

# **SKRIPSI**

## **ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA BLOK D3W PIT SF DENGAN METODE MORGENSTERN-PRICE MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK *ROCSIENCE SLIDE 6.0***

**Disusun dan diajukan oleh**

**VIRGILIO TANGKEALLO**

**D621 15 503**



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2022**

## LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA BLOK D3W PIT SF DENGAN METODE MORGENSTERN-PRICE MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK *ROCSIENCE SLIDE 6.0*

Disusun dan diajukan oleh

**VIRGILIO TANGKEALLO**

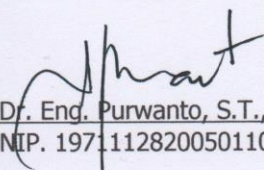
**D62115503**


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 Agustus 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

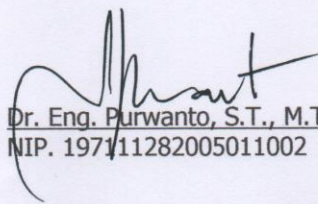
Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

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

  
Nirmana Fiqra Qaidahiyani, S.T., M.T.  
NIP. 199304222019032018

Ketua Program Studi,

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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Virgilio Tangkeallo  
NIM : D62115503  
Program Studi : Teknik Pertambangan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA BLOK D3W PIT SF DENGAN METODE MORGENSTERN-PRICE MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK *ROCSIENCE SLIDE 6.0***

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.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 19 Agustus 2022

Yang menyatakan



Virgilio Tangkeallo

## ABSTRAK

PT Arga Morini Indah merupakan perusahaan pertambangan bijih nikel yang menerapkan sistem tambang terbuka dan memiliki tiga blok area penambangan, yaitu Blok D1W, D2W, dan D3W. Berdasarkan data yang diperoleh, longsor pernah terjadi di sekitar area Blok D3W Pit SF dan menjadi rekomendasi tempat dilakukannya penelitian. Kegiatan penambangan yang berlangsung pada Blok D3W secara terus-menerus menjadi salah satu penyebab akan terjadinya penggelinciran atau kelongsoran pada lereng. Untuk mencegah terjadinya kelongsoran pada lereng ini, perlu dilakukan analisis kestabilan lereng dan juga rekomendasi teknis untuk stabilisasi lereng pada Blok D3W Pit SF. Pengolahan data berupa data litologi tanah dan data geometri lereng dibantu dengan menggunakan perangkat lunak *Surpac* 6.3.2 untuk pembuatan penampang dan data properti material tanah dibantu dengan *Rocsience Slide* 6.0 untuk analisis kestabilan lereng. Analisis kestabilan lereng menggunakan metode kesetimbangan batas (Morgenstern-Price) pada Blok D3W Pit SF. Nilai faktor keamanan lereng pada tiap penampang antara lain penampang A-A' sebesar 1,035, penampang B-B' sebesar 0,856, penampang C-C' sebesar 0,828, dan penampang D-D' sebesar 0,768. Berdasarkan hasil pemodelan ulang geometri lereng dengan mengubah sudut kemiringan lereng pada tiap penampang, maka didapatkan hasil nilai faktor keamanan lereng yang aman, yaitu penampang A-A' sebesar 1,253 dengan sudut kemiringan lereng keseluruhan 29°, penampang B-B' sebesar 1,296 dengan sudut kemiringan lereng keseluruhan 21°, penampang C-C' sebesar 1,266 dengan sudut kemiringan lereng keseluruhan 20°, penampang D-D' sebesar 1,292 dengan sudut kemiringan lereng keseluruhan 21°.

Kata kunci: Kestabilan lereng, geometri lereng, faktor keamanan, Morgenstern-Price, rekomendasi stabilitas lereng.

## **ABSTRACT**

*PT Arga Morini Indah is a nickel ore mining company that implements an open pit mining system and has three mining blocks, namely Blocks D1W, D2W, and D3W. Based on the data obtained, avalanches have occurred around the D3W Pit SF Block area and have become a recommendation for a research location. Mining activities that take place in the D3W Block are continuously one of the causes of slipping or landslides on the slopes. To prevent landslides on this slope, it is necessary to carry out slope stability analysis and also technical recommendations for slope stabilization in Block D3W Pit SF. Data processing in the form of soil lithology data and slope geometry data was assisted by using Surpac 6.3.2 software for cross-sectional fabrication and soil material property data assisted by Rocscience Slide 6.0 for slope stability analysis. Slope stability analysis using boundary equilibrium method (Morgenstern-Price) in Block D3W Pit SF. The value of the slope safety factor at each cross section includes the A-A' cross-section of 1.035, the B-B' cross-section of 0.856, the C-C' cross-section of 0.828, and the D-D' cross-section of 0.768. Based on the results of the remodelling of the slope geometry by changing the angle of the slope at each cross section, it is obtained that the safety factor of the slope is safe, namely the A-A' cross-section of 1.253 with an overall slope angle of 29°, the B-B' cross-section of 1.296 with a slope angle the overall slope is 21°, the cross section of C-C' is 1,266 with the overall slope angle of 20°, the section D-D' is 1,292 with the overall slope angle of 21°.*

*Keywords: Slope stability, slope geometry, safety factor, Morgenstern-Price, recommendation for slope stability.*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan berkahnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir berjudul "Analisis Kestabilan Lereng Pada Blok D3W Pit SF dengan Metode Morgenstern-Price Menggunakan Perangkat Lunak *Rocscience Slide 6.0*".

Penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis menyampaikan hormat dan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan PT Arga Morini Indah dan seluruh jajarannya yang telah menerima dan membantu penulis dalam melakukan penelitian tugas akhir.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T. selaku pembimbing I sekaligus Kepala Departemen Teknik Pertambangan, Ibu Nirmana Fiqra Qaidahiyani, S.T., M.T selaku pembimbing II sekaligus Kepala Penjamin Mutu Departemen Teknik Pertambangan yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Rizki Amalia, S.T., M.T dan Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan dalam penyusunan tugas akhir ini.

Keluarga penulis khususnya kepada kedua orang tua atas dukungan, doa, nasihat dan arahan yang diberikan selama melakukan studi hingga tahap akhir pengerjaan tugas akhir. Kepada teman-teman seperjuangan Teknik Pertambangan khususnya kepada STABILITY 2015 atas dukungan, bantuan dan kerja samanya dalam perkuliahan hingga pengerjaan tugas akhir. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada setiap orang dan kelompok yang tidak sempat disebutkan namanya yang telah banyak membantu penulis hingga selesainya skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik senantiasa penulis harapkan guna penyempurnaan tugas akhir dalam penyusunan berikutnya. Semoga tugas akhir ini bermanfaat dan menjadi bekal pengetahuan khususnya di bidang ilmu Teknik pertambangan baik itu untuk penulis sendiri maupun pembaca. Sekian dan terima kasih.

Makassar, 19 Agustus 2022

Penulis

# DAFTAR ISI

	Halaman
<b>LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI</b> .....	ii
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian.....	3
1.6 Lokasi Penelitian.....	5
<b>BAB II KESTABILAN LERENG</b> .....	7
2.1 Definisi dan Jenis-Jenis lereng .....	7
2.2 Prinsip Dasar Kemantapan Lereng.....	8
2.3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kestabilan Lereng .....	12
2.4 Klasifikasi Gerakan Massa Tanah.....	18
2.5 Metode Analisis Kestabilan Lereng.....	25
2.6 Stabilisasi Lereng.....	31
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	37
3.1 Pengumpulan Data .....	37
3.2 Pengolahan Data .....	39



3.3	Analisis Data .....	41
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	46
<b>BAB IV ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA BLOK D3W PIT SF DENGAN</b>		
<b>METODE MORGENSTERN-PRICE .....</b>		<b>48</b>
4.1	Analisis Kestabilan Lereng .....	48
4.2	Rekomendasi Lereng.....	52
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>58</b>
5.1	Kesimpulan .....	58
5.2	Saran .....	58
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>60</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>62</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Peta lokasi penelitian area penambangan Blok D3W Pit SF PT Arga Morini Indah .....	6
2.1 Faktor keamanan sederhana oleh Romana (1993).....	11
2.2 Longsor bidang (Hoek and Bray,1981).....	20
2.3 Longsor baji (Hoek and Bray, 1981) .....	21
2.4 Longsor guling (Hoek and Bray, 1981).....	21
2.5 Longsor busur (Hoek and Bray, 1981).....	22
2.6 Model lereng dengan bidang runtuh yang berbentuk sebuah busur lingkaran (Arief, 2008).....	27
2.7 Model lereng dengan bidang runtuh yang berupa gabungan dari sebuah busur lingkaran dengan segmen garis lurus (Arief, 2008).....	27
2.8 Model lereng dengan bidang runtuh yang berupa gabungan dari beberapa segmen garis lurus (multilinier) (Arief, 2008) .....	28
2.9 Stabilisasi Lereng. (Sumber: Dr. L. D. Wesley, "Mekanika Tanah", 2012).	32
2.10 Potongan melintang lereng dengan perkuatan soil nailing .....	36
3.1a Topografi lokasi penelitian.....	39
3.1b Garis sayatan penampang pada pada lokasi penelitian .....	40
3.2 Contoh penampang pada lokasi penelitian .....	40
3.3 Hasil import penampang pada perangkat lunak Rocscience Slide 6.0 .....	42
3.4 Menentukan jenis metode analisis .....	42
3.5 Memasukkan nilai properti material pada tiap lapisan penampang .....	43
3.6 penentuan surface grid .....	44

3.7	Proses komputasi .....	45
3.8	Tampilan interpretasi.....	45
3.9	Diagram alir penelitian .....	47
4.1	Faktor keamanan penampang A-A' .....	49
4.2	Faktor keamanan penampang B-B' .....	49
4.3	Faktor keamanan penampang C-C' .....	50
4.4	Faktor keamanan penampang D-D' .....	51
4.5	Desain lereng stabil pada penampang A-A' .....	53
4.6	Desain lereng stabil pada penampang B-B' .....	54
4.7	Desain lereng stabil pada penampang C-C' .....	55
4.8	Desain lereng stabil pada penampang D-D' .....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Geometri lereng pada tiap penampang .....	37
3.2 Data nilai properti material pada tiap lapisan.....	39
4.1 Nilai geometri lereng tunggal dan keseluruhan beserta nilai faktor keamanan pada tiap penampang.....	51
4.2 Hasil perhitungan nilai faktor keamanan lereng keseluruhan penampang A-A' ..	53
4.3 Hasil perhitungan nilai faktor keamanan lereng keseluruhan penampang B-B' ..	54
4.4 Hasil perhitungan nilai faktor keamanan lereng keseluruhan penampang C-C' ..	55
4.5 Hasil perhitungan nilai faktor keamanan lereng keseluruhan penampang D-D' .	56
4.6 Rekapitulasi nilai geometri tunggal dan keseluruhan beserta nilai faktor keamanan (FK) pada tiap penampang.....	57

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Lampiran A Peta IUP PT Arga Morini Indah .....	63
Lampiran B Data litologi tanah.....	65
Lampiran C Hasil perhitungan rekomendasi lereng.....	77
Lampiran D Kartu konsultasi tugas akhir. ....	88

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Geologi teknik (geoteknik) sebagai aplikasi bidang rekayasa merupakan kajian ilmu yang menganalisis pengaruh faktor-faktor geologi terhadap lokasi, desain, konstruksi pelaksanaan pembangunan dan pemeliharaan. Dalam kegiatan operasi penambangan, masalah geoteknik yang seringkali dihadapi adalah kestabilan lereng. Permasalahan ini kerap ditemukan pada lokasi-lokasi penggalian, tempat penimbunan *overburden* dan bahan buangan (*tailing, material reject*) serta jalan tambang.

Kestabilan lereng merupakan salah satu faktor yang penting untuk diperhatikan pada kegiatan penambangan, khususnya penambangan dengan sistem tambang terbuka, karena kestabilan lereng menyangkut masalah keselamatan pekerja, keamanan peralatan, serta kelancaran produksi dari tambang tersebut. Pada tambang terbuka, kondisi lereng yang stabil akan menjamin keamanan dan kelancaran kegiatan penambangan. Salah satu tahapan kegiatan penambangan, yaitu penggalian pada lereng, dapat menyebabkan perubahan gaya-gaya. Akibat dari perubahan tersebut tentunya akan memengaruhi kestabilan lereng sehingga dapat menimbulkan potensi terjadinya kelongsoran. Kestabilan lereng pada tanah lebih dipengaruhi oleh bidang-bidang lemah yang disebut bidang diskontinu, geometri lereng, sifat fisik dan mekanis tanah, serta kondisi air tanah (Zufialdi, 2009).

PT Arga Morini Indah merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan bijih nikel yang menerapkan sistem tambang terbuka. Dalam peningkatan produksi, PT Arga Morini Indah harus memperluas dan memperdalam area penambangan. Semakin lebar dan dalam area penambangan, maka semakin besar risiko

yang akan muncul akibat semakin kecilnya angka keamanan pada lereng tersebut. PT Arga Morini Indah memiliki tiga Blok area penambangan, yaitu Blok D1W, D2W, dan D3W. Pada Blok D1W aktivitas penambangan sudah tidak dilakukan lagi (*mined out*), sementara untuk dua blok lainnya masih dilakukan kegiatan penambangan. Pada Blok D3W, kenampakan lerengnya cenderung lebih curam dibandingkan dengan Blok D2W. Berdasarkan data yang diperoleh, longsor pernah terjadi di sekitar area Blok D3W Pit SF dan menjadi rekomendasi tempat dilakukannya penelitian.

Kegiatan penambangan yang berlangsung pada Blok D3W Pit SF secara terus-menerus menjadi salah satu penyebab akan terjadinya penggelinciran atau kelongsoran pada lereng. Untuk mencegah terjadinya kelongsoran pada lereng ini, maka perlu dilakukan analisis kestabilan lereng. Stabilitas lereng dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi keamanan lereng dan mencegah kelongsoran. Kestabilan suatu lereng dapat diketahui dengan mengevaluasi faktor keamanan sehingga dapat diberikan rekomendasi untuk stabilitas lereng pada Blok D3W Pit SF.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Kelongsoran rawan terjadi pada lereng Blok D3W Pit SF sehingga perlu dilakukan analisis kestabilan lereng;
2. Diperlukannya suatu rekomendasi teknis untuk stabilisasi lereng pada Blok D3W Pit SF.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kestabilan lereng pada Blok D3W Pit SF;

2. Memberikan rekomendasi untuk stabilisasi lereng pada Blok D3W Pit SF.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Sebagai rekomendasi stabilisasi lereng pada Blok D3W Pit SF berdasarkan nilai faktor keamanan lereng;
2. Sebagai referensi terkait penelitian analisis kestabilan lereng dengan metode Morgenstern-Price.

#### **1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan mengaplikasikan teori-teori untuk menyelesaikan suatu permasalahan. Adapun tahapan penelitian yang dilakukan pada PT Arga Morini Indah, yaitu sebagai berikut.

1. Persiapan

Kegiatan ini merupakan tahapan awal sebelum kegiatan lapangan yang meliputi sebagai berikut.

- a. Perumusan Masalah

Perumusan masalah bertujuan untuk memberikan gambaran umum dan batasan terhadap kegiatan penelitian yang akan dilakukan.

- b. Administrasi

pengurusan administrasi merupakan pengurusan segala bentuk pemenuhan persyaratan dan perizinan penelitian.

- c. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengkaji literatur yang berkaitan dengan rumusan masalah yang telah ditentukan.



## 2. Orientasi Lapangan

Tahapan ini dijadwalkan oleh perusahaan yang meliputi kegiatan pengenalan lingkup kerja, tempat kerja, dan lingkungan sekitar. Orientasi ini dilakukan untuk pengenalan terhadap lingkungan kerja dan lokasi operasi penambangan PT Arga Morini Indah.

## 3. Pengumpulan Data

Data-data yang dikumpulkan dan menjadi bahan dalam penelitian ini merupakan data primer yang didapatkan secara langsung dari PT Arga Morini Indah, pada 21 Desember 2020–5 Februari 2021. Data-data yang dikumpulkan terdiri atas:

- a. data geologi yang meliputi data litologi tanah,
- b. data geometri lereng,
- c. data properti tanah.

## 4. Pengolahan Data dan Analisis Data

Pengolahan data dilakukan untuk menghitung dan mengkaji data-data yang ada untuk kemudian dapat dianalisis. Pengolahan pada penelitian ini dibantu dengan menggunakan perangkat lunak *Surpac* 6.3.2 dan *Rocscience Slide* 6.0. Setelah melakukan pengolahan data, data tersebut dianalisis dengan menggunakan metode Morgenstern-Price. Hasil dari pengolahan dan analisis data digunakan sebagai rekomendasi lereng yang optimal pada Blok D3W Pit SF.

## 5. Penyusunan Laporan

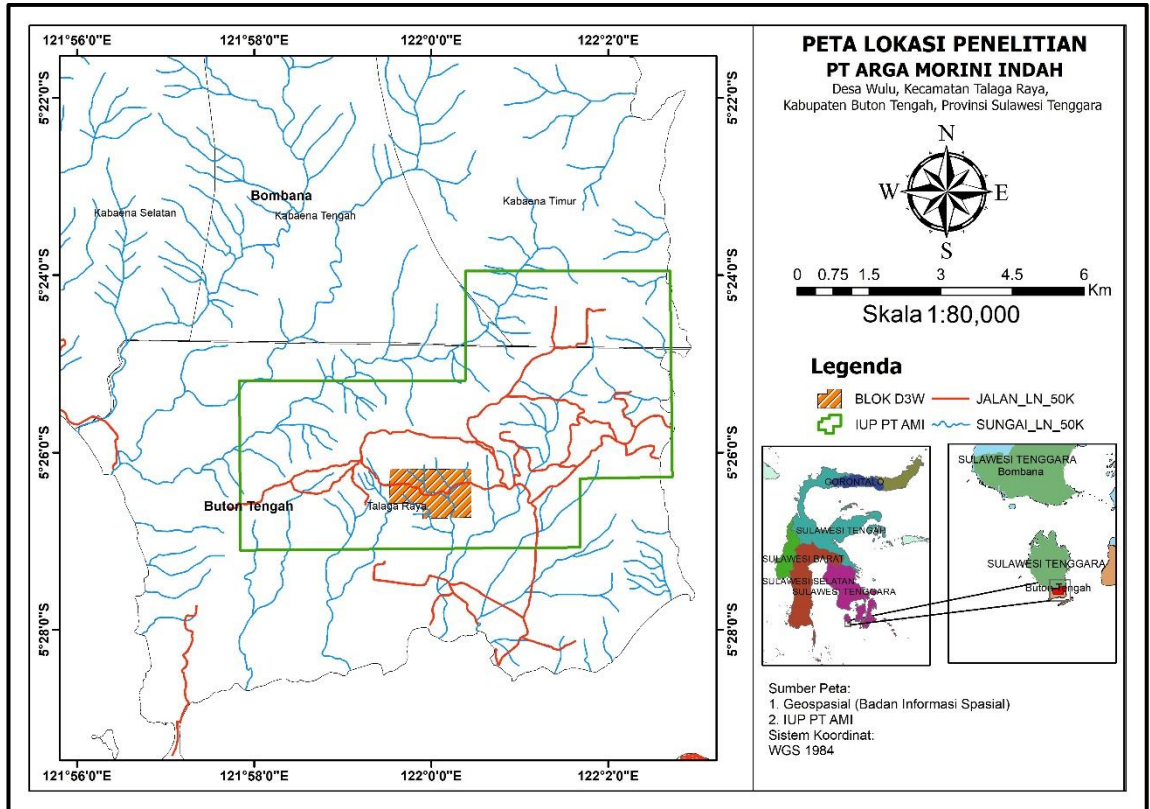
Tahapan ini merupakan tahapan akhir dalam rangkaian kegiatan penelitian. Hasil pengolahan dan analisis data dituangkan dalam bentuk laporan hasil penelitian (skripsi) sesuai dengan format dan kaidah penulisan tugas akhir yang telah ditetapkan oleh Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

## 6. Seminar dan Penyerahan Laporan

Hasil akhir dari penelitian ini akan dipresentasikan dalam bentuk seminar hasil dan ujian sidang Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin setelah melalui proses penyempurnaan dan masukan-masukan yang diperoleh dari dosen pembimbing dan penguji selama penyusunan laporan. Laporan akhir kemudian diserahkan kepada Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin untuk dijadikan tambahan literatur bagi seluruh *civitas academica*.

### **1.6 Lokasi Penelitian**

Lokasi penelitian ini dilakukan di wilayah penambangan PT Arga Morini Indah yang secara administratif terletak pada Pulau Kabaena tepatnya di Desa Wulu, Kecamatan Talaga Raya, Kabupaten Buton Tengah, Provinsi Sulawesi Tenggara. Perjalanan ditempuh dengan menggunakan jalur udara dari Kota Makassar ke Kota Bau-Bau dengan waktu tempuh 1 jam, dilanjutkan dengan perjalanan laut dari Kota Bau-Bau ke Kecamatan Talaga Raya, Kabupaten Buton Tengah, dengan waktu tempuh 5 jam, kemudian perjalanan dari Kecamatan Talaga Raya ke Desa Wulu ditempuh menggunakan jalur laut dengan waktu tempuh 30 menit, dan perjalanan untuk menuju lokasi pertambangan dari Desa Wulu melalui jalur darat dengan waktu tempuh 15 menit. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Peta lokasi penelitian area penambangan Blok D3W Pit SF PT Arga Morini Indah

## **BAB II**

### **KESTABILAN LERENG**

#### **2.1 Definisi dan Jenis-Jenis lereng**

Permukaan tanah tidak selalu membentuk bidang datar atau mempunyai perbedaan elevasi antara tempat yang satu dengan yang lain sehingga membentuk suatu lereng (*slope*) (Fareka, *et al.*, 2020).

Lereng merupakan suatu kondisi topografi yang banyak dijumpai pada berbagai pekerjaan konstruksi sipil maupun penambangan. Lereng adalah suatu bidang di permukaan tanah yang menghubungkan permukaan tanah yang lebih tinggi dengan permukaan yang lebih rendah. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan oleh manusia dengan tujuan tertentu.

Dalam bidang teknik sipil ada tiga jenis lereng yaitu:

1. Lereng alam, lereng yang terbentuk karena proses-proses alam. Material yang membentuk lereng memiliki kecenderungan tergelincir akibat beratnya sendiri dan gaya-gaya luar yang ditahan oleh kuat geser tanah dari material tersebut. Gangguan terhadap kestabilan terjadi bila tahanan tanah geser tanah tidak dapat mengimbangi gaya-gaya yang menyebabkan gelincir pada bidang longsor.
2. Lereng yang dibuat dengan tanah asli adalah lereng yang dibuat dengan memotong tanah asli itu sendiri. Pemotongan ini dilakukan untuk membuat suatu lereng dengan kemiringan tertentu yang cukup aman. Kestabilan ini ditentukan oleh kondisi geologi, sifat teknis tanah, tekanan air akibat rembesan dan cara pemotongan.

3. Lereng yang dibuat dari tanah yang dipadatkan, sebagai tanggul untuk jalan atau bendungan tanah. Sifat teknis tanah timbunan yang dipengaruhi oleh cara penimbunan dan derajat kepadatan tanah.

Ketiga jenis lereng ini kemungkinan untuk terjadi longsor selalu ada, karena dalam setiap kasus tanah yang tidak rata akan menyebabkan komponen gravitasi dari berat memiliki kecenderungan untuk menggerakkan massa tanah dari elevasi lebih tinggi ke elevasi yang lebih rendah. Pada tempat dimana dua permukaan tanah yang berbeda ketinggiannya, maka akan ada gaya-gaya yang bekerja mendorong sehingga tanah yang lebih tinggi kedudukannya cenderung bergerak ke arah bawah.

Disamping gaya yang mendorong ke bawah terdapat pula gaya-gaya yang bekerja menahan/ melawan sehingga kedudukan tanah tersebut tetap stabil. Gaya-gaya pendorong berupa gaya berat, gaya tiris/ muatan dan gaya-gaya inilah yang menyebabkan kelongsoran. Gaya-gaya penahan berupa gaya gesekan/ geseran, lekatan (dari kohesi), kekuatan geser tanah. Jika gaya-gaya pendorong lebih besar dari gaya-gaya penahan, maka tanah akan mulai runtuh dan akhirnya terjadi keruntuhan tanah sepanjang bidang yang menerus dan massa tanah diatas bidang yang menerus ini akan longsor. Peristiwa ini disebut sebagai keruntuhan lereng dan bidang yang menerus ini disebut bidang gelincir (Pangemanan, 2014).

## **2.2 Prinsip Dasar Kemantapan Lereng**

Kestabilan suatu lereng sangat berhubungan dengan keselamatan manusia, keamanan peralatan dan kelancaran produksi suatu penambangan. Kondisi lereng yang tidak stabil akan mengancam keselamatan pekerja, mengakibatkan kerusakan peralatan, mengurangi intensitas produksi serta menimbulkan dampak negatif pada lingkungan baik pada saat dilakukannya penambangan maupun setelah pelaksanaan penambangan (Kusuma dan Wiyono, 2015).

Kestabilan lereng, baik lereng alami maupun lereng buatan (buatan manusia) serta lereng timbunan, dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat dinyatakan secara sederhana sebagai gaya-gaya penahan dan gaya-gaya penggerak yang bertanggung jawab terhadap kestabilan lereng tersebut. Pada kondisi gaya penahan (terhadap longsoran) lebih besar dari gaya penggerak, maka lereng tersebut akan berada dalam kondisi yang stabil. Namun, apabila gaya penahan lebih kecil dari gaya penggerak, maka lereng tersebut tidak stabil dan akan terjadi longsoran. Sebenarnya, longsoran merupakan suatu proses alami yang terjadi untuk mendapatkan kondisi kestabilan lereng yang baru (keseimbangan baru), dimana gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak (Arif, 2016).

Apabila kestabilan dari suatu lereng dalam operasi penambangan meragukan maka Analisa terhadap kestabilannya harus dinilai berdasarkan dari struktur geologi, kondisi air tanah dan faktor pengontrol lainnya yang terdapat pada suatu lereng. Kestabilan lereng penambangan dipengaruhi oleh geometri lereng, struktur batuan, sifat fisik dan mekanik batuan serta gaya luar yang bekerja pada lereng tersebut. Suatu cara yang umum untuk menyatakan kestabilan suatu lereng penambangan adalah faktor keamanan. Faktor ini merupakan perbandingan antara gaya penahan yang membuat lereng tetap stabil, dengan gaya penggerak yang menyebabkan terjadinya longsor. Biasanya setiap tanah pada lereng yang mengalami kelongsoran akan bergerak pada bidang tertentu. Bidang tersebut disebut bidang gelincir dan bidang geser (Yadi, 2015).

Tanah longsor atau longsoran merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan pergerakan massa tanah atau batuan yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Dimana gerakan ini sangat berbahaya sehingga dapat menimbulkan bencana alam. Oleh karena itu tanah longsor merupakan masalah yang sangat penting dan selalu menjadi perhatian utama Insinyur geoteknik dan ahli geologi teknik di seluruh dunia (Das, 1994).

Lereng pada dasarnya merupakan struktur geoteknik yang dapat terjadi oleh alam maupun buatan manusia. Lereng merupakan struktur yang terbuat dari material geoteknik berupa tanah dan batuan. Dalam analisis kestabilan lereng harus mengikuti ketentuan-ketentuan yang didasarkan pada rekayasa geoteknik yang umumnya dipelajari dalam bidang mekanika tanah dan batuan. Namun demikian, mengingat material geoteknik pada umumnya lebih mempunyai tahanan yang lemah terhadap gesernya, maka penerapan ilmu mekanika tanah lebih banyak dalam melakukan analisis dan rekayasa di lereng (Hakam, 2004).

Lereng yang mengalami keruntuhan, secara teknis dikatakan telah kehilangan kestabilannya. Sebelum mengalami keruntuhan, lereng tersebut dapat dipastikan mempunyai nilai keamanan yang rendah, sedangkan lereng yang dalam kondisi stabil dianggap tidak mengalami pergerakan baik ke arah bawah maupun ke arah atas lereng. Namun lereng yang stabil juga dapat mempunyai nilai keamanan yang kecil sehingga pada suatu saat akan mengalami keruntuhan (Hakam, 2004).

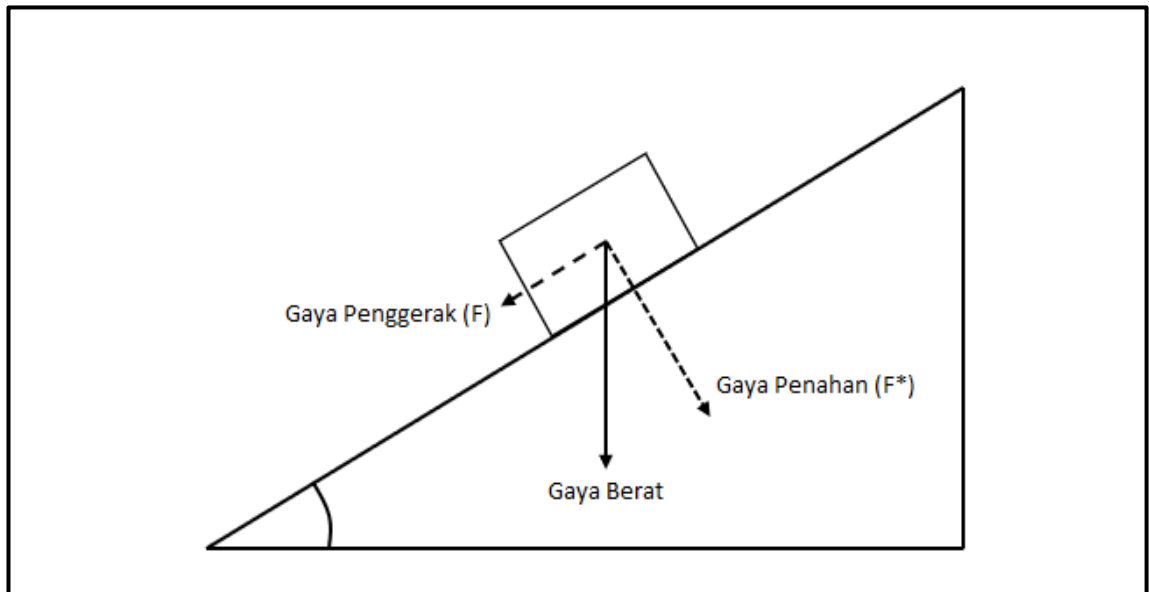
Gerakan tanah adalah suatu gerakan menuruni lereng oleh massa tanah atau batuan penyusun lereng akibat terganggunya kestabilan tanah atau batuan penyusun lereng tersebut. Definisi diatas menunjukkan bahwa massa yang bergerak dapat berupa massa tanah, massa batuan atau pencampuran antara massa tanah dan 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 (Das, 1994).

Analisis stabilitas lereng meliputi konsep kemantapan lereng yaitu penerapan pengetahuan mengenai kekuatan geser tanah. Keruntuhan geser pada tanah 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).

Untuk menyatakan tingkat kestabilan suatu lereng dikenal istilah faktor keamanan (*safety factor*). Faktor keamanan diperlukan untuk mengetahui kemandapan suatu lereng sehingga dapat mencegah bahaya longsor di waktu-waktu yang akan datang.



Gambar 2.1 Faktor keamanan sederhana oleh Romana (1993)

Pada Gambar 2.1 dapat dilihat bahwa gaya yang bekerja pada suatu lereng adalah gaya berat, kemudian dihasilkan gaya penggerak dan gaya penahan. Untuk menjaga agar benda di lereng tidak jatuh (*failure*), diperlukan perhitungan terhadap kemiringan sesuai dengan faktor keamanan yang diinginkan. Secara mekanik sederhana, faktor keamanan (FK) dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\text{Faktor keamanan} = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya penggerak}} = \frac{F_r}{F}$$



$$= \frac{\text{momen penahan}}{\text{momen penggerak}} = \frac{F'x r}{F x r}$$

$$= \frac{\text{Kekuatan geser}}{\text{Gaya penggerak}} = \frac{F'/A}{F/A} = \frac{\tau'}{\tau} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Kekuatan geser} = c + \sigma_n \tan \emptyset \dots\dots\dots(2)$$

Dengan perhitungan lebih rinci didapatkan faktor keamanan sebagai berikut:

$$\text{faktor keamanan (fk)} = \frac{c.A + \sigma.A \tan \emptyset}{W \sin \sigma}$$

$$= \frac{c.A + W \cos \sigma \tan \emptyset}{W \sin \sigma} \dots\dots\dots(3)$$

Apabila nilai FK untuk suatu lereng > 1,0 (Gaya Penahan > Gaya Penggerak), lereng tersebut dalam kondisi stabil. Namun, apabila nilai FK < 1,0 (Gaya Penahan < Gaya Penggerak), lereng tersebut berada dalam kondisi tidak stabil dan mungkin akan terjadi longsor pada lereng tersebut (Arif, 2016).

### 2.3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kestabilan Lereng

Setiap daerah memiliki kondisi yang berbeda-beda dan memiliki parameter yang berbeda pula dalam stabilitas lereng. Pada umumnya, lereng yang terbuat dari tanah maupun batuan merupakan struktur alam yang terbuka. Dengan keadaan yang demikian, maka terdapat banyak faktor-faktor di alam terbuka yang dapat memengaruhi (mengganggu) kestabilan lereng tersebut (Hakam, 2004).

Faktor-faktor yang menyebabkan gangguan pada lereng dapat berupa faktor alami seperti panas matahari, air hujan, kelembapan dan sebagainya maupun faktor akibat aktivitas manusia seperti getaran kendaraan, ledakan, beban bangunan dan sebagainya (Harbinova *et al.*, 2021).

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 (Pangemanan, 2014; Pane, 2018; dan Haris,2019):

1. Struktur geologi regional dan lokal
2. Jenis dan keadaan lapisan tanah/ batuan pembentuk lereng
3. Geometri lereng
4. Sifat fisik dan mekanik batuan
5. Bentuk geometris penampang lereng (misalnya tinggi dan kemiringan lereng)
6. Iklim dan curah hujan
7. Berat dan distribusi beban
8. Getaran atau gempa

Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya keruntuhan pada lereng dapat dibagi menjadi dua faktor utama, yaitu faktor yang disebabkan karena adanya gangguan luar dan juga faktor yang disebabkan oleh gangguan dari dalam. Namun secara teknik penyebab tersebut pada gilirannya akan meningkatkan gaya penyebab runtuh atau menurunkan kekuatan tanah sedemikian rupa sehingga faktor keamanan/stabilitas lereng menurun (Hakam, 2004).

#### A. Gangguan luar

Gangguan luar adalah semua gangguan dari luar struktur lereng baik diakibatkan oleh alam maupun buatan. Gangguan luar yang dapat menurunkan faktor keamanan (stabilitas) lereng adalah: Getaran yang dapat diakibatkan oleh aktivitas manusia (lalu-lintas, ledakan dll) dan gempa bumi; Beban tambahan terutama yang diakibatkan aktivitas manusia seperti pembuatan gedung (bangunan) dan penimbunan benda-benda diatas lereng; Hilangnya penahan lateral pada kaki lereng yang dapat disebabkan oleh pengikisan (erosi);

Hilangnya pelindung (tumbuhan penutup) pada badan lereng yang pada gilirannya memudahkan penyebab lain merusak stabilitas.

#### B. Gangguan dalam

Gangguan dalam yang dapat mengakibatkan kurangnya stabilitas lereng adalah: Penurunan dan peningkatan kadar air dalam tanah; Naiknya massa tanah akibat terisinya rongga (pori) tanah oleh air; Larutnya zat perekat pada butiran pasir (*cemented agent*) yang menyebabkan hilangnya ikatan antar butiran pasir; Naiknya muka air tanah yang menyebabkan berkurangnya tekanan efektif tanah; Pengembangan tanah (terutama tanah lempung) yang berada pada lapisan bawah yang dapat menyebabkan ketidakstabilan pada bagian atasnya; Surutnya muka air yang cepat terutama pada lereng yang bersentuhan langsung dengan air seperti waduk; Likuifaksi pada pasir halus akibat gempa.

Didalam operasi penambangan, masalah kestabilan lereng akan ditemukan pada penggalian tambang terbuka (*open pit* dan *open cut*), tempat penimbunan material buangan (*tailing disposal*), penimbunan bijih (*stockyard*), bendungan, 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 merupakan sarana penunjang operasi penambangan (bendungan, jalan, dan lain-lain) 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 yang 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).

Menurut Karyono (2004) faktor-faktor yang perlu diperhatikan dalam menganalisa kestabilan lereng pada aktivitas penambangan adalah sebagai berikut:

1) Geometri lereng

Geometri lereng yang dapat mempengaruhi kestabilan lereng meliputi tinggi lereng, kemiringan lereng dan lebar *berm*, baik itu lereng tunggal (*single slope*) jika dibentuk oleh satu jenjang saja maupun lereng keseluruhan (*overall slope*) jika dibentuk oleh beberapa jenjang.

2) Sifat fisik dan mekanik material penyusun lereng

Kekuatan yang sangat berperan dalam analisa kestabilan lereng terdiri dari sifat fisik dan sifat mekanik dari tanah tersebut. Sifat fisik tanah yang digunakan dalam menganalisa kemantapan lereng adalah bobot isi tanah ( $\gamma$ ), sedangkan sifat mekaniknya adalah kuat geser tanah yang dinyatakan dengan parameter kohesi ( $c$ ) dan sudut gesek dalam ( $\phi$ ). Kekuatan gesek ini berbanding lurus dengan faktor keamanan (*safety factor*) lereng.

3) Keberadaan air tanah

Keberadaan air tanah pada pori-pori atau celah-celah tanah jelas akan menambah berat satuan material dan memperbesar beban pada lereng. keberadaan air, terutama air tanah (*ground water*) sangat mempengaruhi kestabilan suatu lereng. Air tanah memiliki tekanan air pori (*uplift force*) sehingga menurunkan kekuatan geser dan mengakibatkan lereng mudah longsor.

4) Gaya luar

Gaya luar yang mempengaruhi kestabilan lereng penambangan adalah beban alat mekanis yang beroperasi diatas lereng, getaran yang diakibatkan oleh kegiatan peledakan.

Menurut Zakaria (2009) dan Safruddim (2019) faktor penyebab keamanan lereng pada tanah adalah sebagai berikut:

- a. Pelapukan dan erosi, Pelapukan dan erosi sangat dipengaruhi oleh iklim yang diwakili oleh kehadiran hujan di daerah setempat, curah hujan kadar air (*water content*; %) dan kejenuhan air (*saturation*;  $S_r$ , %). Pada beberapa kasus longsor, hujan sering sebagai pemicu karena hujan meningkatkan kadar air tanah yang menyebabkan kondisi fisik/ mekanis material tubuh lereng berubah. Kenaikan kadar air akan memperlemah sifat fisik-mekanis tanah dan menurunkan faktor keamanan dari lereng tersebut
- b. Ketidakseimbangan beban puncak di kaki lereng, Beban tambahan di tubuh lereng bagian atas (puncak) mengikutsertakan peranan aktifitas manusia. Pendirian atau peletakan bangunan, terutama memandangi aspek estetika belaka, misalnya dengan membuat perumahan (*real estate*) atau villa di tepi-tepi lereng atau di puncak-puncak bukit merupakan tindakan ceroboh yang dapat mengakibatkan longsor. Kondisi tersebut menyebabkan berubahnya keseimbangan tekanan dalam tubuh lereng. Sejalan dengan kenaikan beban di puncak lereng, maka keamanan lereng akan menurun. Pengurangan beban di daerah kaki lereng berdampak menurunkan Faktor Keamanan. Makin besar pengurangan beban di kaki lereng, makin besar pula penurunan Faktor Keamanan lerengnya, sehingga lereng makin labil atau makin rawan longsor. Aktivitas manusia berperan dalam kondisi seperti ini. Pengurangan beban di kaki lereng diantaranya oleh aktivitas penambangan bahan galian, pemangkasan (*cut*) kaki lereng untuk perumahan, dan jalan.
- c. Vegetasi/ tumbuh-tumbuhan, Hilangnya tumbuhan penutup, dapat menyebabkan alur-alur pada beberapa daerah tertentu. Penghanyutan makin meningkat dan akhirnya terjadilah longsor. Dalam kondisi tersebut berperan pula faktor erosi. Letak atau posisi penutup tanaman keras dan kerapatannya mempengaruhi faktor keamanan lereng. Penanaman vegetasi tanaman keras di

kaki lereng akan memperkuat kestabilan lereng, sebaliknya penanaman tanaman keras di puncak lereng justru akan menurunkan faktor keamanan lereng sehingga memperlemah kestabilan lereng.

- d. Naiknya muka air tanah, kehadiran air tanah dalam tubuh lereng biasanya menjadi masalah bagi kestabilan lereng. Kondisi ini tak lepas dari pengaruh luar, yaitu iklim (diwakili oleh curah hujan) yang dapat meningkatkan kadar air tanah, derajat kejenuhan, atau muka air tanah. Kehadiran air tanah akan menurunkan sifat fisik dan mekanik tanah. Kenaikan muka air tanah meningkatkan tekanan pori ( $\mu$ ) yang berarti memperkecil ketahanan geser dari massa lereng, terutama pada material tanah (*soil*). Kenaikan muka air tanah juga memperbesar debit air tanah dan meningkatkan erosi di bawah permukaan (*piping* atau *subaqueous erosion*). Akibatnya lebih banyak fraksi halus (lanau) dari masa tanah yang di hanyutkan, ketahanan massa tanah akan menurun.
- e. Gempa atau getaran, banyak kejadian longsor terjadi akibat gempa bumi selain itu getaran dari aktivitas manusia juga dapat mengakibatkan kelongsoran seperti peledakan dan getaran kendaraan.

Dalam analisis sebuah lereng, untuk mengestimasi keamanannya terhadap faktor-faktor pengganggu, dapat dilakukan sejumlah kombinasi. Keputusan untuk menentukan keamanan lereng selanjutnya harus selalu diambil berdasarkan kemungkinan-kemungkinan yang cukup ekstrim. Selain itu pertimbangan biaya konstruksi dan resiko akibat kelongsoran juga tetap dipertimbangkan.

Identifikasi faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya gangguan pada lereng, sangat bermanfaat dalam tindakan lanjutan dalam analisis kestabilan lereng. Berdasarkan sejumlah faktor-faktor yang menyebabkan keruntuhan lereng, maka dapat dipilih metode analisis stabilitas lereng untuk mengetahui keamanan lereng tersebut terhadap gangguan yang ada. Sejumlah metode analisis kestabilan lereng telah

dikembangkan berdasarkan perilaku lereng, parameter-parameter, asumsi-asumsi dan penyederhanaan tertentu. Untuk dapat memilih dan menggunakan metode yang sesuai dengan kasus yang dihadapi, maka identifikasi masalah terhadap lereng harus cukup lengkap dan disesuaikan dengan hal-hal yang dipertimbangkan dalam pengusulan metode analisis. Sebagai contoh, metode analisis lereng yang menggunakan parameter  $C_u$  misalnya, sangat tidak sesuai dengan lereng yang terbuat dari tanah berbutir kasar.

Tindakan selanjutnya adalah meningkatkan stabilitas lereng dengan faktor keamanan tertentu dengan dasar faktor-faktor yang mengganggu dan hasil analisis kestabilannya. Berbagai metode stabilitas lereng telah dikembangkan. Dari sejumlah metode yang telah dikembangkan dapat dipilih beberapa metode yang mungkin dilakukan berdasarkan data-data yang ada. Selanjutnya dari sejumlah yang mungkin dilakukan, dipilih metode yang sesuai berdasarkan kriteria biaya, waktu, alat, keahlian, umur penanganan, keindahan dan sebagainya (Hakam, 2004).

## **2.4 Klasifikasi Gerakan Massa Tanah**

Beberapa hal yang perlu diketahui, dipelajari, dan dimengerti sebelumnya agar dapat merancang lereng tambang yang baik adalah klasifikasi gerakan massa tanah dan batuan, metode penambangan terbuka yang diterapkan, dan rancangan teknik secara umum (Arif, 2016).

Gerakan tanah menurut M.M. Purbo Hadiwidjono (1992, dalam Arif, 2016) dapat didefinisikan sebagai berpindahnya massa tanah dan batuan pada arah tegak, mendatar, atau miring dari kedudukannya semula. Jenis gerakan tanah dan batuan dapat di klasifikasikan sebagai berikut.

### **2.4.1 Longsoran (*Sliding*)**

Secara umum longsor adalah proses tergelincir atau berpindahnya suatu bagian tanah atau batuan (Alfat., 2019). Istilah yang paling banyak digunakan untuk gerakan

tanah dan batuan yang terjadi pada lereng-lereng alamiah adalah longsor dalam arti yang luas. Agar pengertian longsor dapat diperjelas, Coates (1970) dan Hansen (1984) membuat daftar beberapa faktor penting yang telah disetujui diantara 28 penulis yang telah menyumbangkan pikirannya untuk subjek ini. Daftar ini sangat menarik saat kita mencoba memutuskan elemen apa yang menyusun suatu longsor dan gerakan mana yang dapat atau tidak dapat didefinisikan kedalam kategori longsor. Daftar tersebut adalah sebagai berikut.

1. Longsor mewakili satu kategori dan suatu fenomena termasuk didalamnya arah umum dari pergerakan tanah dan batuan.
2. Gravitasi adalah gaya utama yang terlibat.
3. Gerakan harus cukup cepat karena rayapan (*creep*) begitu untuk dikategorikan sebagai longsor.
4. Gerakan dapat berupa keruntuhan (*falling*), longsor/luncuran (*sliding*), dan aliran (*flow*).
5. Bidang atau daerah gerakan tidak sama dengan patahan.
6. Gerakan akan mengarah ke bawah dan menghasilkan bidang bebas, jadi subsidence tidak termasuk.
7. Material yang tetap di tempat dapat meliputi sebagian dari regolith dan/ atau *bedrock*.
8. Fenomena tanah beku (*frozen ground*) biasanya tidak termasuk kategori ini.

Klasifikasi dari longsor pada umumnya dapat didasarkan pada faktor-faktor sebagai berikut: jenis material, karakteristik geomekanik, kecepatan dan lamanya gerakan, bentuk permukaan longsor (bidang, baji, busur), volume yang dilibatkan, umur longsor, penyebab longsor, dan mekanisme longsor (Arif, 2016).

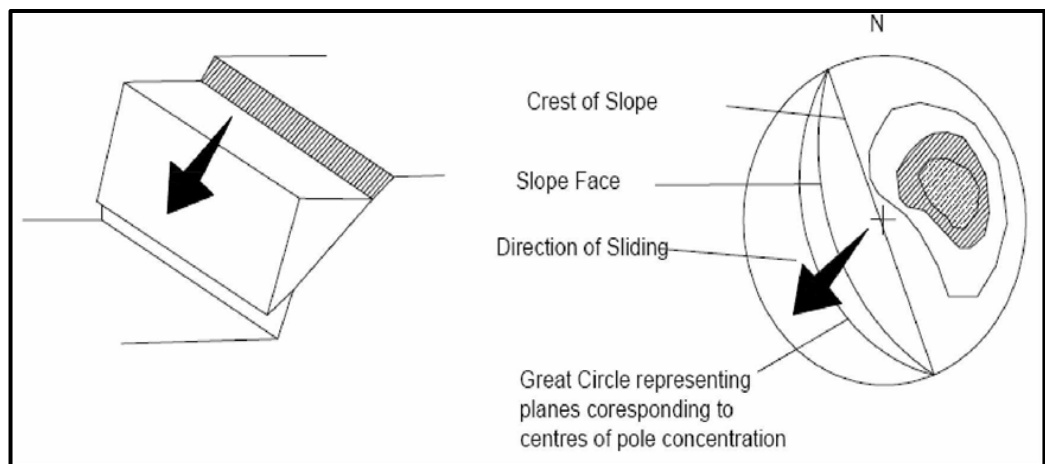
Longsor pada suatu lereng dapat terjadi dengan beberapa bentuk atau cara. Longsor yang terjadi pada tanah mempunyai mekanisme dan bentuk geometri yang



berbeda dengan batuan keras. Hal ini yang membuat analisa dari kemantapan lereng sangat penting. Menurut Hoek & Bray (1981) secara umum, longsor pada tambang terbuka dibagi menjadi 4 (empat), yaitu:

### 1. Longsor bidang

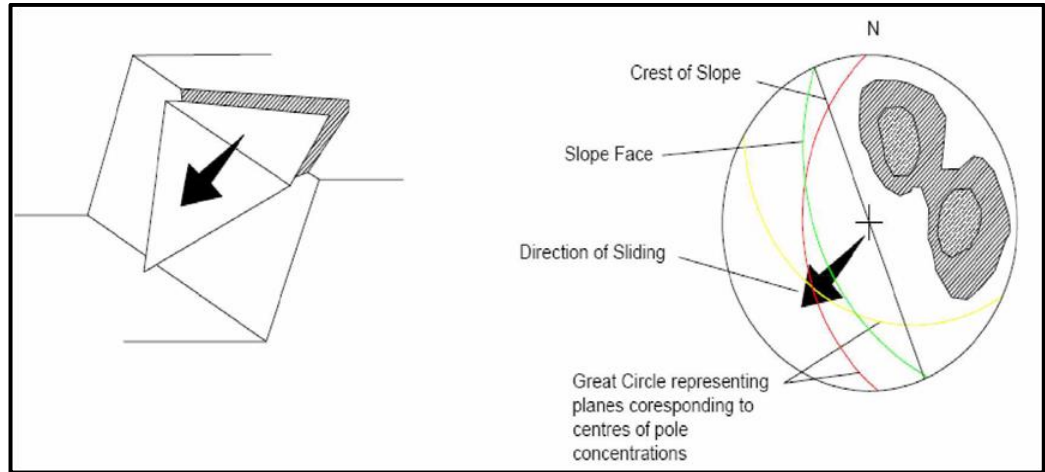
Longosoran bidang terjadi pada batuan yang mempunyai bidang luncur bebas (*day light*) yang mengarah ke lereng dan bidang luncurnya pada bidang diskontinu seperti sesar, kekar, liniasi atau bidang perlapisan. Fenomena lainnya yang memicu longsor jenis ini yaitu bila sudut lereng lebih besar dari sudut bidang luncur serta sudut geser dalam lebih kecil dari sudut bidang luncurnya. Biasanya terjadi pada permukaan lereng yang cembung dengan kemiringan bidang kekar rata-rata hampir atau searah dengan kemiringan lereng (Duncan & Christopher, 2004).



Gambar 2.2 Longsor bidang (Hoek and Bray,1981)

### 2. Longsor baji

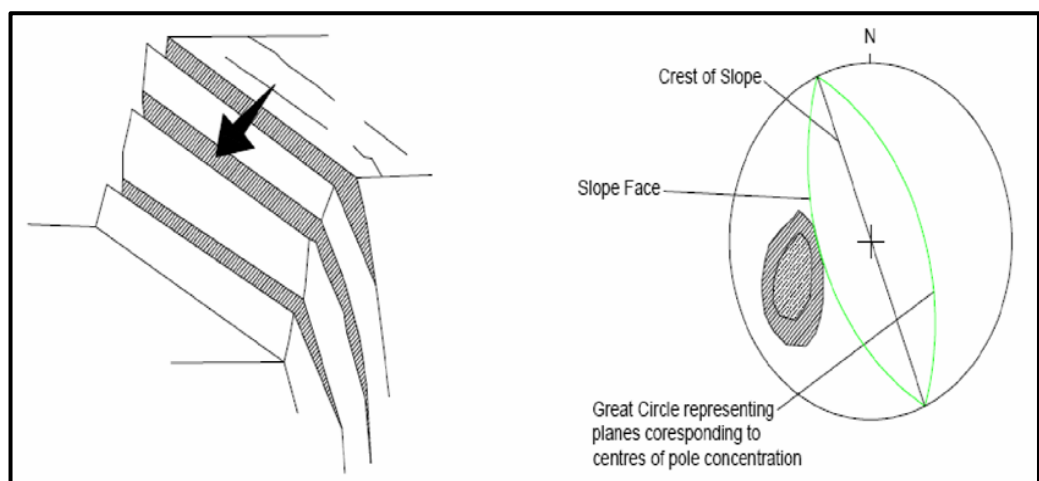
Longsor baji terjadi pada batuan yang mempunyai lebih dari satu bidang lemah atau bidang diskontinu yang bebas, dengan sudut antara kedua bidang tersebut membentuk sudut yang lebih besar dari sudut geser dalamnya. Fenomena yang paling sering terjadi adalah garis perpotongan dua bidang kekar mempunyai kemiringan ke arah kemiringan lereng (Duncan & Christopher, 2004).



Gambar 2.3 Longsor baji (Hoek and Bray, 1981)

### 3. Longsor guling

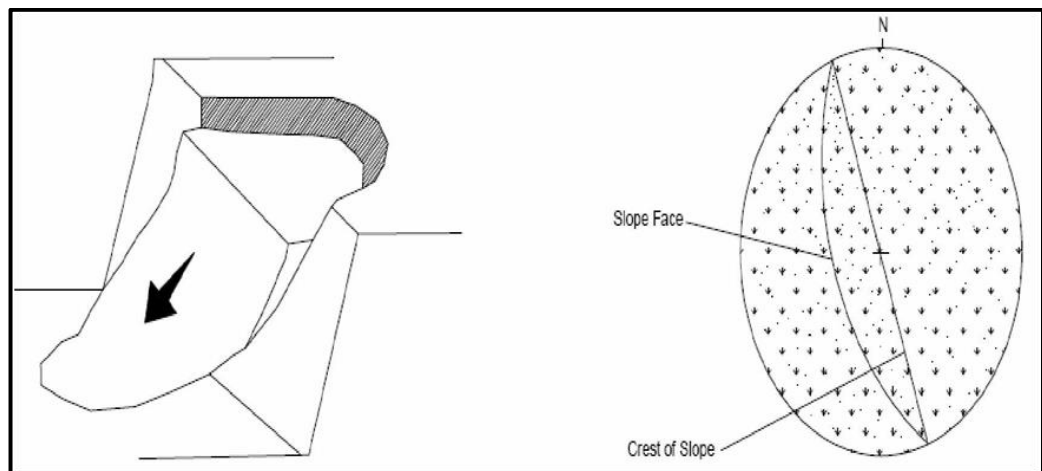
Longsor guling terjadi pada lereng yang terjal pada batuan keras dengan bidang-bidang diskontinu yang hampir tegak atau tegak, dan longsor dapat berbentuk blok atau bertingkat. Longsor guling umumnya terjadi pada lereng yang terjal dan pada batuan yang keras dengan struktur bidang lemahnya yang berbentuk kolom. Longsor guling yang akan terjadi pada suatu lereng batuan yang arah kemiringannya berlawanan dengan kemiringan bidang-bidang lemahnya (Hoek and Brown, 1980).



Gambar 2.4 Longsor guling (Hoek and Bray, 1981)

#### 4. Longsoran busur

Longsoran busur adalah longsoran yang bidang luncurnya berupa busur dan paling umum terjadi di alam terutama pada batuan yang lunak atau tanah. Pada batuan, longsoran busur hanya terjadi jika batuan tersebut sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidang-bidang lemah (rekahan) yang sangat rapat dan tidak dapat dikenali kedudukannya. Longsoran busur akan terjadi jika partikel individu pada suatu tanah atau massa batuan sangat kecil dan tidak saling mengikat. Oleh karena itu, batuan yang telah lapuk cenderung bersifat seperti tanah. Tanda pertama suatu longsoran busur berupa suatu rekahan tarik permukaan atas atau muka lereng, disertai dengan menurunnya sebagian permukaan atas lereng yang berada disamping rekahan. Penurunan ini menandakan adanya gerakan tanah yang pada akhirnya akan terjadi longsoran pada lereng (Hoek and Bray, 1981).



Gambar 2.5 Longsoran busur (Hoek and Bray, 1981)

#### 2.4.2 Runtuhan (*Falling*)

Menurut Arif (2016), disebut runtuh jika gerakan tanah dan batuan ibarat jatuh bebas, seperti batuan pada dinding yang curam (mendekati tegak) yang tiba-tiba jatuh. Runtuhan dapat terjadi akibat adanya bidang-bidang diskontinu pada suatu lereng yang

relatif tegak, pada rayapan dari lapisan lunak (misalnya marl) atau gulingan blok seperti runtuhannya yang terjadi di gunung granier en savoie pada tahun 1248.

#### 2.4.3 Jatuhan (*Fall*)

Jatuhan (*Fall*) adalah jatuhnya atau massa batuan bergerak melalui udara, termasuk gerak jatuh bebas, melompat dan penggelindingan bongkah batu dan bahan rombakan tanpa banyak bersinggungan satu dengan yang lain. Termasuk jenis gerakan ini adalah runtuhannya (*urug, lawina, avalanche*) batu, bahan rombakan maupun tanah (Zakaria, 2009).

#### 2.4.4 Nendatan (*Slump*)

*Slump*, atau dikenal juga sebagai nendatan (KBBI, 2015), merupakan gerakan yang terputus-putus atau tersendat-sendat dari massa tanah dan batuan ke arah bawah dalam jarak yang relatif pendek, melalui bidang lengkung dengan kecepatan ekstrem lambat sampai agak cepat (*moderate*). Sesuai dengan prosesnya yang terputus-putus, nendatan mempunyai lebih dari satu bidang longsor yang kurang lebih sejajar atau searah satu sama lain.

#### 2.4.5 Amblesan (*Subsidence*)

Amblesan atau subsidence merupakan proses penurunan muka air tanah yang terjadi secara alamiah karena konsolidasi pada lapisan tanah dangkal dan lapisan tanah lunak, ataupun karena penurunan tekanan air tanah pada sistem akuifer di bawahnya akibat pengaruh kegiatan manusia di atas permukaan dan pengambilan air tanah. Amblesan juga dapat terjadi pada permukaan di atas suatu tambang bawah tanah (Arif, 2016).

#### 2.4.6 Rayapan (*Creep*)

Rayapan (*creep*) adalah gerakan yang dapat dibedakan dalam hal kecepatannya yang secara alami biasanya lambat (Zaruba & Mencl, 1969; Hansen, 1984). Untuk membedakan longsor dan rayapan, maka kecepatan gerakan tanah perlu

diketahui. Rayapan (*creep*) dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu: rayapan musiman yang dipengaruhi iklim, rayapan bersinambungan yang dipengaruhi kuat geser dari material, dan rayapan melaju yang berhubungan dengan keruntuhan lereng atau perpindahan massa lainnya. Rayapan adalah gerakan yang diskontinu dan relatif lambat, sehingga kita tidak dapat melihat dengan jelas bidang rayapan. Contoh daerah pelanggan jenis gerakan ini adalah Pangadegang di Cianjur Selatan. Di sana daerah yang bergerak mencakup sekitar 100 kilometer. Selain itu juga di daerah Ciamis Utara dan Banjarnegara di Jawa Tengah (M.M. Purbo Hadiwidjoyo, 1992; Arif, 2016).

#### 2.4.7 Aliran (*Flow*)

Gerakan ini berasosiasi dengan transportasi material oleh air atau udara yang dipicu oleh gerakan longsoran sebelumnya. Kecepatan gerakan bisa sangat tinggi (Arif, 2016). Aliran (*flow*) adalah gerakan yang dipengaruhi oleh jumlah kandungan atau kadar air tanah, terjadi pada material tak terkonsolidasi. Bidang longsor antara material yang bergerak umumnya tidak dapat dikenali, termasuk dalam jenis gerakan aliran kering adalah sandrun (larian pasir), aliran fragmen batu, aliran loess. Sedangkan jenis gerakan aliran basah adalah aliran pasir-lanau, aliran tanah cepat, aliran tanah lambat, aliran lumpur, dan aliran bahan rombakan (Zakaria, 2009).

Aliran tanah adalah pergerakan dari tanah yang telah bercampur dengan air dan udara (serta sampah) yang bergerak secara cepat atau perlahan tapi pasti (seolah-olah mengalir). Aliran tanah ini terjadi pada lereng-lereng yang relatif tidak curam. Sehingga banyak tersedia waktu untuk bercampurnya tanah dengan air. Sehingga mekanisme mengalir zat cair lebih berperan dibanding mekanisme geseran pada tanah. (Hakam, 2004).

#### 2.4.8 Gerakan Kompleks (*Complex Movement*)

Disebut gerakan tanah kompleks jika gerakan tanah dan batuan yang terjadi merupakan gabungan dua atau lebih gerakan tanah dan batuan yang disebutkan

sebelumnya sehingga sulit diidentifikasi sebagai salah satu jenis gerakan yang telah diidentifikasi sebagai salah satu jenis gerakan yang telah didefinisikan sebelumnya (Arif, 2016).

## **2.5 Metode Analisis Kestabilan Lereng**

Analisis kestabilan lereng (*slope stability*) diperlukan sebagai suatu pendekatan untuk memecahkan masalah kemungkinan longsor yang akan terjadi pada suatu lereng. Kelongsoran dapat terjadi akibat pergerakan dari material lereng karena kekuatan geser tanah telah terlampaui yaitu kekuatan geser tanah pada bidang gelincir tidak cukup besar untuk menahan gaya-gaya yang bekerja pada bidang tersebut.

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

Metode kesetimbangan batas atau metode *limit equilibrium method* merupakan metode yang sangat populer dalam analisis kestabilan lereng. Metode ini juga dikenal sebagai metode irisan karena bidang longsor dari lereng tersebut dibagi menjadi beberapa irisan. Metode ini telah terbukti sangat berguna dan dapat diandalkan dalam praktik rekayasa serta membutuhkan data yang relatif sedikit dibandingkan dengan metode lainnya, seperti metode elemen hingga (*finite element*), metode beda hingga (*finite difference*) atau metode elemen diskrit (*discrete element*) (Krahn, 2004).

Ide untuk membagi massa di atas bidang runtuh ke dalam sejumlah irisan telah digunakan sejak awal abad ke-20. Pada tahun 1916, Peterson melakukan analisis kestabilan lereng pada beberapa dinding dermaga di Gothenberg, Swedia, dimana bidang runtuh dianggap berbentuk sebuah busur lingkaran dan kemudian massa di atas bidang runtuh dibagi ke dalam sejumlah irisan vertikal. Pada tahun 1936, Fellenius memperkenalkan metode irisan biasa.

Terdapatnya beberapa macam variasi dari metode irisan disebabkan oleh adanya perbedaan asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan faktor keamanan. Asumsi

tersebut dipergunakan karena analisis kestabilan lereng merupakan persoalan statika tak tentu (*indefinite statics*) sehingga diperlukan beberapa asumsi tambahan yang diperlukan dalam perhitungan faktor keamanan.

### 2.5.2 Prinsip Metode Kestimbangan Batas

Semua metode irisan menyatakan kondisi kestabilan suatu lereng dinyatakan dalam suatu indeks yang disebut faktor keamanan (FK), yang didefinisikan sebagai berikut:

$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{\text{Kekuatan geser material yang tersedia}}{\text{Kekuatan geser material yang diperlukan agar tepat seimbang}} \dots\dots\dots(4)$$

Faktor keamanan diasumsikan mempunyai nilai yang sama untuk setiap irisan. Kekuatan geser material yang tersedia untuk menahan material sehingga lereng tidak longsor dinyatakan dalam kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb sebagai berikut:

$$s = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \dots\dots\dots(5)$$

Di mana:

s = Kekuatan geser

c'= kohesi efektif

$\phi'$  = sudut gesek efektif

$\sigma_n$  = tegangan normal total

u = tekanan air pori

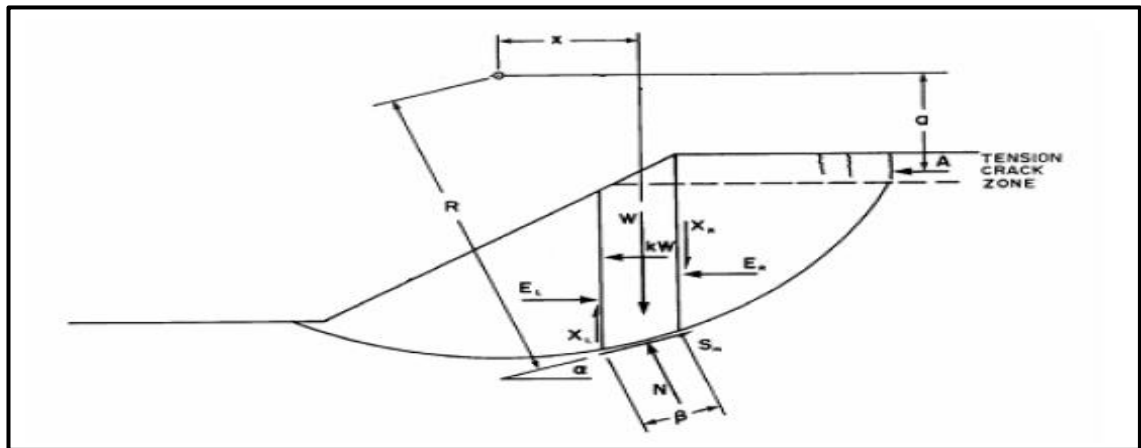
Kekuatan geser tersebut dianggap tidak tergantung pada kondisi tegangan-regangan yang ada pada lereng. Besarnya tahanan geser yang diperlukan agar lereng berada dalam kondisi tepat setimbang [ $S_m$ ] dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S_m = \frac{s \beta}{F} = \frac{(c' + (\sigma_n - u) \tan \phi') \beta}{F} \dots\dots\dots(6)$$

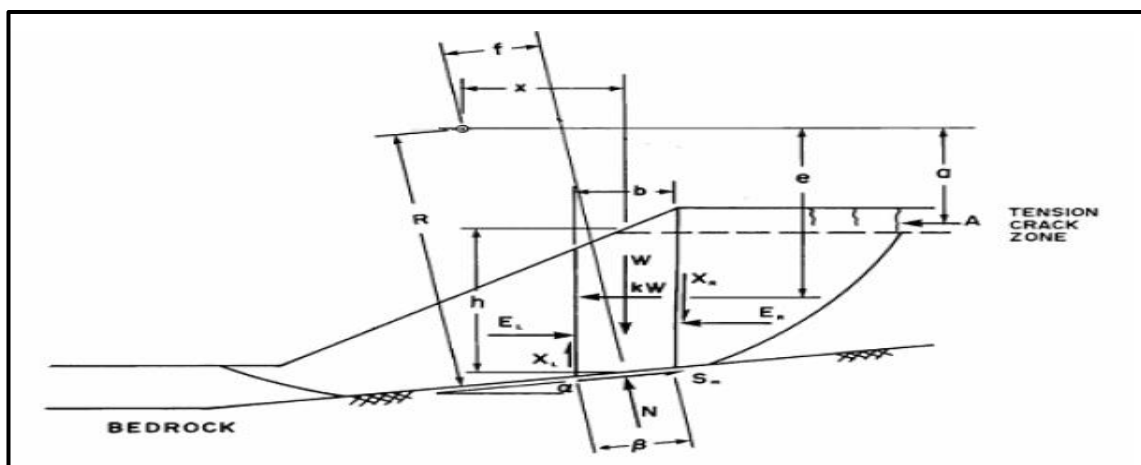
$$S_m = \frac{(c' \beta + (\sigma_n - u) \beta \tan \phi')}{F} \dots\dots\dots(7)$$

Karakteristik lainnya yaitu geometri dari bidang gelinciran harus ditentukan atau diasumsikan terlebih dahulu. Untuk menyederhanakan perhitungan, bidang runtuh biasanya dianggap berbentuk sebuah busur lingkaran, gabungan busur lingkaran dengan garis lurus, atau gabungan dari beberapa segmen garis lurus.

Setelah geometri dari bidang runtuh ditentukan kemudian selanjutnya massa di atas bidang runtuh dibagi ke dalam sejumlah irisan tertentu. Tujuan dari pembagian tersebut adalah untuk mempertimbangkan terdapatnya variasi kekuatan geser dan tekanan air pori sepanjang bidang runtuh. Ilustrasi beberapa bentuk bidang runtuh tersebut dan gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan ditunjukkan gambar berikut.

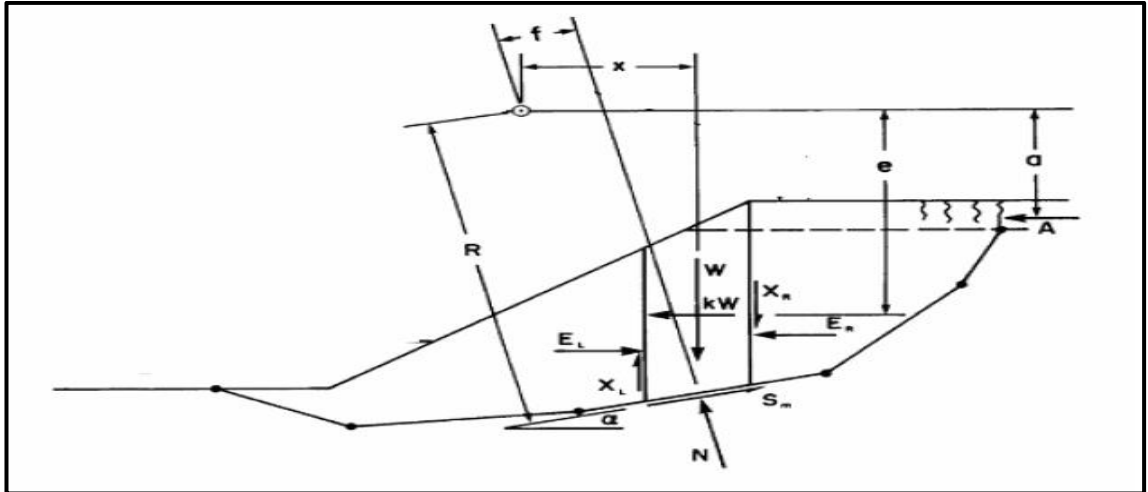


Gambar 2.6 Model lereng dengan bidang runtuh yang berbentuk sebuah busur lingkaran (Arief, 2008)



Gambar 2.7 Model lereng dengan bidang runtuh yang berupa gabungan dari sebuah busur lingkaran dengan segmen garis lurus (Arief, 2008)





Gambar 2.8 Model lereng dengan bidang runtuh yang berupa gabungan dari beberapa segmen garis lurus (multilinier) (Arief, 2008)

Definisi dari variabel-variabel pada gambar-gambar di atas adalah sebagai berikut:

$W$  = Berat total irisan.

$N$  = Gaya normal total pada dasar irisan.

$S_m$  = Gaya geser pada dasar irisan yang diperlukan agar irisan berada dalam kondisi tepat setimbang.

$E$  = Gaya antar-irisan horisontal; titik bawah L dan R menunjukkan masing-masing untuk sebelah kiri dan kanan dari irisan.

$X$  = Gaya antar-irisan vertikal; titik bawah L dan R menunjukkan masing-masing untuk sebelah kiri dan kanan dari irisan.

$kW$  = Gaya seismik horisontal yang bekerja pada pusat massa irisan, dimana  $k$  adalah koefisien seismik.

$R$  = Radius lingkaran untuk bidang runtuh busur lingkaran; atau lengan momen dari gaya geser  $S_m$  terdapat pusat momen untuk bidang runtuh yang bukan busur lingkaran.

$f$  = Jarak tegak lurus dari gaya normal  $N$  terhadap pusat momen.

$x$  = Jarak horisontal dari pusat massa irisan terhadap pusat momen.

- e = Jarak vertikal dari pusat massa irisan terhadap pusat momen. Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Irisan - 5
- h = Tinggi rata-rata irisan
- b = Lebar irisan
- $\beta$  = Panjang dasar irisan [ $b = b \sec a$ ]
- a = Jarak vertikal dari gaya hidrostatik terhadap pusat momen.
- A = Gaya hidrostatik pada retakan tarik
- $\alpha$  = Sudut kemiringan dari garis singgung pada titik di tengah dasar irisan terhadap bidang horisontal. Sudut kemiringan bernilai positif apabila searah dengan kemiringan lereng, dan bernilai negatif apabila berlawanan arah dengan kemiringan lereng.

### 2.5.3 Jenis-Jenis Metode Irisan

Menurut Arief (2008) berikut ini adalah jenis-jenis metode irisan dalam analisis kestabilan lereng.

1. Metode irisan biasa (*Fellenius method*)

Metode irisan biasa (Fellenius, 1936) merupakan metode yang paling sederhana diantara beberapa metode irisan. Metode ini juga dinamakan sebagai metode lingkaran Swedia. Asumsi yang digunakan dalam metode ini adalah resultan gaya antar irisan sama dengan nol dan bekerja sejajar dengan permukaan bidang runtuh, serta bidang runtuh berupa sebuah busur lingkaran. Kondisi kesetimbangan yang dapat dipenuhi oleh metode ini hanya kesetimbangan momen untuk semua irisan pada pusat lingkaran runtuh.

2. Metode Bishop yang disederhanakan

Diantara metode irisan lainnya, metode Bishop yang disederhanakan (Bishop, 1955) merupakan metode yang paling populer dalam analisis kestabilan lereng. Asumsi yang digunakan dalam metode ini yaitu besarnya gaya geser antar-irisan

sama dengan nol ( $X=0$ ) dan bidang runtuh berbentuk sebuah busur lingkaran. Kondisi kesetimbangan yang dapat dipenuhi oleh metode ini adalah kesetimbangan gaya dalam arah vertikal untuk setiap irisan dan kesetimbangan momen pada pusat lingkaran runtuh untuk semua irisan, sedangkan kesetimbangan gaya dalam arah horisontal tidak dapat dipenuhi.

Metode Bishop yang disederhanakan merupakan metode sangat populer dalam analisis kestabilan lereng dikarenakan perhitungannya yang sederhana, cepat dan memberikan hasil perhitungan faktor keamanan yang cukup teliti. Kesalahan metode ini apabila dibandingkan dengan metode lainnya yang memenuhi semua kondisi kesetimbangan seperti metode Spencer atau metode kesetimbangan batas umum, jarang lebih besar dari 5%. Metode ini sangat cocok digunakan untuk pencarian secara otomatis bidang runtuh kritis yang berbentuk busur lingkaran untuk mencari faktor keamanan minimum.

### 3. Metode Janbu yang disederhanakan

Metode Janbu yang disederhanakan (Janbu, 1954; dan 1973) juga termasuk salah satu metode yang populer dan sering digunakan dalam analisis kestabilan lereng. Asumsi yang digunakan dalam metode ini yaitu gaya geser antar irisan sama dengan nol. Metode ini memenuhi kesetimbangan gaya dalam arah vertikal untuk setiap irisan dan kesetimbangan gaya dalam arah horisontal untuk semua irisan, namun kesetimbangan momen tidak dapat dipenuhi. Sembarang bentuk bidang runtuh dapat dianalisis dengan metode ini.

### 4. Metode kesetimbangan batas umum

Metode kesetimbangan batas umum dikembangkan oleh Fredlund di tahun 70-an (Fredlund dan Krahn 1977; Fredlund dkk, 1981). Metode ini dapat memenuhi semua kondisi kesetimbangan dan dapat digunakan untuk gelinciran dengan bidang runtuh sembarang. Asumsi yang digunakan oleh metode kesetimbangan

batas umum yaitu terdapat hubungan antara gaya geser antar-irisan dan gaya normal antar-irisan.

#### 5. Metode Spencer

Spencer (1967) menganggap resultan gaya antar irisan pada semua irisan mempunyai sudut kemiringan tertentu yang sama. Oleh karena itu metode Spencer dapat dianggap sebagai kasus khusus dari metode Morgenstern-Price dimana  $f(x) = 1$ . Metode Spencer dapat digunakan untuk sembarang bentuk bidang runtuh dan memenuhi semua kondisi kesetimbangan gaya dan kesetimbangan momen pada setiap irisan.

#### 6. Metode Morgenstern-Price

Metode Morgenstern-Price (Morgenstern & Price, 1965) dikembangkan terlebih dahulu daripada metode kesetimbangan batas umum. Metode ini dapat digunakan untuk semua bentuk bidang runtuh dan telah memenuhi semua kondisi kesetimbangan. Metode Morgenstern-Price menggunakan asumsi yang sama dengan metode kesetimbangan batas umum yaitu terdapat hubungan antara gaya geser antar-irisan dan gaya normal antar-irisan. Asumsi yang diterapkan dalam metode ini adalah kemiringan gaya geser antar irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan.

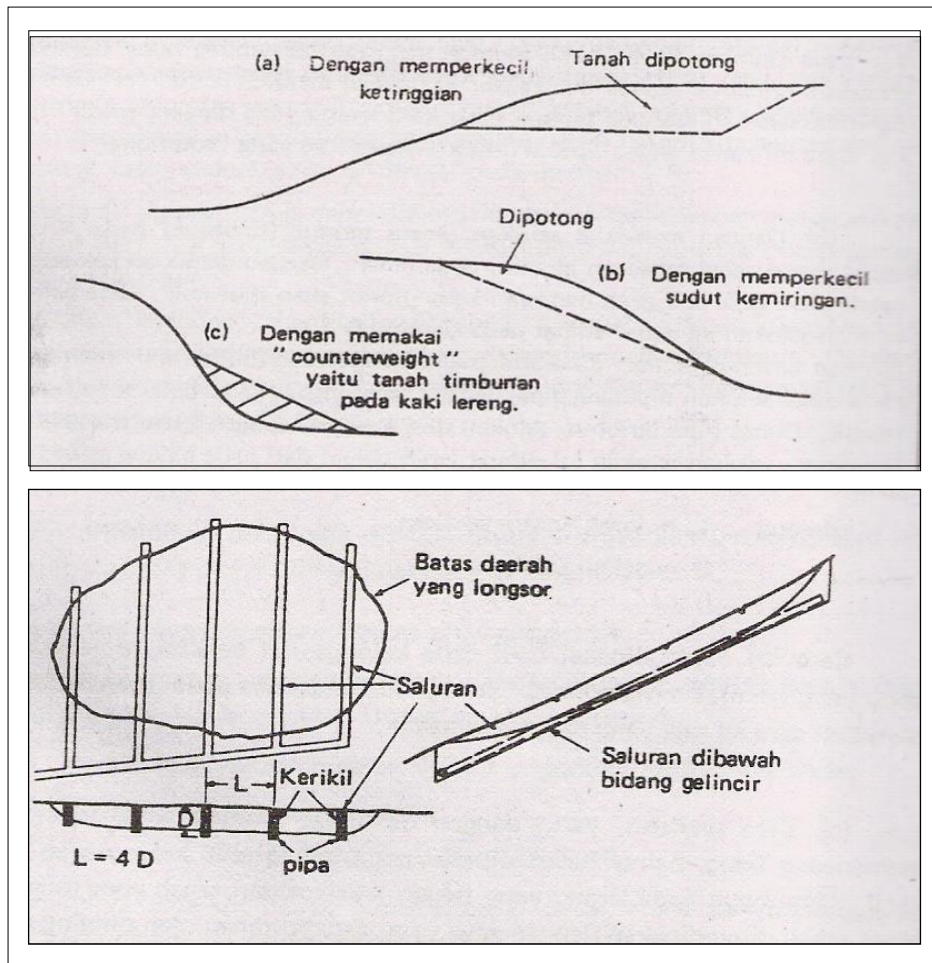
## 2.6 Stabilisasi Lereng

Stabil atau tidaknya suatu lereng penambangan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Pada dasarnya, untuk meningkatkan stabilitas lereng, ada dua pendekatan yang biasa diterapkan dalam penanganan longsoran untuk menaikkan angka keamanan, yaitu sebagai berikut.

### 2.6.1 Memperkecil gaya penggerak atau momen penggerak

Gaya atau momen penggerak dapat diperkecil dengan cara merubah geometri lereng yang bersangkutan. Untuk itu ada dua cara:

- a) Membuat lereng lebih datar, yaitu mengurangi sudut kemiringan.
- b) Memperkecil ketinggian lereng.



Gambar 2.9 Stabilisasi Lereng. (Sumber: Dr. L. D. Wesley, "Mekanika Tanah", 2012)

### 2.6.2 Memperbesar gaya penahan atau momen penahan

Untuk memperbesar gaya penahan, dapat dilakukan dengan menerapkan beberapa metode perkuatan tanah, diantaranya konstruksi penahan seperti dinding penahan tanah, tiang, atau timbunan pada kaki lereng. Penanggulangan longsor tergantung pada tipe dan sifat longsor tersebut, serta kondisi lapangan dan geologi

yang terdapat pada daerah longsoran. Cara penanggulangan longsor dapat dilakukan dengan cara:

1. Mengubah geometri lereng

Mengubah geometri lereng dapat dilakukan dengan cara pemotongan dan penimbunan pada ujung kaki lereng. Metode ini mempunyai prinsip mengurangi gaya dorong dari masa tanah yang longsor dan menambah gaya penahan dengan cara penimbunan pada ujung kaki lereng, sehingga faktor keamanan lereng dapat bertambah. Sebagai contoh pemotongan bagian ujung kaki dapat dilakukan untuk longsoran yang mempunyai massa relatif kecil. Mengubah geometri dengan cara penimbunan dilakukan dengan memberikan beban berupa timbunan pada daerah kaki yang berfungsi untuk menambah momen lawan. Penanggulangan ini cocok untuk longsoran dengan massa yang relatif utuh.

2. Mengendalikan air permukaan

Pengendalian air permukaan akan mengurangi berat massa tanah yang bergerak dan menambah kekuatan material pembentuk lereng. Air permukaan yang akan mengalir pada permukaan lereng dan yang akan meresap ke dalam tanah harus dikendalikan, dapat dilakukan dengan menanam tumbuhan, tata salir (saluran permukaan yang dibuat pada bagian luar longsoran dan mengelilingi longsoran sehingga dapat mencegah aliran limpasan yang datang dari daerah yang lebih tinggi), perbaikan permukaan lereng (meratakan cekungan atau tonjolan lereng).

3. Mengendalikan air rembesan

Metode pengendalian air rembesan dapat dilakukan dengan sumur dalam (untuk menanggulangi longsoran yang bidang longsornya dalam), saluran tegak (untuk menurunkan tekanan hidrostatik), saluran mendatar (menurunkan muka air tanah di daerah longsoran), dan sebagainya.

#### 4. Penambatan

Penambatan untuk menanggulangi longsor tanah dapat dilakukan dengan menggunakan bangunan penambat antara lain:

##### a. Bronjong

Bronjong merupakan bangunan penambat yang mempunyai struktur bangunan berupa anyaman kawat yang diisi batu belah. Struktur bangunan berbentuk persegi dan disusun secara bertangga yang umumnya berukuran  $2 \times 1 \times 0.5 \text{ m}^3$ . Bronjong adalah struktur yang tidak kaku sehingga dapat menahan gerakan vertikal dan horizontal. Bronjong akan efektif untuk longsor yang relatif dangkal tetapi tidak efektif untuk longsor berantai. Bronjong banyak digunakan karena material yang digunakan tidak sulit diperoleh dan biayanya relatif murah. Namun metode ini tidak dapat diterapkan pada lereng penambangan blok D3W pit SF karena dapat menghambat proses pengambilan ore pada bagian bawah lereng.

##### b. Tembok penahan

Tembok penahan merupakan bangunan penambat dari pasangan batu, beton, atau beton bertulang. Tipe tembok penahan terdiri dari dinding gaya berat, semi gaya berat dan dinding pertebalan. Tembok penahan harus diberi fasilitas drainase seperti lubang penetes dan pipa salir yang diberi bahan filter supaya tidak tersumbat, sehingga tidak menimbulkan tekanan hidrostatik yang besar. Kecuali lereng hasil penambangan tersebut akan dibuat permanen, cara ini kurang efektif jika harus diterapkan pada lereng penambangan non permanen. Sama seperti bronjong, metode ini tidak dapat diterapkan pada blok D3W pit SF.

c. Tiang bor (*bored pile*)

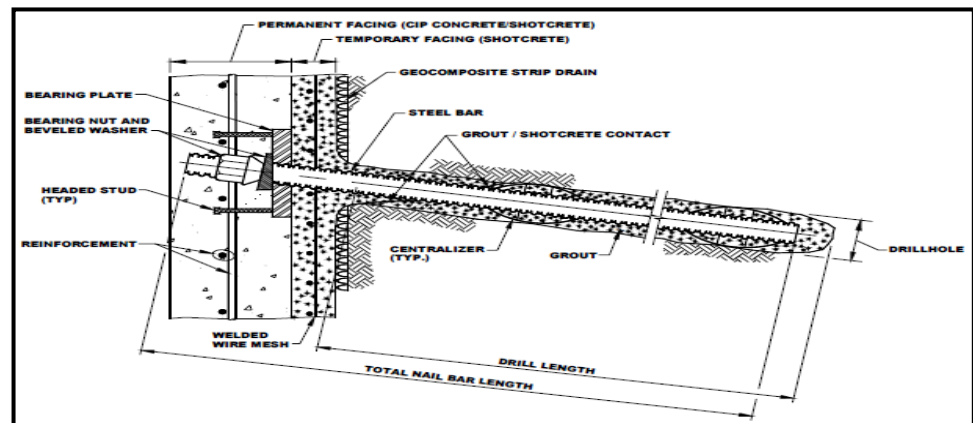
Untuk penanggulangan longsor dengan bantuan struktur tiang yang lebih sering dipakai adalah Tiang bor (*bored pile*) dibandingkan dengan tiang pancang karena tiang pancang memiliki keterbatasan dalam dimensi dan kemampuan dipancang (*driveability*). Diameter tiang bor yang digunakan untuk menstabilkan longsor (*dowel piles*) berkisar antara 1,5 – 3,5 m. Pemasangan tiang bor biasanya dilakukan dengan 3 metode, yaitu metode kering (*dry method*), metode casing (*casing method*), dan metode basah (*wet method*). Untuk semua kasus longsor yang ditinjau (apabila diterapkan penanganan menggunakan tiang bor), metoda yang dipakai adalah metode casing sementara (*temporary casing method*) yang dikombinasikan dengan metode basah dikarenakan metode ini memungkinkan konstruksi tiang bor untuk dilaksanakan pada kondisi tanah/batuan di lokasi yaitu muka air tanah yang dekat dengan permukaan dan batu serpih lapuk yang mudah runtuh akibat pengeboran. Metode ini juga sulit untuk diterapkan pada lereng penambangan blok D3W pit SF dikarenakan tidak efisien dan membutuhkan biaya yang besar.

d. *Soil nailing*

Dari beberapa metode stabilisasi lereng yang ada, metode *soil nail* adalah metode yang paling mungkin untuk diterapkan pada lereng penambangan blok D3W pit SF melihat kondisi material tanah yang ada. *Soil nailing* merupakan jenis perkuatan pasif pada tanah dengan menancapkan potongan-potongan baja (*nails*) ke dalam tanah. Perkuatan yang diberikan diperoleh dari kekuatan tegangan baja dan gesekan antara permukaan batangan baja dengan tanah disekelilingnya yang akan memberikan gaya perlawanan tambahan bagi lereng. Pada beberapa kondisi, *soil*



*nailing* memberikan alternatif yang bisa dilakukan dilihat dari sisi kemungkinan pelaksanaan, biaya pembuatan, dan lamanya waktu pengerjaan jika dibandingkan dengan sistem perkuatan lereng yang lain. *Soil nailing* merupakan metode perbaikan tanah asli (in-situ) dengan cara melakukan pemakuan batang-batang seperti cerucuk, baja, bambu, dan *mini pile*. *Soil nailing* dapat digunakan untuk banyak jenis tanah, dan kondisi. Kondisi tanah yang menguntungkan, akan membuat metode *soil nailing* menjadi lebih efektif dari segi biaya dibandingkan dengan teknik lain (Wesley 2012).



Gambar 2.10 Potongan melintang lereng dengan perkuatan soil nailing