

# **SKRIPSI**

## **ANALISIS PENGARUH AIR TANAH TERHADAP KESTABILAN LERENG BLOK B40 PT SINAR JAYA SULTRA UTAMA**

(Studi Kasus: *Site* Waturambaha, Kecamatan Lasolo Kepulauan,  
Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara)

**Disusun dan diajukan oleh**

**ASTINA ARAS**

**D111181316**



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

**ANALISIS PENGARUH AIR TANAH TERHADAP KESTABILAN  
LERENG BLOK B40 PT SINAR JAYA SULTRA UTAMA**

(Studi Kasus: *Site* Waturambaha, Kecamatan Lasolo Kepulauan,  
Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara)

**Disusun dan diajukan oleh**

**ASTINA ARAS**

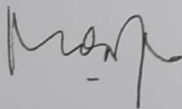
**D111181316**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 11 November 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,


Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T.

NIP. 196807181993091001



Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T.

NIP. 199511262022043001

Wakil Dekan

Bidang Akademik dan Kemahasiswaan,



Dr. Amil Ahmad Ilham, S.T., M.IT.

NIP. 197310101998021001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Astina Aras  
NIM : D111181316  
Program Studi : Teknik Pertambangan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Pengaruh Air Tanah Terhadap Kestabilan  
Lereng Blok B40 PT Sinar Jaya Sultra Utama  
(Studi Kasus: *Site* Waturambaha, Kecamatan Lasolo Kepulauan,  
Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara)

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.

Makassar, 17 November 2022

Yang menyatakan



Tanda tangan

Astina Aras

## ABSTRAK

PT Sinar Jaya Sultra Utama merupakan perusahaan pertambangan nikel laterit yang menerapkan sistem tambang terbuka. Salah satu lereng pada blok B40 PT SJSU membutuhkan analisis lebih lanjut terkait kestabilan lereng berdasarkan pengaruh air tanah. Keberadaan air tanah dapat menurunkan kekuatan massa batuan penyusun lereng dan mempengaruhi kestabilan suatu lereng. Daerah penelitian ini memiliki air tanah yang relatif dekat dengan permukaan dan menyebabkan lereng berada dalam kondisi hampir jenuh. Penelitian ini bertujuan sebagai studi mengenai analisis pengaruh air tanah terhadap kestabilan lereng blok B40. Metode penelitian yang digunakan meliputi pengumpulan data melalui studi literatur dan kegiatan observasi lapangan yang bertujuan mengumpulkan data-data teknis terkait dengan topik penelitian. Analisis pengaruh air tanah terlebih dahulu dilakukan melalui pemodelan *Seep/W* berdasarkan data curah hujan pada bulan Agustus 2021, yang dipantau selama 7 (tujuh) hari. Analisis lanjutan mengenai kestabilan lereng dilakukan dengan menggunakan *Slope/W* untuk memperoleh nilai faktor keamanan lereng. Hasil analisis lereng aktual pada lereng blok B40 tanpa hujan diperoleh nilai FK sebesar 1,984 yang berarti kondisi lereng dinyatakan aman atau stabil. Sedangkan, untuk hasil analisis dengan adanya pengaruh air tanah berdasarkan variasi intensitas curah hujan maka nilai FK yang diperoleh secara berturut-turut yaitu 1,186; 1,493; 1,021; 1,356; 1,227; 1,684; dan 1,459. Hasil penelitian menunjukkan pengaruh air tanah dengan variasi intensitas curah hujan memiliki hubungan berbanding terbalik terhadap nilai faktor keamanan lereng, yaitu semakin besar intensitas curah hujan maka akan semakin kecil nilai faktor keamanan.

Kata kunci: air tanah, curah hujan, infiltrasi, kestabilan lereng, faktor keamanan

## **ABSTRACT**

*PT Sinar Jaya Sultra Utama is a laterite nickel mining company that implements an open-cast mining system. One of the slopes in PT SJSU's B40 block requires further slope stability analysis based on groundwater's influence. The presence of groundwater can reduce the strength of rock masses that make up the slope and affect the stability of a slope. This study area has groundwater relatively close to the surface, which causes the slopes to be almost saturated. This study aims to analyze the effect of groundwater on the stability of the slopes block B40. The research methods include data collection through literature studies and field observation activities to collect technical data related to the research topic. Groundwater's influence was first analyzed through Seep/W modeling based on rainfall data in August 2021, which was monitored for 7 (seven) days. Further slope stability analysis was carried out using Slope/W to obtain the slope safety factor value. The results actual slope analysis on block B40 without rain got an FK value of 1.984, meaning that the slope conditions were declared safe or stable. Meanwhile, for the analysis results with influence groundwater based on variations in rainfall intensity, the FK value obtained successively is 1.186; 1.493; 1.021; 1.356; 1.227; 1.684; and 1.459. The results showed that the influence of groundwater with variations in rainfall intensity has an inversely proportional relationship to the value of the slope safety factor. That is, the greater intensity of rainfall, the smaller value of the safety factor.*

*Keywords: groundwater, rainfall, infiltration, slope stability, safety factor*

## **KATA PENGANTAR**

*Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul "Analisis Pengaruh Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Blok B40 PT Sinar Jaya Sultra Utama" sebagai salah satu syarat yang harus ditempuh untuk menyelesaikan pendidikan pada jenjang Strata Satu (S1) dalam Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Shalawat serta salam tidak lupa pula senantiasa tercurahkan kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga, dan para sahabat nabi yang telah membimbing umat manusia dari zaman jahiliyah menuju zaman yang penuh dengan ilmu pengetahuan yang luar biasa seperti sekarang ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, hal itu disadari karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Besar harapan penulis, semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pihak lain pada umumnya. Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis banyak mendapat pelajaran, dukungan, motivasi, dan bantuan berupa bimbingan yang sangat berharga dari berbagai pihak mulai dari pelaksanaan hingga penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan tugas akhir ini sehingga dapat berjalan lancar dan terselesaikan dengan baik.

Ucapan terima kasih dengan penuh kerendahan hati pertama-tama penulis sampaikan kepada Bapak Yoyok Arum selaku Kepala Teknik Tambang PT SJSU *site* Waturambaha yang telah memberikan kesempatan kepada penulis sehingga dapat melakukan penelitian di wilayah operasional penambangannya, Bapak Asep Kamaludin selaku Wakil Kepala Teknik Tambang PT SJSU, kakak Aldio selaku pembimbing kerja

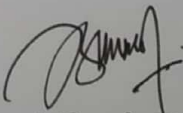
praktik sekaligus *Mineplan*, kakak Jul Hasan, dan kakak Azhar selaku tim *Survey* yang telah membantu dalam orientasi lapangan dan memberikan ilmu, arahan, serta bimbingan selama kegiatan penelitian. Kepada kakak Yunita Sri Sutarni Dapo, kakak Wa Ode Monaswati, dan kakak Wa Ode Zaatul Irqin selaku tim *Engineering* dan seluruh karyawan PT SJSU yang selalu menghibur dan memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T. dan Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa meluangkan waktu, motivasi, dan pikiran untuk penulis dalam menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini. Serta terima kasih pula penulis ucapkan kepada kanda-kanda, adik-adik, dan teman-teman Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin Angkatan 2018 (TUNNEL 18) khususnya tim Baruga 2022 yang senantiasa menjadi teman diskusi dan memberikan semangat serta dukungan untuk penulis selama pelaksanaan penelitian.

Terima kasih pula penulis sampaikan kepada Bapak Aras Rahman dan Ibu Rosdiana selaku orangtua penulis, Fahrul Reza Aras dan Allif Al-Kauthar selaku adik-adik penulis, serta keluarga yang senantiasa mendoakan, memberi semangat, dan selalu memotivasi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari para pembaca. Akhir kata, penulis mengharapkan semoga tujuan dari pembuatan tugas akhir ini dapat tercapai sesuai dengan yang diharapkan.

*Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

Makassar, 17 November 2022



Astina Aras

# DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i> .....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian.....	4
1.6 Lokasi Penelitian.....	7
BAB II KESTABILAN LERENG & AIR TANAH.....	8
2.1 Lereng .....	8
2.2 Kestabilan Lereng.....	11
2.3 Longsoran .....	15
2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng.....	22
2.5 Metode Analisis Kestabilan Lereng.....	27
2.6 Air Tanah .....	34
BAB III METODE PENELITIAN.....	39
3.1 Persiapan .....	39



3.2	Pengambilan Data .....	40
3.3	Pengolahan dan Analisis Data .....	42
BAB IV ANALISIS PENGARUH AIR TANAH TERHADAP KESTABILAN LERENG TAMBANG		
BLOK B40 .....		
4.1	Kondisi Lokasi Penelitian .....	55
4.2	Penampang Lereng Blok B40 .....	56
4.3	Analisis Pengaruh Air Tanah dengan Infiltrasi Hujan.....	56
4.4	Analisis Kestabilan Lereng Blok B40.....	59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		
5.1	Kesimpulan.....	64
5.2	Saran .....	65
DAFTAR PUSTAKA .....		
LAMPIRAN .....		

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Diagram alir tahapan kegiatan penelitian.....	6
1.2 Peta lokasi penelitian.....	7
2.1 Lereng buatan pada tambang terbuka.....	11
2.2 Sketsa lereng dan gaya-gaya yang bekerja.....	13
2.3 Skema longsoran busur .....	18
2.4 Skema longsoran bidang.....	19
2.5 Skema longsoran baji .....	20
2.6 Skema longsoran guling .....	20
2.7 Elemen hingga dan titik simpul pada geometri .....	29
2.8 Bidang longsor <i>circular</i> .....	32
2.9 Bidang longsor <i>non-circular</i> .....	32
2.10 Gaya yang bekerja pada bidang irisan .....	32
2.11 Kondisi air tanah pada lereng .....	38
3.1 Sayatan lereng blok B40 pada lokasi penelitian .....	42
3.2 Penampang dari hasil sayatan titik A–A' .....	43
3.3 Tampilan awal <i>software Geostudio 2018</i> .....	43
3.4 Penentuan ukuran kertas lembar kerja .....	44
3.5 Pilih analisis <i>seep/w</i> dan <i>transient</i> untuk infiltrasi hujan .....	44
3.6 Tampilan pengaturan analisis.....	45
3.7 Pengaturan menu <i>water</i> .....	45
3.8 Pengaturan menu <i>time</i> .....	46
3.9 Tampilan lembar kerja pada <i>software Geostudio 2018</i> .....	46
3.10 Menentukan sumbu X dan Y.....	47

3.11 Menambahkan gambar desain geometri lereng .....	47
3.12 Geometri lereng blok B40.....	48
3.13 Menggambar region geometri lereng.....	48
3.14 Asumsi muka air tanah blok B40.....	49
3.15 Menentukan parameter <i>boundary conditions</i> .....	49
3.16 Hasil dari <i>boundary conditions</i> .....	50
3.17 Menginput material model.....	50
3.18 Menentukan <i>mesh</i> elemen .....	51
3.19 Klik tombol <i>start</i> .....	51
3.20 Hasil analisis dengan material.....	51
3.21 Hasil dari <i>pore water pressure</i> .....	52
3.22 Hasil pemodelan air tanah pada hari ke-7 .....	52
3.23 Input <i>material properties</i> .....	53
3.24 Hasil nilai faktor keamanan pada hari ke-7 .....	53
3.25 Diagram alir penelitian.....	54
4.1 Lokasi penelitian lereng blok B40.....	55
4.2 Geometri lereng penampang A-A' pada blok B40 .....	56
4.3 Pemodelan lereng akibat pengaruh air tanah dengan infiltrasi hujan .....	57
4.4 Hasil pemodelan lereng blok B40 dengan infiltrasi hujan selama 7 hari.....	59
4.5 Nilai faktor keamanan lereng aktual blok B40.....	61
4.6 Grafik pengaruh curah hujan terhadap nilai faktor keamanan .....	63

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Penyebab gerakan massa tanah .....	10
2.2 Kondisi lereng berdasarkan nilai faktor keamanan .....	14
2.3 Kestimbangan pada masing-masing metode .....	33
2.4 Gaya antar irisan yang bekerja .....	33
4.1 Data sifat fisik dan mekanik tanah blok B40.....	60
4.2 Nilai faktor keamanan lereng blok B40 dengan adanya curah hujan .....	61

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A Peta lokasi penelitian .....	70
B Peta sayatan A–A'.....	72
C Data curah hujan tahun 2021 .....	74
D Data litologi.....	76
E Data sifat fisik dan mekanik tanah.....	78
F Hasil analisis pemodelan air tanah ( <i>seep/w</i> ) .....	80
G Hasil analisis kestabilan lereng ( <i>slope/w</i> ) .....	85
H Dokumentasi kegiatan penelitian .....	90
I Kartu konsultasi tugas akhir .....	94

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Kajian geoteknik dalam hal ini kestabilan lereng tambang merupakan salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan oleh perusahaan. Hal tersebut disebabkan oleh adanya beberapa perusahaan tambang yang mengejar dan meningkatkan target produksi dengan melakukan penggalian dan pengupasan tanah secara besar-besaran dimana dapat meningkatkan resiko terhadap faktor keamanan dan kestabilan lereng tambang. Sehingga, kestabilan lereng tersebut menjadi hal yang patut untuk diperhatikan karena berhubungan dengan keselamatan pekerja, keamanan peralatan tambang, dan kelancaran produksi penambangan (Ardi, Syafuan, & Solihin, 2018).

Kestabilan pada lereng dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti geometri lereng, sifat fisik dan mekanik tanah, struktur geologi, dan keberadaan air tanah. Keberadaan air tanah (*groundwater*) sangat mempengaruhi kestabilan suatu lereng. Hal tersebut dikarenakan air tanah memiliki tekanan air pori (*pore water pressure*) yang dapat menimbulkan gaya angkat (*uplift force*) dan menurunkan kekuatan suatu massa batuan penyusun lereng. Sehingga hal tersebut dapat mengakibatkan keselamatan atas unit dan pekerja yang beroperasi pada area lereng memiliki tingkat resiko bahaya yang tinggi (Frans & Nurfalaq, 2019).

PT Sinar Jaya Sultra Utama merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan nikel. Terletak di Desa Waturambaha, Kecamatan Lasolo Kepulauan, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. Proses penambangan PT Sinar Jaya Sultra Utama menerapkan metode tambang terbuka atau *open cast mining* dengan membuat lereng berjenjang di area penambangannya. Dengan penerapan

metode *open cast mining* yang dilakukan oleh perusahaan, tentu banyak ditemukan masalah tentang kestabilan lereng. Pada PT Sinar Jaya Sultra Utama pihak perusahaan hanya mengasumsikan faktor keamanan melalui kegiatan pemantauan lereng tanpa mempertimbangkan muka air tanah sehingga dianggap belum merepresentasikan kondisi lereng yang ideal secara aktual. Dikarenakan, adanya parameter tingkat keamanan kestabilan lereng dikatakan aman apabila memenuhi kriteria klasifikasi Bowles (1989) dengan nilai faktor keamanan  $\geq 1,25$ .

Berkaitan dengan permasalahan tentang air tanah pada lereng, maka dianggap perlu untuk melakukan analisis lebih lanjut mengenai pengaruh air tanah terhadap kestabilan lereng tambang dengan menggunakan pemodelan *Geostudio 2018* yang merupakan perangkat lunak geoteknik dua dimensi khusus stabilitas lereng yang bekerja berdasarkan metode elemen hingga (*finite element method*) dan metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*). *Software* ini digunakan karena relatif mudah dalam pengoperasiannya dan sering digunakan dalam menganalisis stabilitas lereng. Sehingga, dibuatlah penelitian ini dengan judul "Analisis Pengaruh Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Blok B40 PT Sinar Jaya Sultra Utama". Adapun analisis stabilitas lereng tersebut ditentukan dengan memasukkan parameter pengujian sifat fisik dan mekanik tanah, kondisi geometri lereng melalui data topografi, dan data intensitas curah hujan.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Salah salah satu faktor pemicu ketidakstabilan pada lereng tambang dapat dipengaruhi oleh intensitas curah hujan yang tinggi sehingga terjadi pembasahan pada tanah yang dapat mengakibatkan naiknya air tanah dan berkurangnya kekuatan geser tanah karena butir-butir tanah yang menyerap air. Penyerapan air ke dalam tanah seiring dengan waktu sampai terjadi jenuh sehingga menyebabkan lereng menjadi tidak stabil dan mengakibatkan kelongsoran. Kestabilan lereng pada PT Sinar Jaya Sultra Utama

direpresentasikan hanya melalui kegiatan pemantauan lereng tanpa adanya pengaruh air tanah, sedangkan keberadaan dan muka air tanah pada sebuah lereng tambang memiliki pengaruh terhadap kestabilan lereng tersebut. Oleh karena itu, permasalahan yang ingin dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana analisis pengaruh air tanah dengan adanya infiltrasi hujan yang diolah menggunakan *software Geostudio 2018 (Seep/W)* dengan data input berupa data curah hujan dan dilanjutkan dengan menganalisis kestabilan lereng menggunakan *Slope/W* dalam menentukan faktor keamanan lereng dari blok B40.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah, yaitu:

1. Mengetahui nilai faktor keamanan lereng aktual tanpa adanya pengaruh air tanah pada blok B40 PT Sinar Jaya Sultra Utama.
2. Mengetahui nilai faktor keamanan lereng blok B40 PT Sinar Jaya Sultra Utama dengan adanya pengaruh air tanah berdasarkan variasi intensitas curah hujan yang berlangsung selama 7 (tujuh) hari.
3. Mengetahui adanya hubungan antara pengaruh air tanah berdasarkan variasi intensitas curah hujan dengan nilai faktor keamanan lereng yang terjadi pada blok B40 PT Sinar Jaya Sultra Utama.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat berguna bagi PT Sinar Jaya Sultra Utama sebagai bahan kajian tambahan terhadap masalah geoteknik yang dihadapi khususnya masalah yang berkaitan dengan pengaruh air tanah terhadap kestabilan lereng tambang berdasarkan variasi intensitas curah hujan sehingga dapat



meningkatkan keamanan bagi pekerja dan alat yang beroperasi di sekitar area lereng penambangan. Selain itu, dapat memberikan informasi mengenai nilai faktor keamanan dari analisis kestabilan lereng aktual dan dengan adanya pengaruh air tanah terhadap kestabilan lereng blok B40 PT Sinar Jaya Sultra Utama.

## **1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian**

Tahapan kegiatan penelitian merupakan langkah-langkah yang dilakukan untuk menyelesaikan suatu penelitian yang dilaksanakan. Dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan kegiatan penelitian yang dilakukan, yaitu:

### **1. Persiapan**

Tahapan persiapan merupakan kegiatan pendahuluan sebelum dilakukan penelitian dan pengambilan data di lapangan. Tahapan persiapan terdiri dari beberapa tahap, antara lain:

#### **a. Administrasi**

Administrasi merupakan salah satu tahap persiapan yang berkaitan dengan pengurusan segala keperluan administrasi berupa perizinan mengenai kegiatan penelitian yang dilaksanakan kepada beberapa pihak terkait.

#### **b. Perumusan masalah**

Perumusan masalah merupakan tahap untuk merumuskan konsep penelitian yang meliputi penentuan topik penelitian, menentukan permasalahan dan batasan yang akan dibahas dalam penelitian, melakukan studi pendahuluan dan hipotesis, serta menyusun rencana penelitian. Dalam tahap ini menghasilkan proposal tugas akhir dengan tujuan untuk membantu dalam kegiatan pengambilan data di lapangan agar lebih terkontrol dan membantu pada proses penarikan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan. Adapun masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh air

tanah terhadap tingkat kestabilan lereng blok B40 yang ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan berdasarkan kriteria Bowles (1989).

c. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari dan memahami teori-teori penelitian secara umum dengan mengkaji buku, jurnal, maupun jenis literatur lainnya yang berkaitan dengan topik penelitian mengenai air tanah dan kestabilan lereng tambang yang bertujuan untuk menentukan rancangan penelitian. Studi literatur ini dilakukan sebelum dan selama penelitian berlangsung.

2. Pengambilan data

Tahapan pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang dibutuhkan dalam melakukan penelitian dan hal-hal yang berkaitan dengan masalah yang diteliti, serta melakukan pengamatan secara visual terkait dengan kondisi daerah penelitian. Secara umum, pengambilan data dalam penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari perusahaan atau hasil dari penelitian terdahulu. Adapun data yang diperoleh antara lain data topografi, data litologi, data curah hujan, serta data sifat fisik dan mekanik tanah.

3. Pengolahan dan analisis data

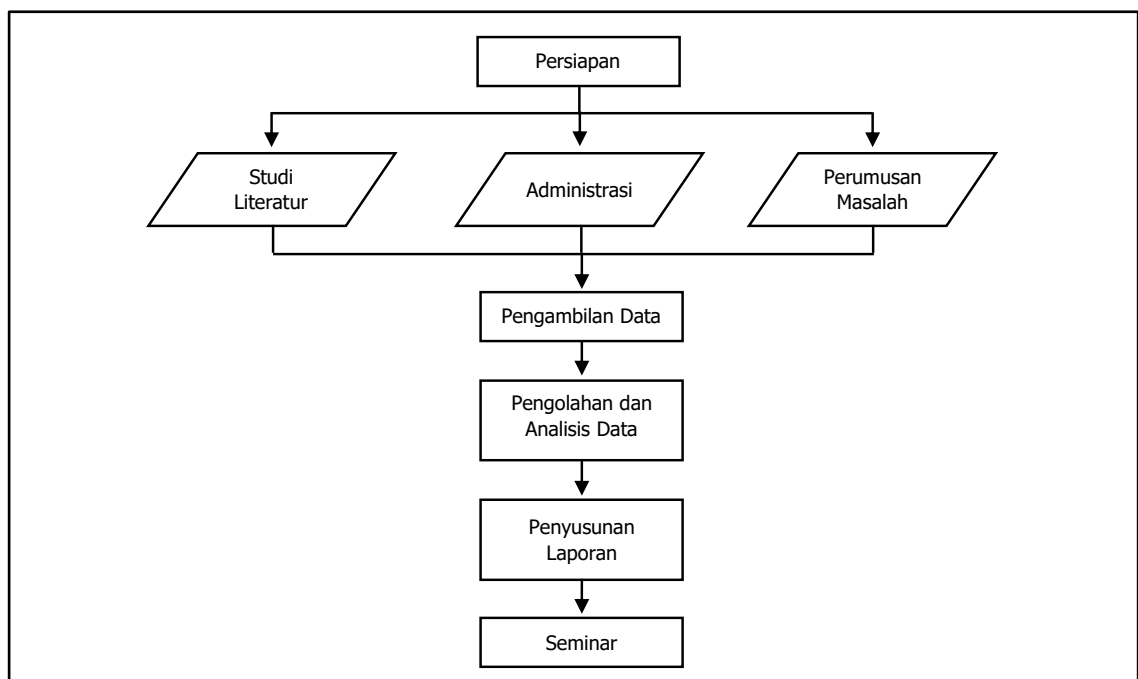
Tahapan pengolahan dan analisis data dilakukan secara ilmiah untuk mencapai tujuan penelitian berdasarkan metodologi yang digunakan. Data yang telah dikumpulkan diolah dan dianalisis dengan menggunakan program *software Geostudio 2018 (Seep/W dan Slope/W)*, dimana metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode elemen hingga (*finite element method*) dan metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) untuk mengetahui hasil dari penelitian dan penyelesaian masalah terkait dengan kestabilan lereng pada blok B40 PT Sinar Jaya Sultra Utama.

#### 4. Penyusunan laporan

Tahapan penyusunan laporan merupakan salah satu tahap dalam rangkaian kegiatan penelitian, dimana keseluruhan data-data yang telah diolah dan dianalisis kemudian dituangkan ke dalam bentuk laporan tugas akhir (skripsi) sesuai dengan format dan kaidah penulisan tugas akhir yang telah ditetapkan oleh Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

#### 5. Seminar

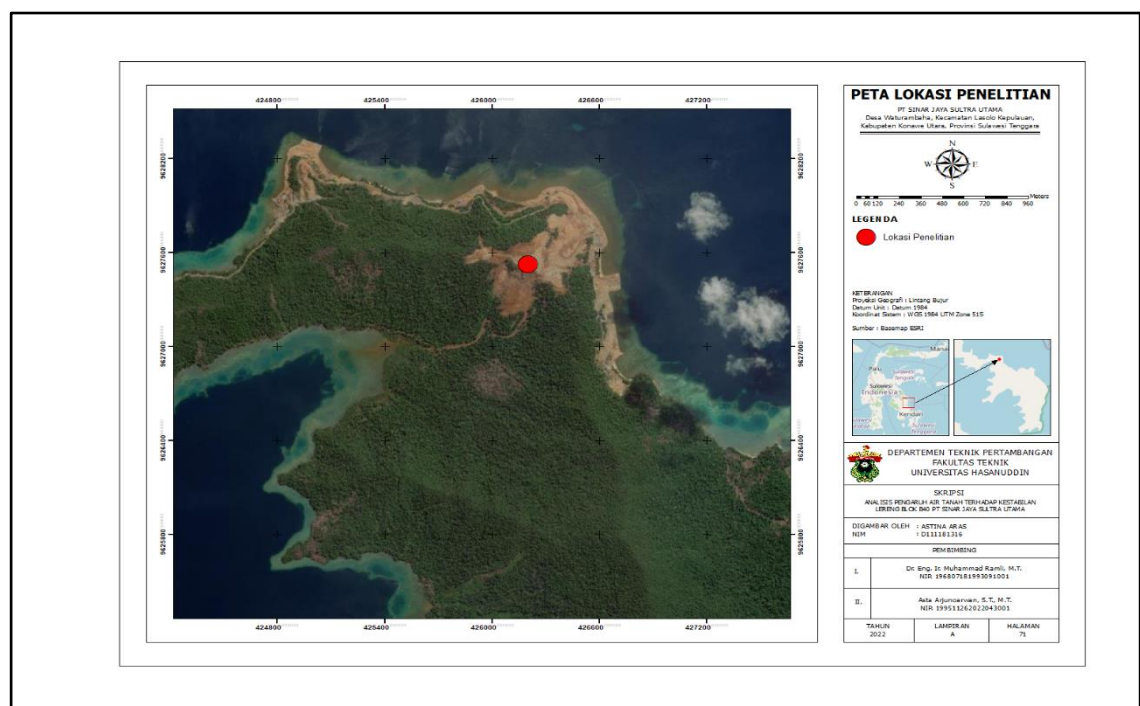
Seminar merupakan tahapan akhir yang dilakukan dalam penelitian ini, dimana hasil penelitian yang telah disusun dalam bentuk skripsi akan dipresentasikan melalui seminar hasil dan ujian sidang tutup. Adapun saran dan kritik yang diperoleh dari kegiatan seminar dijadikan pertimbangan untuk penyempurnaan laporan tugas akhir (skripsi). Kegiatan seminar dapat terlaksana dengan izin pembimbing setelah skripsi dikatakan rampung dan siap untuk dipresentasikan. Setelah itu, skripsi kemudian diserahkan kepada Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.



Gambar 1.1 Diagram alir tahapan kegiatan penelitian

## 1.6 Lokasi Penelitian

Secara administratif lokasi penelitian ini berada pada wilayah operasional penambangan PT Sinar Jaya Sultra Utama, *site* Waturambaha. PT Sinar Jaya Sultra Utama merupakan salah satu perusahaan pertambangan nikel di kawasan Indonesia yang menerapkan sistem penambangan terbuka (*open cast mining*), dengan luasan IUP  $\pm 301$  Ha yang terletak di Desa Waturambaha, Kecamatan Lasolo Kepulauan, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. Secara geografis perusahaan ini terletak pada koordinat  $122^{\circ}19'36''$ – $122^{\circ}20'30''$  BT dan  $03^{\circ}22'0''$ – $03^{\circ}23'17''$  LS. Perjalanan dari Kota Makassar menuju lokasi penelitian dapat ditempuh melalui jalur udara menuju Kota Kendari dengan waktu tempuh  $\pm 55$  menit. Dari Kota Kendari menuju kantor PT Sinar Jaya Sultra Utama sekitar 20 menit, kemudian dari kantor pusat menuju *site* Waturambaha PT Sinar Jaya Sultra Utama yang berlokasi di pantai timur laut Tanjung Boenaga ditempuh dengan menggunakan transportasi darat selama  $\pm 7$  jam melalui jalan pengerasan kawasan perkebunan sawit dan jalan pertambangan.



Gambar 1.2 Peta lokasi penelitian

## **BAB II**

### **KESTABILAN LERENG & AIR TANAH**

#### **2.1 Lereng**

Lereng merupakan suatu permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alamiah karena proses geologi atau karena dibuat oleh manusia. Lereng yang terbentuk secara alamiah misalnya lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia antara lain yaitu galian dan timbunan untuk membuat jalan raya dan jalan kereta api, bendungan, tanggul sungai, kanal, serta dinding tambang terbuka (Gazali, Sidiq, & Surya, 2020).

##### **2.1.1 Lereng Alami**

Lereng alami terbentuk karena fenomena alam yang terjadi. Dalam perencanaan teknik, lereng alami sering dijumpai pada kawasan dengan topografi berbukit dan pegunungan. Lereng alami ialah apabila tidak ada penanganan terhadap lereng tersebut, baik berupa perubahan kemiringan atau penambahan dengan suatu konstruksi tertentu, sehingga kestabilan dari lereng tersebut terbentuk akibat sifat, karakteristik, dan struktur tanah yang mengandalkan kestabilan internal (Supandi, Rande, & Isjudarto, 2017).

Lereng alami yang telah berada dalam kondisi yang stabil selama puluhan atau bahkan ratusan tahun dapat tiba-tiba runtuh sebagai akibat dari adanya perubahan kondisi lingkungan antara lain perubahan bentuk topografi, kondisi air tanah, adanya gempa bumi maupun pelapukan. Kadang-kadang keruntuhan tersebut dapat disebabkan oleh adanya aktivitas konstruksi seperti pembuatan jalan raya, jalan kereta api, saluran air, dan bendungan (Supandi, Rande, & Isjudarto, 2017).

Beberapa pertimbangan yang harus dilakukan dalam analisis kestabilan lereng alami antara lain menentukan apakah longsoran yang mungkin terjadi merupakan

longsoran yang pertama kali atau longsoran yang terjadi pada bidang geser yang sudah ada, serta kemungkinan terjadinya longsoran apabila dibuat suatu pekerjaan konstruksi atau penggalian pada lereng (Supandi, Rande, & Isjudarto, 2017).

### 2.1.2 Lereng Buatan

Lereng buatan merupakan lereng yang terbentuk akibat aktivitas yang dilakukan oleh manusia. Terdapat beberapa jenis geometri pada lereng buatan antara lain *single slope*, *inter-ramp slope*, dan *overall slope*. Ada 2 (dua) contoh lereng buatan yang dikenal dalam pertambangan, yaitu (Hakam, 2010):

#### 1. Timbunan

Analisis kestabilan lereng timbunan biasanya lebih mudah dan mempunyai ketidakpastian yang lebih rendah daripada lereng alami dan galian. Hal ini disebabkan karena material yang digunakan untuk timbunan dapat dipilih dan dikontrol dengan baik. Untuk timbunan dari material yang tak berkohesi, seperti kerikil, pasir atau lanau, parameter yang mempengaruhi kestabilan timbunan yaitu sudut geser, berat satuan tanah, tekanan air pori, dan sudut kemiringan lereng. Longsoran yang terjadi pada timbunan tipe ini biasanya merupakan gelinciran translasional atau gelinciran rotasional yang dangkal. Tekanan air pori yang diakibatkan oleh rembesan akan mengurangi kestabilan timbunan, seringkali dalam analisis diasumsikan muka air tanah berada pada permukaan lereng dan rembesan sejajar dengan permukaan lereng. Kondisi ini biasanya terjadi pada hujan yang sangat deras dan memiliki durasi yang lama.

#### 2. Galian

Tujuan dari rancangan galian adalah untuk menentukan tinggi dan sudut kemiringan lereng yang optimum sehingga lereng tetap stabil dalam jangka waktu yang diinginkan. Lamanya kondisi kestabilan lereng yang harus dipenuhi ditentukan oleh apakah galian bersifat permanen atau sementara, pekerjaan

perawatan yang dirancang pada lereng serta pemantauan kondisi kestabilan yang dipasang pada lereng. Galian dapat dibuat dengan sudut kemiringan tunggal atau menggunakan sudut kemiringan yang bervariasi sesuai dengan tipe material yang digali. Misalnya untuk lereng yang terdiri dari material tanah dan batuan, sudut kemiringan lereng batuan dapat dibuat lebih terjal daripada lereng tanah. Penggalan lereng juga dapat dilakukan secara berjenjang dengan menggunakan *berm* untuk setiap interval ketinggian. Apabila penggalan dilakukan secara berjenjang maka harus dilakukan analisis untuk kestabilan lereng secara keseluruhan maupun lereng tunggal pada setiap jenjang.

Secara umum, di daerah tropis seperti Indonesia, penyebab utama longsor lereng adalah air, baik tekanan air dalam rekahan, alterasi mineral, maupun erosi dari lapisan lunak. Penyebab dari longsor dapat dikategorikan dalam tiga faktor, yakni geometrik, hidraulik, dan mekanik (Muzani, 2021). Namun, masih ada faktor lain yang diterjemahkan dalam beberapa faktor seperti yang disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penyebab Gerakan Massa Tanah (Arif, 2016)

No.	Penyebab Eksternal	Penyebab Internal
1.	Perubahan geometri lereng	Longsor, progresif (perekahan)
2.	Pembebasan beban (erosi, penggalan)	Pelapukan
3.	Pembebanan (penambahan material)	Erosi <i>seepage</i> (pemipaan)
4.	<i>Shock</i> dan vibrasi (gempa bumi)	
5.	Penurunan permukaan air	

Terkait dengan operasi penambangan, masalah kestabilan lereng akan ditemukan pada penggalan tambang terbuka (*open pit*), tempat penimbunan material buangan, penimbunan bijih, bendungan, dan infrastruktur lainnya. Jika lereng seperti pada Gambar 2.1, yang terbentuk sebagai akibat dari proses penambangan (*pit slope*) dan merupakan sarana penunjang operasi penambangan (bendungan, jalan, dan lain-

lain) itu tidak stabil, maka kegiatan produksi yang dilakukan oleh perusahaan akan terganggu dan mengakibatkan ketidaksinambungan produksi. Oleh karena itu, analisis kemantapan lereng 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 (Sudinda, 2020).



Gambar 2.1 Lereng buatan pada tambang terbuka (Read & Stacey, 2009)

## 2.2 Kestabilan Lereng

Kestabilan suatu lereng merupakan salah satu masalah yang penting dan perlu diperhatikan karena berhubungan dengan keselamatan manusia, peralatan, dan bangunan yang berada disekitar area lereng. Di dalam dunia tambang khususnya pada tambang terbuka, lereng yang tidak aman akan mengganggu kelancaran produksi (Herawadi, 2017). Sejatinnya, tanah dan batuan umumnya berada dalam keadaan setimbang, artinya keadaan distribusi tegangan pada tanah atau batuan tersebut dalam



keadaan mantap atau stabil. Namun, karena adanya faktor dari luar maka keadaan setimbang tersebut dapat terganggu dan akan mencapai kesetimbangan baru dengan cara pengurangan beban yang biasa disebut longsor (Hardiyatmo, 2002). Arif (2016), menerangkan bahwa terjadinya longsor lereng tambang dimulai dengan longsor kecil yang kemudian menjadi besar dan menghambat proses operasi penambangan.

Secara umum kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jarak muka air tanah, sudut kemiringan lereng, nilai kuat geser tanah, dan jenis tanah lapisan penyusunnya yang memiliki nilai kohesi dan sudut geser dalam yang berbeda. Adapun maksud analisis stabilitas lereng adalah untuk menentukan nilai faktor keamanan dari bidang longsor yang berpotensi. Faktor keamanan merupakan perbandingan antara gaya penahan dengan gaya penggerak yang terdapat pada suatu bidang gelincir. Gaya penahan merupakan gaya yang menahan terjadinya suatu longsor, sedangkan gaya penggerak merupakan gaya yang menyebabkan terjadinya suatu longsor. Sebuah lereng dapat mengalami longsor apabila gaya penggerak lebih besar dibandingkan dengan gaya penahannya. Sebaliknya, apabila gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak maka lereng tersebut dapat dikatakan stabil atau tidak mengalami longsor (Fianti, Munirwansyah, & Yunita, 2020).

Analisis stabilitas lereng terdiri dari perkiraan antara gaya keruntuhan dengan gaya kuat geser tanah. Keruntuhan dapat dipicu oleh adanya beban massa di atas tanah maupun karena pengaruh air dalam tanah. Air dalam tanah dapat menambah beban massa tanah yang juga akan mempengaruhi kuat geser tanah. Gaya yang menyebabkan ketidakstabilan (gaya penggerak) yaitu berat tanah itu sendiri dan gaya penahan yang berasal dari gaya geser tanah (Sepriadi & Prastowo, 2018). Pola keruntuhan yang akan terjadi, tidak dapat ditentukan dan dipastikan, namun dapat diperkirakan dengan melakukan analisis. Metode yang paling umum dalam analisis kestabilan lereng didasarkan pada syarat kesetimbangan. Analisis yang dimaksud ialah dengan

memperhitungkan faktor keamanan (*safety factor*) dari lereng yang dipantau. Analisis bertujuan untuk menentukan apakah lereng tersebut mantap atau stabil. Dengan menggunakan analisis kesetimbangan tersebut, perbandingan antara gaya penahan yang ada serta gaya penggerak dapat dibuat. Kestabilan lereng berdasarkan faktor keamanan dapat dinyatakan sebagai berikut (Bowles, 1989):

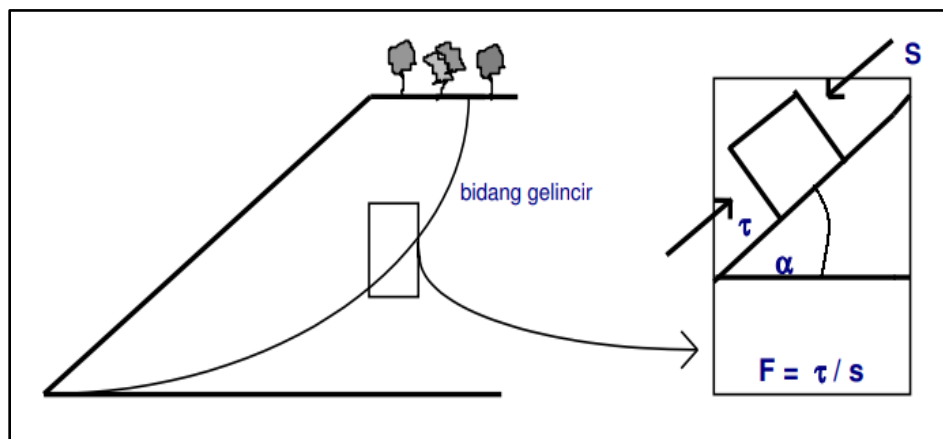
$$Fk = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{\Sigma \text{ gaya penahan}}{\Sigma \text{ gaya penggerak}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

Fk = Faktor keamanan lereng

$\tau_f$  = Gaya penahan

$\tau_d$  = Gaya penggerak



Gambar 2.2 Sketsa lereng dan gaya-gaya yang bekerja (Parker & Means, 1974)

Mengingat banyaknya faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng tambang maka hasil analisis melalui kegiatan pemantauan lereng dianggap belum dapat menjamin bahwa lereng tersebut dalam keadaan stabil. Hal ini disebabkan karena ada beberapa faktor yang perlu diperhitungkan dalam analisis faktor keamanan lereng penambangan seperti sifat fisik dan mekanik batuan serta keberadaan muka air tanah pada area lereng tersebut. Dengan demikian, diperlukan suatu nilai faktor keamanan minimum dengan suatu nilai tertentu yang disarankan sebagai batas faktor keamanan terendah yang

masih aman sehingga lereng dapat dinyatakan stabil atau tidak (Ali, Najib, & Nasrudin, 2017). Secara umum, faktor keamanan yang sering digunakan adalah  $FK \geq 1,25$  sesuai prosedur dari Bowles (1989) dengan ketentuan:

Tabel 2.2 Kondisi lereng berdasarkan nilai faktor keamanan (Bowles, 1989)

Nilai Faktor Keamanan	Kondisi Lereng
$FK < 1,07$	Lereng dalam kondisi tidak aman (labil)
$FK = 1,07 - 1,25$	Lereng dalam kondisi kritis
$FK \geq 1,25$	Lereng dalam kondisi aman (relatif stabil)

Umumnya pada permukaan tanah yang tidak horizontal, komponen gravitasi cenderung untuk menggerakkan tanah ke bawah. Jika komponen gravitasi sedemikian besar sehingga perlawanan terhadap geseran yang dapat dikerahkan oleh tanah pada bidang longsornya terlampaui, maka akan terjadi kelongsoran lereng. Analisis stabilitas pada permukaan tanah yang miring, disebut analisis stabilitas lereng. Umumnya analisis stabilitas dilakukan untuk mengecek keamanan dari lereng alam, lereng galian, dan lereng urugan tanah. Analisis stabilitas lereng tidak mudah, karena terdapat banyak faktor yang sangat mempengaruhi hasil hitungan. Faktor-faktor tersebut misalnya kuat geser tanah yang anisotropis, aliran rembesan air di dalam tanah, dan lain-lain (Hardiyatmo, 2002). Terzaghi (1950), membagi penyebab kelongsoran lereng terdiri dari akibat pengaruh dalam (*internal effect*) dan pengaruh luar (*external effect*). Pengaruh luar, yaitu pengaruh yang menyebabkan bertambahnya gaya geser dengan tanpa adanya perubahan kuat geser tanah. Contohnya, akibat perbuatan manusia yang mempertajam kemiringan tebing atau memperdalam galian tanah dan erosi sungai. Pengaruh dalam, yaitu longsoran yang terjadi dengan tanpa adanya perubahan kondisi luar atau gempa bumi.

Ada tiga pendekatan utama dari analisis kestabilan lereng yaitu pendekatan mekanika batuan, mekanika tanah, pendekatan yang memakai kombinasi keduanya.

Beberapa metode analisis kestabilan yang dapat digunakan antara lain metode analitik, metode grafik, metode steronet, metode kesetimbangan batas, metode numerik (metode elemen hingga, elemen diskrit, dan elemen batas), metode probabilistik, teori blok maupun pemodelan fisik (Frans & Nurfalaq, 2019). Adapun tahap-tahap suatu studi kemantapan lereng secara umum adalah tahapan studi topografi dan geologi umum, studi struktur massa batuan, studi karakteristik fisik dan geomekanik, studi kondisi hidrologi dan hidrogeologi, permodelan perhitungan kemantapan lereng, serta perbaikan kemantapan lereng antara lain berupa perkuatan lereng dan pemantuan kemantapan lereng (Ferdianto, Saismana, Hakim, & Sudarmaji, 2017).

Salah satu cara untuk menjaga stabilitas suatu lereng yaitu dengan menerapkan metode perkuatan lereng. Perkuatan lereng dibutuhkan agar tidak terjadi keruntuhan akibat beban yang berada di atas lereng. Secara umum terdapat 2 (dua) cara agar lereng menjadi stabil, yaitu (Wesley, 2010):

1. Gaya penggerak atau momen penggerak diperkecil dengan cara mengubah bentuk lereng yang bersangkutan seperti mengubah lereng lebih landai atau mengurangi sudut kemiringan lereng, memperkecil ketinggian lereng, dan mengubah lereng menjadi lereng bertingkat (*multi slope*).
2. Gaya melawan atau momen diperbesar yaitu dengan cara menggunakan *counterweight* yaitu timbunan pada kaki lereng, mengurangi tekanan air pori di dalam lereng, dan memasang tiang atau membuat dinding penahan tanah.

### **2.3 Longsoran**

Longsoran merupakan pergerakan massa tanah atau batuan kearah miring, mendatar, atau vertikal pada salah satu lereng. Longsor terjadi karena terganggunya kesetimbangan lereng akibat pengaruh gaya-gaya yang berasal dari dalam lereng seperti gaya gravitasi bumi, tekanan air pori dalam tanah, dan gaya dari luar lereng seperti

getaran alat dan pembebanan pada lereng. Dalam longsoran yang sebenarnya, gerakan ini terjadi dari peregangan secara geser dan peralihan sepanjang suatu bidang atau beberapa bidang gelincir yang nampak secara visual. Gerakan ini dapat bersifat progresif yang berarti bahwa keruntuhan geser tidak terjadi seketika pada seluruh bidang gelincir melainkan merambat dari suatu titik. Tingkat pelapukan yang tinggi, kecuraman lereng, dan curah hujan yang tinggi menjadi beberapa pemicu terjadinya bencana longsor. Potensi terjadinya longsor dapat diminimalisir dengan mengenali topologi lereng yang rawan longsor, gejala awal lereng akan bergerak, serta sistem peringatan dini yang efektif (Apriyono, 2009).

Menurut Skempton dan Hutchinson (1969), tanah longsor atau gerakan tanah didefinisikan sebagai gerakan menuruni lereng oleh massa tanah akibat terganggunya batuan penyusun lereng. Dimana lereng yang memiliki faktor keamanan yang masuk dalam kategori rendah atau kecil, sewaktu-waktu dapat mengalami keruntuhan yang dapat memberikan dampak kerugian yang cukup besar bagi manusia. Permukaan tanah yang tidak datar memiliki kemiringan tertentu terhadap bidang horizontal yang dapat menyebabkan komponen berat tanah yang sejajar dengan kemiringan bergerak ke arah bawah. Bila berat tanah tersebut cukup besar longsoran tanah dapat terjadi, dengan kata lain gaya dorong melampaui gaya yang berlawanan dari kekuatan geser tanah sepanjang bidang longsor. Tanah yang tidak datar akan menghasilkan gaya gravitasi dari berat tanah yang cenderung menggerakkan masa tanah dari elevasi yang lebih tinggi keelevasi yang lebih rendah.

Berdasarkan definisi dan klasifikasi longsoran menurut Varnes (1978), maka disimpulkan gerakan tanah (*mass movement*) merupakan gerakan perpindahan atau gerakan lereng dari bagian atas atau perpindahan massa tanah maupun batuan pada arah tegak, mendatar atau miring dari kedudukan semula. Selain itu, Varnes (1978) mengklasifikasi tanah longsor menjadi 5 (lima) jenis yaitu runtuh (*fall*), robohan

(*topple*), longSORan (*slides*), pencaran lateral (*lateral spread*), dan aliran (*flow*). Klasifikasi ini didasarkan pada mekanisme gerakan tanah dan material yang berpindah. Beberapa klasifikasi tersebut diuraikan sebagai berikut:

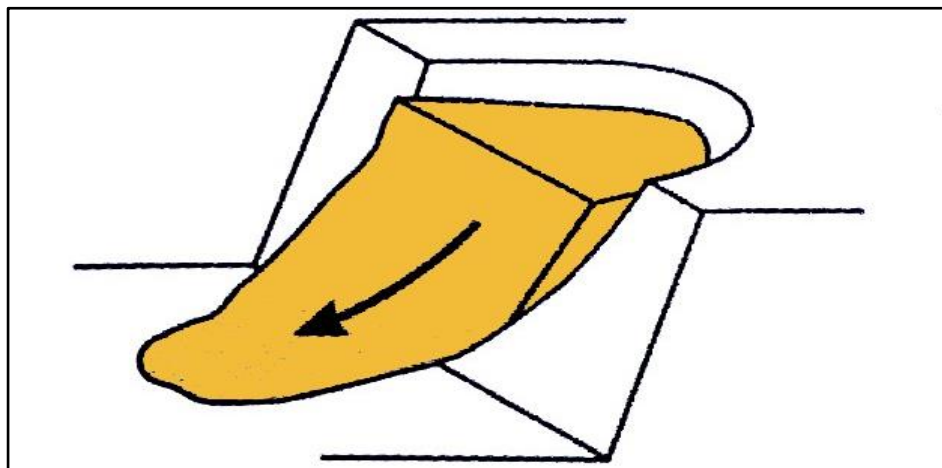
1. Runtuhan (*falls*) adalah runtuhnya sebagian massa batuan pada lereng yang terjal. Jenis ini memiliki ciri yaitu sedikit atau tanpa disertai terjadinya pergeseran antara massa yang runtuh dengan massa yang tidak runtuh. Runtuhnya massa batuan umumnya dengan cara jatuh bebas, meloncat atau menggelinding tanpa melalui bidang gelincir. Penyebab terjadinya runtuhan adalah adanya bidang-bidang diskontinu seperti retakan-retakan pada batuan.
2. Robohan (*topples*) adalah robohnya batuan yang umumnya bergerak melalui bidang-bidang diskontinu yang sangat tegak pada lereng. Bidang diskontinu ini berupa retakan pada batuan seperti pada runtuhan. Robohan ini biasanya terjadi pada batuan dengan kelerengan sangat terjal sampai tegak.
3. LongSORan (*slide*) adalah gerakan menuruni lereng oleh material penyusun lereng, melalui bidang gelincir pada lereng. Seringkali dijumpai tanda-tanda awal gerakan berupa retakan berbentuk lengkung tapal kuda pada bagian permukaan lereng yang mulai bergerak. Bidang gelincir ini dapat berupa bidang yang relatif lurus (translasi) ataupun bidang lengkung ke atas (rotasi).
4. Pencaran lateral (*lateral spread*) adalah material tanah atau batuan yang bergerak dengan cara perpindahan translasi pada bagian dengan kemiringan landai sampai datar. Pergerakan terjadi pada lereng yang tersusun atas tanah lunak dan terbebani oleh massa tanah di atasnya. Pembebanan inilah yang mengakibatkan lapisan tanah lunak tertekan dan mengembang ke arah lateral.
5. Aliran (*flows*) yaitu aliran massa yang berupa aliran fluida kental. Aliran pada bahan rombakan dapat dibedakan menjadi aliran bahan rombakan (*debris*), aliran tanah (*earth flow*) apabila massa yang bergerak didominasi oleh material

tanah berukuran butir halus (butir lempung), dan aliran lumpur (*mud flow*) apabila massa yang bergerak jenuh air. Jenis lain dari aliran ini adalah aliran kering yang biasa terjadi pada endapan pasir (*dry flow*).

Sedangkan, Hoek dan Bray (1981) mengklasifikasikan longsoran pada tambang terbuka menjadi 4 (empat) jenis longsoran yaitu longsor busur (*circular failure*), longsor bidang (*plane failure*), longsor baji (*wedge failure*), dan longsor guling (*toppling failure*), berikut penjelasannya:

1. Longsor busur (*circular failure*)

Longsor busur merupakan longsor batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang berbentuk busur (Gambar 2.3). Longsor busur paling umum terjadi di alam, terutama pada batuan yang lunak (tanah). Pada batuan yang keras, longsor busur hanya dapat terjadi jika batuan tersebut sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidang-bidang lemah (rekahan) yang sangat rapat dan tidak dapat dikenal lagi kedudukannya. Longsor busur akan terjadi jika partikel individu pada suatu tanah atau massa batuan sangat kecil dan tidak saling mengikat. Penurunan sebagian permukaan atas lereng yang berada disamping rekahan menandakan adanya gerakan lereng yang pada akhirnya akan menimbulkan kelongsoran lereng.

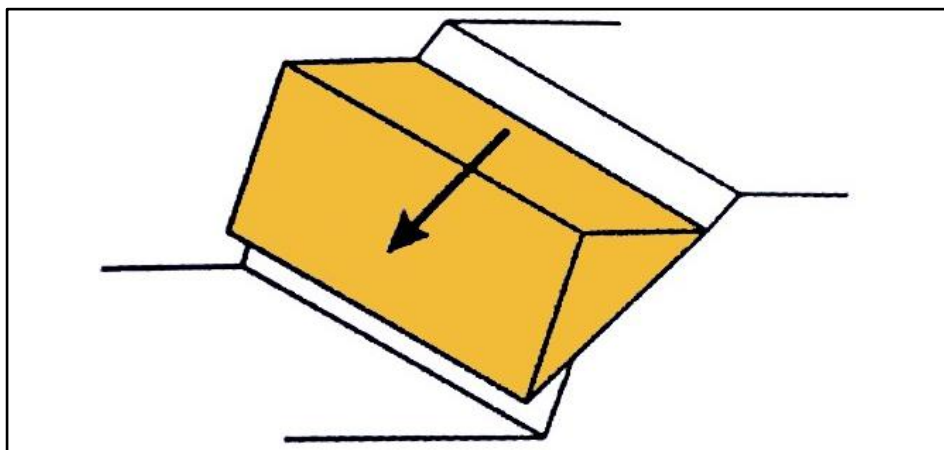


Gambar 2.3 Skema longsor busur (Arif, 2016)

## 2. Longsoran bidang (*plane failure*)

Longsoran bidang merupakan suatu longsoran batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang dianggap rata. Bidang luncur tersebut dapat berupa bidang sesar, rekahan (*joint*) maupun bidang perlapisan batuan. Jenis longsoran ini jarang terjadi di area pertambangan. Namun, longsoran ini akan sangat mungkin terjadi apabila terdapat kondisi yang menunjang. Longsoran ini biasa terjadi apabila terdapat struktur geologi yang berkembang, seperti adanya kekar (*joint*) maupun patahan yang searah terhadap bidang gelincirnya. Skema longsoran bidang dapat dilihat pada Gambar 2.4. Longsoran bidang dapat terjadi jika ditemukan pada dua kondisi antara lain:

- a. Kemiringan dari bidang diskontinuitas harus melebihi sudut geser dalam.
- b. Kemiringan dari bidang diskontinuitas harus lebih kecil dari kemiringan muka lereng.



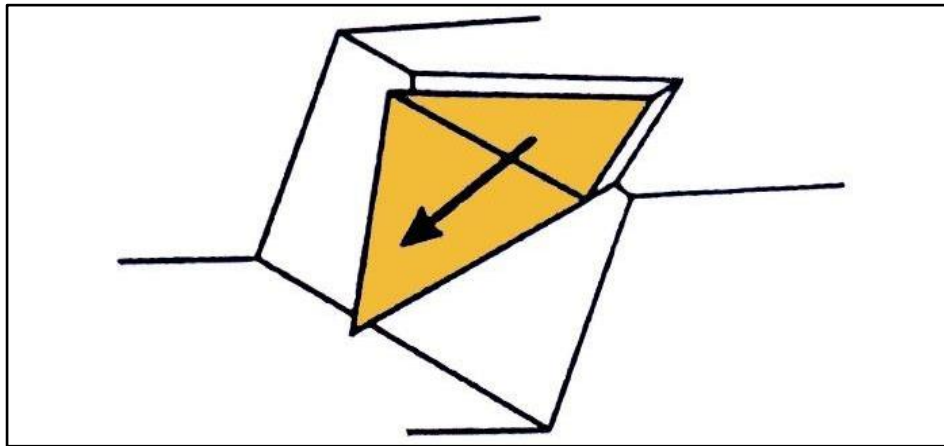
Gambar 2.4 Skema longsoran bidang (Arif, 2016)

## 3. Longsoran baji (*wedge failure*)

Longsoran baji serupa dengan longsoran bidang, yang diakibatkan oleh perkembangan struktur geologi (kekar). Longsoran ini hanya bisa terjadi pada batuan yang mempunyai lebih dari satu bidang lemah yang saling berpotongan membentuk baji (*plane A* dan *plane B*), dalam kondisi yang sangat sederhana



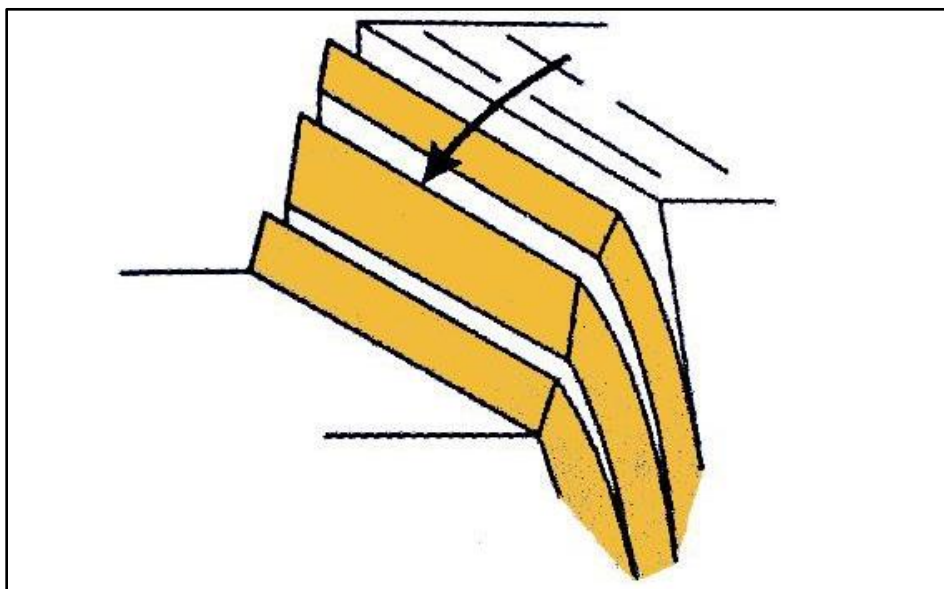
longsoran baji terjadi pada sepanjang garis potong kedua bidang lemah tersebut (*line of intersection*) seperti yang terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema longsoran baji (Arif, 2016)

#### 4. Longsoran guling (*toppling failure*)

Longsoran guling, yang skema terjadinya terlihat pada Gambar 2.6 umumnya terjadi pada permukaan lereng yang terjal, serta pada jenis batuan yang keras. Dimana struktur bidang lemahnya berbentuk menyerupai kolom. Longsoran ini terjadi apabila bidang lemah yang terdapat pada lereng memiliki sudut kemiringan yang tegak hingga berlawanan dengan arah kemiringan lereng.



Gambar 2.6 Skema longsoran guling (Arif, 2016)

Kelongsoran yang terjadi pada lereng secara garis besar dapat disebabkan oleh beberapa hal, seperti (Hardiyatmo, 2006):

1. Penambahan beban yang terjadi di atas lereng. Tambahan beban lereng dapat berupa bangunan baru, tambahan beban oleh air yang masuk ke pori-pori tanah maupun yang menggenang di permukaan tanah, serta beban dinamis oleh tumbuh-tumbuhan yang tertiuip angin dan lain-lain.
2. Penggalian atau pemotongan tanah pada kaki lereng yang akan mengubah dan mempertajam kemiringan lereng. Kondisi tersebut terlihat dari banyaknya titik longsoran pada tebing-tebing dari hasil pemotongan tanah yang dilakukan pada kaki lereng.
3. Perubahan posisi muka air secara cepat yang biasa terjadi pada bendungan dan sungai. Dimana perubahan tersebut terjadi pada musim penghujan yang dapat menyebabkan terjadinya longsoran pada tebing sungai.
4. Kenaikan tekanan lateral oleh air (dimana air yang mengisi retakan akan mendorong tanah ke arah lateral).
5. Getaran atau gempa bumi yang terjadi secara berlebihan, dimana gempa merupakan getaran pada permukaan bumi yang diakibatkan oleh pelepasan energi yang sangat besar. Gempa pada umumnya dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu gempa tektonik yang berasal dari pergeseran lempeng bumi yang mengakibatkan pelepasan energi sangat besar, gempa vulkanik yang berasal dari aktivitas pergerakan magma di dalam perut bumi, dan gempa buatan manusia yang diakibatkan oleh aktivitas manusia seperti pengeboman pada tambang dan penggunaan alat berat yang dapat mengakibatkan suatu getaran yang cukup besar. Ketika gempa terjadi, tanah menjadi media bagi getaran sehingga mengakibatkan tanah menjadi lebih padat atau kebalikannya gaya geser antar partikel tanah menghilang. Ketika gaya geser antar partikel tanah sama dengan

nol atau sangat kecil maka daya dukung tanah tersebut menurun. Pada lereng khususnya angka keamanan akan jatuh dan berpotensi terjadinya longsor.

6. Penurunan tahanan geser tanah pembentuk lereng akibat kenaikan kadar air, kenaikan tekanan air pori, dan tekanan rembesan genangan air dalam tanah.
7. Aktivitas manusia yang memicu terjadinya longsor pada umumnya berkaitan dengan pekerjaan konstruksi dan kegiatan yang merubah sudut kemiringan lereng serta kondisi air permukaan juga air tanah. Perubahan sudut kemiringan lereng dapat disebabkan oleh galian dan timbunan, konstruksi gedung, serta operasi tambang terbuka. Apabila aktivitas-aktivitas tersebut dikerjakan atau dirancang dengan sembarangan, maka longsor dapat terjadi karena beban yang bekerja pada lereng melebihi tahanan geser yang dimiliki oleh lereng.

## **2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng**

Secara umum, lereng yang terbentuk dari tanah maupun batuan merupakan struktur alam terbuka. Dengan keadaan yang demikian, maka terdapat banyak faktor-faktor di alam terbuka yang dapat mempengaruhi (mengganggu) kestabilan lereng tersebut. Faktor-faktor yang menyebabkan gangguan pada lereng dapat berupa faktor alami (seperti geometri lereng, kekuatan massa batuan, struktur batuan, air tanah, dan iklim) maupun faktor akibat aktivitas manusia (seperti alat berat yang bekerja disekitar lereng dan getaran dari kegiatan peledakan) (Hakam, 2010).

### **2.4.1 Lereng Tambang**

Ketidakstabilan lereng tambang dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain geometri lereng, kekuatan massa batuan lereng, struktur batuan, air tanah, beban luar, dan tegangan insitu. Faktor-faktor tersebut dapat juga dipergunakan untuk mengenali tanda-tanda suatu potensi kelongsoran lereng, berikut penjelasannya (Badan Standardisasi Nasional, 2017):

## 1. Geometri lereng

Geometri lereng yang dapat mempengaruhi kestabilan lereng meliputi tinggi lereng, kemiringan lereng, dan lebar *berm* baik itu lereng tunggal (*single slope*) maupun lereng keseluruhan (*overall slope*). Suatu lereng disebut lereng tunggal jika dibentuk oleh satu jenjang dan disebut lereng keseluruhan jika dibentuk oleh beberapa jenjang. Lereng yang terlalu tinggi akan cenderung lebih mudah longsor dibanding dengan lereng yang tidak terlalu tinggi dan dengan jenis batuan penyusun yang sama atau homogen. Demikian pula dengan sudut lereng, semakin besar sudut kemiringan lereng maka lereng akan semakin tidak stabil. Sedangkan, semakin besar lebar *berm* maka lereng tersebut akan semakin stabil.

## 2. Kekuatan massa batuan

Kekuatan yang sangat berperan dalam analisis kestabilan lereng terdiri dari sifat fisik dan mekanik dari batuan tersebut. Sifat fisik batuan yang digunakan dalam menganalisis kemantapan lereng adalah bobot isi tanah ( $\gamma$ ), sedangkan sifat mekaniknya adalah kuat geser batuan yang dinyatakan dengan parameter kohesi (C) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Kekuatan geser batuan atau tanah ini adalah kekuatan yang berfungsi sebagai gaya untuk melawan atau menahan gaya penyebab kelongsoran.

### a. Bobot isi tanah atau batuan

Bobot isi merupakan perbandingan antara berat material dengan volume material. Nilai bobot isi tanah atau batuan akan menentukan besarnya beban yang diterima pada permukaan bidang longsor, dinyatakan dalam satuan berat per volume. Bobot isi batuan juga dipengaruhi oleh jumlah kandungan air dalam batuan tersebut. Semakin besar bobot isi pada suatu lereng tambang, maka gaya geser penyebab kelongsoran akan semakin besar. Bobot isi dapat diketahui dari pengujian laboratorium. Nilai bobot isi batuan

untuk analisis kestabilan lereng terdiri dari 3 (tiga) parameter yaitu nilai bobot isi batuan pada kondisi asli ( $\gamma_n$ ), bobot isi pada kondisi kering ( $\gamma_d$ ), dan bobot isi pada kondisi basah ( $\gamma_w$ ) (Noorchayo, Toha, & Bochori, 2019).

b. Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antara partikel dalam batuan, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi batuan akan semakin besar jika kekuatan gesernya semakin besar. Nilai kohesi (C) diperoleh dari pengujian laboratorium yaitu pengujian kuat geser langsung (*direct shear strength test*) dan pengujian *triaxial (triaxial test)* (Noorchayo, Toha, & Bochori, 2019).

c. Sudut geser dalam

Sudut geser dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam atau sudut rekahan terbentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang dikenakan terhadapnya. Sudut geser dalam sangat berperan untuk menentukan kekuatan atau kemampuan tanah menahan tekanan beban tambahan dari luar (Noorchayo, Toha, & Bochori, 2019).

3. Struktur batuan

Struktur batuan yang sangat mempengaruhi ketidakstabilan lereng adalah bidang-bidang sesar, pelapisan, dan rekahan. Struktur batuan tersebut merupakan bidang lemah (diskontinuitas) dan juga sebagai zona rembesan air sehingga batuan lebih mudah longsor. Arah dan kemiringan bidang lemah akan menentukan model dari potensial longsor yang terjadi. Lereng yang memiliki

orientasi sejajar dengan bidang lemah akan lebih berpotensi mengalami longsor dibanding dengan lereng yang memiliki orientasi tegak lurus terhadap bidang lemah. Hal ini disebabkan karena orientasi bidang lemah yang tegak lurus dengan orientasi lereng akan menahan gaya normal yang bekerja pada lereng.

#### 4. Air tanah

Pengaruh air tanah terhadap ketidakstabilan lereng terletak pada adanya tekanan air pori yang akan mengurangi kekuatan geser tanah. Penambahan air tanah pada pori-pori tanah atau batuan akan memperbesar beban dan pada akhirnya menimbulkan gaya penggerak yang dapat mengakibatkan terjadinya longsor. Kondisi air tanah yang dimaksud disini adalah ketinggian level air tanah yang berada di bawah permukaan lereng. Pengaruh air tanah terhadap kestabilan lereng yaitu adanya tekanan ke atas dari air pada bidang-bidang lemah yang secara efektif mengurangi kekuatan geser dan mempercepat proses pelapukan dari batuan. Selain itu, kandungan air pada batuan akan meningkatkan berat batuan yang akan menjadi beban terhadap lereng. Semakin tinggi muka air tanah, maka semakin tinggi potensi kelongsoran yang terjadi pada lereng.

#### 5. Iklim

Iklim berpengaruh terhadap kestabilan lereng karena iklim mempengaruhi perubahan temperatur. Temperatur yang cepat sekali berubah dalam waktu yang singkat akan mempercepat proses pelapukan batuan. Untuk daerah tropis pelapukan lebih cepat dibandingkan dengan daerah dingin, oleh karena itu singkapan batuan pada lereng di daerah tropis akan lebih cepat lapuk dan ini akan mengakibatkan lereng mudah tererosi sehingga mengalami kelongsoran.

#### 6. Beban luar

Beban atau gaya luar yang dapat mempengaruhi ketidakstabilan lereng penambangan antara lain getaran yang ditimbulkan dari penggunaan alat-alat

berat di sekitar lereng dan getaran yang diakibatkan oleh kegiatan peledakan. Gaya-gaya yang berkerja tersebut akan memperbesar tegangan geser sehingga dapat mengakibatkan kelongsoran pada lereng.

#### 7. Tegangan insitu

Pada tambang terbuka yang sangat dalam atau mempunyai lereng tambang sangat tinggi, maka tegangan (*stress*) insitu dapat menyebabkan ketidakstabilan lereng. Tegangan yang terkonsentrasi pada suatu area yang sempit akan melampaui kekuatan batuan, sehingga batuan akan pecah dan memicu kelongsoran. Selain itu, pada beberapa daerah dimana tektonik *stress* hadir atau adanya *stress* residu horizontal dapat memicu terjadinya longsor.

#### 2.4.2 Lereng Timbunan

Pada lereng timbunan batuan penutup yang merupakan tumpukan batuan pecah (*broken rocks*), bentuk longsor yang mungkin terjadi adalah *circular failure* atau sering juga disebut longsor busur. Faktor-faktor yang mempengaruhi ketidakstabilan lereng timbunan batuan penutup adalah beban dinamik peralatan, material penyusun timbunan, geometri lereng, air permukaan dan air tanah, tapak timbunan, serta laju dan jenis penimbunan. Tapak timbunan yang tidak stabil berupa lumpur atau terdapat struktur akan mengakibatkan ketidakstabilan lereng timbunan. Sementara itu, tingkat kelajuan penimbunan yang tinggi akan meningkatkan potensi terjadinya longsor (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

Semakin tinggi sebuah lereng maka semakin besar resiko yang akan dihadapi. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi lereng, maka semakin besar perubahan tegangan (*stress*) yang dapat menyebabkan konsentrasi tegangan pada kaki lereng serta dengan semakin besarnya geometri, maka ketersingkapan struktur pun akan semakin besar yang dapat menyebabkan terjadinya ketidakstabilan pada lereng. Pada dasarnya sebuah lereng yang curam merupakan kondisi paling tidak stabil, namun tidak menutup

kemungkinan bahwa suatu lereng yang landai tidak mengalami peristiwa longsor (Duncan, Wright, & Brandon, 2014). Menurut Dunn, dkk (1980) faktor-faktor yang menyebabkan ketidakstabilan pada lereng secara umum diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Faktor-faktor yang menyebabkan naiknya tegangan meliputi naiknya berat tanah akibat komponen air, terdapat beban eksternal seperti bangunan, bertambahnya kecuraman lereng akibat erosi maupun penggalian, serta adanya guncangan yang ditimbulkan dari luar.
2. Faktor-faktor yang menyebabkan turunnya kemantapan dapat terjadi dengan adanya adsorpsi air, kenaikan tekanan pori, mengalami penambahan beban secara berulang, pengaruh pembekuan dan pencairan, hilangnya sementasi material serta terjadinya proses pelapukan. Hadirnya air adalah faktor utama dari kebanyakan longornya suatu lereng, hal ini dikarenakan kehadiran air menyebabkan naiknya tegangan maupun turunnya gaya penahan tanah.

## **2.5 Metode Analisis Kestabilan Lereng**

Analisis kestabilan lereng merupakan analisis yang sering kali perlu dilakukan untuk mengevaluasi kondisi kestabilan lereng, karena hampir setiap pekerjaan konstruksi sering melibatkan pembuatan lereng seperti galian, timbunan, dan konstruksi di atas lereng. Metode-metode dalam analisis stabilitas lereng termasuk bagian dari teknologi struktur secara keseluruhan dengan membuat suatu pemodelan yang tepat, akurat, dan realistis sebagai solusi pemecahan masalah terkait kestabilan lereng. Dalam analisis kestabilan lereng terdapat dua metode yang digunakan yaitu metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) dan metode elemen hingga (*finite element method*). Pada umumnya metode yang sering digunakan adalah metode kesetimbangan batas. Namun, seiring perkembangan teknologi komputer maka berkembang pula aplikasi metode elemen hingga untuk analisis kestabilan lereng. Berbeda dengan metode

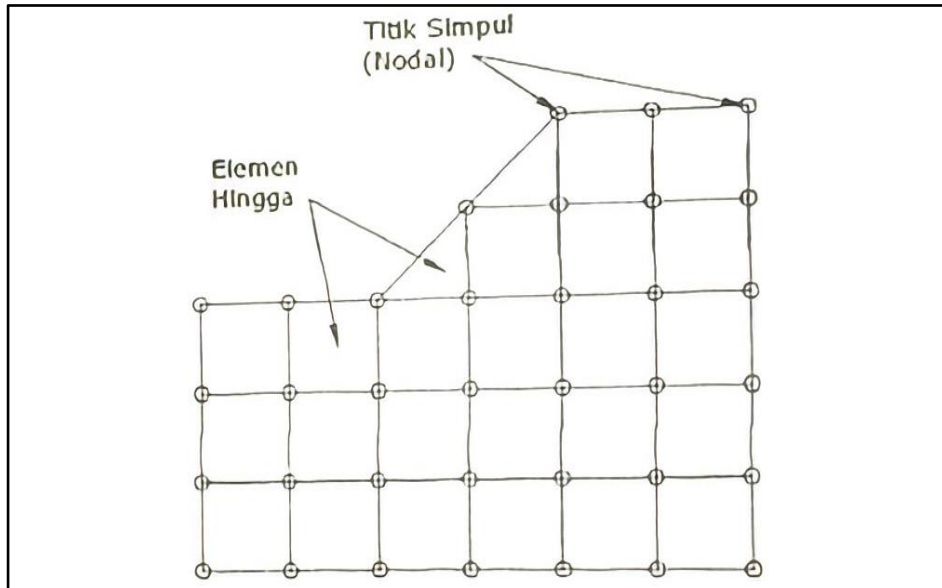


kesetimbangan batas dimana bidang longsor ditentukan terlebih dahulu, namun pada metode elemen hingga dilakukan dengan mencari titik-titik atau bidang lemah di dalam tanah sebagai penentuan bidang kelongsoran (Liong & Herman, 2012).

#### 2.5.1 *Finite Element Method*

*Finite element method* (metode elemen hingga) menurut Loilatu & Iswandaru (2022), merupakan cara pendekatan solusi analisis struktur kontinum dengan derajat kebebasan tak hingga yang disederhanakan dengan diskretasi kontinum dalam elemen-elemen kecil yang umumnya memiliki geometri lebih sederhana dengan derajat kebebasan tertentu (berhingga), sehingga lebih mudah dianalisis. Elemen-elemen diferensial ini memiliki asumsi fungsi perpindahan yang dikontrol pada titik-titik simpulnya. Pada metode elemen hingga, tanah dimodelkan sebagai kumpulan elemen-elemen yang berlainan menggunakan model elastoplastisitas tegangan dan regangan berdasarkan prinsip mekanika tanah. Metode elemen hingga tidak menggunakan asumsi bidang longsor. Hal ini disebabkan faktor keamanan didapatkan dengan mencari bidang lemah pada struktur lapisan tanah.

Sedangkan, menurut Ruslan (2007) menyatakan bahwa metode elemen hingga domain dari daerah yang dianalisis dibagi ke dalam sejumlah zona kecil yang dinamakan elemen. Elemen-elemen tersebut dianggap saling berkaitan pada sejumlah titik simpul. Perpindahan pada setiap titik simpul dihitung terlebih dahulu, kemudian dengan sejumlah fungsi interpolasi yang diasumsikan, perpindahan pada sembarang titik dapat dihitung berdasarkan nilai perpindahan pada titik-titik simpul. Selanjutnya, regangan yang terjadi pada setiap elemen dihitung berdasarkan besarnya perpindahan masing-masing titik simpul. Berdasarkan nilai regangan tersebut dapat dihitung tegangan yang bekerja pada setiap elemen. Elemen-elemen yang dipilih dengan idealisasi dua dimensi dapat berupa segitiga dengan enam titik simpul ataupun segiempat dengan empat atau lebih titik simpul seperti yang terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Elemen hingga dan titik simpul pada geometri (Ruslan, 2007)

Analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode elemen hingga akan memberikan gambaran mengenai besarnya perpindahan pada setiap titik simpul dan besarnya tegangan pada setiap elemen yang ada. Terdapat dua pendekatan yang umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode elemen hingga, yaitu (Arif, 2016):

1. Metode pengurangan kekuatan geser (*strength reduction method*)

Prinsip metode ini ialah kekuatan geser material nilainya dikurangi secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Pengurangan parameter kohesi (C) dan sudut geser dalam ( $\emptyset$ ) dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_f = \frac{c}{SRF} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\emptyset_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \emptyset}{SRF}\right) \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

SRF = Faktor reduksi kekuatan geser.

Faktor keamanan (FK) besarnya sama dengan nilai SRF pada saat terjadi keruntuhan.

2. Metode penambahan gravitasi (*gravity increase method*)

Prinsip dari metode penambahan gravitasi yaitu nilai gravitasi dinaikkan secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Faktor keamanan dalam pendekatan ini didefinisikan sebagai berikut:

$$(FS)_{gi} = \frac{g_{limit}}{g_{actual}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

$g_{limit}$  = Nilai gravitasi yang tepat menyebabkan terjadi suatu keruntuhan pada lereng.

$g_{actual}$  = Konstanta gravitasi (9,81 kN/m<sup>3</sup>).

Beberapa keuntungan utama dari metode elemen hingga dibandingkan dengan metode kesetimbangan batas dalam hal analisis stabilitas lereng menurut (Griffiths & Lane, 1999), yaitu:

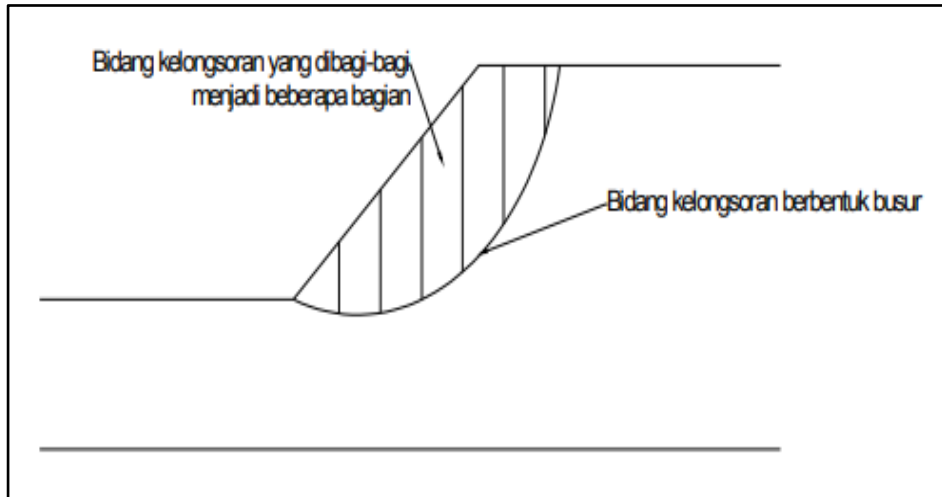
1. Asumsi dalam penentuan posisi bidang longsor tidak dibutuhkan, bidang ini akan terbentuk secara alami pada zona dimana kekuatan geser tanah tidak mampu menahan tegangan geser yang terjadi.
2. Metode ini mampu memantau perkembangan *progressive failure* termasuk *overall shear failure*.
3. Karena tidak ada konsep irisan dalam pendekatan elemen hingga maka tidak ada kebutuhan untuk asumsi tentang kekuatan bidang gelincir lereng. Metode elemen hingga memenuhi kesetimbangan sampai kegagalan tercapai.
4. Jika kompresibilitas tanah data tersedia, solusi elemen hingga akan memberikan informasi tentang deformasi pada tingkat tegangan yang bekerja.

2.5.2 *Limit Equilibrium Method*

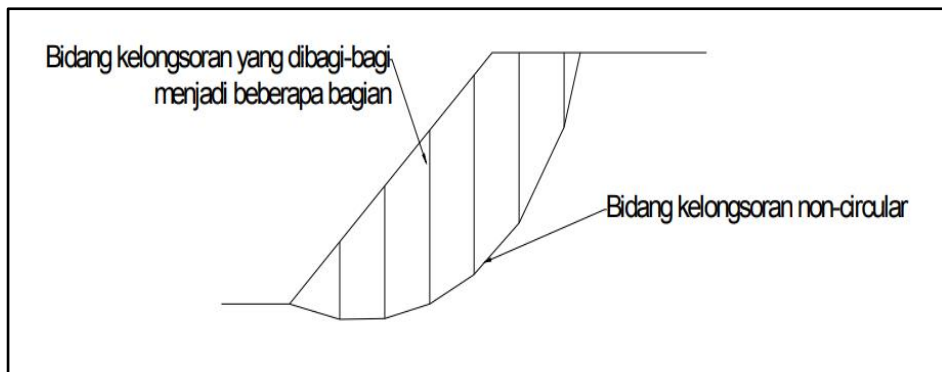
*Limit equilibrium method* atau metode kesetimbangan batas dikenal sebagai metode irisan karena bidang longsor dari lereng tersebut dibagi menjadi beberapa irisan. Metode ini terbukti sangat berguna dan dapat diandalkan dalam praktik rekayasa

serta membutuhkan data yang relatif sedikit dibandingkan metode lainnya. Metode ini dinyatakan dengan persamaan-persamaan kesetimbangan dengan mengurangi gaya-gaya yang tidak diketahui, khususnya gaya geser yang bekerja pada permukaan longsor yang dipilih. Kondisi kestabilan lereng menggunakan metode ini dinyatakan dalam indeks faktor keamanan. Faktor keamanan dihitung menggunakan kesetimbangan gaya atau kesetimbangan momen atau dapat menggunakan kedua kesetimbangan gaya tersebut tergantung dari metode perhitungan yang digunakan (Wyllie & Mah, 2004). Menurut Giani (1992), terdapat beberapa persamaan statis yang digunakan dalam penentuan faktor keamanan dengan metode ini meliputi penjumlahan gaya pada arah vertikal setiap irisan yang digunakan untuk menghitung gaya normal bagian dasar irisan, penjumlahan gaya pada arah horizontal setiap irisan yang digunakan untuk menghitung gaya normal antar irisan, penjumlahan momen untuk keseluruhan irisan yang bertumpu pada suatu titik, dan penjumlahan gaya pada arah horizontal untuk seluruh irisan.

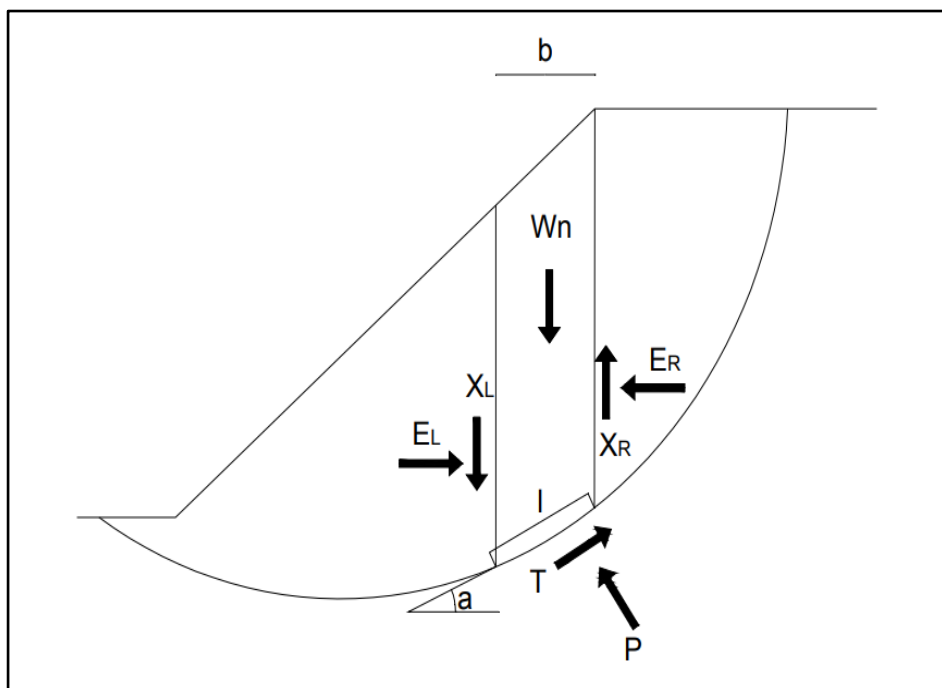
Metode kesetimbangan batas merupakan metode yang menggunakan prinsip kesetimbangan gaya. Metode analisis ini pertama-tama mengasumsikan bidang kelongsoran yang dapat terjadi. Terdapat dua asumsi bidang kelongsoran yaitu bidang kelongsoran berbentuk *circular* dan bidang kelongsoran yang diasumsikan berbentuk *non-circular* (bisa juga planar). Perhitungan dilakukan dengan membagi-bagi tanah yang berada dalam bidang longsor dengan irisan-irisan sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 2.8 hingga Gambar 2.10, karena itu metode ini dikenal dengan nama metode irisan (*method of slice*). Pada Gambar 2.10, menggambarkan massa tanah dan gaya-gaya yang bekerja pada irisan. Berbagai solusi yang berbeda untuk metode irisan ini telah dikembangkan selama bertahun-tahun yang dimulai dari Fellenius, Taylor, Bishop, Morgenstern-Price hingga Spencer dan lainnya. Perbedaan antara cara yang satu dengan yang lain tergantung pada persamaan kesetimbangan batas dan asumsi gaya kekuatan antar irisan (*interslice force*) yang diperhitungkan (Liong & Herman, 2012).



Gambar 2.8 Bidang longsor *circular* (Liong & Herman, 2012)



Gambar 2.9 Bidang longsor *non-circular* (Liong & Herman, 2012)



Gambar 2.10 Gaya yang bekerja pada bidang irisan (Liong & Herman, 2012)

Fellenius merupakan orang pertama yang mempublikasikan metode irisan ini dan merupakan cara yang paling sederhana. Pada cara Fellenius semua gaya antar irisan diabaikan dan hanya memperhitungkan kesetimbangan momen. Bishop kemudian mengembangkan cara yang lebih kompleks dengan memasukkan gaya yang bekerja di sekitar bidang irisan, namun tetap melakukan perhitungan dengan kesetimbangan momen. Bishop juga mengeluarkan cara yang dikenal dengan nama metode Bishop Sederhana (Simplified Bishop) dimana gaya normal antar irisan diperhitungkan tetapi gaya geser antar irisan diabaikan. Janbu mengembangkan metode yang mirip dengan metode sederhana Bishop. Perbedaannya adalah metode Janbu diturunkan dari kesetimbangan gaya horizontal. Pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 menunjukkan perbedaan antar metode yang dikenal dalam *limit equilibrium method* (Liong & Herman, 2012).

Tabel 2.3 Kesetimbangan pada masing-masing metode (Liong & Herman, 2012)

Metode	Kesetimbangan Momen	Kesetimbangan Gaya
Ordinary/Fellenius	Ya	Tidak
Bishop's Simplified	Ya	Tidak
Janbu's Simplified	Tidak	Ya
Morgenstern-Price	Ya	Ya
Spencer	Ya	Ya

Tabel 2.4 Gaya antar irisan yang bekerja (Liong & Herman, 2012)

Metode	Gaya Normal Antar Irisan (E)	Gaya Geser antar Irisan (X)	Kemiringan Resultan X/E dan Hubungan antar X-E
Ordinary/Fellenius	Tidak	Tidak	Tidak ada gaya antar irisan
Bishop's Simplified	Ya	Tidak	Horizontal
Janbu's Simplified	Ya	Tidak	Horizontal
Morgenstern-Price	Ya	Ya	<i>Variable; user function</i>
Spencer	Ya	Ya	Konstan

## 2.6 Air Tanah

Air tanah merupakan air yang terdapat di dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah. Air tanah termasuk salah satu komponen dalam daur hidrologi yang berlangsung di alam. Sumber air ini terbentuk dari air hujan yang meresap ke dalam tanah dan merembes melalui lapisan batuan, terutama lapisan pembawa air dalam satu cekungan air tanah yang berada di bawah permukaan menuju ke daerah lepasan. Proses ini dapat diartikan bahwa ketersediaan air tanah berkaitan erat dengan kondisi lingkungan seperti iklim, geologi, dan vegetasi. Tanah terbagi menjadi dua zona yaitu zona tekanan pori positif dan negatif. Garis yang membagi kedua zona tersebut adalah garis permukaan air tanah, dimana tekanan hidrostatiknya sama dengan tekanan atmosfer. Di bawah muka air tanah, tanah dalam kondisi jenuh air dan tekanan air pori adalah positif. Di atas muka air tanah, di dalam zona tanah tidak jenuh, tekanan pori adalah negatif. Adanya perubahan yang terjadi pada tekanan pori akan merubah kuat geser tanah yang mempunyai pengaruh pada stabilitas lereng (Hardiyatmo, 2006).

Tanah terdiri dari tiga komponen penyusun yaitu butiran, udara, dan air. Pada rongga yang terdapat diantara butiran akan diisi oleh air dan udara. Peran air di dalam tanah sangat penting, karena air dapat mempengaruhi sifat-sifat tanah dan mengakibatkan kuat geser pada tanah menurun. Apabila seluruh rongga terisi oleh air, maka tanah tersebut dalam kondisi jenuh (*saturated soil*). Sedangkan, apabila rongga terisi oleh udara dan air, maka tanah tersebut dalam kondisi jenuh sebagian (*unsaturated soil*). Apabila tanah hampir tidak mengandung air atau nilai kadar airnya mendekati nol, maka tanah tersebut dalam kondisi kering. Pada kedalaman tanah tertentu, rongga pada tanah akan mulai terisi oleh air dan menjadi jenuh. Batas antara lapisan jenuh air dan tidak jenuh disebut dengan muka air tanah (*groundwater table*). Air tanah dapat bergerak melalui rongga tanah pada setiap lapisan. Aliran air tanah dapat

menurunkan kuat geser tanah sehingga dapat membahayakan, terutama pada kondisi tanah di lereng. Aliran air dapat menurunkan kestabilan lereng sehingga dapat memperbesar gerakan tanah dan menyebabkan kelongsoran. Tanah merupakan sistem *liquid-in-solid* dan bukan *solid-in-liquid*. Meskipun begitu, karakteristik tanah sangat dipengaruhi oleh kadar air yang ada di dalam tanah (Hardiyatmo, 2006).

Air tinggal di dalam rongga-rongga tanah oleh karena itu, perubahan pada kadar air tanah dapat terjadi dari perubahan proporsi air dan udara di dalam rongga tanah atau dari perubahan volume rongga tanah. Air yang tinggal di dalam tanah, bertahan dari gaya gravitasi dan penguapan. Penyimpanan air ini, disebabkan oleh gaya kapiler yang timbul dari tegangan permukaan pada tempat pertemuan udara dan air di dalam rongga tanah, atau oleh gaya-gaya permukaan yang mengikat molekul-molekul air. Gaya-gaya kapiler tergantung dari ukuran rongga, dan gaya-gaya permukaan sesuai jumlah dan sifat permukaan dari butir-butir tanah. Penambahan air pada tanah akan menaikkan kadar air tanah sehingga menaikkan gaya tolak antar partikel yang mendorong terjadinya *swelling* pada tanah. Naiknya kadar air juga berarti mempengaruhi konsistensi tanah yang kemudian akan mempengaruhi kekuatan tanah. Pada umumnya semakin cair suatu tanah maka kekuatannya akan semakin menurun. Berkurangnya kadar air dengan pengeringan dapat mengubah susunan fabrik tanah, yang mengubah ukuran dan distribusi pori-pori tanah (Wardana, 2011).

Keberadaan 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 yang berarti memperkecil ketahanan geser dari massa lereng, terutama pada material tanah. 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 massa tanah yang dihanyutkan, sehingga ketahanan massa tanah akan menurun. Jadi dapat dikatakan bahwa suatu lereng yang mengandung air tanah maka lereng tersebut lebih rendah faktor keamanannya jika dibandingkan dengan lereng yang tidak mengandung air tanah pada geometri lereng yang sama. Jadi, secara umum dapat dikatakan bahwa jarak muka air tanah terhadap bidang dasar kelongsoran juga dapat mempengaruhi kestabilan suatu lereng, dimana semakin dekat jarak muka air tanah terhadap tanah permukaan lereng, maka semakin kecil nilai faktor keamanannya. Begitu pula sebaliknya, semakin jauh jarak muka air tanah terhadap tanah permukaan lereng, maka semakin besar nilai faktor keamanannya (Noorchayo, Toha, & Bochori, 2019).

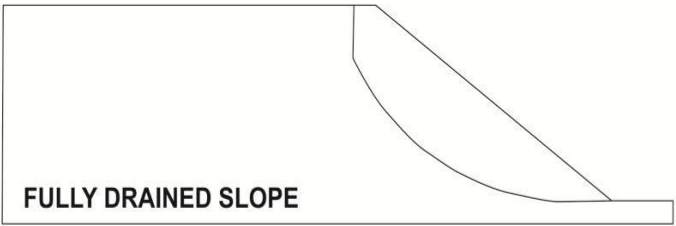
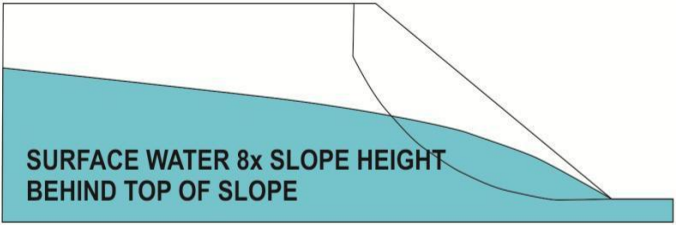
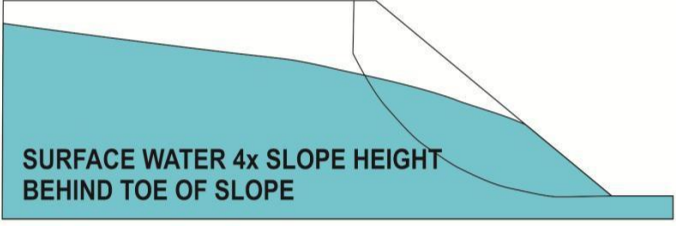

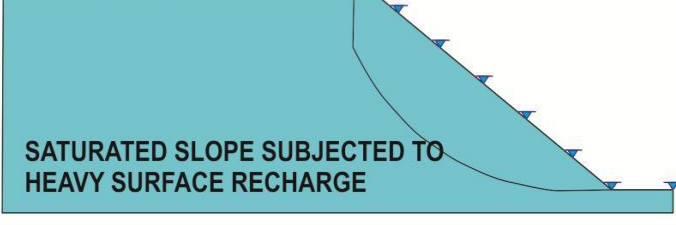
Air tanah maupun air permukaan sangat mempengaruhi kekuatan batuan, tekanan air tanah mempengaruhi tegangan normal pada permukaan bidang geser. Disamping menambah beban pada lereng, air tanah juga dapat melarutkan batuan sehingga mempercepat proses pelapukan batuan. Turun naiknya tinggi muka air tanah dapat di pengaruhi oleh curah hujan. Pada saat musim kemarau, dimana hujan jarang terjadi kemungkinan besar tinggi muka air tanah mengalami penurunan, namun sebaliknya pada saat musim hujan dengan curah hujan yang cukup tinggi muka air tanah ini dapat berpengaruh terhadap nilai kestabilan lereng. Kelongsoran lereng pada musim hujan, disebabkan oleh infiltrasi air hujan ke dalam tanah yang menyebabkan tanah menjadi jenuh dan disertai dengan perubahan pada karakteristik tanah terutama kekuatannya. Umumnya pada kebanyakan tambang terbuka, faktor air tanah memiliki peran cukup besar dalam terjadinya kelongsoran pada lereng (Darajaat, Iqbal, Zakaria, & Muslim, 2020).

Kelongsoran umumnya terjadi pada musim penghujan dikarenakan tanah pada umumnya akan berada dalam kondisi jenuh air pada musim penghujan dan mengakibatkan lereng menjadi tidak stabil sehingga, beresiko untuk terjadi kelongsoran.

Peningkatan air pori akibat pembasahan atau peningkatan kadar air pada musim penghujan, akan meningkatkan muka air tanah serta menurunkan ketahanan tanah yang bersangkutan disepanjang bidang gelincirnya. Gerakan tanah terjadi dari hasil gangguan kesetimbangan yang merupakan hasil dari sebuah proses infiltrasi air ke dalam tanah yang berakibat pada penambahan bobot tanah. Jika air tersebut menembus sampai tanah kedap air yang berperan sebagai bidang gelincir, maka tanah akan menjadi licin dan tanah yang berada di atasnya akan bergerak mengikuti sepanjang badan lereng. Gerak massa pada lereng terjadi jika hambatan geser tanah lebih kecil dari berat massa tanah. Berat massa tanah dan sudut kemiringan merupakan faktor utama yang mengontrol. Sehingga sifat fisik kimia biologi tanah merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap stabilitas lereng karena sifat ini akan mempengaruhi ada tidaknya dan banyak sedikitnya air yang mampu disimpan atau mampu dialirkannya. Air ini sangat berperan terhadap stabilitas massa tanah yang ada pada lereng karena air akan menambah berat, akan menyebabkan kohesi tanah menurun, akan menyebabkan peningkatan proses kimia, dan akan memisahkan atau memindahkan unsur kimia pengikat tanah menuju ke bawah (Silvianengsih, Liliwarti, & Satwarnirat, 2015).

Menurut Haryanti, dkk (2010) hujan pemicu longsor adalah tipe hujan deras dan tipe hujan normal tetapi berlangsung lama. Tipe hujan deras adalah hujan yang mempunyai intensitas 70 mm per jam atau hujan dengan intensitas lebih dari 100 mm per hari. Tipe hujan seperti ini efektif memicu longsor pada lereng yang tanahnya mudah menyerap air seperti tanah lempung pasir dan tanah pasir. Tipe hujan normal adalah hujan yang intensitasnya kurang dari 20 mm per hari. Tipe hujan ini apabila berlangsung selama beberapa minggu hingga beberapa bulan dapat efektif memicu longsor pada lereng yang tanahnya lebih kedap air seperti tanah lempung. Sedangkan, Subiyanti, (2011) menyatakan bahwa hujan normal yang terjadi dengan durasi lama berpengaruh terhadap perubahan tekanan air pori. Hujan normal dengan durasi lama,

pada tanah berbutir halus menyebabkan muka air tanah naik dan tekanan air pori juga naik. Proses penjumlahan tanah berlangsung terhadap fungsi waktu. Ketika tanah jenuh, maka kekuatan geser tanah hilang, sehingga kemungkinan besar terjadi longsor. Tanah longsor dapat diartikan gerakan massa tanah yang mengandung air, menggelincir ke bawah menuruni kemiringan lereng. Berikut merupakan pembagian lereng berdasarkan kondisi air tanah seperti yang terlihat pada Gambar 2.11.

GROUNDWATER FLOW CONDITION	CHART NUMBER
 <p data-bbox="443 949 724 981">FULLY DRAINED SLOPE</p>	<b>1</b>
 <p data-bbox="443 1167 874 1227">SURFACE WATER 8x SLOPE HEIGHT BEHIND TOP OF SLOPE</p>	<b>2</b>
 <p data-bbox="443 1413 874 1473">SURFACE WATER 4x SLOPE HEIGHT BEHIND TOE OF SLOPE</p>	<b>3</b>
 <p data-bbox="443 1659 874 1720">SURFACE WATER 2x SLOPE HEIGHT BEHIND TOP OF TOE</p>	<b>4</b>
 <p data-bbox="443 1906 874 1966">SATURATED SLOPE SUBJECT TO HEAVY SURFACE RECHARGE</p>	<b>5</b>

Gambar 2.11 Kondisi air tanah pada lereng (Hoek & Bray, 1981)