

**SKRIPSI**

**ANALISIS KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN *LIMIT EQUILIBRIUM METHOD* BERBASIS PROGRAM  
GEOSTUDIO SLOPE/W DAN  
ROCSCIENCE SLIDE**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**SALMAWATI  
D111 19 1020**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

## LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### **ANALISIS KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN *LIMIT EQUILIBRIUM METHOD* BERBASIS PROGRAM GEOSTUDIO SLOPE/W DAN ROCSCIENCE SLIDE**

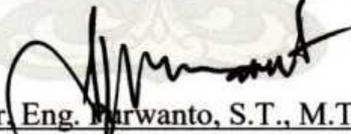
Disusun dan diajukan oleh

**Salmawati**  
**D111 19 1020**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 19 Februari 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

  
Dr. Eng. Harwanto, S.T., M.T.  
NIP 197111282005011002

Ketua Program Studi,

  
Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T.  
NIP 197010052008012026



## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Salmawati

NIM : D111191020

Program Studi : Teknik Pertambangan

Jenjang : SI

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**Analisis Kestabilan Lereng Menggunakan *Limit Equilibrium Method* Berbasis Program Geostudio Slope/W Dan Rocscience Slide**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 19 Februari 2024

Yang Menyatakan



METERAI  
TEMPEL  
16A91ALX074197148  
Salmawati



## ABSTRAK

**SALMAWATI.** *ANALISIS KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN LIMIT EQUILIBRIUM METHOD BERBASIS PROGRAM GEOSTUDIO SLOPE/W DAN ROCSCINCE SLIDE* (dibimbing oleh Purwanto)

Keamanan dan kestabilan lereng di tambang adalah aspek kunci yang harus dipertimbangkan selama fase perencanaan, operasi, dan pemantauan. Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng di tambang sangat penting untuk mengidentifikasi potensi risiko dan mengambil tindakan yang diperlukan untuk meminimalkannya. Analisis kestabilan lereng pada Pit Koro South 02, PT Vale Indonesia Tbk menggunakan *Metode Limit Equilibrium Method* (LEM) dengan asumsi metode Morgenstren-Price menggunakan *software* Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide dengan melakukan perbandingan hasil analisis antara lereng jenuh dan lereng tidak jenuh dari masing-masing *software* yang digunakan. Hasil analisis kestabilan lereng tidak jenuh menggunakan Geostudio Slope/W, *section A-A'*  $FK > 1,44$ , *section B-B'*  $FK > 1,31$  dan *section C-C'*  $FK > 1,4$ , sedangkan hasil analisis pada *software* Rocscience Slide, *section A-A'*  $FK > 1,44$ , *section B-B'*  $FK > 1,3$  dan *section C-C'*  $FK > 1,4$ . Hasil analisis kestabilan lereng tidak jenuh menggunakan Geostudio Slope/W, *section A-A'*  $FK > 1,78$ , *section B-B'*  $FK > 1,81$  dan *section C-C'*  $FK > 1,64$ , sedangkan hasil analisis pada *software* Rocscience Slide, *section A-A'*  $FK > 1,79$ , *section B-B'*  $FK > 1,84$  dan *section C-C'*  $FK > 1,64$ . Faktor keamanan yang dihasilkan dari analisis kestabilan lereng jenuh lebih rendah dari faktor kermanan yang dihasilkan dari hasil analisis stabilatas lereng tidak jenuh. Hasil analisis dari penggunaan dua *software* relatif sama dari masing-masing lereng yang di analisis.

Kata Kunci: Kestabilan lereng, *Limit Equilibrium Method*, Geostudio Slope/W, Rocscience Slide



## ABSTRACT

**SALMAWATI. SLOPE STABILITY ANALYSIS USING LIMIT EQUILIBRIUM METHOD BASED ON GEOSTUDIO SLOPE/W AND ROCSCINCE SLIDE PROGRAM** (supervised by Purwanto)

*The safety and stability of slopes in mines are key aspects that must be considered during the planning, operation, and monitoring phases. Therefore, analysis of slope stability in mines is essential to identify potential risks and take the necessary actions to minimize them. The slope stability analysis at Koro South 02 Pit, PT Vale Indonesia Tbk, uses the Limit Equilibrium Method (LEM) with the assumption of the Morgenstren-Price method using Geostudio Slope/W and Rocscience Slide software by comparing the analysis results between saturated slopes and unsaturated slopes from each software used. The results of the analysis of the stability of unsaturated slopes using Geostudio Slope/W are section A-A'  $FK > 1.44$ , section B-B'  $FK > 1.31$ , and section C-C'  $FK > 1.4$ , while the results of the analysis on the Rocscience Slide software are section A-A'  $FK > 1.44$ , section B-B'  $FK > 1.3$ , and section C-C'  $FK > 1.4$ . The results of the unsaturated slope stability analysis using Geostudio Slope/W are section A-A'  $FK > 1.78$ , section B-B'  $FK > 1.81$ , and section C-C'  $FK > 1.64$ , while the results of the analysis on the Rocscience Slide software are section A-A'  $FK > 1.79$ , section B-B'  $FK > 1.84$ , and section C-C'  $FK > 1.64$ . The factor of safety resulting from the analysis of the stability of saturated slopes is lower than the factor of safety resulting from the analysis of the stability of unsaturated slopes. The analysis results from the use of two software programs are relatively the same for each slope analyzed.*

**Keywords:** *Slope stability, Limit Equilibrium Method, Geostudio Slope/W, Rocscience Slide*



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan.....	2
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan.....	2
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Konsep Dasar kestabilan Lereng.....	4
2.2 Kestabilan Lereng.....	5
2.3 Masalah Kestabilan Lereng.....	6
2.3 Lereng.....	7
2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng.....	9
2.5 Longsoran.....	11
2.6 Nilai <i>Safety Factor</i> (SF) Terhadap kestabilan Lereng.....	15
2.7 Pentingnya Analisis Kestabilan Lereng dalam Rekayasa Geoteknik.....	17
2.8 <i>Limit Equilibrium Method</i> (LEM).....	18
2.9 Perangkat Lunak Geostudio Slope/W.....	25
2.10 Perangkat Lunak Rocscience Slide.....	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Lokasi Penelitian.....	29
3.2 Benda Uji dan Alat.....	30
3.3 Teknik Pengumpulan Data.....	30
3.4 Teknik Analisis.....	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1 Hasil analisis kestabilan lereng.....	46
4.2 Hasil Analisis Menggunakan Rocscience Slide.....	51
4.3 Perbandingan Hasil Analisis Lereng Jenuh dan Lereng Tidak Jenuh dari Kedua Perangkat Lunak.....	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA.....	63



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Bidang miring pada longsor berupa elemen geometris dasar (Blassio,2011) .....	11
Gambar 2 Elemen utama geometri dari longsor (Ikah, 2018).....	12
Gambar 3 Longsoran bidang (Hoek <i>and</i> Bray,1981).....	13
Gambar 4 Longsoran baji (hoek <i>and</i> Bray,1981).....	13
Gambar 5 Longsoran guling (Hoek <i>and</i> Bray, 1981) .....	14
Gambar 6 Longsoran busur (Hoek <i>and</i> Bray, 1981).....	15
Gambar 7 Gaya yang bekerja pada potongan bidang gelincir dalam metode irisan (Read <i>and</i> Stacey, 2009) .....	19
Gambar 8 (a) Fungsi gaya antar irisan setengah sinus (b) hubungan faktor keamanan dan $\lambda$ (Krahn, 2003) .....	21
Gambar 9 Skema analisis kesetimbangan batas (Morgenstern & Price, 1965 dalam Takwin dkk., 2017) .....	24
Gambar 10 Lereng dibagi menjadi potongan-potongan kecil (Krahn, 2004) .....	25
Gambar 11 Tampilan <i>software</i> Geostudio Slope/W 2012 .....	26
Gambar 12 Peta Lokasi Penelitian Pit Koro South 02 .....	29
Gambar 13 Topografi layout Pit Koro South 2 .....	30
Gambar 14 <i>Section A-A'</i> Pit Koro South 02-02 .....	31
Gambar 15 <i>Section B-B'</i> Pit Koro South 02-03 .....	31
Gambar 16 <i>Section C-C'</i> Pit Koro South 02-04 .....	31
Gambar 17 Material penyusun lereng <i>section A-A'</i> .....	32
Gambar 18 Material penyusun lereng <i>section B-B'</i> .....	32
Gambar 19 Material penyusun lereng <i>section C-C'</i> .....	33
Gambar 20 <i>Section A-A'</i> Lereng Jenuh .....	33
Gambar 21 <i>Section B-B'</i> Lereng jenuh .....	34
Gambar 22 <i>Section C-C'</i> Lereng Jenuh .....	34
Gambar 23 <i>Section A-A'</i> Lereng tidak jenuh .....	35
Gambar 24 <i>Section B-B'</i> Lereng tidak jenuh .....	35
Gambar 25 <i>Section C-C'</i> Lereng tidak jenuh .....	36
Gambar 26 Pengaturan pada <i>keyIn analyses</i> .....	37
Gambar 27 <i>Scale picture</i> .....	37
Gambar 28 Geometri lereng .....	38
Gambar 29 Memasukkan data-data material yang akan di analisis .....	38
Gambar 30 Lapisan material tanah .....	39
Gambar 31 Menggambar garis tekanan air pori .....	39
Gambar 32 <i>Slip surface</i> .....	40
Gambar 33 <i>Running</i> lereng untuk mengetahui nilai FK .....	40
Gambar 34 Tampilan awal pada Rocscience Slide .....	41
Gambar 35 Import data/file .....	41
Gambar 36 <i>Scale data/file</i> .....	42
Gambar 37 Menginput data material penyusun lereng .....	42
Gambar 38 Menginput <i>water table</i> .....	43
Gambar 39 Interpret lereng .....	43
Gambar 40 Diagram alir penelitian .....	44
Gambar 41 Hasil analisis <i>section A-A'</i> .....	46



Gambar 42 Hasil analisis <i>section</i> B-B'	47
Gambar 43 Hasil analisis <i>section</i> C-C'	48
Gambar 44 Hasil analisis <i>section</i> A-A'	49
Gambar 45 Hasil analisis <i>section</i> B-B'	50
Gambar 46 Hasil analisis <i>section</i> C-C'	51
Gambar 47 Hasil analisis <i>section</i> A-A'	52
Gambar 48 Hasil analisis <i>section</i> B-B'	53
Gambar 49 Hasil analisis <i>section</i> C-C'	54
Gambar 50 Hasil analisis <i>section</i> A-A	56
Gambar 51 Hasil analisis <i>section</i> B-B'	57
Gambar 52 Hasil analisis <i>section</i> C-C'	58



## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Nilai Faktor Keamanan untuk Perencanaan Lereng .....	16
Tabel 2 Hubungan nilai Faktor Kemanan (FK) dan kemungkinan Kelongsoran Lereng .....	16
Tabel 3 Kisaran Faktor keamanan.....	17
Tabel 4 Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang .....	17
Tabel 5 Persamaan dan Ketidaktahuan yang terkait dengan metode irisan .....	22
Tabel 6 Kondisi kesetimbangan statik yang sering digunakan dalam metode irisiran.....	22
Tabel 7 Data material penyusun lereng.....	32
Tabel 8 Informasi muka air tanah .....	33
Tabel 9 Hasil analisis kestabilan lereng Geostudio Slope/W dan rocscience slide .....	59



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Drill Hole Record Pit Koro South 02-02 .....	65
Lampiran 3 Drill Hole Record Pit Koro South 02-03 .....	67
Lampiran 4 Drill Hole Record Pit Koro South 02-04 .....	68
Lampiran 5 Penampang Pit Koro South 02-02 (A-A') .....	71
Lampiran 6 Penampang Pit Koro South 02-03 (B-B') .....	72
Lampiran 7 Penampang Pit Koro South 02-04 (C-C') .....	73



## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah*, Maha besar Allah *Subhanahu wa ta'ala* atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad *Shallallahu 'alaihi Wasallam* sebagai manusia pilihan yang diutus untuk menyebarkan syiar kebenaran-Nya.

Masalah kestabilan lereng merupakan salah satu aspek krusial yang selalu menjadi perhatian utama dalam pengembangan infrastruktur, konstruksi dan penataan lahan. Masalah kestabilan lereng menjadi semakin kompleks dan menantang ketika berhadapan dengan kondisi geologi dan topografi tertentu. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terkait kestabilan lereng dan metode analisis yang tepat adalah suatu hal yang mutlak diperlukan.

Penelitian ini berjudul “analisis kestabilan lereng menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) berbasis program Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide” merupakan salah satu upaya untuk menjawab tantangan ini. Penelitian ini menganalisis kestabilan lereng dengan menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM), yang merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi kestabilan lereng.

Dalam penelitian ini bukanlah usaha yang dilakukan sendiri, melainkan merupakan hasil kerja sama, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Melalui skripsi ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada PT Vale Indonesia Tbk yang telah memberikan kesempatan juga bimbingan kepada penulis untuk melaksanakan penelitian di lokasi operasionalnya. Terima kasih kepada Bapak Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, panduan, dan dorongan selama proses penelitian ini. Terima kasih kepada dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan perbaikan tugas akhir ini. Terima kasih kepada seluruh Dosen dan staff administrasi Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah melaksanakan tugasnya dengan tulus dan baik. Terimakasih kepada Anggota PERMATA FT-UH yang telah memberikan bantuan kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini. Terima kasih kepada semua teman-teman “IGNEOUZ” (Teknik Pertambangan Angkatan 2019) yang telah memberikan bantuan dan saran kepada penulis selama pelaksanaan penelitian. Terima kasih kepada teman-teman LBE GEOMEKANIKA yang telah memberikan sumbangsi tenaga dan pikirannya kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini. Ucapan terima kasih penulis kepada orang tua penulis yang dengan sabar dan tulus senantiasa mendoakan, memotivasi, serta mendukung penulis dalam setiap kondisi. Penulis juga ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi, baik dalam bentuk dukungan, saran, maupun data-data yang diperlukan dalam penelitian ini. Semua dukungan ini sangat berarti dan membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.



Melalui penelitian ini, penulis berharap dapat memberikan kontribusi kecil pemahaman lebih mendalam tentang kestabilan lereng dan metode analisis, serta memberikan wawasan yang bermanfaat dalam penggunaan software lunak Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide dalam konteks ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat yang berarti dan

menjadi sumber referensi yang berguna bagi para pembaca yang tertarik dalam bidang kestabilan lereng dan aplikasi perangkat lunak geoteknik. Semoga penelitian ini dapat memberikan wawasan yang bermanfaat dan menjadi kontribusi positif dalam pengembangan ilmu geoteknik.

Penulis

Salmawati



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Industri pertambangan adalah salah satu sektor industri yang memiliki peran vital dalam pertumbuhan dan perkembangan ekonomi suatu negara. Namun, operasi tambang seringkali melibatkan penggalian yang dalam dan luas, yang dapat menghadirkan risiko kestabilan lereng yang serius. Kegagalan lereng di tambang dapat mengakibatkan konsekuensi yang merugikan, termasuk kecelakaan, kerusakan peralatan, kerusakan lingkungan, dan penundaan produksi. Keamanan dan kestabilan lereng di tambang adalah aspek kunci yang harus dipertimbangkan selama fase perencanaan, operasi, dan pemantauan. Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng di tambang menjadi sangat penting untuk mengidentifikasi potensi risiko dan mengambil tindakan yang diperlukan untuk meminimalkannya.

Metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*) telah menjadi salah satu alat standar dalam menganalisis kestabilan lereng di tambang. Dalam beberapa tahun terakhir, perangkat lunak geoteknik seperti Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide telah menjadi sarana yang tak tergantikan dalam melakukan analisis ini. Kedua perangkat lunak ini memungkinkan insinyur geoteknik untuk memodelkan geometri kompleks dari lereng tambang dan menganalisis stabilitas dengan berbagai parameter tanah dan kondisi operasional yang berubah-ubah. Namun, meskipun telah ada banyak penelitian dalam analisis kestabilan lereng di tambang, masih ada tantangan yang perlu diatasi dalam aplikasi praktisnya, terutama dalam konteks PT Vale Indonesia Tbk. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis kestabilan lereng di PT Vale Indonesia Tbk, dengan menggunakan Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide sebagai perangkat lunak yang digunakan dalam studi ini.

Studi kasus ini akan memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang kondisi geologis dan operasional yang unik di PT Vale Indonesia Tbk, serta rekomendasi yang relevan untuk meminimalkan risiko kestabilan tempat ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan untuk



tindakan pencegahan dan pengelolaan risiko yang lebih efektif dalam operasi tambang di PT Vale Indonesia Tbk.

Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan kontribusi dalam pemahaman lebih lanjut tentang metode kesetimbangan batas atau *Limit Equilibrium Method* (LEM) dalam analisis kestabilan lereng di tambang dan penggunaan perangkat lunak Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide dalam konteks tambang yang khusus.

## 1.2 Rumusan Masalah

Penelitian yang akan dilakukan membahas analisis kestabilan lereng, yaitu lereng tidak jenuh dan lereng jenuh dengan memasukkan parameter muka air tanah sebagai faktor pembanding untuk melihat hasil analisis kestabilan lereng yang dihasilkan. Rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana analisis kestabilan lereng yang dihasilkan pada lereng jenuh dan lereng tidak jenuh?
2. Apa pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng?
3. Bagaimana variasi faktor keamanan memengaruhi hasil analisis kestabilan lereng menggunakan Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis faktor keamanan yang dihasilkan dari lereng jenuh dan lereng tidak jenuh
2. Mengetahui pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng
3. Menganalisis faktor keamanan yang dihasilkan dari perangkat lunak Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide.

## 1.4 Manfaat Penelitian



Hasil penelitian ini berupa hasil dari dua kondisi lereng yang berbeda. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi perusahaan dan pembaca lainnya untuk mengevaluasi metode analisis kestabilan lereng dan perangkat lunak yang

digunakan sehingga mampu memberikan pilihan yang paling sesuai untuk hasil yang lebih akurat berdasarkan kebutuhannya. Keakuratan hasil yang didapatkan dapat memberikan pilihan yang efisien untuk upaya-upaya pengelolaan dan mitigasi terhadap lereng penambangan.

### **1.5 Ruang Lingkup**

Ruang lingkup penelitian ini fokus pada analisis kestabilan lereng jenuh dan lereng tidak jenuh menggunakan metode kesetimbangan batas dengan perangkat lunak Geostudio Slope/W dan Rocscience Slide. Selanjutnya penelitian akan membandingkan hasil analisis kestabilan lereng jenuh dan lereng tidak jenuh, pengaruh dari muka air tanah dan variasi faktor keamanan yang dihasilkan dari kedua perangkat lunak.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Konsep Dasar Kestabilan Lereng

Gerakan tanah adalah semua proses dimana dari material bumi bergerak oleh gravitasi bumi, baik lambat atau cepat dari suatu tempat ke tempat lain (Van Zuidam, 1983). Fenomena terjadinya gerakan tanah dapat disebabkan oleh faktor luar serta dalam. Beberapa faktor dalam yang memicu terjadinya gerakan tanah adalah kemiringan lereng, sifat batuan serta struktur geologi. Kemiringan lereng merupakan salah satu faktor yang berkaitan langsung dengan gerakan tanah. Daerah dengan topografi lereng yang curam akan memiliki potensi pergerakan tanah yang lebih besar dibanding daerah yang topografi lerengnya landai. Hal ini disebabkan karena perbandingan antara gaya penahan dan gaya pendorong pada lereng yang curam relatif lebih kecil dibanding lereng yang lebih landai. Kelerengan merupakan salah satu faktor penting dalam gerakan tanah dan akan berinteraksi dengan gaya gravitasi. Gaya gravitasi dapat diuraikan menjadi dua buah gaya, yaitu gaya yang bekerja sejajar pada lereng dan gaya yang bekerja tegak lurus dengan lereng. Gaya beban dan gaya gesek yang melawan gaya tegak lurus lereng tersebut berpengaruh dalam gerakan tanah (Palmer, 1980).

Gerakan tanah merupakan suatu gerakan menuruni lereng oleh massa tanah dan atau bantuan penyusun lereng akibat terganggunya kestabilan tanah atau bantuan penyusun lereng tersebut. Definisi diatas menunjukkan bahwa massa yang bergerak dapat berupa massa tanah, massa batuan atau pencampuran antara massa tanah dan batuan penyusun lereng. Apabila massa yang bergerak ini didominasi oleh massa tanah dan gerakannya melalui suatu bidang pada lereng, baik berupa bidang miring ataupun lengkung, maka proses pergerakan tersebut disebut sebagai longsoran tanah. Analisis stabilitas tanah pada permukaan tanah ini disebut dengan analisis stabilitas lereng.

Analisis stabilitas lereng meliputi konsep kemantapan lereng yaitu pengetahuan mengenai kekuatan geser tanah. Keruntuhan geser dapat terjadi akibat gerak relatif antar butirnya. Karena itu kekuatannya



tergantung pada gaya yang bekerja antar butirnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa kekuatan geser terdiri atas:

1. Bagian yang bersifat kohesif, tergantung pada macam tanah dan ikatan butirnya.
2. Bagian yang bersifat gesekan, yang sebanding dengan tegangan efektif yang bekerja pada bidang geser (DAS, 1994).

## 2.2 Kestabilan Lereng

Kestabilan dari suatu jenjang individual dikontrol oleh kondisi geologi daerah setempat, bentuk keseluruhan lereng pada daerah tersebut, kondisi air tanah setempat, dan juga oleh teknik penggalian yang digunakan dalam pembuatan lereng. Faktor pengontrol ini jelas sangat berbeda untuk situasi penambangan yang berbeda dan sangat penting untuk memberikan aturan yang umum untuk menentukan seberapa tinggi atau seberapa landai suatu lereng untuk memastikan lereng itu akan stabil. Apabila kestabilan dari suatu jenjang dalam operasi penambangan meragukan, maka kestabilannya harus dinilai berdasarkan dari struktur geologi, kondisi air tanah dan faktor pengontrol lainnya yang terjadi pada suatu lereng. Kestabilan lereng pada batuan dipengaruhi oleh geometri lereng, struktur batuan, sifat fisik dan mekanik batuan serta gaya-gaya luar yang bekerja pada lereng tersebut. Suatu cara yang umum untuk menyatakan kestabilan suatu lereng batuan adalah dengan faktor keamanan. Faktor ini merupakan perbandingan antara gaya penahan yang membuat lereng tetap stabil, dengan gaya penggerak yang menyebabkan terjadinya longsor. Secara matematis faktor kestabilan lereng dinyatakan sebagai berikut :

$$F = R/Fp \quad (1)$$

Dimana

F= faktor kestabilan lereng

R= gaya penahan, berupa resultan gaya-gaya yang membuat lereng tetap stabil

Fp= gaya penggerak, berupa resultan gaya-gaya yang menyebabkan lereng



### 2.3 Masalah Kestabilan Lereng

Masalah kestabilan seringkali terjadi di dalam proses penambangan terutama pada penggalian tambang terbuka (*open pit* dan *open cut*), tempat penimbunan material buangan (*tailing disposal*), penimbunan bijih (*stockyard*), bendungan, infrastruktur lainnya seperti jalan, fondasi jembatan, dan lereng di sekitar fasilitas seperti perumahan (Suyartono, 2003). Jika lereng yang terbentuk sebagai akibat dari proses penambangan (*pit slope*) dan yang merupakan sarana penunjang operasi penambangan (bendungan, jalan, dll) itu tidak stabil, kegiatan produksi akan terganggu dan mengakibatkan ketidaksinambungan produksi. Oleh karena itu, analisis kemantapan lereng, baik pada tahap perancangan maupun tahap penambangan dan pasca tambang, merupakan suatu bagian penting dan harus dilakukan untuk mencegah terjadinya gangguan-gangguan terhadap kelancaran produksi serta bencana fatal yang akan berakibat pada keselamatan pekerja dan peralatan (Harries dkk., 2009).

Material penyusun lereng ada dua macam, yaitu lereng tanah dan lereng batuan, walaupun kenyataannya yang dijumpai pada lereng tambang selalu merupakan gabungan dari material tanah dan batuan. Dalam analisis dan penentuan jenis tindakan pengamanannya lereng tanah tidak dapat disamakan dengan lereng batuan karena parameter material dan jenis penyebab longsor pada kedua material pembentuk lereng tersebut sangat jauh berbeda (Romana, 1993).

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh faktor geometri lereng, karakteristik fisik dan mekanik material pembentuk lereng, air (hidrologi dan hidrogeologi), struktur bidang lemah batuan (lokasi, arah, frekuensi, karakteristik mekanik), tenggangan alamiah dalam massa batuan, konsentrasi tegangan lokal, getaran (alamiah: gempa; dan perbuatan manusia: efek peledakan, efek lalu lalang alat-alat berat), iklim, hasil perbuatan pekerja tambang, serta pengaruh termik (Moshab, 1997). Kenyataan di lapangan memang memperlihatkan bahwa masalah ketidak stabilan lereng yang timbul dapat diakibatkan oleh faktor-faktor tersebut. Oleh karena itu, faktor-faktor ini perlu mendapatkan perhatian agar lereng dapat dijaga kestabilannya.

ah dan batuan umumnya berada dalam keadaan seimbang terhadap a yang bekerja padanya, baik gaya dari dalam maupun dari luar. Jika



tanah dan batuan mengalami perubahan keseimbangan akibat pengangkatan, penurunan, penggalian, penimbunan, erosi, atau aktivitas lain tanah dan batuan tersebut secara alamiah akan berusaha untuk mencapai keseimbangan yang baru. proses ini biasanya berupa degradasi atau pengurangan beban, terutama dalam bentuk perpindahan dengan besaran tertentu sampai kepada bentuk longsoran atau gerakan-gerakan lain, sampai tercapai keseimbangan. Pada tanah dan batuan dalam keadaan alamiah yang berkerja antara lain tegangan-tegangan dan tekanan air pori. Kedua hal tersebut mempunyai peranan penting dalam bentuk kestabilan lereng. Sedangkan tanah dan batuan sendiri mempunyai sifat-sifat fisik dan mekanik asli tertentu seperti sudut gesek dalam (*angle of internal friction-  $\phi$* ), kohesi (*c*), kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, nisbah poissin, dan bobot isi ( $\gamma$ ) serta sifat fisik dan mekanik lainnya yang sangat berperan dalam menentukan kekuatan tanah dan batuan juga mempengaruhi kestabilan lereng (Hoek and Bray, 1981). Sifat-sifat tersebut tidaklah statis, tetapi perlu dimaknai secara dinamis baik sebagai fungsi letak maupun fungsi dari faktor lainnya. Oleh karena itu kemantapan lereng harus diketahui dengan pasti system tegangan yang bekerja pada tanah dan batuan dalam hal ini sifat-sifat fisik dan material pembentuknya serta posisi dan kedalaman lereng. Sehingga dari data dan pengetahuan yang diperoleh dapat dilakukan analisis perilaku tanah dan batuan apabila dilakukan penggalian atau penimbunan. Kemudian penentuan geometri lereng atau cara yang lain yang dapat membantu menstabilkan lereng.

### 2.3 Lereng

Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia. Lereng yang terbentuk secara alami misalnya: lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia, antara lain: galian dan timbunan untuk membuat bendungan, tanggul dan kanal sungai serta dinding tambang terbuka (Arief, 2007). Pada sebuah galian tambang terdiri dari tiga bagian yaitu : *high wall*, dan *side wall*.



*side wall* adalah permukaan kerja tambang terbuka yaitu khususnya tambang terbuka, permukaan atau lereng dibagian yang lebih tinggi dari suatu

kontur tambang terbuka. Dapat juga diartikan sebagai sisi bukaan tanah/batuan, sisi tanah buangan arah tegak lurus terhadap sisi buangan dan arah kemajuan tambang (*high wall*).

- b) *Low wall* adalah sisi bukaan tanah penutup batubara atau bahan galian tambang lainnya pada tambang terbuka. *Low wall* dapat ditentukan (searah) berdasarkan bedding dip suatu permukaan tanah.
- c) *Side wall* adalah dinding pada area sisi samping suatu lubang bukaan tambang. Umumnya *side wall* tegak lurus terhadap *low wall* dan *high wall* pada area pit. Lereng tersusun atas batuan yang memiliki komposisi tertentu yang termuat didalamnya. Komposisi penyusun batuan dapat berupa mineral yang merupakan material padat anorganik yang terbentuk secara alamiah atau organik yang sudah mati. Batuan adalah material yang membentuk kulit bumi termasuk fluida yang berada di dalamnya (seperti air, minyak, dan lain-lain). Batuan penyusun lereng dapat mengalami perubahan sebagai pengaruh dari kondisi alam yang dinamis salah satu diantaranya adalah iklim.

Lereng alam (*natural slope*) merupakan lereng yang terbentuk karena adanya fenomena alam yang merupakan akibat dari proses geologi. Dalam konteks perencanaan jalan, lereng alam sering dijumpai pada kawasan dengan topografi berbukit dan pegunungan, dimana letak dari badan jalan berada pada dasar lereng (*existing ground*), atau elevasi badan jalan berada pada lereng yang sebagian digali/dipotong untuk posisi badan jalan. Dikategorikan sebagai lereng ala apabila tidak ada perlakuan dan/atau penanganan terhadap lereng tersebut. Perubahan pada kemiringan ataupun penambahan dengan suatu konstruksi tertentu sehingga kestabilan dan kemantapan dari lereng alam tersebut benar-benar mengandalkan kestabilan internal yang terbentuk akibat sifat, karakteristik, dan struktur tanah, serta bentuk alaminya (Rumansara, 2014).

Lereng buatan adalah lereng yang terbentuk akibat daerah galian ataupun daerah timbunan yang dibuat oleh manusia sesuai perencanaan lereng sehingga stabil. Lereng buatan dibentuk sesuai dengan penanganan konstruksi seperti

n lereng ataupun lereng yang dibuat tanpa penanganan konstruksi dimana rataan tersebut hanya mengandalkan kemiringan dan tinggi berdasarkan stik tanah pembentuk lereng.



## 2.4 Faktor-Faktor yang mempengaruhi Kestabilan Lereng

Umumnya stabil atau tidaknya suatu lereng tergantung dari beberapa faktor, antara lain:

- Geometri lereng Kemiringan dan tinggi suatu lereng sangat mempengaruhi kestabilannya. Semakin besar kemiringan dan ketinggian suatu lereng, maka kestabilan semakin berkurang. Geometri lereng yang dapat mempengaruhi kestabilan lereng meliputi tinggi lereng, kemiringan lereng dan lebar *berm* (*b*), baik itu lereng tunggal (*single slope*) maupun lereng keseluruhan (*overall slope*). Suatu lereng disebut lereng tunggal (*single slope*) jika dibentuk oleh satu jenjang saja dan disebut keseluruhan (*overall slope*) jika dibentuk oleh beberapa jenjang.
- Struktur batuan Struktur batuan yang sangat mempengaruhi kestabilan lereng adalah bidang-bidang sesar, perlapisan dan rekahan. Struktur batuan tersebut merupakan bidang-bidang lemah (*diskontinuitas*) dan sekaligus sebagai tempat merembesnya air, sehingga batuan lebih mudah longsor.
- Sifat fisik dan mekanik batuan Sifat fisik batuan yang mempengaruhi kestabilan lereng adalah : bobot isi (*density*), porositas dan kandungan air. Sedangkan sifat mekanik batuan antara lain kuat tekan, kuat tarik, kuat geser dan juga sudut geser dalam batuan.

Kuat geser batuan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\tau = C + (\sigma - \mu) \tan \phi \quad (2)$$

Dimana:

$\tau$  = kuat geser batuan ( $\text{ton/m}^2$ )

$C$  = kohesi ( $\text{ton/m}^2$ )

$\sigma$  = tegangan normal ( $\text{ton/m}^2$ )

$\phi$  = sudut geser dalam (*angle of internal friction*) ( $^{\circ}$ )

Untuk mengetahui nilai kohesi dan sudut geser dalam, dinyatakan dalam persamaan berikut :



$$: \sigma \tan \phi + c \tau = c + \tau \tan \phi \quad (3)$$

$$: (\sigma - \mu) \quad (4)$$

ka didapatkan persamaan:

$$\tau = (\sigma - \mu) \tan \phi + c \quad (5)$$

Dimana

$\tau$  = tegangan geser ( $\text{kN/m}^2$ )

$\sigma$  = tegangan normal ( $\text{kN/m}^2$ )

$\phi$  = sudut geser dalam ( $^\circ$ )

$C$  = kohesi ( $\text{kN/m}^2$ )

Gaya-gaya dari luar yang dapat mempengaruhi (mengurangi) kestabilan suatu lereng adalah :

1. Getaran yang diakibatkan oleh gempa, peledakan dan pemakaian alat-alat mekanis yang berat didekat lereng
2. Pemotongan dasar (*toe*) lereng
3. Penebangan pohon-pohon pelindung lereng

Kemudian Kestabilan Lereng Keruntuhan pada lereng alami atau buatan disebabkan karena adanya perubahan antara lain topografi, seismik, aliran air tanah, kehilangan kekuatan, perubahan tegangan, dan musim/iklim/cuaca. Akibat adanya gaya-gaya luar yang bekerja pada material pembentuk lereng menyebabkan material pembentuk lereng mempunyai kecenderungan untuk menggelincir. Kecenderungan menggelincir ini ditahan oleh kekuatan geser material sendiri. Meskipun suatu lereng telah stabil dalam jangka waktu yang lama, lereng tersebut dapat menjadi tidak stabil karena beberapa faktor seperti :

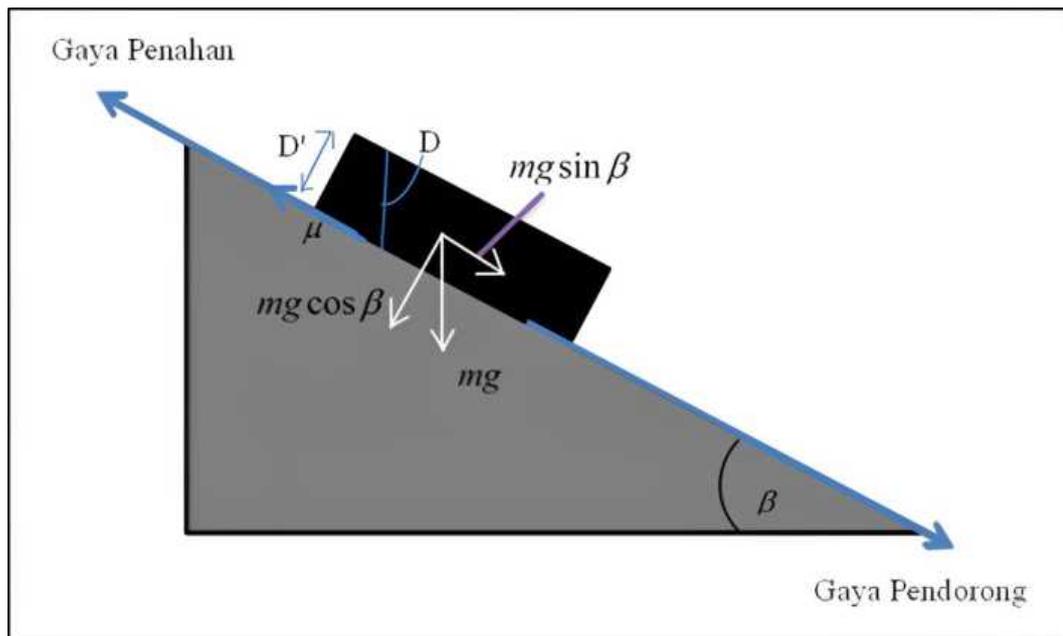
1. Jenis dan keadaan lapisan tanah/batuan pembentuk lereng
2. Bentuk geometris penampang lereng (misalnya tinggi dan kemiringan lereng)
3. Penambahan kadar air pada tanah (misalnya terdapat rembesan air atau infiltrasi hujan)
4. Berat dan distribusi beban
5. Getaran atau gempa Faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng dapat menghasilkan tegangan geser pada seluruh massa tanah, dan suatu gerakan akan terjadi kecuali tahanan geser pada setiap permukaan runtuh yang mungkin terjadi lebih besar dari tegangan geser yang bekerja.

(Bowles, 1991).



## 2.5 Longsor

Longsor atau longsoran didefinisikan sebagai gerakan campuran masa pembentuk lereng berupa batuan, bahan rombakan, tanah atau material campuran bergerak keluar menuruni lereng ketika kesetimbangan terlampaui, dimana gaya pendorong lebih besar daripada gaya penahan (Permanasari, 2018).



Gambar 1 Bidang miring pada longsoran berupa elemen geometris dasar (Blassio,2011)

Tanah longsor juga didefinisikan sebagai pergerakan batu, detritus, atau tanah yang disebabkan oleh aksi gravitasi (Blassio, 2011). Suatu daerah dinyatakan memiliki potensi longsor apabila memenuhi tiga syarat, yaitu :

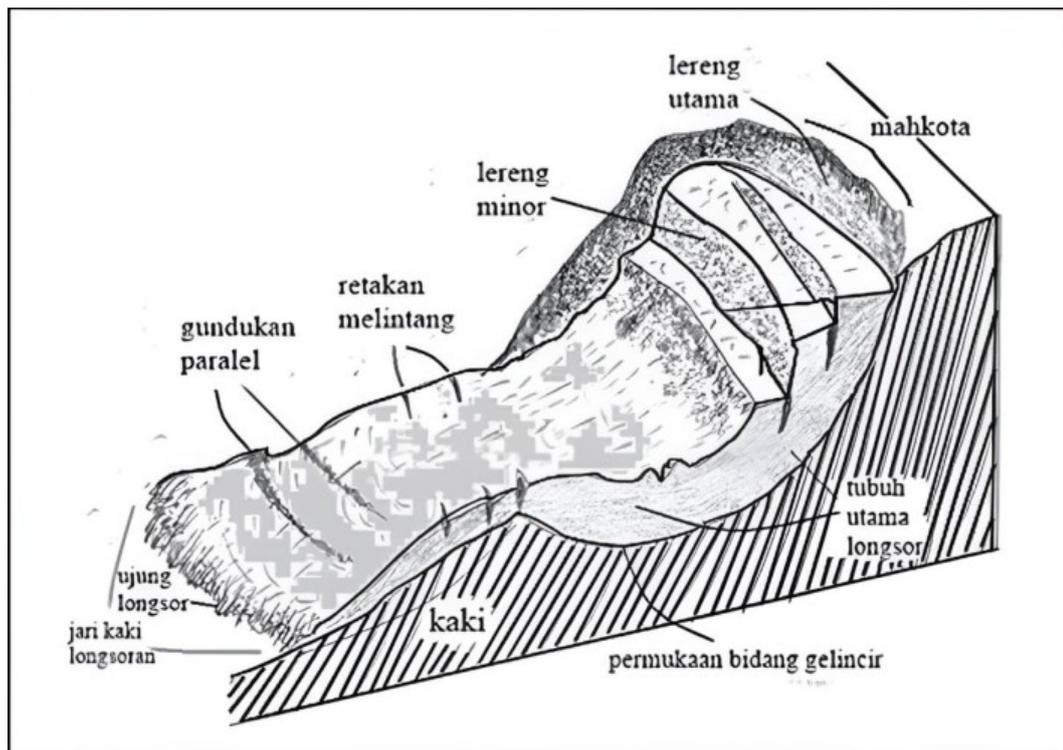
1. Lereng cukup curam
2. Memiliki bidang luncur berupa lapisan di bawah permukaan tanah yang semi permeabel dan lunak
3. Terdapat cukup air untuk membuat tanah diatas bidang gelincir menjadi jenuh

### 2.5.1 mekanisme terjadinya longsor



Longsor terjadi ketika air masuk kedalam tanah dan menambah bobot tanah. air tersebut menembus hingga ke tanah kedap air yang berperan sebagai pelincir, maka tanah akan menjadi licin sehingga tanah pelapukan akan bergerak mengikuti lereng dan keluar dari lereng (Ferrer and

Vallejo, 2011). Pergerakan massa tanah/batuan pada lereng dapat terjadi akibat interaksi pengaruh antara beberapa kondisi yang meliputi geologi, morfologi, struktur geologi, hidrogeologi dan tata guna lahan. Kondisi-kondisi tersebut saling berpengaruh sehingga mengakibatkan suatu kondisi lereng mempunyai kecenderungan atau berpotensi untuk bergerak (Karnawati,2005).



Gambar 2 Elemen utama geometri dari longsor (Permanasari, 2018)

### 2.5.2 jenis-jenis longsor

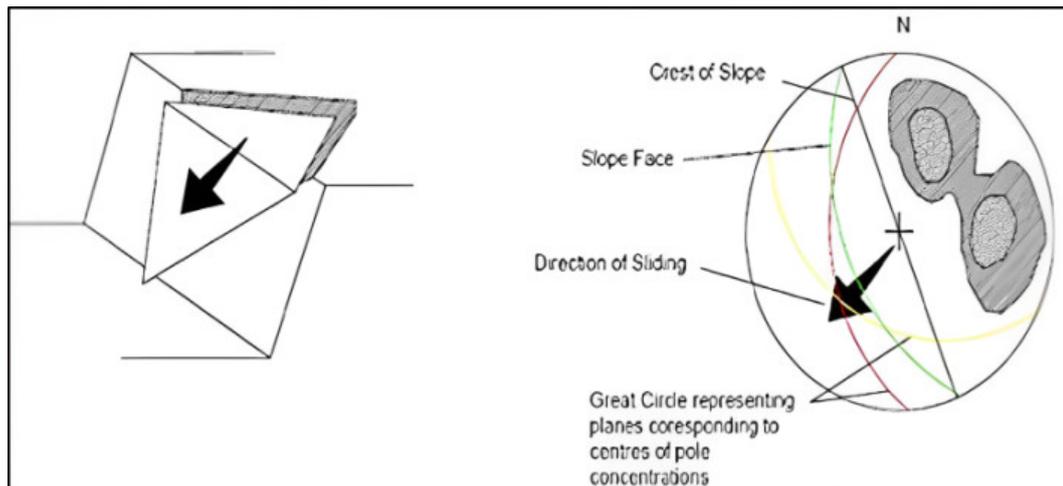
Ada beberapa jenis longsor yang umum dijumpai pada massa batuan ditambang terbuka, yaitu :

a. Longsor bidang (*plane failure*) Longsor jenis ini (Gambar 3) akan terjadi jika kondisi di bawah ini terpenuhi:

1. Jurus (*strike*) bidang luncur mendekati paralel terhadap jurus bidang permukaan lereng (perbedaan maksimum  $20^{\circ}$ ).
2. Kemiringan bidang luncur ( $\psi_p$ ) harus lebih kecil daripada kemiringan bidang permukaan lereng ( $\psi$ ).

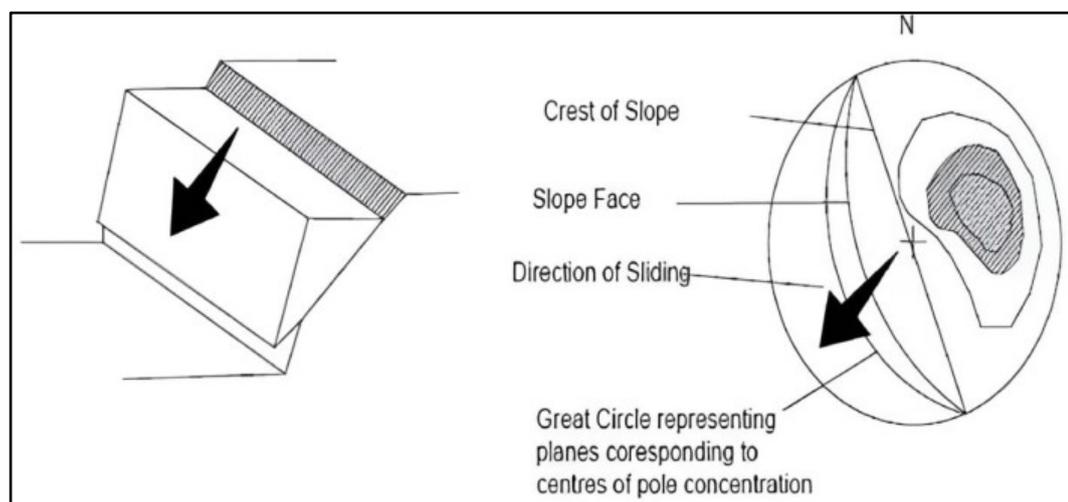


kemiringan bidang luncur ( $\psi_p$ ) lebih besar daripada sudut geser dalam ( $\phi$ ). Terdapat bidang bebas yang merupakan batas lateral dari massa batuan atau tanah yang longsor.



Gambar 3 Longsoran bidang (Hoek and Bray,1981)

- b. Longsoran baji (*wedge failure*) Longsoran baji terjadi bila terdapat dua bidang lemah atau lebih berpotongan sedemikian rupa sehingga membentuk baji terhadap lereng. Longsoran baji (Gambar 4) ini dapat dibedakan menjadi dua tipe longsoran yaitu, longsoran tunggal (*single sliding*) dan longsoran ganda (*double sliding*). Untuk longsoran tunggal, luncuran terjadi pada salah satu bidang, sedangkan untuk longsoran ganda luncuran terjadi pada perpotongan kedua bidang. Longsoran baji tersebut akan terjadi bila memenuhi syarat sebagai berikut :

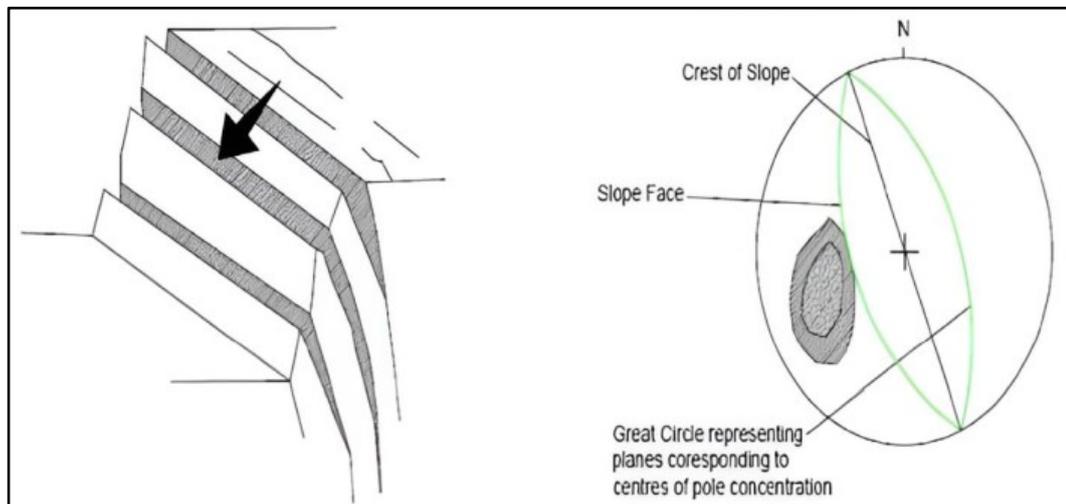


Gambar 4 Longsoran baji (hoek and Bray,1981)

1. Kemiringan lereng lebih besar daripada kemiringan garis potong kedua bidang lemah ( $\psi_{fi} > \psi_i$ ).  
 2. Sudut garis potong kedua bidang lemah lebih besar daripada sudut geser alamnya ( $\psi_{fi} > \nu$ ).



- c. Longsoran guling (*toppling failure*) Longsoran guling (Gambar 5) umumnya terjadi pada lereng yang terjal dan pada batuan yang keras dimana struktur bidang lemahnya berbentuk kolom.



Gambar 5 Longsoran guling (Hoek and Bray, 1981)

Longsoran jenis ini terjadi apabila bidang-bidang lemah yang ada berlawanan dengan kemiringan lereng. Longsoran guling pada blok fleksibel terjadi jika :

1.  $\beta > 90^\circ + \nu - \alpha$ , di mana  $\beta$  = kemiringan bidang lemah,  $\nu$  = sudut geser dalam dan  $\alpha$  = kemiringan lereng.
  2. Perbedaan maksimal jurus (*strike*) dari kekar (*joint*) dengan jurus lereng (*slope*) adalah  $30^\circ$ .
- d. Longsoran busur (*circular failure*) Longsoran busur umumnya terjadi pada material yang bersifat lepas (*loose material*) seperti material tanah. Sesuai dengan namanya, bidang longsorannya berbentuk busur (Gambar 6). Batuan hancur yang terdapat pada suatu daerah penimbunan dengan dimensi besar akan cenderung longsor dalam bentuk busur lingkaran (Hoek and Bray, 1981). Pada longsoran busur yang terjadi pada daerah timbunan, faktor struktur geologi tidak terlalu berpengaruh pada kestabilan lereng timbunan. Analisis longsoran busur dapat dilakukan dengan menggunakan diagram yang telah



oleh Hoek and Bray (1981). Namun diagram-diagram tersebut dibuat arkan asumsi bahwa material penyusun lereng memiliki karakteristik homogen sepanjang lereng dan longsoran busur yang terbentuk melewati



antara gaya-gaya penahan terhadap gaya-gaya penggerak tanah inilah yang disebut dengan faktor keamanan lereng (FK).

Kemantapan suatu lereng dapat dinyatakan dengan suatu nilai faktor keamanan (FK). Faktor keamanan merupakan perbandingan antara gaya penahan dengan gaya penggerak yang terdapat pada suatu bidang gelincir. Gaya penahan (*resisting force*) merupakan gaya yang menahan terjadinya suatu longsoran, sedangkan gaya penggerak (*driving force*) merupakan gaya yang menyebabkan terjadinya suatu longsoran. Lereng akan mengalami longsoran apabila besarnya gaya penggerak lebih besar dibanding gaya penahan, sebaliknya apabila besarnya gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak maka lereng tersebut akan stabil atau tidak akan mengalami longsoran (Hoek *and* Bray, 1981)

Nilai faktor keamanan secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Nilai  $FK < 1$ , lereng dalam keadaan tidak stabil atau tidak mantap
2. Nilai  $FK = 1$ , lereng dalam keadaan seimbang, namun dalam berpotensi terjadi longsor bila terdapat getaran atau sedikit gangguan
3. Nilai  $FK > 1$ , lereng dalam keadaan stabil atau mantap.

Tabel 1 Nilai Faktor Keamanan untuk Perencanaan Lereng

Nilai Faktor keamanan (FK)	Keadaan Lereng
<1,0	Tidak mantap
1,0-1,2	Kemantapan diragukan
1,2-1,4	Memuaskan untuk pemotongan dan penimbunan
1,4-1,7	Mantap untuk bendungan

Sumber : Sosrasardono dalam Made Astawa Rai (1993)

Tabel 2 Hubungan nilai Faktor Keamanan (FK) dan kemungkinan Kelongsoran Lereng

Nilai Faktor Keamanan	Kemungkinan Longsor
<1,07	Kelongsoran biasa terjadi (lereng labil)
$\leq 1,25$	Kelongsoran pernah terjadi (lereng kritis)



>1,25	Kelongsoran jarang terjadi (lereng <i>relative</i> stabil)
-------	--

Sumber: Bowles (1984)

Tabel 3 Kisaran Faktor keamanan

Faktor Keamanan (FK)	Kerentanan Gerakan Tanah
FK<1,2	Tinggi, gerakan tanah sering terjadi
1,2<FK<1,7	Menengah, gerakan tanah dapat terjadi
1,7<FK<2,0	Rendah, gerakan tanah dapat terjadi
FK>2,0	Sangat rendah, gerakan tanah sangat jarang terjadi

Sumber : ward (1976)

Tabel 4 Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang  
Kriteria dapat diterima

Jenis Lereng	Keparahan Longsor	Kriteria dapat diterima		
		Faktor keamanan statis (min)	Faktor keamanan dinamis (min)	Probabilitas kelongsoran (maks) PoF (FK≤1)
Lereng Tunggal	Rendah	s.d 1,1	Tidak ada	25-50%
Inter-ramp	Rendah	1,15-1,2	1,0	25%
	menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

Sumber: KEPMEN 1827 K/30/MEM/2018.

## 2.7 Pentingnya Analisis Kestabilan Lereng dalam Rekayasa Geoteknik



k berguna untuk kepentingan manusia dalam mencapai keberhasilan unan fisik infrastruktur yang kuat dan aman dari ancaman kerusakan. erubahan roman muka bumi untuk keperluan infrastruktur, selalu

melibatkan kajian keamanan dan antisipasi agar infrastruktur tersebut kuat dan aman. Untuk mendapatkan kondisi infrastruktur tersebut di atas, maka pendekatannya dilakukan melalui geoteknik. Yang dimaksud dengan infrastruktur adalah semua jenis dan konstruksi suatu bangunan (Zakaria, 2003), infrastruktur dapat berupa:

- a. Bangunan yang langsung berhubungan dengan permukaan tanah atau fondasi, baik jenis fondasi dangkal maupun fondasi dalam, untuk berbagai keperluan
- b. Bangunan jembatan (jembatan untuk jalan, jalan raya ataupun jalan kereta api).
- c. Bangunan rumah, gedung, kantor, stasiun, hotel, dll.
- d. Konstruksi bawah permukaan (bangunan lantai dasar, *basement*, tempat perlindungan, *bunker*, maupun bangunan-bangunan pada pertambangan seperti *tunnel* atau pit)
- e. Jalan, jalan raya, dan jalan kereta api
- f. Lereng rekayasa (*slope* hasil pekerjaan *cut & fill* : pemotongan dan timbunan; lereng open pit dalam tambang terbuka)
- g. Dinding penahan (*talud*, *retaining wall*) untuk lereng/jalan, bangunan tepi lereng, dll.
- h. Tanggul (*embankment*)
- i. Saluran irigasi maupun saluran drainase
- j. Bendung (*weir*) maupun bendungan (*dam*)
- k. Terowongan (untuk keperluan teknik sipil secara umum maupun teknik pertambangan).

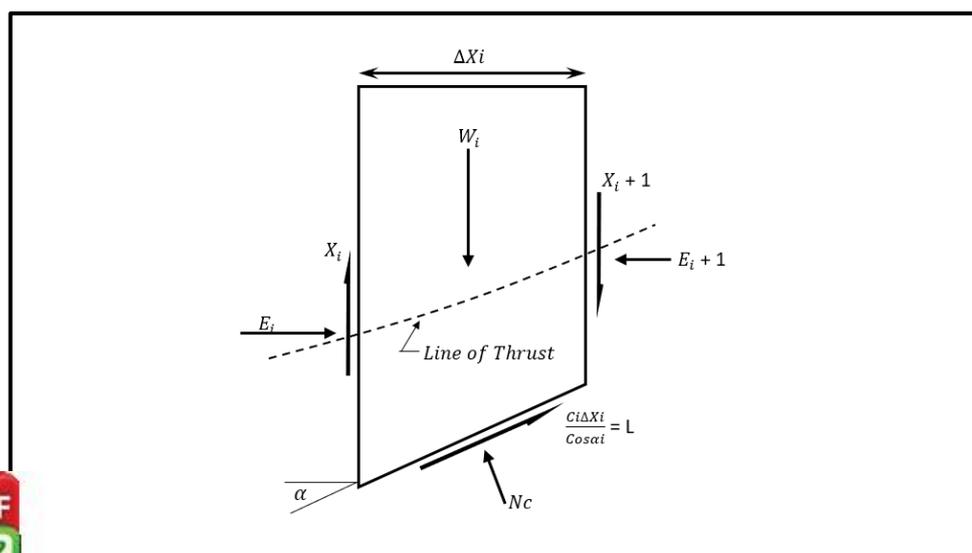
## 2.8 Limit Equilibrium Method (LEM)

Metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*) merupakan metode yang menggunakan kondisi kesetimbangan statik dan mengabaikan hubungan tegangan-regangan pada lereng dimana dalam analisisnya menggunakan perbandingan gaya pendorong dan gaya penahan lereng. Pada analisis angan batas, asumsi geometri dari bentuk bidang runtuh harus diketahui tukan terlebih dahulu lalu menghitung data-data untuk setiap irisan (Arif,



Metode kesetimbangan batas menggunakan geometri representatif, kekuatan geser material dan/atau sambungan, berat unit material, air tanah, dan kondisi pembebanan/dukungan eksternal untuk menentukan faktor keamanan lereng berdasarkan serangkaian asumsi mekanis penyederhanaan (Read and Stacey, 2009). Metode kesetimbangan batas yang digunakan untuk menentukan stabilitas bidang geser, balok dan baji diselesaikan untuk satu benda bebas dan tidak bergantung pada distribusi tegangan normal efektif sepanjang permukaan runtuh. Namun, jika kekuatan Mohr-Coulomb yang dimobilisasi dari massa batuan akan dihitung, distribusi tegangan normal efektif sepanjang permukaan keruntuhan harus diketahui (Read and Stacey, 2009).

Solusi untuk kondisi tersebut biasanya didasarkan pada metode irisan 2D, yang membagi tubuh menjadi  $n$  irisan di atas permukaan bidang gelincir. Permukaan ini sering diasumsikan melingkar, tetapi dapat mengambil bentuk apa pun karena metode irisan dapat dengan mudah mengakomodasi kemiringan kompleks dan geometri potensial permukaan kegagalan, kondisi massa batuan yang bervariasi, dan beban batas eksternal. Namun, masalahnya adalah keadaan statis tidak tentu karena solusinya memiliki lebih banyak yang tidak diketahui daripada persamaan. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan individu dalam metode irisan diilustrasikan pada Gambar 7 (Read and Stacey, 2009).



Gambar 7 Gaya yang bekerja pada potongan bidang gelincir dalam metode irisan (Read and Stacey, 2009)



Persamaan terkait dan tidak diketahui diringkas dalam Tabel 5. Metode analisis yang paling banyak dikenal berdasarkan metode irisan dan kondisi kesetimbangan statis yang dipenuhi oleh masing-masing irisan dirangkum dalam Tabel 6. Rincian tambahan dari metode ini dan metode lainnya dapat diperoleh dari sejumlah sumber yang berbeda, deskripsi dan contoh yang komprehensif dapat dilihat pada Abramson, *et al.* (1996) (Duncan *and* Wright, 2005).

Morgenstern dan Price (1965), Spencer (1967, 1973) dan Sarma (1973) semuanya memenuhi keseimbangan gaya dan momen. Metode solusi irisan yang sepenuhnya memenuhi kesetimbangan telah terbukti memberikan nilai yang sama untuk faktor keamanan. Dalam kasus stabilitas lereng batuan keras, teknik solusi yang lebih disukai adalah teknik Spencer, Morgenstern dan Price, dan Janbu, karena dapat memodelkan permukaan keruntuhan yang tidak beraturan (Read *and* Stacey, 2009).

Formulasi GLE didasarkan pada dua persamaan faktor keamanan terhadap kesetimbangan momen ( $F_m$ ) dan kesetimbangan gaya horizontal ( $F_f$ ) sehingga memungkinkan rentang kondisi gaya normal geser antar irisan. Gaya geser antar irisan dalam metode GLE diselesaikan dengan Persamaan (6) yang diusulkan oleh Morgenstern dan Price (Krahn, 2003).

$$X = E\lambda f(x) \quad (6)$$

Dimana:

$f(x)$  adalah fungsi,

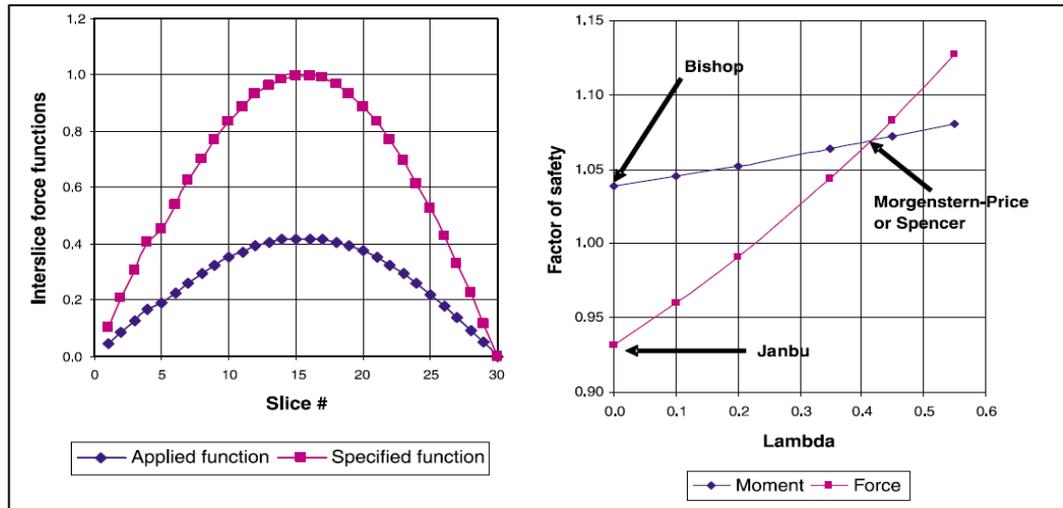
$\lambda$  adalah persentase (dalam desimal) dari fungsi yang digunakan,

$E$  adalah gaya normal irisan, dan

$X$  adalah gaya geser antar irisan.

Gambar 8. (a) menunjukkan fungsi setengah sinus yang khas. Kurva atas pada gambar ini adalah fungsi spesifik yang sebenarnya. Kurva bawah adalah fungsi yang digunakan (Krahn, 2003).





Gambar 8 (a) Fungsi gaya antar irisan setengah sinus (b) hubungan faktor keamanan dan λ (Krahn, 2003)

Faktor GLE dari persamaan keamanan terhadap kesetimbangan momen adalah;

$$F_m = \frac{\sum [c' \beta R + (N - v) R \tan \phi']}{\sum W_x - \sum N f \pm D d} \tag{7}$$

Faktor GLE dari persamaan keamanan terhadap kesetimbangan gaya horizontal adalah (Krahn, 2003);

$$F_x = \frac{\sum [c' \beta \cos \alpha + (N - v \beta) \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha - D \cos \omega} \tag{8}$$

Salah satu variabel kunci dalam kedua persamaan adalah N, gaya normal di dasar setiap irisan. Persamaan ini diperoleh dengan penjumlahan gaya-gaya vertikal. Akibatnya keseimbangan gaya vertikal terpenuhi. Dalam bentuk persamaan, basis normal didefinisikan sebagai persamaan (9) (Krahn, 2003).

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha + v \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \tag{9}$$

Dimana:

F adalah  $F_m$  ketika N disubstitusikan ke dalam faktor keamanan persamaan momen, dan F adalah  $F_f$  ketika N disubstitusikan ke dalam faktor keamanan dari persamaan gaya (Krahn, 2003).

Dasar irisan normal bergantung pada gaya geser antar irisan  $X_R$  dan  $X_L$  di kedua

1. Gaya normal dasar irisan akibatnya berbeda untuk berbagai metode g pada bagaimana masing-masing metode menangani gaya geser antar etode GLE menghitung  $F_m$  dan  $F_f$  untuk rentang nilai λ. Dengan nilai-



nilai yang dihitung ini, plot seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. (b) dapat digambar yang menunjukkan bagaimana  $F_m$  dan  $F_f$  bervariasi dengan  $\lambda$  (Krahn, 2003).

Faktor keamanan Spencer dan Morgenstern–Price (M-P) ditentukan pada titik di mana kedua kurva bersilangan pada Gambar. Pada titik ini, faktor keamanan memenuhi kesetimbangan momen dan gaya. Apakah titik persilangan adalah faktor keamanan Spencer atau M-P tergantung pada fungsi gaya antar irisan. Metode M-P dapat memanfaatkan fungsi umum yang sesuai. Posisi pada kurva gaya tergantung pada prosedur yang digunakan untuk menentukan kemiringan resultan antar irisan. Kemiringan resultan interslice adalah arctan ( $\lambda$ ) ketika  $f(x)$  adalah konstanta 1,0 seperti pada metode Spencer (Krahn, 2003).

Tabel 5 Persamaan dan Ketidaktahuan yang terkait dengan metode irisan

Persamaan	Kondisi	Total Persamaan
n	Kesetimbangan Momen Irisan ( $\sum M = 0$ )	
2n	Kesetimbangan Horizontal dan Vertikal Irisan ( $\sum Fh = 0$ & $\sum Fv = 0$ )	4n
n	Persamaan Mohr-Coulomb	
Tidak diketahui	Variabel	
1	Faktor Keamanan	
n	Gaya Normal, N	
n	Posisi N pada bidang gelincir	
n	Gaya Geser, T	6n-2
n-1	Gaya irisan horizontal, $E_i$ dan $E_{i+1}$	
n-1	Gaya irisan Vertikal, $X_i$ dan $X_{i+1}$	
<b>n-1</b>	<b>Garis Dorongan, Posisi dari <math>E_i</math>, <math>E_{i+1}</math></b>	

Sumber : Read and Stacey (2009)

Tabel 6 Kondisi kesetimbangan statik yang sering digunakan dalam metode irisan

Metode	Gaya		Kesetimbangan Momen	Kesetimbangan Gaya Horizontal	Kemiringan Resultan X/E
	Normal antar irisan (E)	Geser antar irisan (X)			



Fellenius OMS	Tidak	Tidak	Ya	Tidak	Tidak ada
Bishop yang disederhanakan	Ya	Tidak	Ya	Tidak	Horizontal
Janbu yang disederhanakan	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Horizontal
US Corps of Engineers	Ya	Ya	Tidak	Ya	Irisan kemiringan permukaan tanah atas Rata-rata kemiringan permukaan dan kemiringan dasar irisan
Lowe & Karafiath	Ya	Ya	tidak	Ya	
Morgenstern & Price	Ya	Ya	Ya	Ya	Berfariasi
Spencer	Ya	Ya	Ya	Ya	Konstan

Sumber : Krahn (2002)

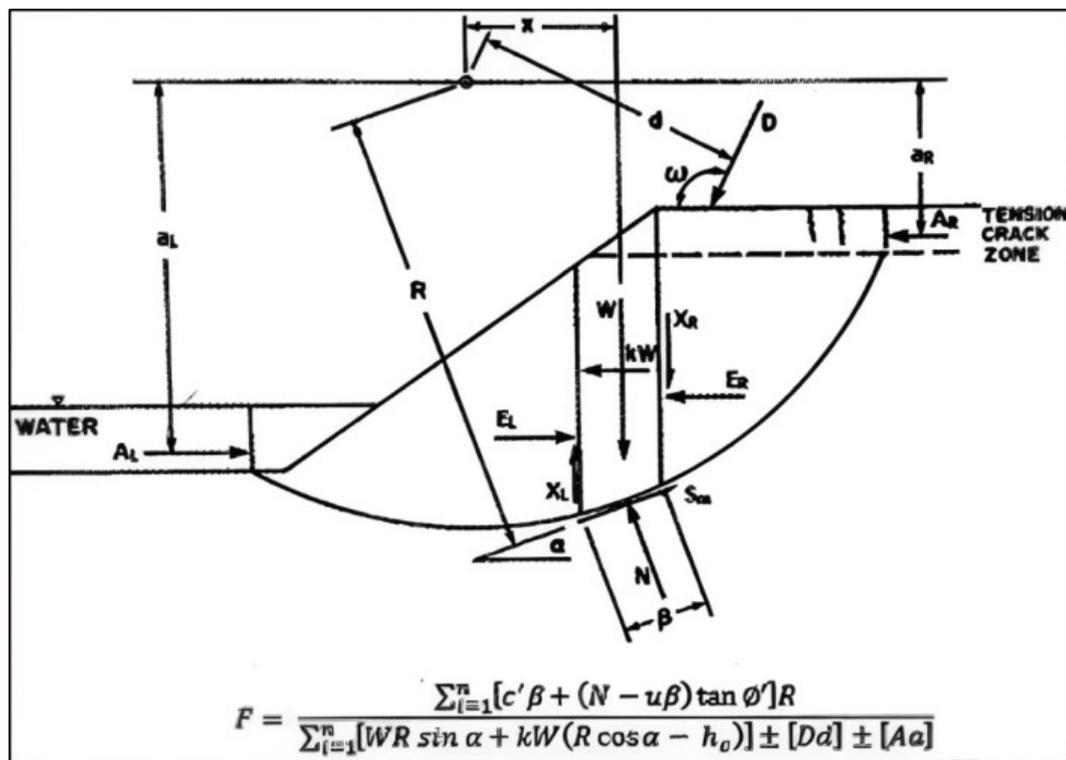
Metode irisan biasa atau *Original Methods of Slice* (OMS) (Fellenius 1927, 1936) mengabaikan semua gaya antar irisan dan tidak memenuhi keseimbangan gaya untuk massa geser atau irisan individu. Metode Bishop yang disederhanakan (Bishop, 1955) dan metode Janbu yang disederhanakan (1954, 1957, 1973) juga hanya solusi kesetimbangan parsial. Keduanya mengasumsikan nol gaya antar irisan, mengurangi jumlah yang tidak diketahui menjadi  $(4n-1)$ , meninggalkan solusi yang terlalu ditentukan. Bishop meninggalkan keseimbangan gaya horizontal yang tidak terpenuhi untuk satu irisan dan Janbu tidak sepenuhnya



ti keseimbangan momen; Janbu menyajikan faktor koreksi,  $f_0$ , untuk  $\alpha$  dan kekurangan ini. Bishop dan Janbu juga menguraikan metode yang akurat yang memungkinkan untuk memenuhi kesetimbangan dengan lebih

baik. Metode-metode tersebut juga menunjukkan bahwa posisi garis dorong adalah tambahan yang tidak diketahui. Dalam analisis selanjutnya, keseimbangan dikatakan terpenuhi secara akurat jika asumsi memilih garis dorong yang benar (Read and Stacey, 2009).

Metode Morgenstern-Price adalah salah satu metode analisis yang berdasarkan prinsip kesetimbangan batas (Morgenstern & Price, 1965 dalam Takwin dkk., 2017), proses analisisnya merupakan hasil dari kesetimbangan setiap gaya-gaya normal dan momen yang bekerja pada tiap irisan dari bidang longsor lereng tersebut. Kondisi kesetimbangan yang dipenuhi yaitu kesetimbangan gaya vertikal dan horizontal, serta kesetimbangan momen (Krahn, 2003).



Gambar 9 Skema analisis kesetimbangan batas (Morgenstern & Price, 1965 dalam Takwin dkk., 2017)

Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan bidang kelongsoran ditunjukkan pada Gambar 9, persamaan yang berlaku pada gambar tersebut adalah :



$$\frac{\gamma n - (x_R - x_L) - \frac{1}{f} (C_r (\sin \alpha - \mu l \tan \phi' \sin \alpha))}{\cos \alpha (l + \tan \alpha \frac{\tan \phi}{F})} \tag{10}$$

Dimana:

$p$  = gaya normal

$c'$  = kohesi (jika dianalisa dalam kondisi undrained diambil  $c_u$  jika dalam kondisi drained diambil nilai kohesi efektif)

$W_n$  = gaya akibat beban tanah ke- $n$

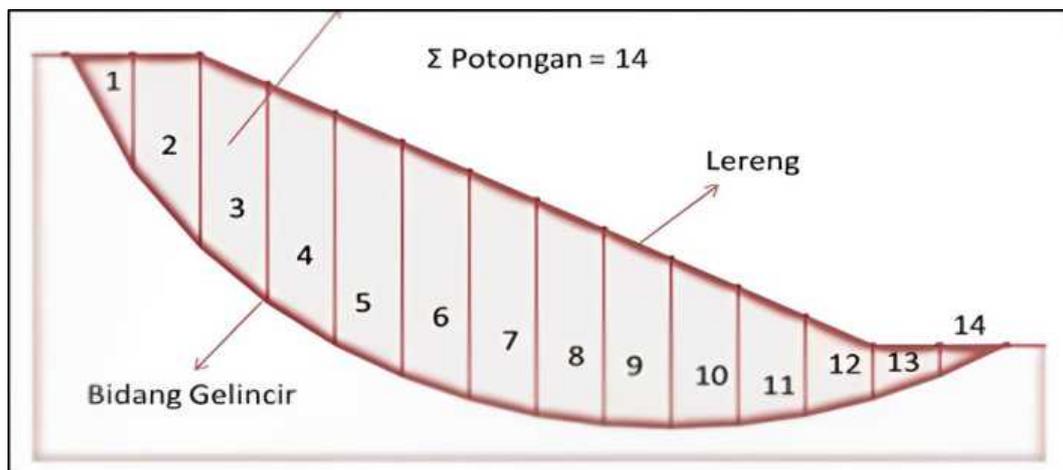
$\alpha$  = sudut antara titik tengah bidang irisan dengan titik pusat bidang longsor

$\phi$  = sudut geser tanah (jika dalam kondisi undrained nilai sudut geser = 0)

$\mu$  = tekanan air pori

$x_L, x_R$  = gaya geser yang bekerja di tepi irisan.

Keunggulan dari digunakannya metode Morgenstern-Price untuk analisis stabilitas lereng adalah variasi dari gaya antar potongan dapat dimodelkan. Perhitungan *safety factor* pada dasarnya adalah perhitungan jumlah antar potongan model lereng yang dibuat. Lereng yang dibuat menjadi potongan-potongan kecil untuk memudahkan perhitungan.



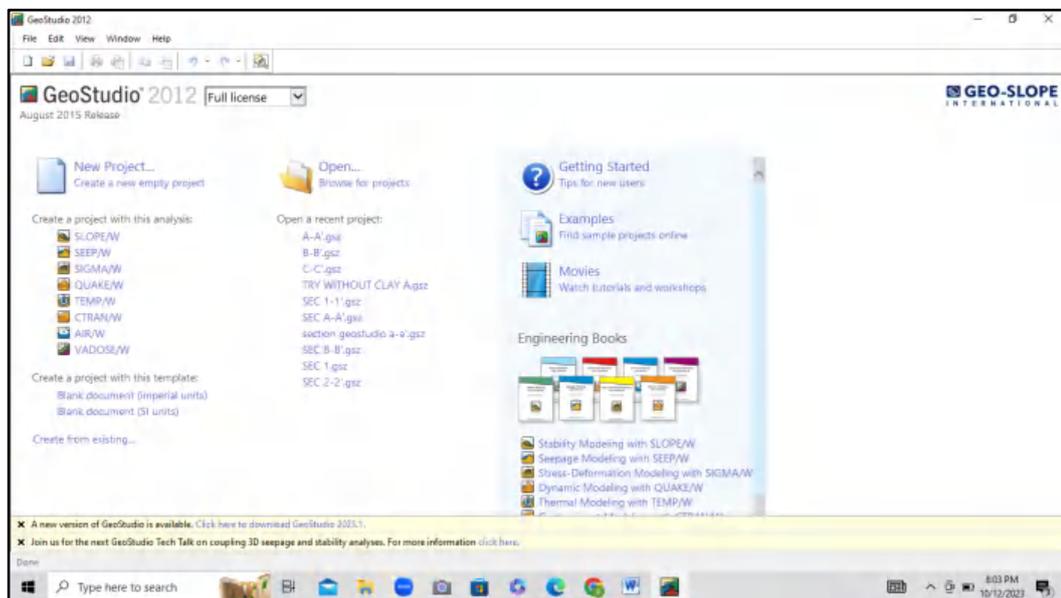
Gambar 10 Lereng dibagi menjadi potongan-potongan kecil (Krahn, 2004)

## 2.9 Perangkat Lunak Geostudio Slope/W

*GeoStudio Office* adalah sebuah paket aplikasi untuk pemodelan geoteknik dan geo-lingkungan. *Software* ini meliputi SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, dan CTRAN/W yang sifatnya terintegrasi sehingga cukup unik dan memberikan fleksibilitas untuk digunakan baik di lingkungan akademisi maupun profesional dalam menyelesaikan berbagai macam



permasalahan geoteknik dan geo-lingkungan seperti tanah longsor, pembangunan bendungan, penambangan dan lain-lainnya. Tampilan dari perangkat Lunak Geostudio dapat dilihat pada Gambar 11 di bawah ini.



Gambar 11 Tampilan *software* Geostudio Slope/W 2012

SLOPE/W merupakan produk perangkat lunak untuk menghitung faktor keamanan tanah dan kemiringan batuan. SLOPE/W dapat dilakukan analisis masalah baik secara sederhana maupun kompleks dengan menggunakan salah satu dari delapan metode kesetimbangan batas untuk berbagai permukaan yang miring, kondisi tekan pori air, sifat tanah dan beban terkonsentrasi. Selain itu dapat juga digunakan elemen tekan pori air yang terbatas, tegangan statis atau tegangan dinamik pada analisis kestabilan lereng serta dapat juga dikombinasikan dengan analisis probabilistik.

*Software* Geostudio SLOPE/W 2012 sudah banyak diaplikasikan pada penelitian dan analisis kestabilan lereng, khususnya dengan menggunakan SLOPE/W dan SEEP/W. Pada penelitian ini analisis kestabilan lereng menggunakan SLOPE/W dengan memasukkan data indeks properti tanah dan parameter kuat geser tanah yang diperoleh dari uji triaksial (Hia, 2019).



merupakan genangan air, air tanah mengalir sampai ujung lereng dan daerah retakan berkembang pada puncak akibat gaya tegangan pada lereng.

2. Slope/W dapat menghitung faktor keamanan dari lereng dengan beban luar dan perkuatan lereng dengan anker atau perkuatan dengan *geo-textile*.
3. Kondisi tekanan air pori dalam tanah yang kompleks, kondisi air pori dapat dibedakan dalam beberapa cara, dapat semudah seperti piezometrik atau analisa elemen batas dari tekanan pori. Tekanan air pori pada tiap dasar potongan lereng ditemukan dari data titik cara interpolasi *spline*.
4. Menganalisa stabilitas dengan tekanan batas elemen. Memasukkan data tekanan lereng dari analisa batas stabilitas elemen Sigma/W ke Slope/W untuk mempermudah. Keuntungan lain yaitu dapat menghitung faktor keamanan tiap potongan, sebaik perhitungan faktor keamanan seluruh longsor. Pada dasarnya Slope/W terdiri dari tiga bagian pengerjaan (langkah kerja), yaitu:
  - 1) *Define* : pendefinisian model
  - 2) *Slove* : nilai dari hasil perhitungan, dengan menekan start
  - 3) *Countur* : memperlihatkan gambaran hasil perhitungan

## 2.10 Perangkat Lunak Rocscience Slide

Rocscience Slide adalah salah satu *software* geoteknik yang mempunyai spesialisasi sebagai *software* perhitungan kestabilan lereng. Pada dasarnya Rocscience Slide adalah salah satu program di dalam paket perhitungan geoteknik Rocscience yang terdiri dari Swedge, Roclab, Phase2, RocPlane, Unwedge, dan RocData.

Secara umum langkah analisis kestabilan lereng dengan Rocscience Slide adalah pemodelan, identifikasi metode dan parameter perhitungan, identifikasi material, penentuan bidang gelincir, *running*/kalkulasi, dan interpretasi nilai FoS dengan *software* komplemen Slide bernama Slide Interpret.



alisis kestabilan lereng mempunyai tingkat kerumitan yang cukup tinggi punyai banyak variabel. Selain itu akurasi kestabilan lereng juga sangat ihi oleh akurasi parameter yang dimasukkan terkait kondisi sebenarnya.

Perhitungan detail dan unsur ketdakpastiannya cukup besar (diwakili oleh parameter *probaility*) sehingga jika perhitungan dilakukan manual akan memakan waktu yang cukup lama dan akurasinya pun tidak maksimal. Oleh karena itu analisis kestabilan lereng semakin banyak digunakan di dunia industri maupun pendidikan. Tetapi yang menjadi syarat utama seseorang sebelum menggunakan *software* adalah pemahaman terhadap konsep perhitungan tersebut.

