhadap regangan aksial. Jika suatu batuan atau material diregangkan pada satu arah maka material tersebut cenderung mengkerut (jarang mnengembang) pada dua arah lainnya. Sebaliknya, jika suatu material ditekan, material tersebut akan mengembang (dan jarang mengkerut) pada dua arah lainnya. Kecenderungan material untuk mengkerut atau mengembang dalam arah tegak lurus terhadap pembebanan disebut efek Poisson. Secara rumus nisbah ini dituliskan sebagai berikut (Arif, 2016) :

$$\nu = - \frac{\epsilon_{\text{lateral}}}{\epsilon_{\text{aksial}}} \dots\dots\dots (3.7)$$

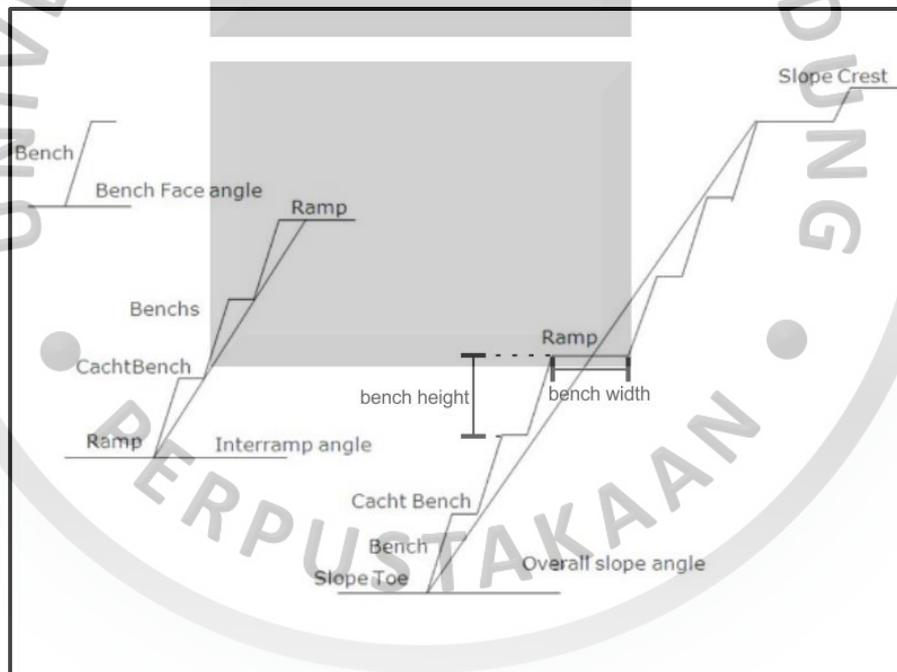
Keterangan :

$\nu$  = Nisbah Poisson

$\epsilon$  = Regangan (%)

### 3.2.3 Geometri Lereng

Geometri lereng berupa tinggi dan sudut kemiringan lereng sangat mempengaruhi dari kekuatan lereng yang dibuat. Karena permukaan bumi yang merata sebagai akibat gaya gravitasi untuk mempertahankan keseimbangan, jika diubah bentuknya dan menjadi tidak stabil, maka permukaan yang diubah tersebut akan mencari bidang bebas (pergerakan tanah/longsor) agar menjadi seimbang kembali. Sehingga dalam membuat lereng diharuskan memiliki geometri yang sesuai dan aman akan terjadinya longsor, tidak terlalu tinggi, tidak terlalu curam, namun tidak terlalu landai dan pendek dengan unsur-unsur yang lengkap seperti contoh geometri pada Gambar 3.4 dibawah ini.



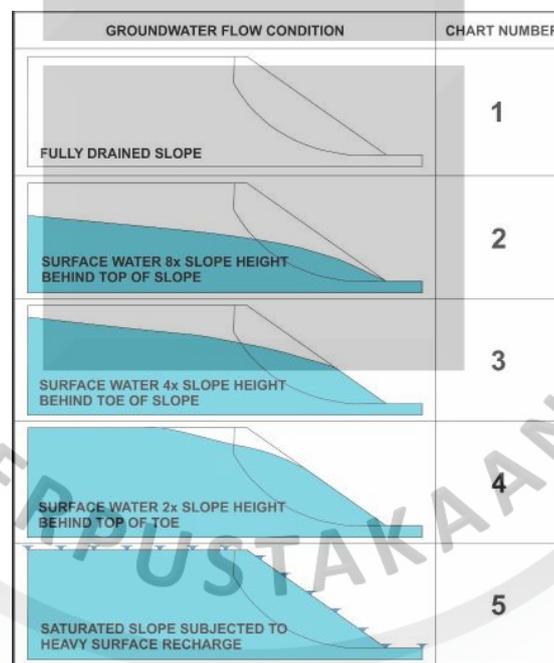
Sumber : Azhary, 2013.

**Gambar 3.4**  
**Unsur-unsur Geometri Lereng**

### 3.2.4 Keadaan Muka Air Tanah Dalam Batuan

Pada prinsipnya jika gaya penggerak lebih besar dibandingkan dengan gaya penahan maka kemungkinan longsor akan terjadi. Besarnya gaya penggerak ini terdapat banyak faktor yang mempengaruhinya salah satunya

adalah kejenuhan batuan akibat keadaan muka air tanah dalam batumannya. Kejenuhan batuan pada lereng ini dapat diasumsikan levelnya seperti yang dicetuskan oleh Hoek & Bray (1981) (lihat Gambar 3.5). Jika semakin jenuh batuan karena adanya muka air tanah, maka semakin berat pula beban batuan tersebut, maka akan menyebabkan lereng bergerak ke bawah karena beban yang melebihi batas, sehingga gaya penggerak akan menjadi lebih besar dan akan berdampak pada nilai FK yang dihasilkan. Selain itu air juga dapat mengubah berat jenis atau densitas batuan, melapukan batuan tersebut sehingga dapat melemahkan batuan bahkan terjadi erosi. Oleh karena itu keadaan muka air tanah ini perlu diperhatikan dalam pemodelan.



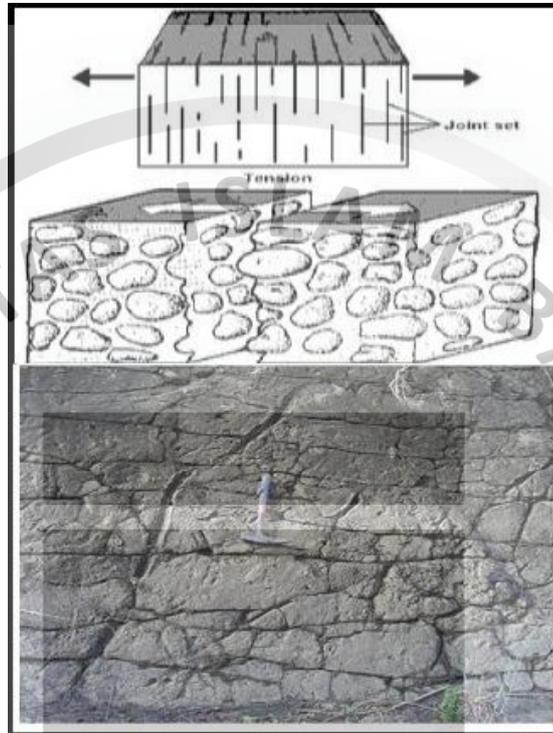
Sumber : Hoek & Bray, 1981

**Gambar 3.5**  
**Kondisi Air Tanah pada Lereng**

### 3.2.5 Bidang Diskontinuitas Dalam Batuan

Keterdapatn bidang diskontinuitas dalam batuan membuat batuan menjadi lemah karena terdapat rongga-rongga yang membuat kekuatan batuan menjadi lemah. Yaitu jika didapati arah umum orientasi (berupa *strike* dan *dip*)

dari bidang diskontinuitas ini berpotongan atau berdekatan dengan arah orientasi lereng maka kemungkinan besar nilai FK yang dihasilkan akan kecil atau kemungkinan longsor akan besar.



Sumber : Azhary, 2013.

**Gambar 3.6**  
**Contoh Struktur Kekar pada Batuan**

### 3.2.6 Faktor Kegempaan

Gempa merupakan fenomena alam yang terjadi sebagai akibat dari pergerakan lempeng-lempeng di bumi. Pergerakan inilah yang dapat menghasilkan gelombang getaran yang sangat dahsyat kepenjuru permukaan bumi disekitarnya yang dapat menyebabkan permukaan lainnya bergerak. Pergerakan dahsyat ini jika terjadi disekitar lereng tambang tentu akan melemahkan kuat tarik antar partikel massa batuan penyusun lereng dan bahkan dapat menyebabkan adanya retakan baru dan mungkin menjadi longsor. Disaat lemah tersebut nilai FK akan menurun. Sehingga dalam memodelkan geometri lereng juga harus diperhatikan juga nilai kegempaan terbesar yang mungkin

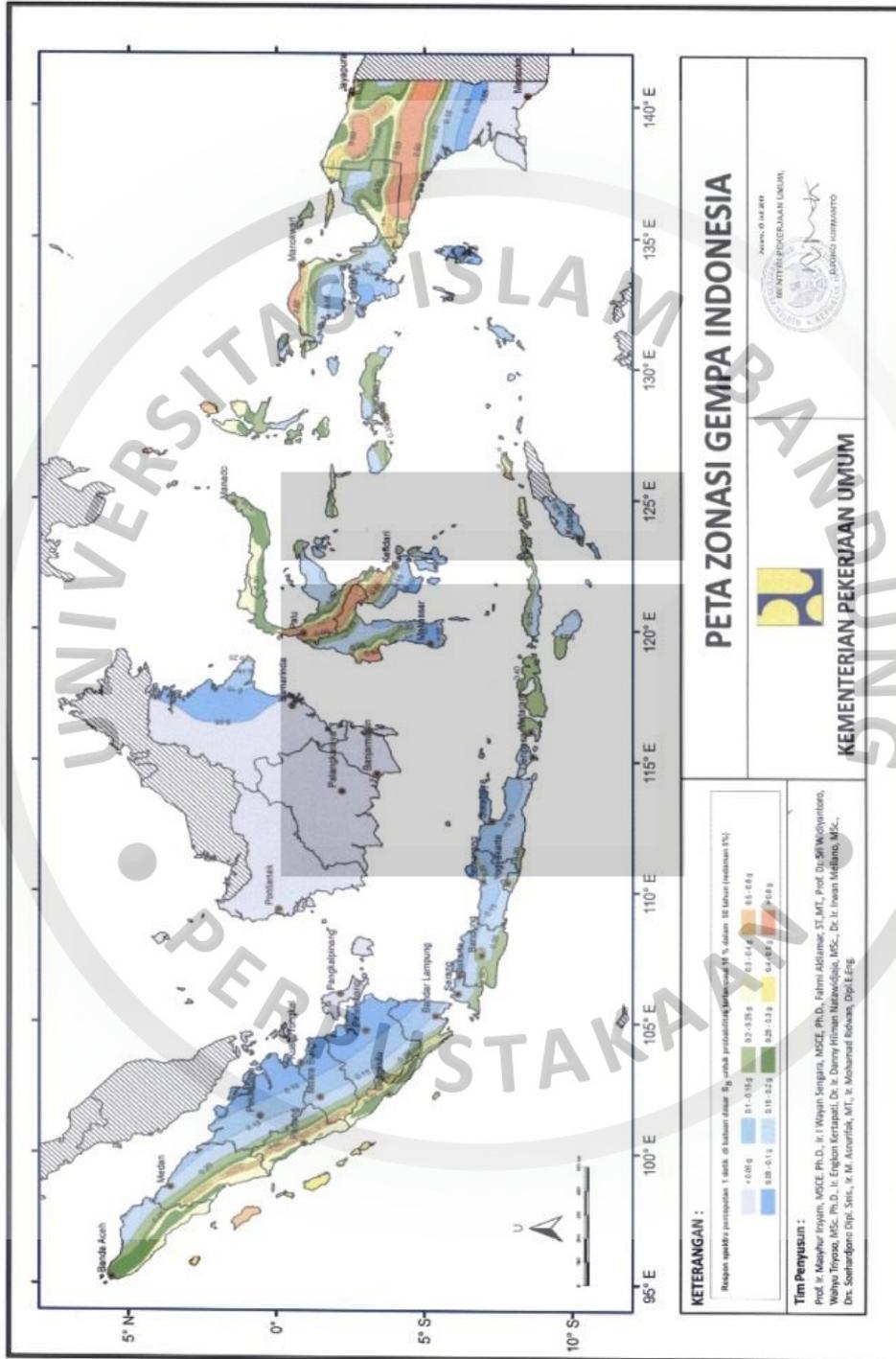
terjadi di wilayah penelitian agar saat terjadi gempa (lihat Gambar 3.x) nilai FK tetap berada dinilai standar keamanan.

Faktor yang dapat melemahkan lereng selain gempa alamiah yang didapatkan dari Peta Zonasi Gempa Indonesia (oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, KPUPR) adalah getaran dari alat berat (serta bebannya) dan dari pengambilan data proses kegiatan peledakan pada tambang tersebut. Pengambilan data tersebut dilakukan menggunakan alat bantu berupa pencatat kecepatan rambat gelombang yang diukur dari radius tertentu hingga mendapatkan nilai dari proses kegiatan peledakan (*ground vibration*). Biasanya hasil nilainya dapat lebih besar atau lebih kecil, tergantung target produksi dimasing-masing perusahaan. Jika sudah didapatkan nilainya, nilai faktor kegempaan tersebut dibandingkan nilainya dengan nilai faktor kegempaan yang dikeluarkan oleh KPUPR untuk mengetahui mana yang lebih besar nilainya. Nilai yang terpilih akan dijadikan sebagai input parameter pemodelan optimasi. Karena untuk rekomendasi optimasi lereng harus memodelkan lereng dengan keadaan paling kritis agar mengetahui nilai stabilitas lereng pada saat yang paling kritis.



Sumber : anonim, 2019.

**Gambar 3.7**  
**Contoh Alat *Ground Vibration***



Sumber : kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017.

Gambar 3.8  
 Peta Zonasi Gempa Indonesia

### 3.5 Longsoran Busur

Batuan atau tanah akan bergerak ke bidang bebas yang ada disekitarnya jika material tersebut tidak stabil pada posisi awalnya sehingga, material tersebut (akibat adanya pengaruh gaya gravitasi juga) mencari posisi yang baru untuk mendapatkan keseimbangan yang baru di bidang bebas yang ada di bawahnya. Pergerakan ini tergantung dengan perilaku batuan atau jenis tanah itu sendiri. Pada jenis longsoran busur, longsoran ini terjadi karena pada materialnya terdapat banyak struktur-struktur minor seperti kekar serta kondisi batuan maupun tanah yang terlapukkan. Selain itu, terkait jenis batuan, longsoran ini terjadi pada jenis material yang memiliki atau terdiri dari fragmen-fragmen berukuran sangat kecil dibandingkan dengan ukuran lerengnya seperti batuan atau tanah bermaterial pasir, lanau dan sebagainya. Sehingga tidak hanya di lereng produksi, di lereng timbunanpun, longsoran ini sering terjadi. Untuk bentuk longsorannya sendiri, sesuai dengan penamaannya yaitu menyerupai busur dengan arah diskontinu acak.

Mengacu pada karakteristik tersebut, jenis longsoran ini berlaku atau kemungkinan akan terjadi pada batuan samping dari lereng B dan D yaitu batulanau, serta batuan peralihan antara lanau dan gamping yang terdiri dari fragmen-fragmen kecil.

Untuk analisis sendiri, analisis mengenai kemungkinan terjadinya longsoran ini, dapat dianalisis dengan metode irisan yang dicetuskan Bishop atau metode Janbu.

#### 3.5.1 Analisis Longsoran Busur Menggunakan Metode Bishop

Pada prinsipnya, metode ini menggunakan kesetimbangan gaya dalam arah vertikal dan kesetimbangan momen pada pusat lingkaran bidang gelincir

serta gaya geser antar irisan diasumsikan tidak bernilai atau nol (0). Untuk mendapatkan nilai FK, metode ini hanya perlu menghitung menggunakan rumus-rumus dengan data-data yang telah diketahui sebelumnya, tidak seperti sebelumnya yang harus menggunakan diagram. FK dinyatakan dengan (Arif, 2016) :

$$FK = \frac{\sum X / (1 + Y / FS)}{\sum Z + Q} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$X = [ c + ( \gamma_r \cdot h - \gamma_w \cdot h_w ) \tan \phi ] (\Delta x / \cos \psi_b) \dots\dots\dots (3.9)$$

$$Y = \tan \psi_b \cdot \tan \phi \dots\dots\dots (3.10)$$

$$Z = \gamma_r \cdot h \cdot \Delta x \cdot \sin \psi_b \dots\dots\dots (3.11)$$

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot Z^2 (\alpha/R) \dots\dots\dots (3.12)$$

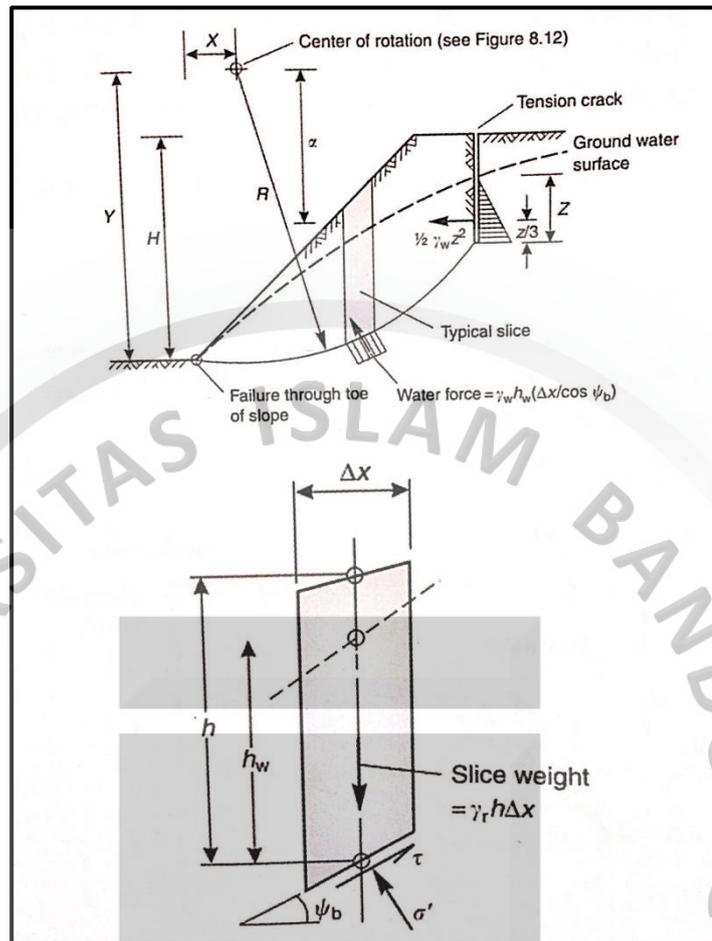
Catatan : sudut  $\psi_b$  negatif ketika *sliding uphill*.

Kondisi berikut harus terdapat dalam setiap bagian rumus di bawah ini

(Arif, 2016) :

$$\sigma' = \frac{\gamma_r \cdot h - \gamma_w \cdot h_w - c (\tan \psi_b / FS)}{1 + Y / FS} \dots\dots\dots (3.13)$$

$$\cos \psi_b (1 + Y / FS) > 0,2 \dots\dots\dots (3.14)$$



Sumber : anonim, 2018.

**Gambar 3.9**  
**Metode Bishop (Hoek dan Bray, 1981)**

Keterangan :

FK = Faktor Keamanan

H = tinggi lereng (m)

z = kedalaman rekahan tarik (m)

b = jarak antara kepala lereng dan rekahan tarik (m)

$\psi_s$  = kemiringan lereng yang berada di atas kepala lereng ( $^\circ$ )

$\gamma_w$  = berat jenis air ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$z_w$  = kedalaman air dalam rekahan (m)

$h_w$  = tinggi air (m)

$\psi_b$  = kemiringan berm ( $^\circ$ )

$\gamma_r$  = berat jenis batuan ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$\sigma'$  = tegangan pada slice n ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

Yang dimaksud dengan rumus 3.8-3.12 adalah rumus ini digunakan untuk memastikan apabila nilai dari tegangan normal efektif pada dasar setiap bidang irisan selalu positif. Namun harus dilakukan analisis kembali jika tidak mendapatkan nilai positif dengan menambahkan variabel pengaruh tegangan akibat rekahan dan/atau kondisi air tanah pada perhitungan. Namun jika tidak terpenuhi juga, metode ini tidak cocok untuk perhitungan tersebut dan harus dianalisis lebih detail.

Metode Bishop juga tidak akan berlaku jika rumus nomor 3.13-3.14 tidak terpenuhi saat sudah dipastikan bahwa analisis tidak akan dibatalkan oleh kondisi-kondisi yang kadang terjadi di kaki lereng. Selain itu jika tidak terpenuhi juga dengan tambahan mengubah dimensi irisan jika kondisi-kondisi kaki lereng tidak terpenuhi. Ssecara gambar, dapat dilihat di bawah ini.

### 3.5.2 Analisis Longsoran Busur Menggunakan Metode Janbu

Untuk longsoran berjenis busur atau dalam arti kata bidang gelincir nya terkategori tidak sirkular, maka dapat dianalisis menggunakan metode yang dicetuskan oleh Janbu ini. Untuk rumus nilai faktor keamanan, metode ini memperhitungkan adanya kegempaan, sehingga secara rumus dituliskan sebagai berikut (Arif, 2016) :

$$F_g = a/g \dots\dots\dots (3.15)$$

Sehingga untuk FK nya :

$$FK = \frac{f_o \cdot \sum X / (1 + Y / FS)}{\sum Z + Q} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$f_o = 1 + K [(d/L) - (1.4 (d/L)^2)] \dots\dots\dots (3.17)$$



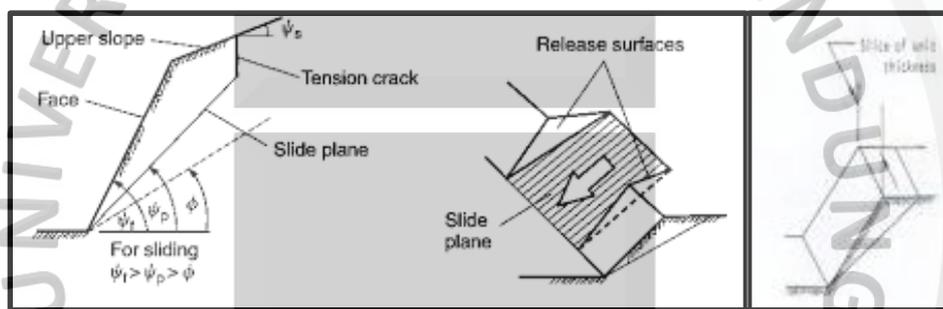
Namun demikian, metode ini hanya dapat diterapkan pada bidang gelincir yang cenderung landai, dimana nilai sudut gesek dalamnya biasanya  $>30^\circ$ , dimana jika diterapkan pada kondisi tersebut FK yang dihasilkan mendekati logis. Dan tidak disarankan diaplikasikan ke lereng yang curam dengan nilai sudut gesek dalam rendah atau  $<30^\circ$ .

### 3.6 Longsoran Bidang

Berbeda dengan longsoran busur, longsoran bidang ini terjadi pada lereng yang materialnya merupakan material masif atau keras sehingga jika terjadi longsor, material yang jatuh akan memiliki volume yang lebih besar dibandingkan dengan longsoran busur maupun jenis lainnya. Biasanya terjadi karena terdapat banyaknya struktur-struktur geologi seperti kekar, lipatan ataupun sesar, dimana patahan atau kekar itu menjadi bidang luncur dari longsoran tersebut. Namun demikian, jika kedudukan antara struktur geologi / bidang gelincir dengan lerengnya tidak sejajar (max 20 derajat) maka kemungkinan longsor tidak akan terjadi. Selain itu, hal yang dapat menyebabkan longsoran bidang adalah :

1. Jejak bagian bawah bidang lemah yang menjadi bidang gelincir harus muncul di muka lereng. Dengan kata lain, kemiringan bidang gelincir lebih kecil dibandingkan dengan dengan kemiringan lereng itu sendiri ( $\psi_p < \psi_f$ ).
2. Kemiringan gelincir lebih besar daripada sudut gesek dalamnya ( $\psi_p > \phi$ ).
3. Harus ada bidang *release* yang menjadi pembatas di kanan dan kiri blok yang menggelincir.

Penyebab-penyebab longsor tersebut harus terpenuhi semuanya dan selanjutnya dapat dikatakan sebagai longsor bidang pada bidang gelincir tunggal menurut Wyllie dan Mah (2004). Untuk melakukan pengujian analisis lereng dalam bentuk dua dimensi, ketebalaan suatu lereng arahnya harus tegak lurus dengan garis muka lereng karena hal itu akan sangat dipertimbangkan saat analisis. Dimana yang nantinya bidang gelincir yang dihasilkan karena longsor ini dapat dikatakan sebagai garis kemiringan dan hasil longsorannya bisa dikatakan sebagai suatu luasan pada penampang vertikal yang tegak lurus dengan *strike* lereng.



Sumber : Suedi, Evansharsal, dkk, 2019.

**Gambar 3.13**  
**Metode Bishop (1955)**

Untuk menganalisis yang lebih jauh, perbedaan longsor bidang dengan longsor yang lainnya adalah jika lereng memiliki rekahan tarik atau struktur geologi harus diperhitungkan mengenai dimanakah posisinya. Dalam menganalisis harus mempertimbangkan atau mengasumsikan beberapa asumsi seperti berikut ini :

- a. Kedudukan berupa *strike* antara rekahan tarik itu sendiri dengan lereng harus sejajar.
- b. Rekahan tarik tersebut harus di bidang dan posisinya vertikal serta terdapat air sedalam  $Z_w$ . Air yang terkandung ini harus membasahi bidang gelincirnya hingga terlihat jejaknya pada permukaan lereng.

- c. Berat blok longsor yang dilambangkan dengan Gaya  $W$ , gaya angkat oleh air yang dilambangkan dengan  $U$  dan gaya tekan air didalam rekahan tarik yang dilambangkan oleh  $V$ , seluruh nya harus bekerja di titik pusat blok longsor sehingga dari pernyataan tersebut terdapat asumsi bahwa momen akibat rotasi tidak ada.

Untuk menghitung kuat geser pada lereng digunakan rumus berikut ini (Arif, 2016) :

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \dots \dots \dots (3.18)$$

Dimana,

$\tau$  : kuat geser ( $N/m^2$ )

$c$  : kohesi ( $N/m^2$ )

$\sigma$  : tekanan normal (MPa)

$\phi$  : sudut gesek dalam ( $^\circ$ )

Untuk menghitung FK, analisis ini menggunakan rumus yang hampir sama dengan yang umum yaitu (Arif, 2016) :

$$FK = \frac{c \cdot A + W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \tan \phi \dots \dots \dots (3.19)$$

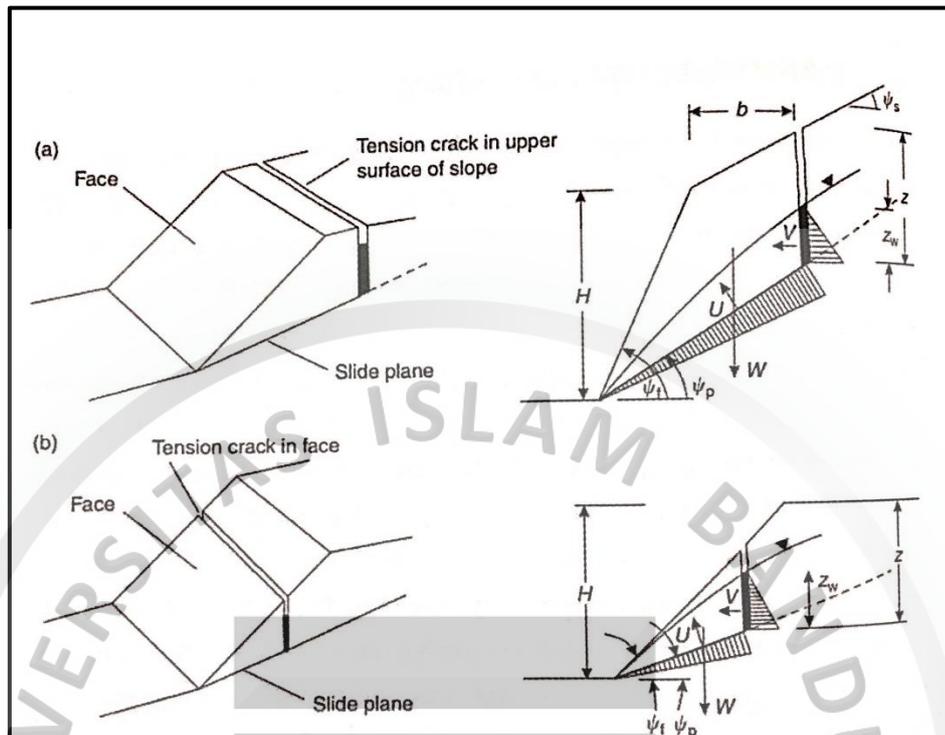
Dimana,

$$A = (H + b \cdot \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p \dots \dots \dots (3.19)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w (H + b \cdot \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p \dots \dots \dots (3.20)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w^2 \dots \dots \dots (3.21)$$

$$W = \gamma_r \cdot [(1 - \cot \psi_f \tan \psi_p)(bH + \frac{1}{2} H^2 \cot \psi_f) + \frac{1}{2} b^2 (\tan \psi_s - \tan \psi_p)] \dots \dots \dots (3.22)$$



Sumber : Arif, 2016.

**Gambar 3.14**  
**Posisi Rekahan Tarik Pada Lereng Batuan (Hoek Dan Bray, 1981)**

Keterangan :

$H$  = tinggi lereng (m)

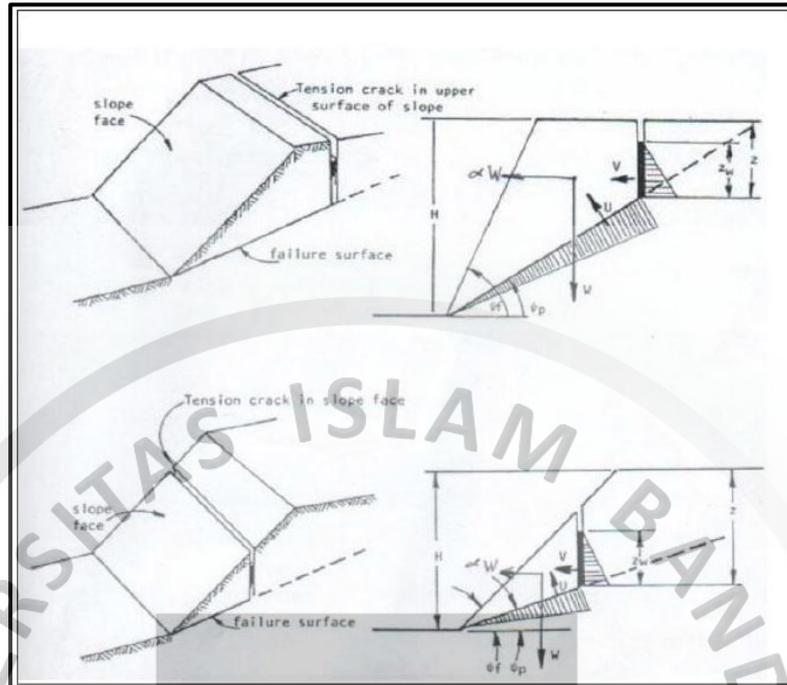
$z$  = kedalaman rekahan tarik (m)

$b$  = jarak antara kepala lereng dan rekahan tarik (cm)

$\psi_s$  = kemiringan lereng yang berada diatas kepala lereng ( $^\circ$ )

$\gamma_w$  = berat jenis air ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$z_w$  = kedalaman air dalam rekahan (m)



Sumber : Hidayat, Taufik, 2018.

**Gambar 3.15**  
**Posisi Rekahan Tarik Pada Lereng**

Namun adapun modifikasi rumus dari rumus yang di atas dengan menyatakan dalam kondisi atau keadaan dimana jika perhitungan di atas menginginkan adanya perbandingan antara geometri lereng, kedalaman air dalam rekahan tarik, dan pengaruh kuat geser yang berbeda adalah sebagai berikut (Arif, 2016) :

$$FK = \frac{(2C/\gamma_h)P + (Q \cot \psi_p - R(P+S)) \tan \phi}{Q + RS \cos \psi_p} \dots \dots \dots (3.23)$$

Dimana,

$$P = (1-Z/H) \operatorname{cosec} \psi_p \dots \dots \dots (3.24)$$

Untuk rekahan tarik dibelakang *crest* menggunakan :

$$Q = [(1-Z/H)^2] \cot \psi_p - \cot \psi_f \sin \psi_p \dots \dots \dots (3.25)$$

Untuk rekahan tarik di muka lereng menggunakan :

$$Q = [(1-Z/H)^2] \cos \psi_p (\cot \psi_p \tan \psi_f - 1) \dots \dots \dots (3.26)$$

$$R = \frac{\gamma_r \cdot ZW \cdot Z}{\gamma \cdot z \cdot H} \dots\dots\dots (3.27)$$

$$\frac{z \cdot z}{z \cdot H} \sin \dots\dots\dots (3.28)$$

Untuk memperhitungkan variabel adanya gempa dilokasi lereng atau lokasi tersebut sering mengalami gempa maka percepatan yang dari hasil gempa tersebut dapat dimodelkan menjadi statis  $\alpha W$ , sehingga secara rumus dapat dinyatakan sebagai berikut (Arief, 2016) :

$$FK = \frac{c \cdot A + \{W (\cos \psi_p - \alpha \sin \psi_p) - U - V \sin \psi_p\} \tan \phi}{W (\sin \psi_p + \alpha \cos \psi_p) + V \cos \psi_p} \dots\dots\dots (3.29)$$

Keterangan :

FK = faktor keamanan

A = luas bidang kontak (m)

U = gaya angkat oleh air (t/m)

V = gaya tekan air dalam rekahan (t/m)

W = berat blok yang longsor (t/m)

H = tinggi air (m)

c = kohesi (MPa atau t/m<sup>2</sup>)

$\psi_f$  = sudut kemiringan lereng (°)

$\psi_p$  = sudut kemiringan bidang lemah (°)

z = kedalaman rekahan tarik (m)

$\gamma_w$  = berat jenis air (t/m<sup>3</sup>), 1 t/m<sup>3</sup>

$z_w$  = kedalaman air dalam rekahan (m)

$\gamma_r$  = berat jenis batuan (t/m<sup>3</sup>)

$\alpha$  = faktor gempa

### 3.4 Analisis Menggunakan Klasifikasi Massa Batuan

Sebelum menganalisis lebih lanjut mengenai kelongsoran, parameter mengenai klasifikasi massa batuan diperlukan. Pasalnya, klasifikasi massa batuan yang terdiri dari beberapa parameter ini cocok untuk mewakili karakteristik batuan, salah satunya seperti sifat-sifat bidang lemah (struktur geologi) dan derajat pelapukan massa batuan. Penting untuk dikaji, karena pada banyak kasus, kelongsoran pada lereng terjadi selain karena terlalu jenuh karena air tanah atau hujan, adanya bidang diskontinu pada muka lereng yang semakin lama akan berkembang, menyebabkan pelemahan massa batuan yang lambat laun menjadi runtuh atau longsor.

#### 3.4.1 Penentuan Nilai *Rock Quality Designation* (RQD)

Penentuan nilai RQD ini diambil dari perhitungan presentase sampel hasil pengeboran (inti) yang terambil memiliki panjang 10cm atau lebih. Adapun syarat sampel atau inti yang diukur harus kompak atau tidak lunak. Diameter inti optimal untuk pengukuran yaitu 47,5mm. Secara rumus dituliskan sebagai berikut (Deere, 1964) :

$$RQD = \frac{\text{panjang potongan inti } >10 \text{ cm}}{\text{panjang total inti}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.30)$$

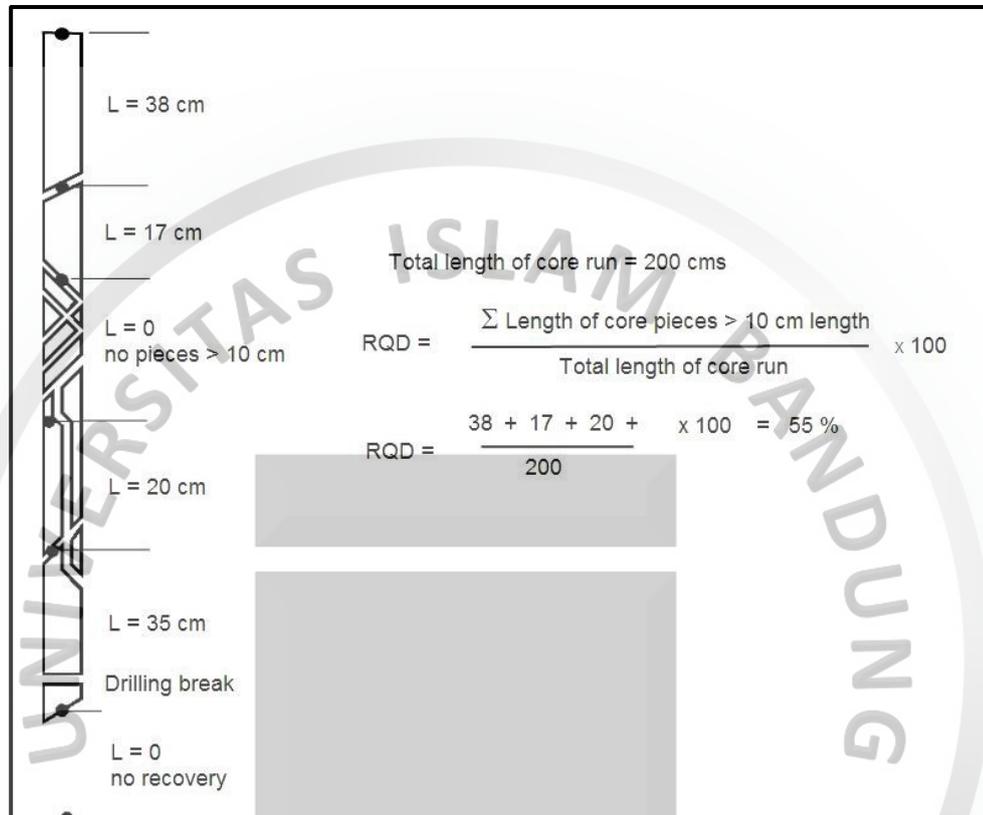
Setelah dilakukan perhitungan seperti contoh di atas, nilai yang didapatkan diklasifikasikan dengan meninjau kelas massa batuan berdasarkan nilai RQD yang didapatkan. berikut dibawah ini merupakan tabel klasifikasi kualitas massa batuan :

**Tabel 3.1**  
**Kelas Massa Batuan**

RQD (%)	Kualitas Massa Batuan
<25	Sangat jelek
25-50	Jelek
50-75	Sedang

RQD (%)	Kualitas Massa Batuan
75-90	Baik
90-100	Sangat baik

Sumber : Azhary, 2013.



Sumber : azhary, 2013.

**Gambar 3.16**  
Rumus dan Contoh perhitungan RQD

#### 3.4.1 Klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR)

Pengkelasan ini yang dicetuskan oleh Bieniawski (1979), didasari oleh nilai hasil pengujian sifat mekanik batuan seperti UCS, pendeskripsian batuan dari hasil pemboran atau *coring* (*Rock Quality Designation*, RQD), spasi-spasi bidang diskontinu beserta kondisinya dan kondisi air tanah. Setelah pengkelasan, bobot yang didapatkan dapat dikalkulasikan. Secara lengkap dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 3.2  
Rock Mass Rating (Bieniawski, 1979)

Parameter		Selang Pembobotan							
1	Kuat tekan	PLI (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Gunakan nilai UCS		
	Batuan utuh	UCS (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Bobot			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Bobot		20	17	13	8	3		
3	Jarak kekar		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m		
	Bobot		20	15	10	8	5		
4	Kondisi kekar		Permukaan sangat kasar, tak menerus, tak terpisah, dinding tak lapuk	Permukaan agak kasar pemisahan <1mm, dinding agak lapuk	Permukaan agak kasar pemisahan <1mm, dinding sangat lapuk	Permukaan slickensided atau gouge <5mm, pemisahan 1-5mm, menerus	Gouge lunak >5mm atau pemisahan >5mm, menerus		
	Bobot		30	25	20	10	0		
5	Air tanah	Aliran per 10m panjang singkapan (Lt/men)	Kosong	<10	10-25	25-125	>125		
		Tekanan air/tegangan utama major	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Kondisi umum	Kering	Lembab	Basah	Menetes	Mengalir		
	Bobot		15	10	7	4	0		

Sumber : Arief, 2016.

### 3.4.2 Klasifikasi Slope Mass Rating (SMR)

Klasifikasi ini diperuntukan untuk mengklasifikasikan pengatur orientasi kekar. Klasifikasi ini berguna untuk mengetahui tipe-tipe runtuh yang mungkin terjadi pada lereng serta pengantisipasi dalam hal-hal untuk perbaikan lereng. Secara rumus dapat dituliskan sebagai berikut (Romana, 1980) :

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \dots \dots \dots (3.31)$$

F pada rumus merupakan suatu faktor koreksi terhadap kondisi kekar, dimana :

1. F1 tergantung pada paralelisme antara kekar dan kemiringan muka lereng (*strike*).
2. F2 berhubungan dengan sudut *dip* kekar pada bidang kelongsoran.

3. F3 menunjukkan hubungan antara kemiringan lereng dan kemiringan kekar.
4. F4 bergantung pada metode penggalian lerengnya, apakah lereng alamiah, digali dengan peledakan persplit, peledakan atau penggalian mekanis.

Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

**Tabel 3.3**  
**Bobot Pengatur Untuk Kekar**

Case		Very	Favourable	Fair	Unfavourable	Very
		Favourable				Unfavourable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	5° - 10°	< 5°
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
P/T	$F1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s )^2$	0.15	0.4	0.7	0.85	1
P	$ \beta_j $	< 20°	20°-30°	30°-35°	35°-40°	> 45°
P	$F2 = \tan 2 \beta_j$	0.15	0.4	0.7	0.85	1
T	F2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (10°)	< -10°
T	$\beta_j - \beta_s$	< 110°	110° - 120°	> 120°	-	-
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

Sumber : Romana, 1985

### 3.8 Uji Normalitas

Sebelum melakukan analisis kelongsoran lereng, pengujian terhadap data yang akan dijadikan input parameter perlu dilakukan, agar mengetahui jenis sebaran atau distribusi datanya apakah normal atau tidak (homogen atau tidak) serta nilai rata-rata dan standar deviasinya. Untuk menguji sebaran distribusi data ini dapat dilakukan dengan metode-metode sebagai berikut :

1. Metode Saphiro Wilk

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

Data yang boleh digunakan dalam pengujian ini harus memiliki syarat seperti berikut ini :

- a. Data berskala interval atau ratio (kuantitatif).
- b. Data tunggal / belum dikelompokkan pada tabel distribusi frekuensi.
- c. Data dari sampel random.
- d. Nilai signifikansi  $>0,05$  (5%)

## 2. Metode Liliefors

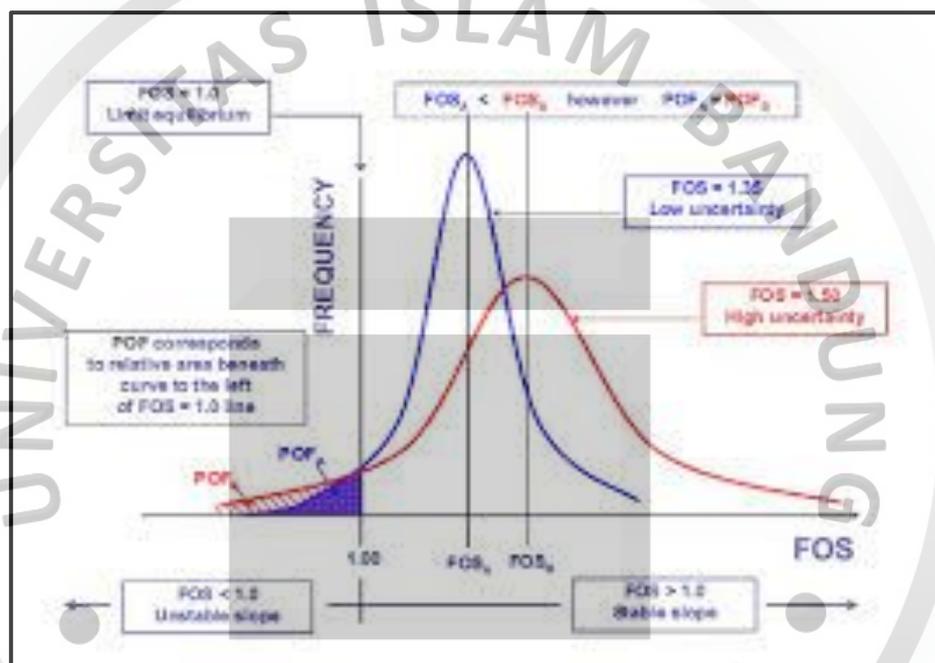
Metode Liliefors ini sama halnya dengan metode Saphiro Wilk, dan merupakan adaptasi dan pengembangan dari uji Kolmogorov Smirnov. Metode ini menggunakan data dasar yang belum diolah dalam tabel distribusi frekuensi. Agar dapat menghitung luasan kurva normalnya, data harus ditransformasikan dahulu kedalam nilai Z. Luasan kurva normal inilah yang menjadi probabilitas kumulatif normal. Data yang boleh digunakan dalam pengujian ini harus memiliki syarat seperti berikut ini :

- a. Data berskala interval atau ratio (kuantitatif).
- b. Data tunggal/belum dikelompokkan pada tabel distribusi frekuensi.
- c. Dapat untuk n besar maupun kecil.
- d. Nilai signifikansi  $>0,05$  (5%)

### 3.9 Metode Probabilitas

Metode ini merupakan salah satu alternatif dalam memodelkan dan menentukan keamanan suatu lereng yang dinyatakan dengan probabilitas. Metode ini memperhitungkan segala variabilitas yang ada seperti stratigrafi, karakteristik tanah dan batuan dan bahkan metode analisis yang digunakan. Sedikit berbeda dengan faktor keamanan atau FK yang menyatakan nilai

keamanan suatu lereng berdasarkan hasil rasio gaya penahan dan penggerak, probabilitas ini dalam perhitungannya menginput parameter tadi kedalamnya sebagai variabel acak yang berdistribusi probabilitas. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.8 yang menyatakan bahwa PK atau probabilitas kelongsoran dihitung sebagai rasio antara area pada distribusi  $FK < 1$  dibagi dengan total area pada kurva distribusi PK.



Sumber : Azizi, 2012.

**Gambar 3.8**  
**Kurva Probabilitas Kelongsoran**

Didalam keputusan menteri terdapat ketentuan nilai PK standar atau ideal yang harus didapatkan dalam menganalisis atau mendesain lereng yang baik seperti di bawah ini :

**Tabel 3.4**  
**Nilai Faktor Keamanan Dan Probabilitas Kelongsoran Tambang**  
**Menurut KEPMEN 1827 K/30/MEM/2018**

Jenis Lereng	Keparahan Longsor	Kriteria Yang Dapat Diterima		
		FK Statis (Min)	FK Dinamis (Min)	PK (FK $\leq$ 1) (Maks)
Lereng Tunggal	Rendah S/D Tinggi	1,1	Tidak Ada	25-50%
Inter-Ramp (Multi Jenjang)	Rendah	1,15-1,2	1	25%
	Menengah	1,2-1,3	1	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

Sumber : KEPMEN 1827 (2018).

Untuk mendapatkan nilai PK seperti di atas dapat dilakukan menggunakan perhitungan-perhitungan. Perhitungan ini dilakukan melalui metode-metode yang dipercaya hasilnya mendekati dengan hasil yang sebenarnya. Metode yang sering digunakan adalah metode kesetimbangan batas melalui simulasi Monte Carlo. Namun demikian, metode numerik seperti metode elemen hingga juga tidak kalah dipakai sebagai pendekatan, karena cocoknya dengan permasalahan yang kompleks mengenai lereng, metode ini menjadi salah satu pesaing metode yang digunakan dalam memperhitungkan nilai PK. Berikut penjabaran cara perhitungannya :

### 3.9.1 Metode Monte Carlo

Metode ini merupakan salah satu metode yang memperhitungkan PK dengan cara menggabungkan suatu varietas distribusi probabilitas yang cukup besar tanpa banyak penafsiran serta memiliki kemampuan untuk memodelkan korelasi diantara variabel dengan mudah (Hammah dan Yacoub, 2009). Karena nilai FK merupakan nilai perbandingan yang parameter nya bersifat tak tentu

maka kecocokan ini dimanfaatkan untuk memastikan dari nilai-nilai FK yang didapat menjadi lebih pasti lagi dengan probabilitas kelongsoran.

Untuk itu hal-hal yang harus dilakukan untuk mendapatkan nilai PK adalah sebagai berikut :

- a. Estimasi distribusi probabilitas pada setiap variabel acak input parameter kestabilan lereng seperti log normal atau normal saja.
- b. Nilai acak yang sudah dimasukkan untuk setiap parameternya di *generate*. Jika nilai nya seragam, gunakan interval 0 dan 1, dan nilai ini kalikanlah dengan nilai *range* maksimum atau minimumnya dari tiap parameter yang ada. Untuk setiap fungsi yang lain diperlukan distribusi kumulatif pada setiap variabel acaknya.
- c. Hitunglah gaya penahan dan gaya penggerakannya. Lalu, setelahnya hitunglah dominasi kemunculan nilai diantara keduanya, berapa kali (M) gaya penahan lebih besar dibandingkan dengan gaya penggerakannya.
- d. Lakukan terus langkah ketiga diatas dengan  $N > 100$ , artinya lebih dari 100 kali. Setelah itu nilai PK dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$PK = \frac{N-M}{N} \dots\dots\dots (3.32)$$

Keterangan :

PK = Probabilitas kelongsoran

N = banyaknya data

M = dominasi kemunculan

- e. Setelah selesai mendapatkan nilai FK yang bervariasi, buatlah distribusi frekuensi relatif dari distribusi empirik nilai FK tersebut.

- f. Membuat histogram dari data frekuensi relatif.
- g. Lakukan pendekatan dan pengansumsian dengan fungsi kerapatan probabilitas atau distribusi teoritik yang sesuai.

Untuk menghasilkan nilai probabilitas yang keyakinannya tinggi maka sangat disarankan pengulangan perhitungan harus dilakukan sebanyak mungkin, tidak memungkiri sampai ribuan kali.

### 3.7 Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

Metode ini dinyatakan dengan persamaan-persamaan kesetimbangan dari satu atau beberapa blok yang diasumsikan tidak terdeformasi, dan mengurangi gaya-gaya yang tidak diketahui (reaksi dari bagian stabil dari massa batuan atau gaya-gaya antar blok), khususnya gaya geser yang bekerja pada permukaan longsor yang dipilih sebelumnya. Hipotesa yang dibuat secara umum adalah bahwa gaya-gaya geser ini mewakili seluruh bagian yang sama dari kuat geser batuan dimana gaya-gaya geser ini bekerja.

Kondisi kestabilan lereng dengan menggunakan metode ini dinyatakan dalam indeks faktor keamanan. Faktor keamanan dihitung menggunakan kesetimbangan gaya atau kesetimbangan momen, atau menggunakan kedua kesetimbangan gaya tersebut tergantung dari metode perhitungan yang dipakai.

Dalam menentukan faktor keamanan dengan metode ini, terdapat beberapa persamaan statis yang digunakan dalam penentuan faktor keamanan, diantaranya :

1. Penjumlahan gaya pada arah vertikal untuk setiap irisan yang digunakan untuk menghitung gaya normal pada bagian dasar irisan.

2. Penjumlahan gaya pada arah horizontal untuk setiap irisan yang digunakan untuk menghitung gaya normal antar irisan.
3. Penjumlahan momen untuk keseluruhan irisan yang bertumpu pada satu titik.
4. Penjumlahan gaya pada arah horizontal untuk irisan.

Sifat-sifat material yang relevan dengan masalah kemantapan lereng adalah sudut geser dalam ( $\phi$ ), kohesi ( $c$ ), dan berat satuan ( $\gamma$ ) batuan. Hubungan antara kuat geser ( $\tau$ ) dan tegangan normal ( $\sigma$ ) dapat dinyatakan oleh persamaan

3.2.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad \dots \dots \dots (3.33)$$

### 3.7.1 Analisis Longsoran Tipe Translasional

Metode kesetimbangan batas telah digunakan secara luas dalam analisis kestabilan lereng yang dikontrol dengan adanya bidang tak menerus yang berupa bidang planar atau baji yang dihasilkan oleh perpotongan dua buah bidang planar. Longsoran diasumsikan terjadi sepanjang bidang planar dan diasumsikan blok massa tidak mengalami rotasi. Faktor keamanan lereng dihitung dengan membandingkan gaya penahan dengan gaya geser yang bekerja sepanjang bidang runtuh seperti pada Gambar 3.16. Secara rumus nilai faktor keamanan dituliskan sebagai berikut :

$$FK = \frac{c' (H-z) \csc \psi_p + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi'}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad \dots \dots \dots (3.34)$$

Keterangan :

FK = Faktor keamanan

$c'$  = kohesi efektif

$\phi'$  = sudut gesek dalam efektif

$\psi_p$  = sudut kemiringan bidang gelincir ( $^{\circ}$ )

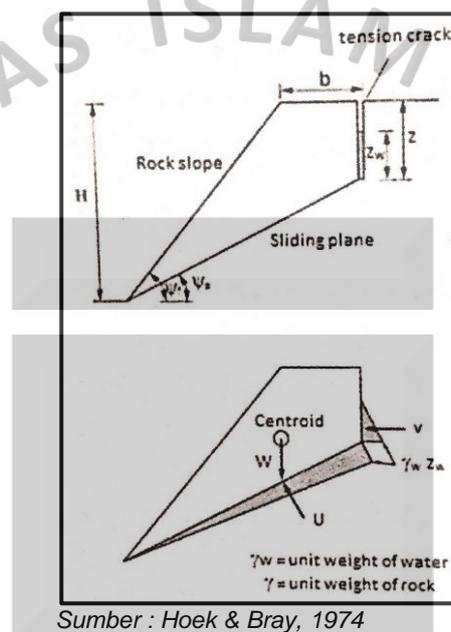
$W$  = berat blok

$U$  = gaya angkat oleh air

$V$  = gaya tekan air dalam rekahan

$H$  = tinggi lereng

$z$  = kedalaman rekahan



Gambar 3.16

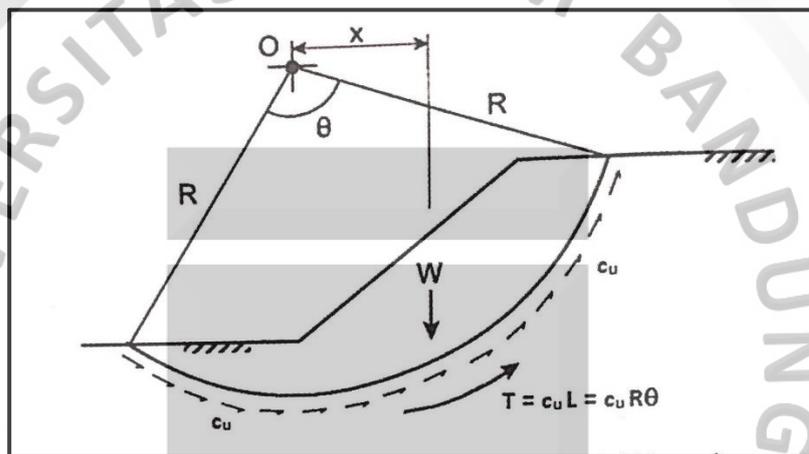
### Metode kesetimbangan batas untuk bidang runtuh planar

#### 3.7.2 Analisis Longsoran Tipe Rotasional

Untuk lereng tanah atau lereng batuan lemah, longsoran terjadi umumnya terjadi karena gaya penahan disepanjang bidang runtuh tidak mampu menahan gaya geser yang bekerja. Pada kasus ini biasanya bidang runtuh berupa sebuah busur lingkaran atau berupa bidang lengkung. Metode kesetimbangan batas merupakan metode yang sangat populer untuk tipe longsoran tersebut. Secara umum metode untuk menganalisis longsoran tipe rotasional dapat dibagi 2 yaitu metode massa dan metode irisan.

## 1. Metode Massa

Pendekatan yang digunakan dalam metode ini ialah massa diatas bidang runtuh dianggap sebagai sebuah benda kaku, bidang runtuh dianggap berupa sebuah busur lingkaran dan parameter kekuatan geser hanya ditentukan oleh kohesi. Metode ini sangat cocok digunakan pada lereng material lempung. Untuk metode massa dapat dilihat pada Gambar 3.17.



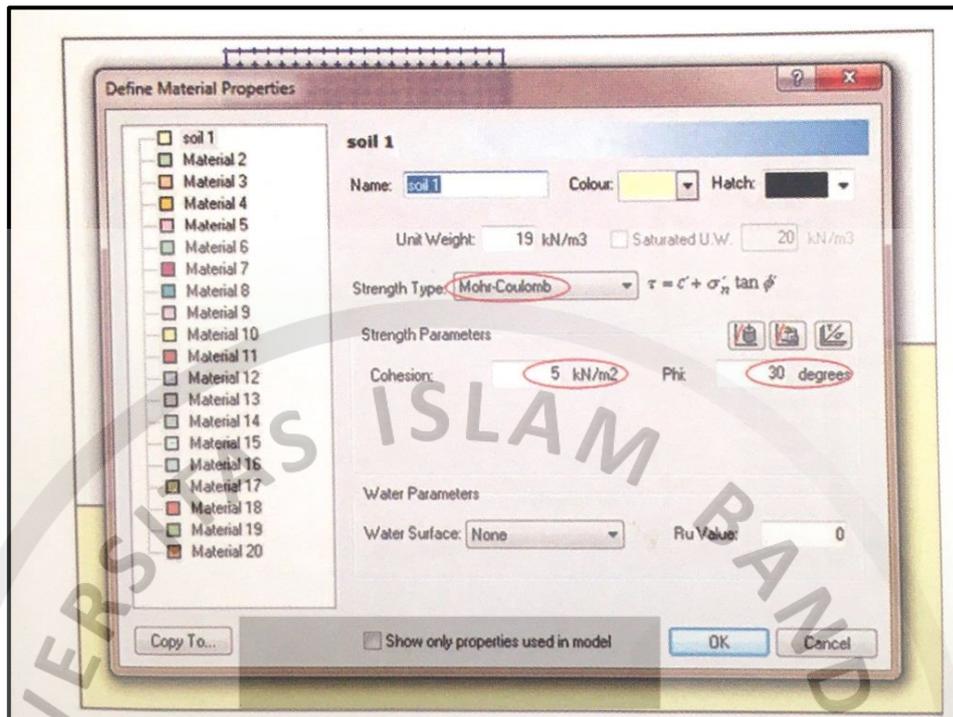
Sumber : Fredlund, Krahn, dan Puhfal, 2004.

**Gambar 3.17**  
**Metode Massa**

## 2. Metode Irisan

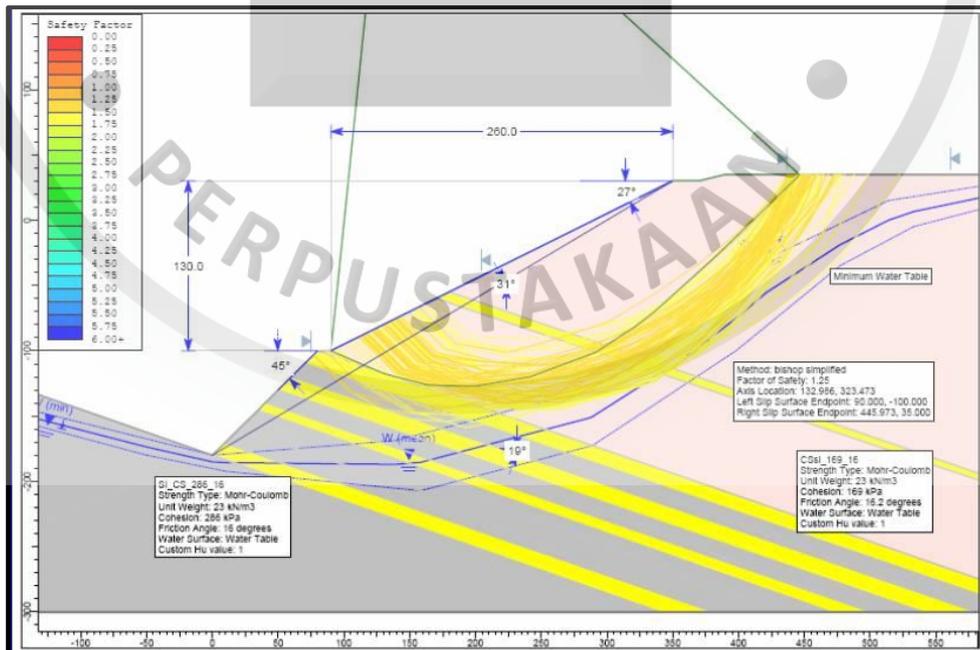
Salah satu karakteristik metode irisan yaitu geometri dari bidang gelinciran harus ditentukan atau diasumsikan terlebih dahulu. Untuk menyederhanakan perhitungan, bidang runtuh biasanya dianggap berupa sebuah busur lingkaran, gabungan busur lingkaran dengan garis lurus, atau gabungan dari beberapa garis lurus seperti pada Gambar 3.18.





Sumber : Arif, 2019.

**Gambar 3.19**  
**Contoh Tahap Pendefinisian Karakteristik Material Pada Perangkat Lunak Slide Dengan Kriteria Kekuatan Mohr-Coloumb**



Sumber : anonim, 2018.

**Gambar 3.20**  
**Contoh Hasil Pemodelan Perangkat Lunak Slide**

### 3.8 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga ini adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa (engineering), seperti analisa tegangan pada struktur. Inti dari metode ini adalah membagi suatu benda yang akan dianalisa, menjadi beberapa bagian atau zona yang lebih kecil dengan jumlah hingga yang dinamakan elemen. Elemen-elemen tersebut dianggap saling berkaitan pada sejumlah titik simpul. Perpindahan pada setiap titik simpul dihitung terlebih dahulu, kemudian dengan sejumlah fungsi interpolasi yang diasumsikan, perpindahan sembarang titik ini dapat dihitung berdasarkan nilai perpindahan pada titik-titik simpul. Selanjutnya regangan yang terjadi pada setiap elemen dihitung berdasarkan besarnya regangan tersebut pada masing-masing titik simpul. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut nilai tegangan yang bekerja pada elemen-elemen tersebut dapat dihitung (Arif, 2016).

Terdapat dua pendekatan yang umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode elemen hingga, yaitu metode pengurangan kekuatan geser (SRF) dan metode penambahan gravitasi (GI). Namun berdasarkan data yang dimiliki metode yang cocok digunakan adalah metode pengurangan kekuatan geser.

Metode ini prinsipnya adalah mengurangi nilai kuat geser material nya secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Pengurangan parameter kohesi ( $c$ ) dan sudut gesek dalam ( $\phi$ ) dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut (Arif, 2016) :

$$c_f = \frac{c}{SRF} \dots\dots\dots (3.35)$$

$$\phi_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{SRF}\right) \dots\dots\dots (3.36)$$

keterangan :

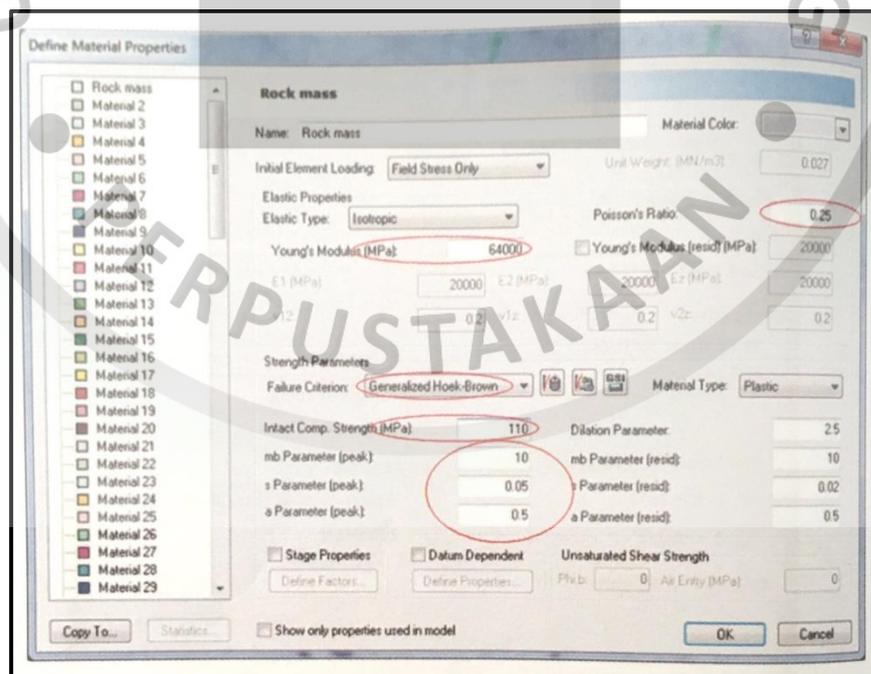
$c$  = Kohesi aktual

SRF = Faktor reduksi kekuatan geser. FK besarnya sama dengan nilai SRF pada saat tepat terjadi keruntuhan.

$\phi_f$  = Sudut gesek dalam saat runtuh ( $^{\circ}$ )

$c_f$  = Kohesi saat runtuh

Pada pengerjaannya, pemodelan lereng untuk metode ini dibantu menggunakan *software Phase 2*. Pemodelan dilakukan untuk mendapatkan nilai SRF dengan geometri yang sudah dioptimasi. Input parameter yang digunakan pada *software* ini adalah nilai *natural density*, modulus elastisitas, nisbah Poisson, nilai kuat geser, kohesi (*peak*) dan sudut gesek dalam (*peak*) serta faktor kegempaan. Setelah dimasukkan input parameter, maka hasil pemodelan beserta nilai SRF akan didapatkan.



Sumber : Arif, 2019.

**Gambar 3.19**  
Contoh Tahap Pendefinisian Karakteristik Material Pada Perangkat Lunak *Phase 2* Dengan Kriteria Kekuatan Mohr-Coloumb