

SKRIPSI

**ANALISIS KESTABILAN LERENG *PIT* FPB-03 PT VALE
INDONESIA TBK. BERDASARKAN HASIL KOMPARASI
ANTARA KONDISI DESAIN DAN AKTUAL PENAMBANGAN**

Disusun dan diajukan oleh:

**TEGAR ABADI
D111 20 1048**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS KESTABILAN LERENG *PIT* FPB-03 PT VALE
INDONESIA TBK. BERDASARKAN HASIL KOMPARASI
ANTARA KONDISI DESAIN DAN AKTUAL PENAMBANGAN**

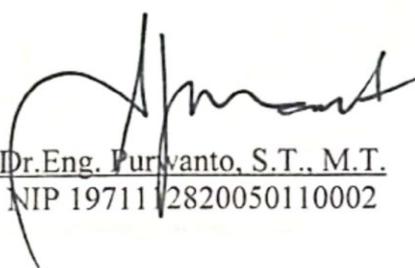
Disusun dan diajukan oleh

**TEGAR ABADI
D111 20 1048**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 29 Juli 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

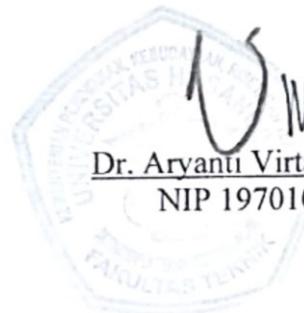
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T.
NIP 1971112820050110002

Ketua Program Studi,



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini ;

Nama : Tegar Abadi
NIM : D111201048
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**ANALISIS KESTABILAN LERENG PIT FPB-03 PT VALE INDONESIA
TBK. BERDASARKAN HASIL KOMPARASI ANTARA KONDISI DESAIN
DAN AKTUAL PENAMBANGAN**

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

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

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

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

Gowa, 29 Juli 2024

Yang Menyatakan


Tegar Abadi

ABSTRAK

TEGAR ABADI. *Analisis Kestabilan Lereng Pit FPB-03 PT Vale Indonesia Tbk Berdasarkan Hasil Komparasi Antara Kondisi Desain dan Aktual Penambangan (Dibimbing Purwanto)*

Penambangan nikel laterit pada lereng *pit* FPB-03 menggunakan metode *open cast mining* dengan kondisi kekuatan material mendekati tanah. Material limonit dan saprolit adalah material dengan variasi nilai *cohesi* dan *phi* yang beragam mempengaruhi nilai faktor keamanan. Fungsi probabilitas menggambarkan penyebaran suatu variabel acak untuk memperkirakan nilai probabilitas suatu parameter. Metode kesetimbangan batas dapat menunjukkan nilai *Probability Failure*. Lereng *pit* FPB-03 dibuat dengan geometri desain yang terdiri dari tinggi *bench* 10 meter, lebar *bench* 7 meter, dan kemiringan lereng Tunggal 45°, akan tetapi setelah dilakukan penambangan terjadi perubahan geometri lereng dan kondisi sebaran materialnya. Analisis kestabilan *pit* FPB-03 dengan membandingkan kondisi desain dan aktual setelah penambangan dilakukan untuk mengetahui bagaimana perbandingan faktor keamanan pada beberapa kondisi tanah pada keadaan desain dan aktual. Analisis dilakukan dengan metode klasifikasi *Unified Soil Classification System (USCS)* dan metode Kesetimbangan Batas *Morgenstern-Price (MP)*. Semua *section* memenuhi kriteria kestabilan lereng berdasarkan standar minimum faktor keamanan beberapa kondisi lereng 1,30 pada kisaran nilai 1,35 – 1,53, dan probabilitas kelongsoran <5% pada kisaran nilai 0,55 – 2,7 % akan tetapi berdasarkan hasil uji sifat fisik kestabilan lereng perlu ditinjau karena masih terdapat potensi longsor. Section A-A' dan D-D' memiliki *overall slope* lebih terjal pada kondisi aktual sehingga nilai faktor keamanannya lebih kecil dari kondisi desain. Section B-B' dan C-C' memiliki *overall slope* lebih landai pada kondisi aktual sehingga nilai faktor keamanannya lebih besar dari kondisi desain. Penyebab lereng menjadi landai ataupun terjal pada kondisi aktual disebabkan oleh beberapa faktor seperti blok model tidak sesuai pada kondisi aktual, terdapat *ore high grade* pada *plan final* aktual, dan *plan priority*.

Kata Kunci: Kestabilan lereng, Longsor, *Limit equilibrium method*, Faktor keamanan, *Overall slope*.

ABSTRACT

TEGAR ABADI. *Slope Stability Analysis of Pit FPB-03 PT Vale Indonesia Tbk Based on Comparison Between Design and Actual Mining Condition* (supervised by Purwanto)

Nickel laterite mining on the slopes of pit FPB-03 uses the open-cast mining method with material strength conditions close to those of soil. Limonite and saprolite materials have variations in cohesion and phi values that affect the safety factor. The probability function describes the distribution of a random variable to estimate the probability value of a parameter. The limit equilibrium method can show the probability of failure. The FPB-03 pit slope is designed with a geometry consisting of a bench height of 10 meters, a bench width of 7 meters, and a single slope angle of 45°. However, after mining, there were changes in the slope geometry and material distribution conditions. Stability analysis of pit FPB-03 by comparing the design and actual conditions after mining is carried out to determine how the safety factor compares in several soil conditions in the design and actual states. The analysis is conducted using the Unified Soil Classification System (USCS) classification method and the Morgenstern-Price (MP) Limit Equilibrium Method. All sections meet the slope stability criteria based on the minimum safety factor standard for several slope conditions of 1.30, ranging from 1.35 to 1.53, and a probability of failure of <5%, ranging from 0.55 to 2.7%. However, based on the results of physical property tests, slope stability needs to be reviewed due to the potential for landslides. Sections A-A' and D-D' have steeper overall slopes in the actual conditions, resulting in lower safety factors than the design conditions. Sections B-B' and C-C' have gentler overall slopes in the actual conditions, resulting in higher safety factors than the design conditions. The causes of the slopes becoming gentler or steeper in the actual conditions are due to several factors, such as the block model not matching the actual conditions, the presence of high-grade ore in the actual final plan, and priority planning.

Keywords: Slope stability, Landslide, Limit equilibrium method, Safety factor, Overall slope.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Lereng	5
2.2 Longsoran.....	8
2.3 Faktor Pemicu Gerakan Massa Tanah/Batuan	10
2.4 Mekanika Tanah.....	19
2.5 Analisis Kestabilan Lereng	19
2.6 Kriteria Keruntuhan <i>Mohr-Coulumb</i>	24
2.7 <i>Probability of Failure</i>	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	27
3.1 Lokasi Penelitian.....	27
3.2 Teknik Pengumpulan Data.....	28
3.3 Pengolahan dan Analisis Data.....	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1 Analisis Data Uji Laboratorium.....	51
4.2 Analisis Kestabilan Lereng	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Gaya yang mempengaruhi faktor keamanan (Arif, 2016).....	6
Gambar 2 Longsor Busur (Hoek <i>and</i> Bray, 1981).....	8
Gambar 3 Longsor Bidang (Hoek <i>and</i> Bray, 1981).....	9
Gambar 4 Longsor Baji (Hoek <i>and</i> Bray, 1981).....	10
Gambar 5 Longsor Guling (Hoek <i>and</i> Bray, 1981).....	10
Gambar 6 Ilustrasi material tanah (Darwis, 2018).....	12
Gambar 7 Sistem Klasifikasi USCS (Darwis, 2018).....	17
Gambar 8 Gaya yang bekerja metode irisan (Imran <i>et al.</i> , 2020).....	24
Gambar 9 Kriteria kegagalan <i>mohr-coulomb</i> ((Nugroho <i>et al.</i> , 2012).....	25
Gambar 10 Lingkaran <i>mohr</i> (Nugroho <i>et al.</i> , 2012).....	25
Gambar 11 Lokasi penelitian <i>Pit</i> FPB-03.....	27
Gambar 12 Topografi <i>section</i> desain <i>pit</i> FPB-03.....	28
Gambar 13 Topografi <i>section</i> aktual <i>pit</i> FPB-03.....	28
Gambar 14 Pengamatan kondisi aktual dan pengambilan sampel: (a) Kondisi <i>Actual pit</i> FPB-03, (b) <i>Sampel standard penetration test pit</i> FPB- 03.....	29
Gambar 15 Alat dan bahan preparasi sampel <i>moisture content</i> : (a) Sampel <i>standard penetration test pit</i> FPB-03, (b) Spatula, (c) Cawan, dan (d) Timbangan.....	30
Gambar 16 Proses preparasi sampel <i>moisture content</i>	31
Gambar 17 Alat dan bahan preparasi sampel <i>moisture content</i> : (a) Sampel <i>standard penetration test pit</i> FPB-03, (b) <i>Oven</i> , (c) Saringan No.10 dan <i>Pan</i> , dan (d) Penumbuk karet dan Wadahnya.....	31
Gambar 18 Proses preparasi sampel <i>specific gravity</i> : (a) Menumbuk sampel yang telah di <i>oven</i> dan (b) Menyaring sampel dengan saringan No.10.....	32
Gambar 19 Alat dan bahan preparasi sampel <i>sieve</i> dan <i>hydrometer</i> : (a) Sampel <i>standard penetration test pit</i> FPB-03, (b) Spatula, (c) Wadah, (d) Air dan botol semprot, (e) Larutan heksametafosfat, (f) Saringan, (g) <i>Mixer</i> , (h) <i>Oven</i> , dan (i) Penumbuk karet dan wadahnya.....	33
Gambar 20 Proses preparasi sampel <i>sieve</i> dan <i>hydrometer analysis</i> : (a) Menumbuk sampel yang telah di <i>oven</i> dan (b) Menyaring sampel dengan saringan No.10 – No.200, (c) Mencampur sampel dengan larutan heksametafosfat, dan (d) <i>Mixer</i> sampel.....	34
Gambar 21 Alat dan bahan preparasi sampel <i>Atterberg limit</i> : (a) Sampel <i>standard penetration test</i> , (b) Spatula, (c) <i>Oven</i> , (d) Saringan No.4, (e) Penumbuk karet dan wadahnya, (f) Plat kaca, (g) Air dan botol semprot, dan (h) Mangkuk.....	35
Gambar 22 Proses preparasi sampel <i>Atterberg limit</i> : (a) Menumbuk sampel yang telah di <i>oven</i> b) Mencampurkan sampel dengan air hingga homogen, dan (c) Membuat sampel pengujian batas plastis.....	36
Gambar 23 Peralatan uji <i>moisture content</i> : (a) Cawan, (b) Timbangan, dan (c) <i>Oven</i>	36
Gambar 24 Prosedur uji <i>moisture content</i> : (a) Menimbang W1, (b) Menimbang W2, (c) Mengoven sampel, dan (d) Menimbang W3.....	37

Gambar 25 Peralatan uji <i>specific gravity</i> : (a) Termometer, (b) Pompa udara, (c) Piknometer, (d) Timbangan, dan (e) Air dan botol semprot	38
Gambar 26 Prosedur uji <i>specific gravity</i> : (a) Menimbang W1, (b) Menimbang W2, (c) Mengeluarkan udara, (d) Menimbang W3, dan (e) Menimbang W4.....	39
Gambar 27 Peralatan <i>sieve</i> dan <i>hydrometer analysis</i> : (a) Saringan No.10 sampai 200, dan <i>pan</i> (b) Termometer, (c) Hidrometer, (d) Tabung silinder, (e) Air dan botol semprot, (f) <i>Timer</i> , dan (g) Timbangan	40
Gambar 28 Prosedur uji <i>sieve</i> : (a) Menimbang saringan kosong, (b) Menyaring sampel, dan (c) Menimbang berat sampel tertahan.....	40
Gambar 29 Prosedur uji <i>hydrometer</i> : (a) Mencampurkan air dengan sampel pada tabung, (b) Memasukan alat hidrometer, (c) Melakukan pembacaan miniskus, dan (d) Mencatat hasil pembacaan.....	41
Gambar 30 Peralatan <i>Atterberg limit</i> : (a) Alat <i>casagrande</i> , (b) <i>Grooving tool</i> , (c) Spatula, (d) <i>Oven</i> , (e) Cawan, (f) Timbangan, dan (g) Air dan botol semprot.....	42
Gambar 31 Prosedur uji batas cair: (a) Meletakkan sampel pada alat <i>Casagrande</i> , (b) Membuat alur, (c) Menjalankan alat uji, (d) Menimbang cawan kosong, (e) Memasukan sampel ke cawan, (f) Menimbang W2, (g) Memasukan sampel ke <i>oven</i> , dan (h) Menimbang W3	43
Gambar 32 Prosedur uji batas plastis: (a) Menimbang W1, (b) Menimbang W2, (c) Memasukan sampel ke <i>oven</i> , (d) Menimbang W3	44
Gambar 33 Pengaturan pada <i>keyIn analyses</i>	45
Gambar 34 Menyesuaikan skala	45
Gambar 35 Menggambar geometri lereng	46
Gambar 36 Memasukkan data-data material yang akan di analisis	46
Gambar 37 Lapisan material tanah	47
Gambar 38 Menghitung <i>overall slope</i>	47
Gambar 39 Menggambar garis <i>ground water level</i>	48
Gambar 40 <i>Slip surface</i>	48
Gambar 41 Hasil <i>running</i> kondisi lereng statis.....	49
Gambar 42 <i>Input</i> material analisis <i>pof</i>	49
Gambar 43 Hasil analisis <i>pof</i>	49
Gambar 44 Diagram alir penelitian.....	50
Gambar 45 Faktor keamanan <i>section A-A'</i> desain	54
Gambar 46 <i>Probability density function section A-A'</i> desain	54
Gambar 47 Faktor keamanan <i>section B-B'</i> desain.....	55
Gambar 48 <i>Probability density function section B-B'</i> desain.....	55
Gambar 49 Faktor keamanan <i>section C-C'</i> desain.....	56
Gambar 50 <i>Probability density function section C-C'</i> desain.....	56
Gambar 51 Faktor keamanan <i>section D-D'</i> desain	57
Gambar 52 <i>Probability density function section D-D'</i> desain	57
Gambar 53 Faktor keamanan <i>section A-A'</i> aktual.....	58
Gambar 54 <i>Probability density function section A-A'</i> aktual.....	59
Gambar 55 Faktor keamanan <i>section B-B'</i> aktual	59
Gambar 56 <i>Probability density function section B-B'</i> aktual	60
Gambar 57 Faktor keamanan <i>section C-C'</i> aktual	60

Gambar 58 <i>Probability density function section C-C'</i> aktual	61
Gambar 59 Faktor keamanan <i>section D-D'</i> aktual.....	61
Gambar 60 <i>Probability density function section D-D'</i> aktual.....	62

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor lereng tambang	6
Tabel 2 Asumsi-asumsi dan kondisi kesetimbangan yang digunakan oleh beberapa metode irisan.....	21
Tabel 3 Variasi kondisi kesetimbangan metode irisan.....	22
Tabel 4 Deskripsi nilai PoF pada lereng tambang	26
Tabel 5 Hasil Uji Sifat Fisik	52
Tabel 6 Material Penyusun Lereng	53
Tabel 7 <i>Input</i> nilai standar deviasi	53
Tabel 8 Hasil analisis kestabilan lereng secara keseluruhan	62

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Lokasi <i>Section</i> Pit FPB-03.....	68
Lampiran 2 Penampang 2 Dimensi <i>Pit</i> FPB-03	69
Lampiran 3 Perhitungan Kadar Air.....	73
Lampiran 4 Perhitungan <i>Specific Gravity</i>	78
Lampiran 5 Perhitungan Analisis Saringan dan Hidrometer	82
Lampiran 6 Perhitungan Analisis Batas <i>Atterberg</i>	85
Lampiran 7 Pemantauan Lereng Secara Aktual.....	96
Lampiran 8 Kartu Konsultasi Tugas Akhir.....	99

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Puji dan syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT, karena dengan rahmat dan hidayah-Nya-lah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisis Kestabilan Lereng *Pit* FPB-03 PT Vale Indonesia Tbk Berdasarkan Hasil Komparasi Antara Kondisi Desain dan Aktual Penambangan”. Penelitian ini adalah tugas akhir penulis selama melakukan kegiatan penelitian pada area operasional PT Vale Indonesia Tbk. Tugas akhir ini dibuat sebagai syarat lulus matakuliah skripsi di Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

Penelitian ini tidak akan terlaksana tanpa adanya kesempatan yang diberikan oleh PT Vale Indonesia Tbk, yang telah memberikan kesempatan dan bimbingan pada penulis untuk melakukan penelitian tugas akhir. Bapak Rusmin Syahid Arianto selaku *Manager Geotechnical & Hydrology Engineering*, Ibu Jane Tanggulangan dan Bapak Dadang Aryandi selaku *Senior Geotechnical Engineering*, serta Ibu Dindin Mulyanti selaku *Person In Charge* KP. Bapak Ainul Yaqin selaku *Junior Geotechnical Engineering*, sekaligus pembimbing yang telah memberikan arahan serta masukan selama melakukan penelitian tugas akhir di PT Vale Indonesia Tbk. Bapak Andi Lolo Bintang, Bapak Imam Yudho Varvianto, Ibu Isti Trisonya, Bapak Hamrin Ilhami, Bapak Herry, Bapak Indra Kabalmay, Bapak Didiet Prayudha M, Bapak Lahmuddin Hamsa, dan seluruh karyawan PT Vale Indonesia Tbk yang telah banyak memberikan arahan, masukan, ilmu yang bermanfaat, serta bantuan selama penulis melakukan penelitian tugas akhir di perusahaan.

Melalui kesempatan ini, penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Geomekanika sekaligus Dosen Pembimbing yang telah mendidik dan mengarahkan penulis.
2. Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Pertambangan FT-UH.

3. Kedua orang tua Penulis, Bapak Baso Sammang dan Ibu Rahma. Skripsi ini penulis persembahkan untuk kalian. Terimakasih atas segala doa dan bimbingannya sehingga penulis dapat terus berjuang dalam meraih cita-cita. Kesuksesan penulis kedepannya karena dan untuk kalian berdua.
4. Bapak Amir Said dan Ibu Nurjannah sebagai orang tua kedua selama menjalani studi kuliah, yang telah memberikan arahan penulis dalam menyesuaikan diri di lingkungan sekitar.
5. Teman-teman Anggota LBE GEOMEKANIKA 2020, yang telah membantu penulis baik dalam bentuk dukungan dan berbagi pengetahuan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Teman-teman DRILLING yang telah berbagi suka dan duka, serta saling mendukung dalam menjalani perkuliahan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Pertambangan.

Penulis menyadari tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu saran maupun kritik yang membangun dibutuhkan penulis. Semoga laporan ini dapat bermanfaat dan dapat menjadi referensi bagi para pembaca khususnya di bidang Teknik Pertambangan.

Gowa, Juli 2024

Tegar Abadi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel laterit adalah bahan galian bernilai ekonomis yang tinggi. Penyebaran bijih nikel dan perbedaan karakteristik massa tanah dan batuan mempengaruhi geometri lereng yang berdampak pada faktor keamanan. Endapan nikel laterit ditambang dengan mempertimbangkan kestabilan lereng agar proses ekstraksi bijih berjalan dengan kaidah teknik pertambangan. Kestabilan lereng menjadi pertimbangan dalam pelaksanaan kegiatan penambangan. Geometri lereng tambangan yang tidak sesuai dapat menyebabkan terjadinya longsor pada lereng tambangan. Dampak longsor yang akan terjadi sangat dipengaruhi pada jenis massa tanah, massa batuan dan geometri lereng yang terbentuk (Hariyanto *et al.*, 2019).

Kestabilan lereng merupakan konsep penting dalam ilmu geoteknik terhadap stabilitas lereng alami dan lereng buatan. Analisis kestabilan lereng meliputi perhitungan faktor keamanan dan diikuti perkembangan geoteknik komputasi. Berbagai parameter seperti geometri lereng, data fisik bahan geologi dan faktor kekuatan gesernya, tekanan air pori memiliki peran yang berpengaruh dalam evaluasi stabilitas lereng. Stabilitas lereng juga ditandai oleh banyak ketidakpastian seperti sifat-sifat tanah, beban, tekanan air (Suman *et al.*, 2016). Karakteristik dasar tanah menentukan jenis struktur yang akan dibangun dan tindakan eksternal harus diambil untuk membuat struktur tersebut bertahan lama dan menanggung dampak gempa, rembesan air, dan faktor eksternal lain (Darwis, 2018).

PT Vale Indonesia Tbk merupakan perusahaan tambang penghasil bijih nikel laterit terbesar di Indonesia, yang terletak di desa Sorowako, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Sistem penambangan terbuka menggunakan metode *open cast mining*, dengan cara memotong bagian sisi bukit dari puncak menuju kebawah sesuai garis konturnya dengan kedalaman penggalian dangkal. Pengupasan dibuat dalam bentuk jenjang. Terdapat tiga material yaitu limonit, saprolit dan *bedrock*. Limonit dan saprolit merupakan material yang mengandung bijih nikel yang memiliki kekuatan hampir mendekati tanah sedangkan *bedrock* merupakan batuan dasar yang sangat keras (Azizi *et al.*, 2019).

Penambangan nikel laterit pada lereng *pit* FPB-03 menggunakan metode *open cast mining* dengan kondisi kekuatan material mendekati tanah. Pengaruh sifat fisik tanah terhadap kestabilan lereng sangat penting, akan tetapi tidak ada penelitian sebelumnya yang mengkomparasi analisis kestabilan lereng dengan sifat fisik tanah. Material limonit dan saprolit adalah material dengan variasi nilai *cohesi* dan *phi* yang beragam mempengaruhi nilai faktor keamanan yang dihasilkan. Fungsi distribusi probabilitas menggambarkan penyebaran suatu variabel acak untuk memperkirakan nilai probabilitas suatu parameter. Metode kesetimbangan batas dapat menunjukkan nilai *Probability Failure*. Lereng *pit* FPB-03 memiliki desain geometri lereng diantaranya tinggi *bench* 10 meter, lebar *bench* 7 meter, dan kemiringan lereng tunggal 45° . Lereng *pit* FPB-03 pada kondisi aktual penambangan mengalami modifikasi, penggalian, dan perubahan sebagai hasil aktivitas pertambangan akan tetapi sebelumnya tidak dilakukan analisis pada kondisi aktual setelah dilakukan penambangan.

Analisis kesetimbangan batas adalah metode *modern* yang banyak digunakan untuk analisis kestabilan lereng. Metode kesetimbangan batas merupakan metode yang menggunakan konsep kesetimbangan statik dan mengabaikan hubungan tegangan-regangan pada lereng dimana dalam analisisnya menggunakan perbandingan antara gaya pendorong dan gaya penahan lereng. Metode *Morgenstern-Price* adalah salah satu metode analisis yang berdasarkan prinsip kesetimbangan batas proses analisisnya merupakan hasil dari kesetimbangan setiap gaya-gaya normal dan momen yang bekerja pada tiap irisan dari bidang longsor lereng tersebut. Kondisi kesetimbangan yang dipenuhi yaitu kesetimbangan gaya vertikal dan horizontal, serta kesetimbangan momen. Nilai faktor keamanan memberikan informasi apakah lereng tersebut stabil atau tidak tidak stabil (Khodijah *et al.*, 2022).

Menanggapi permasalahan baik dari desain maupun kondisi aktual lereng *pit* FPB-03 PT. Vale Indonesia Tbk, dianggap perlu untuk melakukan analisis lanjut terhadap kestabilan lereng. Oleh sebab itu, dibuat penelitian dengan judul “Analisis Kestabilan Lereng *Pit* FPB-03 PT. Vale Indonesia Tbk Berdasarkan Hasil Komparasi Antara Kondisi Desain dan Aktual Penambangan” dalam upaya menghindari potensi bahaya yang dapat terjadi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kestabilan lereng berdasarkan nilai faktor keamanan?
2. Bagaimana kestabilan lereng berdasarkan nilai *probability of failure*?
3. Bagaimana perbandingan kestabilan lereng pada kondisi desain dan aktual penambangan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kestabilan lereng berdasarkan nilai faktor keamanan;
2. Menganalisis kestabilan lereng berdasarkan nilai *probability of failure*; dan
3. Menganalisis perbandingan kestabilan lereng pada kondisi desain dan aktual penambangan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah untuk memberikan informasi dan data terkait klasifikasi tanah berdasarkan uji sifat fisik, tingkat kestabilan lereng secara analitik, nilai faktor keamanan lereng kepada PT Vale Indonesia Tbk. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam upaya meningkatkan stabilitas lereng untuk mencegah terjadinya longsor, dapat menambah wawasan penulis dalam ilmu geoteknik pertambangan, dan dapat memberikan perkembangan ilmu pertambangan dan ilmu pengetahuan dan teknologi.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan di Desa Asuli, Kecamatan Towuti, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Penelitian ini dilakukan selama 2 bulan terhitung sejak bulan Januari 2024 hingga Maret 2024 dengan mengumpulkan data seperti sifat fisik dan penampang *pit* FPB-03, muka air tanah serta data sifat mekanik tanah sebagai *input* material. Penelitian ini difokuskan pada analisis kestabilan lereng pada *pit* FPB-03 yang dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti struktur geologi, sifat fisik dan sifat mekanik tanah. Data yang dikumpulkan diolah dan dianalisis

menggunakan bantuan perangkat lunak *Microsoft excel* untuk mengetahui nilai sifat fisik tanah dan Geostudio SLOPE/W untuk mendapatkan nilai faktor keamanan yang telah menjadi ketetapan oleh perusahaan. Analisis data pengujian sifat fisik dan mekanik tanah sebagai parameter analisis kestabilan lereng untuk memperoleh nilai faktor keamanan (FK) dan maksimum potensi terjadi longsor.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lereng

Lereng merupakan bagian permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu terhadap bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia. Lereng yang terbentuk secara alami misalnya lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia seperti galian, timbunan, tanggul dan kanal sungai serta lereng tambang terbuka (Analiser dan Nurhakiki, 2019).

Berdasarkan jenisnya, secara umum lereng terbagi atas tiga yaitu (Rajagukguk *et al.*, 2014):

1. Lereng alam yaitu lereng yang terbentuk akibat proses-proses alamiah, misalnya lereng pada perbukitan.
2. Lereng yang dibuat dalam pada tanah asli misalnya tanah yang dipotong untuk pembuatan jalan atau saluran air irigasi.
3. Lereng yang dibuat dari tanah yang dipadatkan misalnya tanggul atau bendungan tanah.

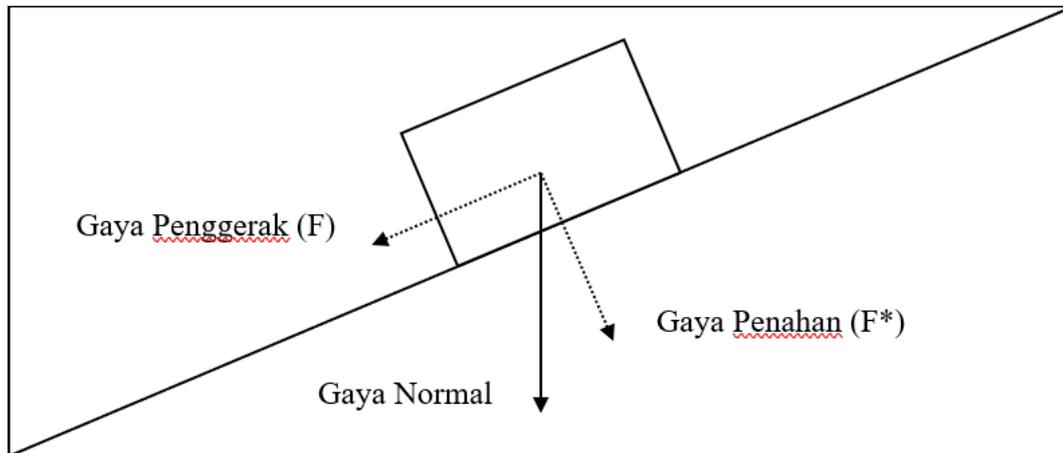
Kemungkinan terjadi longsor selalu ada pada semua jenis lereng. Longsor terjadi akibat gaya pendorong melampaui gaya penahan yang berasal dari kekuatan geser tanah sepanjang bidang longsor. Secara teknik dapat dikatakan bahwa longsor terjadi apabila faktor keamanan tidak memenuhi untuk setiap kriteria lereng (Rajagukguk *et al.*, 2014).

Faktor keamanan digunakan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng untuk mencegah bahaya longsor yang akan terjadi di waktu yang akan datang. Gaya yang bekerja pada suatu lereng adalah gaya berat, kemudian dihasilkan gaya penggerak dan gaya penahan. Analisis perhitungan terhadap kestabilan lereng sesuai dengan faktor keamanan (FK) yang diinginkan diperlukan, agar benda di atas lereng tidak jatuh (*failure*). Faktor keamanan dapat dirumuskan sebagai berikut (Arif, 2016):

$$FK = \frac{\text{Kekuatan Geser}}{\text{Gaya Penggerak}} = \frac{F^*/A}{F/A} = \frac{\tau^*}{\tau} \quad (1)$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2)$$

Dimana, τ adalah kekuatan geser, c adalah kohesi, σ adalah tegangan normal, dan ϕ adalah Sudut geser dalam. Berdasarkan perhitungan lebih rinci didapatkan faktor keamanan (Arif, 2016). Gambaran gaya yang mempengaruhi faktor keamanan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Gaya yang mempengaruhi faktor keamanan (Arif, 2016)

Apabila nilai FK untuk suatu lereng $> 1,0$ (gaya penahan $>$ gaya penggerak), lereng tersebut berada dalam kondisi stabil. Namun, apabila nilai $FK < 1,0$ (gaya penahan $<$ gaya penggerak), lereng tersebut dalam kondisi tidak stabil (Arif, 2016). Desain kriteria dalam menentukan kondisi kestabilan lereng menggunakan Kepmen ESDM Nomor 1827 tahun 2018 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor lereng tambang

Jenis Lonsoran	Keparahan Longsor	Kriteria dapat diterima		
		Faktor Keamanan Statis	Faktor Keamanan Dinamis	Probabilitas Longsor
Tunggal/jenjang (<i>Bench</i>)	Rendah Tinggi	1,1	Tidak ada	25 – 50%
Multi Jenjang (<i>Interramp</i>)	Rendah	1,15 – 1,2	1	25%
	Sedang	1,2	1	20%
	Tinggi	1,2 – 1,3	1,1	10%
Keseluruhan (<i>Overall</i>)	Rendah	1,2 – 1,3	1	15 – 20%
	Sedang	1,3	1,05	5 -10%
	Tinggi	1,3 – 1,5	1,1	<5%

Sumber: (Kepmen ESDM RI 1827K/K/30/MEM/2018)

2.1.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng Tambang

Longsoran lereng tambang terjadi dimulai dengan longsoran yang kecil yang kemudian menjadi besar sehingga menimbulkan masalah pada kegiatan penambangan (Seegmilier, 1972). Penyebab terjadinya longsoran dibagi menjadi dua kelompok yaitu (Krostanto dan Hutapea, 2023):

1. Penyebab eksternal, menyebabkan naiknya gaya pendorong yang bekerja sepanjang bidang runtuh yaitu:
 - a. Perubahan geometri lereng (pemotongan kaki lereng, erosi, perubahan sudut kemiringan, dan panjang);
 - b. Beban dinamik karena *dump truck* (*traffic loading*);
 - c. Gaya vibrasi yang ditimbulkan oleh gempa bumi atau ledakan; dan
 - d. Perubahan muka air tanah secara mendadak.
2. Penyebab internal, faktor-faktor internal yang menyebabkan turunnya kekuatan geser material yaitu:
 - a. Pelapukan;
 - b. Keruntuhan progresif (keruntuhan mengikuti ekspansi lateral, perekahan, dan erosi);
 - c. Hilangnya sementasi material; dan
 - d. Berubahnya struktur material.

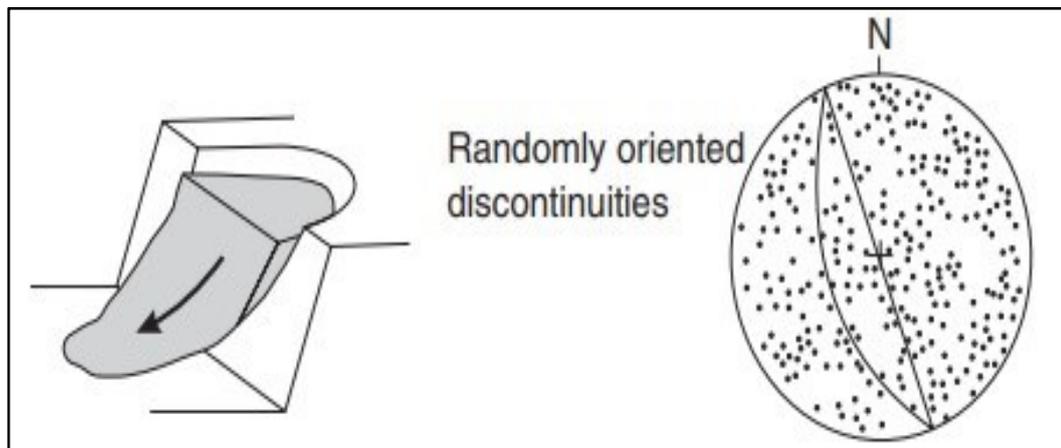
Keruntuhan lereng alami maupun buatan disebabkan adanya perubahan topografi, seismik, aliran air tanah, kehilangan kekuatan, perubahan tegangan, musim, iklim, dan cuaca. Gaya-gaya dari luar yang bekerja pada material pembentuk lereng menyebabkan material pembentuk lereng akan cenderung untuk menggelincir. Kecenderungan menggelincir dapat ditahan oleh kekuatan geser material. Suatu lereng yang stabil dalam jangka waktu yang lama dapat menjadi tidak stabil disebabkan beberapa faktor seperti jenis dan keadaan lapisan tanah atau batuan pembentuk lereng, geometri lereng, penambahan kadar air pada tanah (misalnya terdapat rembesan air atau infiltrasi hujan, berat dan distribusi beban, dan getaran atau gempa. Faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng dapat menghasilkan tegangan geser pada seluruh massa tanah, dan suatu pergerakan lereng akan terjadi kecuali tahanan geser pada setiap permukaan bidang runtuh lebih besar dari tegangan geser (Jihad *et al.*, 2023).

2.2 Longsoran

Lereng merupakan permukaan tanah yang miring, dimana komponen gravitasi cenderung untuk menggerakkan tanah ke bawah. Komponen gravitasi yang besar dapat menyebabkan perlawanan geseran yang dapat dikerahkan oleh tanah pada bidang longsornya terlampaui, maka kelongsoran lereng akan terjadi (Arief, 2007). Kekuatan material dapat menghasilkan lereng yang besar menjadi stabil. Menurut Hoek *and* Bray (1981) terdapat beberapa jenis longsoran umum yang terjadi di tambang terbuka, yaitu longsoran bidang, longsoran baji, longsoran guling, dan longsoran busur.

2.2.1 Longsoran Busur (*Circular Failure*)

Longsoran busur banyak terjadi pada lereng tanah dan batuan lapuk atau sangat terkekarkan dan di lereng-lereng timbunan. Bentuk bidang gelincir pada longsoran busur, sesuai dengan namanya menyerupai busur bila digambarkan dengan penampang melintang. Longsoran busur dapat dilihat pada Gambar 2.



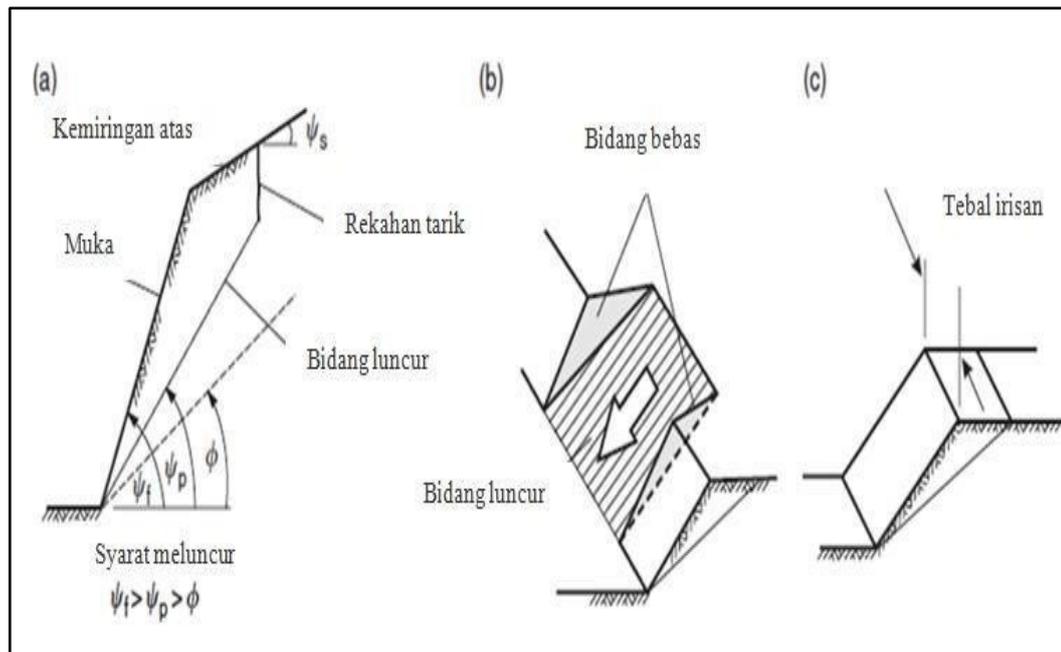
Gambar 2 Longsoran Busur (Hoek *and* Bray, 1981)

2.2.2 Longsoran Bidang (*Plane Failure*)

Longsoran bidang merupakan jenis longsoran batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang dianggap rata. Bidang luncur tersebut berupa sesar atau patahan, kekar (*joint*) maupun bidang perlapisan batuan. Longsoran bidang dapat dilihat pada Gambar 3. Syarat-syarat terjadinya longsoran bidang sebagai berikut (Wyllie *and* Mah, 2004):

1. Terdapatnya bidang luncur bebas, dimana kemiringan bidang luncur harus lebih kecil daripada kemiringan lereng ($\varphi_p < \varphi_f$);

2. Arah bidang luncur sejajar atau mendekati sejajar dengan arah lereng (maksimum 20°);
3. Kemiringan bidang gelincir lebih besar daripada sudut geser dalam batumannya ($\varphi_p > \phi$); dan
4. Terdapat bidang bebas (tidak terdapat gaya penahan) pada kedua sisi longsoran.

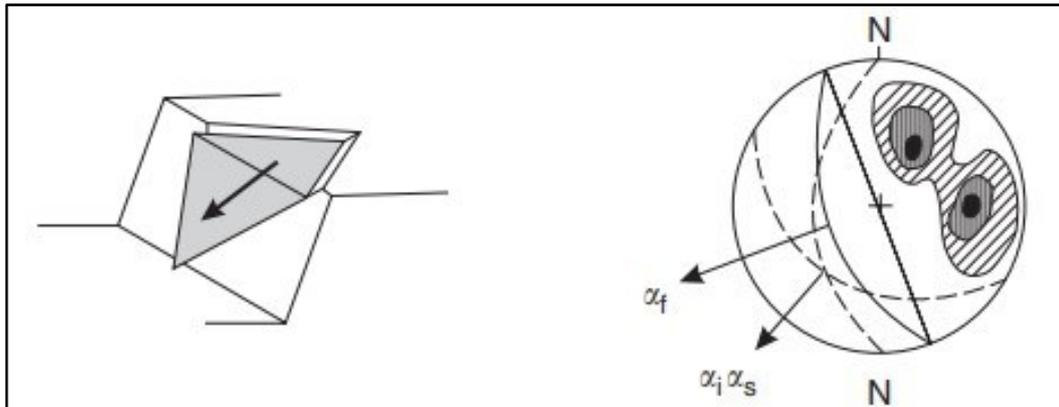


Gambar 3 Longsoran Bidang (Hoek and Bray, 1981)

2.2.3 Longsoran Baji

Longsoran baji merupakan jenis longsoran yang sering terjadi di lapangan. Longsoran baji diakibatkan oleh adanya struktur geologi yang berkembang. Longsoran baji dapat dilihat pada Gambar 4. Longsoran baji dapat terjadi dengan beberapa syarat geometri lereng sebagai berikut:

1. Permukaan bidang lemah A dan bidang lemah B rata, tetapi kemiringan bidang lemah B lebih besar daripada bidang lemah A;
2. Arah pergerakan garis potong harus lebih kecil daripada sudut kemiringan lereng;
3. Bentuk longsoran dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dan kedua bidang lemah; dan
4. Bentuk longsoran dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dari kedua bidang lemah.

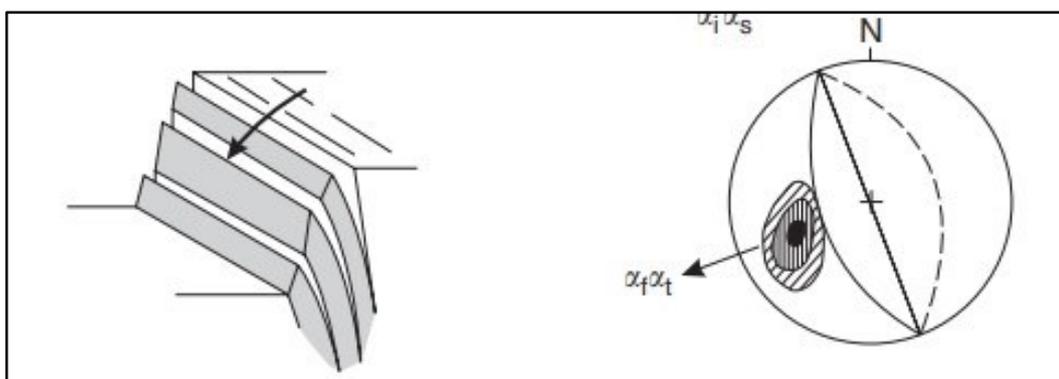


Gambar 4 Longsoran Baji (Hoek and Bray, 1981)

2.2.4 Longsoran Guling

Longsoran guling umumnya terjadi pada lereng yang terjal dan batuan yang keras, jika struktur bidang lemahnya berbentuk kolom. Longsoran guling ini terjadi apabila bidang-bidang lemah yang terdapat pada lereng mempunyai kemiringan yang berlawanan dengan kemiringan lereng. Longsoran bidang dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan bentuk dan proses menggulingnya, longsoran guling dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu:

1. Longsoran guling setelah mengalami benturan (*flexural toppling*);
2. Longsoran guling yang berupa blok (balok-balok); dan
3. Gabungan antara kedua longsoran sebelumnya (*block-flexural*).



Gambar 5 Longsoran Guling (Hoek and Bray, 1981)

2.3 Faktor Pemicu Gerakan Massa Tanah dan Batuan

Faktor pemicu gerakan merupakan proses yang mengawali suatu gerakan berupa terjadinya perubahan kondisi pada lereng dari batas kestabilan menjadi tidak stabil. Faktor-faktor yang berasal dari dalam lereng, seperti mekanisme gerakan serta jenis material yang bergerak diantaranya (Karnawati, 2007):

1. Runtuhan, pada material batuan berupa runtuhannya batuan sedangkan untuk material tanah berbutir kasar terjadi runtuhannya bahan rombakan dan pada material tanah berbutir halus terjadi runtuhannya tanah.
2. Robohan, pada material batuan berupa robohan batuan, sedangkan untuk material tanah berbutir kasar terjadi robohan bahan rombakan dan pada material tanah berbutir halus terjadi robohan tanah.
3. Rotasi, terjadi pada beberapa unit pada material batuan berupa nendatan batuan dan gerakan massa tanah atau batuan blok batuan sedangkan untuk material tanah berbutir kasar terjadi nendatan bahan rombakan dan gerakan massa tanah atau batuan blok bahan rombakan dan pada material tanah berbutir halus terjadi nendatan tanah dan gerakan massa tanah atau batuan blok tanah.
4. Translasi, terjadi pada banyak unit material batuan berupa gerakan massa tanah atau batuan sedangkan material tanah berbutir kasar terjadi gerakan massa tanah atau batuan bahan rombakan dan pada material tanah berbutir halus terjadi gerakan massa tanah atau batuan.
5. Pencaran lateral, pada material batuan berupa pencaran batuan, sedangkan untuk material tanah berbutir kasar terjadi pencaran bahan rombakan, dan pada material tanah berbutir halus terjadi pencaran tanah.
6. Aliran, pada material batuan berupa aliran batuan, sedangkan untuk material tanah berbutir kasar terjadi aliran bahan rombakan, *solifluction*, lawina bahan rombakan, rayapan bahan rombakan serta aliran blok, dan pada material tanah berbutir halus terjadi aliran pasir atau lanau basah, aliran pasir kering, aliran tanah, dan aliran lepas.
7. Kompleks, terjadi campuran dari dua atau lebih jenis gerakan.

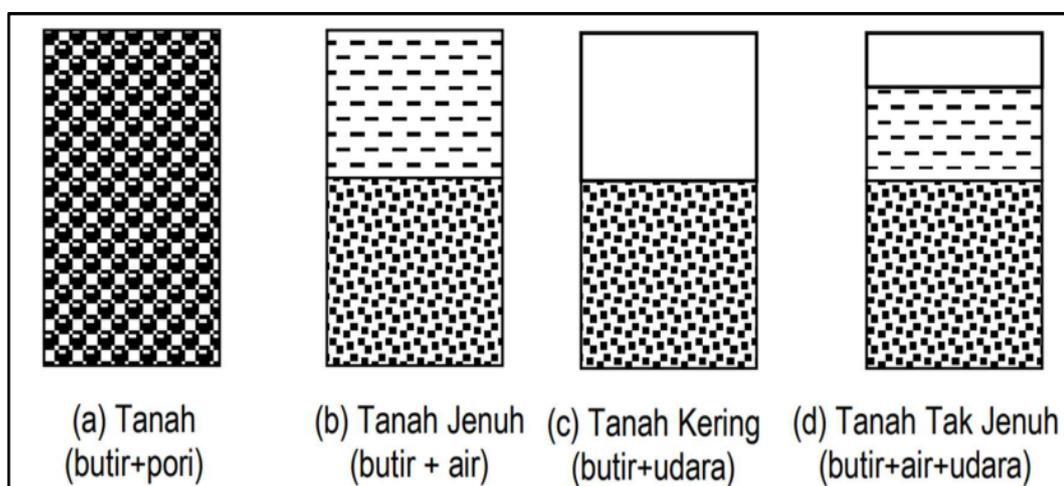
2.4 Mekanika Tanah

Tanah merupakan material yang terdiri dari butiran mineral-mineral padat yang tidak tersementasi satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk di sertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruangruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. Tanah didefinisikan sebagai kumpulan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas, terletak di atas batuan dasar.

Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida yang mengendap diantara partikel-partikel. Ruang diantara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya (Supandi *et al.*, 2016).

Tanah terdiri dari berbagai fase padat, cair, dan gas, dimana karakteristiknya bergantung pada perilaku fase interaksi dan tegangan yang diterimanya. Fase padat meliputi tanah liat, mineral bukan tanah liat, dan bahan organik. Unsur ini dikategorikan menurut ukurannya seperti tanah liat, pasir, dan kerikil. Fase cair terdiri dari air yang mengandung senyawa organik tersedia dari tumpahan kimiawi, limbah, dan air tanah, sedangkan fasa gas biasanya udara. Struktur tanah tergantung pada susunan partikel, kelompok partikel, ruang pori, dan komposisinya. Karakteristik ini menentukan jenis struktur yang dibangun dan tindakan dukungan eksternal yang diambil untuk membuat struktur tersebut bertahan dan menanggung dampak gempa, rembesan air, dan faktor eksternal lain (Darwis, 2018).

Struktur tanah tergantung pada susunan partikel, kelompok partikel, ruang pori, dan komposisinya. Karakteristik dasar menentukan jenis struktur yang akan dibangun dan tindakan dukungan eksternal yang harus diambil untuk membuat struktur tersebut bertahan lama dan menanggung dampak gempa, rembesan air, dan faktor eksternal lainnya. Material tanah dapat terdiri atas dua atau tiga unsur, yakni butiran, air dan udara. Kondisi tanah jenuh terdapat dua unsur, yakni butiran dan air, dan pada tanah yang kering juga hanya terdapat dua unsur yakni butiran dan udara. Tanah kondisi tak jenuh terdapat tiga unsur, yakni butiran, air dan udara. Masing-masing elemen tanah tersebut, memiliki volume dan berat (Darwis, 2018). Ilustrasi material tanah dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Ilustrasi material tanah (Darwis, 2018)

2.4.1 Uji Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik tanah adalah sifat tanah yang didasarkan pada bentuk, ukuran tanah, warna tanah, dan bau tanah tersebut. Tanah terdiri dari tiga komponen meliputi udara, air dan bahan padat (butiran). Udara dianggap tidak mempunyai pengaruh teknis sedang air sangat mempengaruhi sifat-sifat teknis tanah. Ruang diantara butiran-butiran, sebagian atau seluruhnya dapat terisi oleh air atau udara. Apabila rongga air tersebut terisi air seluruhnya, tanah dikatakan dalam kondisi jenuh dan jika rongga terisi oleh udara dan air, tanah pada kondisi jenuh sebagian. Tanah kering adalah tanah yang tidak mengandung air sama sekali atau kadar airnya tidak ada (Mutallib, 2011).

1. Kadar Air

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kadar air tanah asli. Kadar air tanah asli adalah perbandingan antara berat air dalam suatu tanah dengan berat kering tanah tersebut. Kadar air tanah asli dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Hawanto *et al.*, 2021):

$$W = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \quad (3)$$

Dimana,

W = Kadar air tanah asli (%)

W1 = Berat cawan kosong (gr)

W2 = Berat cawan + tanah basah (gr)

W3 = Berat cawan + tanah kering (gr)

2. Berat Jenis Tanah

Tanah yang diuji harus lolos saringan No.40, jika nilai berat jenis dan benda uji hendak digunakan dalam perhitungan untuk uji Hidrometer, maka tanah harus lolos saringan No.200. Berat jenis tanah pada suhu t^oc dapat dihitung dengan persamaan dengan rumus (Hawanto *et al.*, 2021):

$$G = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (4)$$

Dimana,

G = Berat jenis tanah

W1 = Berat piknometer kosong (gr)

W2 = Berat piknometer kosong + tanah kering (gr)

$W3 = \text{Berat piknometer kosong} + \text{tanah} + \text{air (gr)}$

$W4 = \text{Berat piknometer kosong} + \text{air (gr)}$

3. Analisis Saringan dan Hidrometer

Analisis saringan digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran tanah yang berbutir kasar, yang dilakukan terhadap sampel tanah yang kering. Pelaksanaan pengujian ini adalah dengan melakukan penyaringan bersusun pada satu unit alat saringan standar. Berat tanah yang tertinggal pada setiap saringan ditimbang, lalu diprosentasekan terhadap berat total sampel tanah yang dianalisis. Analisis hidrometer dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir tanah yang berbutir halus atau bagian halus dari tanah berbutir campuran (Darwis, 2018). Adapun persentase ukuran butir yang terkandung pada tanah ditentukan dengan *gravel* adalah persentase total sampel tertahan pada ayakan No.4, *sand* adalah persentase total sampel tertahan ayakan No. 200 dikurang dengan persentase *gravel*, *clay* adalah persentase lolos pada uji hidrometer di waktu 1440 menit, dan *silt* adalah persentase lolos ayakan No. 200 dikurang persentase *clay* (PT. Vale Indonesia Tbk., 2022).

4. Batas Atterberg

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan nilai dari batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas. Batas cair (LL), didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair biasanya ditentukan dari uji *Casagrande*. Batas Plastis (PL), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3 mm mulai retak-retak ketika digulung. Adapun perhitungan batas *Atterberg* diantaranya (PT. Vale Indonesia Tbk., 2022):

$$W (\%) = \frac{M2-M3}{M3-M1} \times 100 \quad (5)$$

$$LL = W_N (\%) \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad (6)$$

$$PL (\%) = \frac{M2-M3}{M3-M1} \times 100 \quad (7)$$

$$IP (\%) = LL - PL \quad (8)$$

Dimana,

$W = \text{Kadar air tanah asli (\%)}$

- M1 = Berat cawan kosong (gr)
 M2 = Berat cawan + tanah basah (gr)
 M3 = Berat cawan + tanah kering (gr)
 N = Jumlah ketukan
 w_N = Kadar air pada N tumbukan (%)
 LL = Batas cair tanah
 PL = Batas Plastis
 IP = Indeks Plastis

2.4.2 Klasifikasi USCS

Klasifikasi tanah sistem USCS (*Unified Soil Classification System*), diajukan pertama kali oleh Casagrande dan selanjutnya dikembangkan oleh *United State Bureau of Reclamation* (USBR) dan *United State Army Corps of Engineer* (USACE), kemudian *American Standard Testing of Materials* (ASTM), telah memakai USCS sebagai metode standar untuk mengklasifikasikan tanah. Klasifikasi tanah sistem USCS dapat dilihat pada Gambar 7, tanah diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama yaitu (Darwis, 2018):

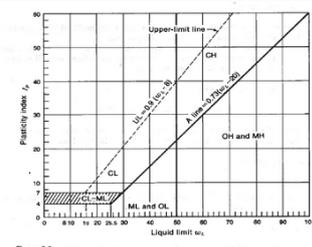
1. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soils*) yang terdiri atas kerikil dan pasir yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No.200 ($F_{200} < 50$). Simbol kelompok diawali dengan G untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil (*gravelly soil*) atau S untuk pasir (*sand*) atau *sandy soil*.
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained soils*) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No.200 ($F_{200} \geq 50$).

Selanjutnya tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan sub-kelompok. Simbol-simbol dalam sistem USCS dimana G (*gravel*), S (*sand*), C (*clay*) M (*silt*), O (lanau atau lempung organik), Pt (tanah gambut atau tanah organik tinggi), W (*well graded*) P (*poorly graded*), H (*high plasticity*), dan L (*low plasticity*). Penentuan klasifikasi tanah dengan Sistem *Unified Soil Classification System* sebagai berikut (Darwis, 2018):

1. Menentukan tanah berbutir halus atau kasar (secara visual atau saringan No. 200);
2. Tanah berbutir kasar lakukan analisis saringan tanah kemudian hitung persen lolos saringan No.4;

- a. Jika persentase lolos $< 50\%$ klasifikasikan tanah sebagai kerikil dan jika persentase lolos $> 50\%$ klasifikasikan tanah sebagai pasir;
 - b. Hitung persen lolos saringan No.200 jika persentase lolos $< 5\%$ maka hitung C_u dan C_c , gradasi baik, klasifikasikan sebagai GW (kerikil) dan klasifikasikan sebagai SW (pasir), dan gradasi buruk, klasifikasikan sebagai GP (kerikil) dan klasifikasikan sebagai SP (pasir).
 - c. Apabila persentase butiran yang lolos saringan No.200 diantara 5% sampai 12%, maka tanah akan memiliki simbol ganda dan mempunyai sifat plastisitas (GW-GM atau SW-SM, dan lain-lain).
 - d. Apabila persentase butiran yang lolos saringan No.200 $> 12\%$, maka harus dilakukan uji batas *Atterberg* dengan menyingkirkan butiran tanah yang tinggal pada saringan No.40, kemudian dengan menggunakan diagram plastisitas, tentukan klasifikasinya (GM, GC, SM, SC, GM-GC atau SM-SC).
3. Untuk tanah berbutir halus, maka:
- a. Lakukan uji batas-batas *Atterberg* dengan menyingkirkan butiran yang tinggal di atas saringan No.40, jika batas cari (LL) $> 50\%$, klasifikasikan tanah tersebut sebagai H (plastisitas tinggi) dan bila LL $< 50\%$ klasifikasikan tanah sebagai L (plastisitas rendah);
 - b. Untuk tanah H, bila batas-batas *Atterberg* diplot pada grafik plastisitas dan berada di bawah garis A, tentukanlah apakah masuk kategori OH (organik) atau MH (anorganik) dan jika plottingnya jatuh di atas garis A, klasifikasikan sebagai tanah CH (organik plastisitas tinggi);
 - c. Untuk tanah L, bila batas-batas *Atterberg* diplot pada grafik plastisitas dan berada di bawah garis A dan area yang diarsir, tentukanlah apakah masuk kategori OL (organik) atau ML (anorganik) berdasarkan warna, bau atau perubahan batas cair dan batas plastisnya dengan mengeringkannya di dalam oven;
 - d. Jika batas-batas *Atterberg* diplot pada grafik plastisitas dan berada pada area yang diarsir, dekat dengan garis A, atau nilai LL sekitar 50, maka gunakan simbol ganda.

UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM

Major Divisions		Group Symbols	Typical Names	Field Identification Procedures	Laboratory Classification Criteria	Information Required for Describing Soils				
1	2	3	4	5	6	7				
Coarse grained soils more than half of material is larger than No. 200 sieve size.	Gravels (more than half of coarse fraction is larger than No. 4 sieve size.)	Clean gravels (little or no fines, less than 5%) Gravels with fines (appreciable amount of fines greater than 12%)	GW	Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	Wide range in grain size and substantial amounts of intermediate particle sizes	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 4 $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}}$ between 1 and 3	Give typical name: Indicate approximate percentage of sand and gravel, maximum size, angularity, surface conditions, and hardness of the coarse grains; local or geologic name and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses. For undisturbed soils add information on degree of stratification, degree of compactness, cementation, moisture conditions, and drainage characteristics. Example: Silty sand gravelly, about 20% hard angular gravel particles 1/2 in. maximum size, rounded and subangular sand grains, coarse to fine; about 15% non plastic fines with low dry strength; well compacted and moist in place, alluvial sand (SM)			
			GP	Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	Predominantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	Not meeting the requirements for GW				
			GM	Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt mixtures	Nonplastic fines	Atterberg limits below "A" line or PI less than 4				
			GC	Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay mixtures	Plastic fines	Atterberg limits above "A" line, with PI greater than 7				
	Sands (more than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size.)	Clean sands (little or no fines, less than 5%) Sands with fines (appreciable amount of fines greater than 12%)	Between 5% and 12% fines is borderline and requires dual symbols	SW	Well graded sands, gravelly sands, little or no fines	Wide range in grain sizes and substantial amounts of all intermediate particle sizes		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 6 $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}}$ between 1 and 3		
				SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines	Predominantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing		Not meeting the requirements for SW		
				SM	Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures	Non plastic fines		Atterberg limits below "A" line or PI less than 4		
				SC	Clayey sands, poorly graded sand-clay mixtures	Plastic fines		Atterberg limits above "A" line, with PI greater than 7		
Fine grained soils more than half of material is smaller than No. 200 sieve size	Silt and clays Liquid limit less than 50	Dry strength	Dilatancy	Toughness	*	 <p>Figure 9-2 Plasticity chart (also called "Casagrande's A-chart") to use with Table 9-1 for the Unified Soil Classification System.</p>				
		None to slight	Quick to slow	None	ML		Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silt or clayey fine sands with slight plasticity			
	Medium to high	None to very slow	Medium	CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays					
	Slight to medium	None to very slow	Medium	OL	Organic silts and organic silty clays of low plasticity					
	Slight to medium	Slow to none	Slight to medium	MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts					
	High to very high	None	High	CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays					
	Medium to high	None to very slow	Slight to medium	OH	Organic clays of medium to high plasticity					
	Highly organic soils						Pt	Peat and other highly organic soils		

* Dry strength (crushing characteristics); Dilatancy (reaction to shaking); Toughness (consistency near plastic limit)

Gambar 7 Sistem Klasifikasi USCS (Darwis, 2018)

2.4.3 Uji Sifat Mekanik Tanah

Sifat mekanik tanah merupakan sifat perilaku dari struktur massa tanah pada dikenai suatu gaya atau tekanan yang dijelaskan secara teknis mekanis (Rochmawati dan irianto, 2020). Tegangan geser pada bidang keruntuhan akan menentukan kekuatan geser tanah maka perlu untuk mengidentifikasi kegagalan sampel. Dapat diasumsikan bahwa ada bidang kegagalan dan mungkin akibat tekanan utama (tegangan geser), dan dapat ditentukan dengan melakukan uji triaksial atau pengujian geser langsung (Darwis, 2018).

1. Direct Shear Test

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Gesekan antara butir-butir tanah besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya. Penentuan kuat geser tanah dapat menggunakan metode pengujian geser langsung. Uji geser langsung dapat dikontrol oleh tegangan ataupun regangannya. Tegangan vertikal diatur sesuai kebutuhan dan rencana percobaan sementara gaya geser diterapkan secara bertahap sampai terjadinya

keruntuhan pada tanah. Keruntuhan akan terjadi diseluruh permukaan bidang geser. Uji geser langsung dilakukan beberapa kali pada sebuah contoh tanah dengan nilai tegangan normal yang berbeda-beda untuk memperoleh data yang lebih referesentatif (Ningsih *et al.*, 2021).

2. Uji Triaksial

Uji triaksial adalah pengujian dengan benda uji tanah kohesif berbentuk silinder yang dibungkus karet kedap air yang diberi tekanan kesemua arah dan diberi tekanan aksial sampai terjadi longsor. Uji triaksial adalah pengujian yang paling dapat diandalkan dalam menentukan parameter tegangan geser tetapi lebih mahal dan butuh waktu cukup lama (Nugroho *et al.*, 2012). Pengujian triaksial terbagi menjadi 3 jenis yaitu (Darwis, 2018):

- a. *Triaxial UU-test (unconsolidated undrained)*, tekanan sel diterapkan tanpa membiarkan terjadinya proses *drainase*, dan menjaga tekanan sel agar tetap konstan. Tegangan deviator langsung diterapkan tanpa didahului dengan pembebanan konsolidasi (*unconsolidation*), dan terus meningkat sampai sampel mengalami keruntuhan, dengan tetap tanpa berdrainase (*undrained*). Keadaan tanpa drainase ini menyebabkan adanya kelebihan tekanan pori (*excess pore pressure*) karena tidak ada tahanan geser hasil perlawanan dari butiran tanah.
- b. *Triaxial CU-test (consolidated undrained)*, pengujian ini dilakukan dengan sampel awal diberi beban dengan tekanan sel tertentu dengan mengizinkan air mengalir ke luar dari benda uji sampai proses konsolidasi selesai (*consolidation*). Tahap selanjutnya, tegangan deviator diterapkan dengan katup drainase dalam keadaan tertutup, sampai benda uji mengalami keruntuhan (*undrained*). Karena katup drainase tertutup, maka volume benda uji tidak berubah selama penggeseran. Pengujian dengan cara ini, akan terjadi kelebihan tekanan air pori (*excess pore pressure*) dalam benda uji. Pengukuran tekanan air pori dapat dilakukan selama pengujian berlangsung.
- c. *Triaxial CD-test (consolidated drained)*, mula-mula tekanan sel tertentu diterapkan pada sampel dengan katup drainase terbuka sampai konsolidasi selesai. Setelah itu, dengan katup *drainase* tetap terbuka, tegangan

deviator harus diterapkan dengan kecepatan yang rendah, yang dimaksudkan agar dapat menjamin tekanan air pori nol selama proses penggeseran. Pada kondisi ini seluruh tegangan selama proses pengujian ditahan oleh gesekan antar butiran tanah.

2.5 Analisis Kestabilan Lereng

Metode yang dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan suatu lereng sangat beragam. Pemilihan metode yang digunakan tergantung pada data yang tersedia, *software* yang tersedia, ketelitian perhitungan yang diperlukan, dan keluaran yang diperlukan. Semakin teliti data yang digunakan untuk perhitungan kestabilan lereng, hasil yang diperoleh akan semakin mendekati kondisi aktual lapangan. Kemampuan dari ahli geoteknik perlu diperhatikan (Arif, 2016).

2.5.1 Metode *Limit Equilibrium* (*Limit Equilibrium Method*)

Metode kesetimbangan batas 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, metode beda hingga atau metode elemen diskrit (Krahn, 2004).

Metode *Limit Equilibrium* merupakan metode yang dinyatakan dengan persamaan-persamaan kesetimbangan dari satu atau beberapa blok yang diasumsikan tidak terdeformasi dan mengurangi gaya-gaya yang tidak diketahui (reaksi dari bagian stabil massa batuan atau gaya-gaya antar blok), khususnya gaya geser yang bekerja pada permukaan longsor yang dipilih sebelumnya. Gaya-gaya geser ini mewakili seluruh bagian yang sama pada kuat geser adalah gaya-gaya geser ini bekerja. Kondisi kestabilan lereng menggunakan metode ini dinyatakan dalam indeks faktor keamanan (Giani, 1992).

Metode irisan menyatakan kondisi kestabilan suatu lereng dinyatakan sebagai faktor keamanan (FK), yang didefinisikan sebagai berikut (Arief, 2008):

$$FK = \frac{s}{\tau} \quad (9)$$

Dimana s adalah kekuatan geser material yang tersedia dan τ adalah kekuatan geser yang diperlukan agar material seimbang. 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 (Arief, 2008):

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (10)$$

Dimana,

s = Kekuatan geser

c' = Kohesi efektif

ϕ' = Sudut gesek efektif

σ_n = Tegangan normal total

u = Tekanan air pori

Jenis-jenis metode irisan analisis kestabilan lereng diantaranya (Arief, 2008):

1. Metode irisan biasa (*Fellenius method*)

Metode *Fellenius* menggunakan asumsi 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 hanya kesetimbangan momen untuk semua irisan pada pusat lingkaran runtuh.

2. Metode *Bishop* yang disederhanakan

Asumsi yang digunakan dalam metode ini yaitu besarnya gaya geser antar-irisan sama dengan nol 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 horizontal tidak dapat dipenuhi.

3. Metode Janbu yang disederhanakan

Asumsi 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 horizontal 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 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*

Metode *spencer* 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* 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.

Sejumlah variasi dari metode irisan disebabkan oleh perbedaan asumsi-asumsi yang digunakan seperti pada Tabel 2 (Krahn, 2004 dalam Arif, 2016).

Tabel 2 Asumsi-asumsi dan kondisi kesetimbangan yang digunakan oleh beberapa metode irisan

Metode	Asumsi
Irisan Biasa (<i>Fellenius</i>)	Resultan gaya antar-irisan sama dengan nol dan bekerja sejajar dengan permukaan bidang runtuh.
<i>Bishop</i> yang disederhanakan	Gaya geser antar irisan sama dengan nol.
Janbu yang disederhanakan	Gaya geser antar-irisan sama dengan nol. Faktor koreksi digunakan sebagai faktor empiris untuk memasukkan efek dari gaya geser antar-irisan

Metode	Asumsi
<i>Lowe-Karafiath</i>	Kemiringan dari resultas gaya geser dan normal antar-irisan sam dengan rata-rata dari kemiringan permukaan lereng dan kemiringan bidang runtuh
<i>Crops of Engineer</i>	Kemiringan dari resultan gaya geser normal antaririsan besarnya sama dengan: a. Kemiringan permukaan lereng; atau Kemiringan dari kaki bidang runtuh ke puncak bidang runtuh.
<i>Spencer</i>	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan adalah sama untuk semua irisan.
<i>Morgenstern-Price</i>	Kemiringan gaya geser antar-irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan
Kesetimbangan Batas Umum	Sudut gaya antar-irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan

Sumber: (Krahn, 2004)

Kondisi kesetimabangan batas seperti kesetimbangan gaya, momen, dan resultan pada setiap metode irisan berbeda-beda. Variasi kondisi kesetimbangan yang dapat dipenuhi dari metode irisan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 (Krahn, 2004 dalam Arif, 2016).

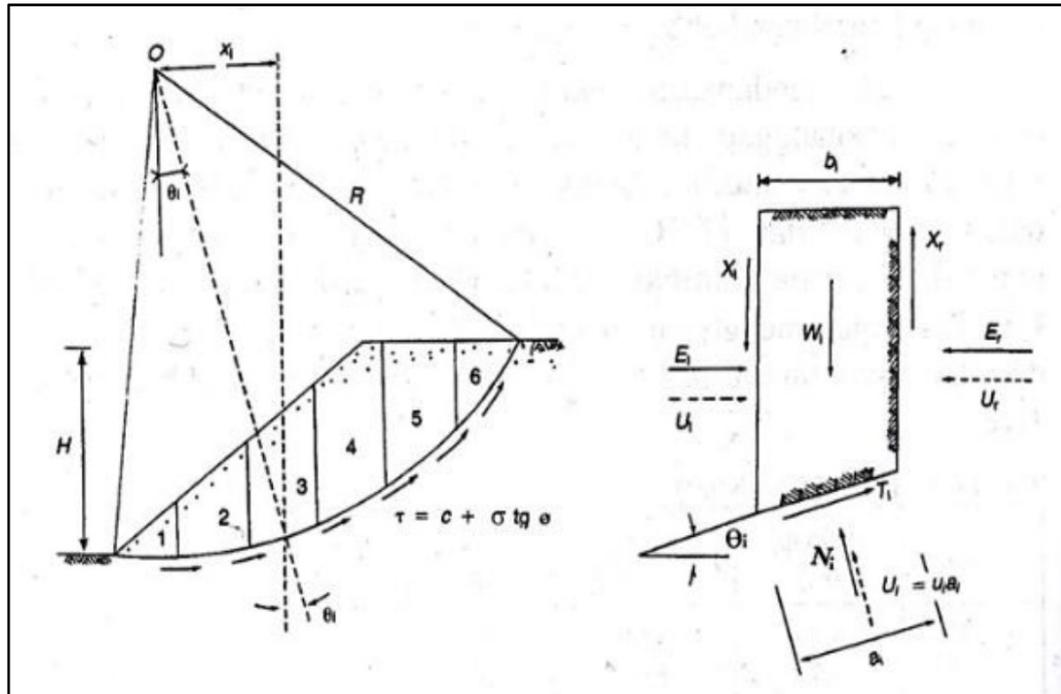
Tabel 3 Variasi kondisi kesetimbangan metode irisan

Metode	Kesetimbangan Gaya		Kesetimbangan Momen	Kemiringan Resultan
	Vertikal	Horizontal		
Irisan Biasa (<i>Fellenius</i>)	Tidak	Tidak	Ya	Tidak ada
<i>Bishop</i> yang disederhanakan	Ya	Tidak	Ya	Horizontal
<i>Janbu</i> yang disederhanakan	Ya	Ya	Tidak	Horizontal
<i>Janbu</i> yang umum	Ya	Ya	Tidak	

Metode	Keseimbangan Gaya		Keseimbangan Momen	Kemiringan Resultan
	Vertikal	Horizontal		
<i>Lowe-Karafiath</i>	Ya	Ya	Tidak	Rata-rata kemiringan permukaan dan kemiringan dasar irisan
<i>Crops of Engineer</i>	Ya	Ya	Tidak	Irisan kemiringan permukaan tanah atas
<i>Spencer</i>	Ya	Ya	Tidak	Konstan
<i>Morgenstern-Price</i>	Ya	Ya	Ya	Bervariasi
Keseimbangan Batas Umum	Ya	Ya	Ya	Bervariasi

Sumber: (Krahn, 2004)

Metode keseimbangan batas yang digunakan untuk menentukan stabilitas bidang geser, balok dan baji diselesaikan untuk satu benda bebas dan tidak bergantung pada distribusi tegangan normal efektif sepanjang permukaan runtuh. Namun, jika kekuatan *mohr-coulomb* yang dimobilisasi dari massa batuan akan dihitung, distribusi tegangan normal efektif sepanjang permukaan keruntuhan harus diketahui. Metode irisan 2D, yang membagi menjadi n irisan di atas permukaan bidang gelincir. Permukaan ini sering diasumsikan melingkar, tetapi dapat mengambil bentuk apa pun karena metode irisan dapat dengan mudah mengakomodasi kemiringan kompleks dan geometri potensial permukaan kegagalan, kondisi massa batuan yang bervariasi, dan beban batas eksternal. Namun, masalahnya adalah keadaan statis tidak tentu karena solusinya memiliki lebih banyak yang tidak diketahui daripada persamaan. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan individu dalam metode irisan diilustrasikan pada Gambar 8 (Read & Stacey, 2009).



Gambar 8 Gaya yang bekerja metode irisan (Imran *et al.*, 2020)

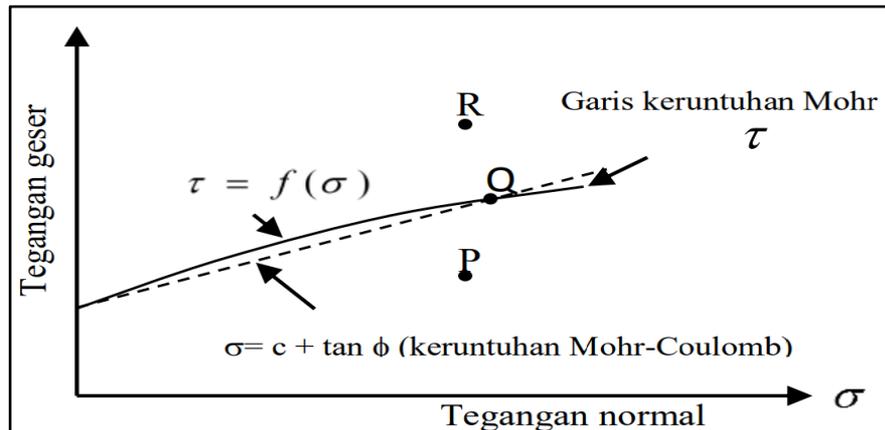
2.6 Kriteria Keruntuhan *Mohr-Coulomb*

Metode *Limit Equilibrium* menghitung faktor keamanan dengan membandingkan geser kekuatan di samping permukaan geser dan gaya yang dibutuhkan yang dapat menopangnya kemiringan dalam keseimbangan. Keruntuhan geser dapat dinyatakan sebagai fungsi *mohr-coulomb* yang mempunyai kekuatan geser yang dinyatakan sebagai kohesi dan sudut gesek (Wyllie dan Mah, 2004). Kesetimbangan statis dapat diperoleh dengan dua cara. Pendekatan pertama melibatkan mempertimbangkan kesetimbangan seluruh massa tanah dan kemudian menyelesaikannya hanya tubuh bebas. Pendekatan kedua membagi tanah menjadi banyak bagian, dan maka setiap irisan harus memenuhi kondisi keseimbangan semua gaya (Duncan and Wright, 2005).

Prinsip-prinsip mekanika tanah dikembangkan oleh Charles Augustin Coulomb (1776) mengenai tekanan tanah aktif dan pasif terhadap dinding penahan. Acuan teori gesekan serta kohesi untuk menentukan bidang gelincir yang berada dibalik dinding penahan, Coulomb dapat menentukan kriteria keruntuhan untuk tanah. Teori ini kemudian dikembangkan dengan substitusi kondisi tegangan 2D Christian Otto Mohr sehingga dikenal dengan teori *Mohr-Coulomb* (O'Kelly 2009 dalam Arif, 2016).

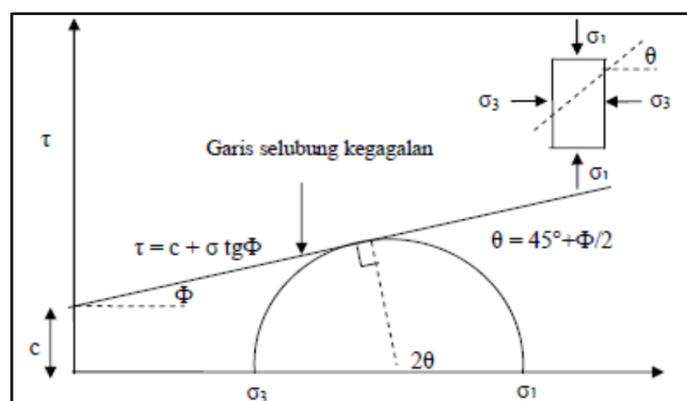
Teori *mohr* menguraikan bahwa kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser pada sebuah bidang keruntuhan. Kriteria keruntuhan mohr dapat dilihat pada Gambar 9. Coulomb (1776) mendefinisikan fungsi $f(\sigma)$ sebagai (Nugroho *et al.*, 2012):

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (11)$$



Gambar 9 Kriteria kegagalan *mohr-coulomb* ((Nugroho *et al.*, 2012)

Tegangan geser dan normal pada sebuah bidang dalam suatu massa tanah jika kedudukan tegangan-tegangan baru mencapai titik P, keruntuhan tanah akibat geser tidak akan terjadi. Keruntuhan geser terjadi jika tegangan mencapai titik Q yang terletak pada garis keruntuhan dan kedudukan tegangan yang ditunjukkan oleh titik R tidak akan pernah terjadi karena bahan telah mengalami keruntuhan sebelum mencapai titik R. Lingkaran *mohr* dalam bentuk lingkaran tegangan, dengan koordinat-koordinat τ dan σ' seperti pada Gambar 10 yang memperlihatkan hubungan antara tegangan utama efektif saat keruntuhan dan parameter kuat geser juga dapat diperoleh (Nugroho *et al.*, 2012).



Gambar 10 Lingkaran *mohr* (Nugroho *et al.*, 2012)

2.7 Probability of Failure

Fungsi distribusi probabilitas menggambarkan penyebaran suatu variabel acak yang digunakan untuk memperkirakan nilai probabilitas kemunculan suatu parameter. Metode kesetimbangan batas dapat menunjukkan nilai *Probability Failure*. Probabilitas kelongsoran dapat didefinisikan sebagai rasio antara jumlah lereng longsor hasil analisis ($FK < 1$) dengan jumlah total analisis (sampel simulasi) yang dinyatakan dalam persen. Fungsi persamaan Pof yaitu (Attiqah dan Heriyadi, 2020):

$$PK = \frac{n(FK < 1)}{n \text{ total } FK \text{ keseluruhan}} \times 100\% \quad (12)$$

Simulasi *Monte-Carlo* adalah metode fleksibel pada analisis probabilitas dalam menggabungkan variasi distribusi cukup besar tanpa penafsiran dan kemampuan memodelkan korelasi antar variabel dengan mudah. Metode Kesetimbangan batas Dimana nilai FK merupakan rasio gaya penahan dan gaya penggerak, masing-masing parameter merupakan variabel acak yang bersifat tak tentu dan berdistribusi probabilitas tertentu. Oleh karena itu, penggunaan simulasi monte carlo cocok untuk menentukan nilai PoF dari Analisis kesetimbangan batas (Arief, 2016).

Probability of failure merupakan besarnya persentase longsor yang mungkin terjadi pada lereng, semakin tinggi nilai PoF maka kondisi lereng semakin tidak stabil. Standar PoF yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4 (Read & Stacey, 2009).

Tabel 4 Deskripsi nilai PoF pada lereng tambang

<i>Category</i>	<i>Description</i>	<i>Acceptable PoF</i>
1	<i>Critical slopes where failure may affect continuous operation and pit safety</i>	< 5%
2	<i>Slopes where failure have a significant impact on costs and safety</i>	< 15%
3	<i>Slopes where failure has no impact on costs and where minimal safety hazards exist</i>	< 30%

Sumber: (Read & Stacey, 2009)