

SKRIPSI

**ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA TAMBANG NIKEL
LATERIT DENGAN METODE BISHOP PIT LOLA
ABC DI PT CERIA NUGRAHA INDOTAMA**

Disusun dan diajukan oleh:

**CEACER DWINATA DARRA
D111 18 1319**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA TAMBANG NIKEL LATERIT DENGAN METODE BISHOP PIT LOLA ABC DI PT CERIA NUGRAHA INDOTAMA

Disusun dan diajukan oleh

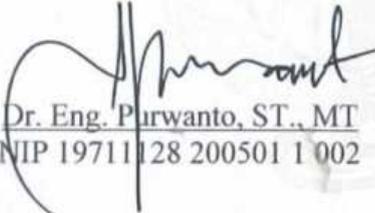
CEACER DWINATA DARRA
D111 18 1319

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 20 Maret 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

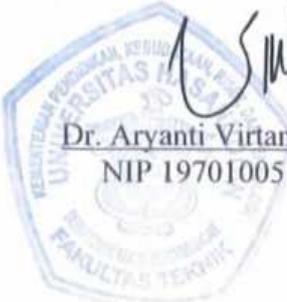
Pembimbing Pendamping,


Dr. Eng. Purwanto, ST., MT
NIP 19711128 200501 1 002


Rizki Amalia, ST., MT
NIPK 8889211019

Ketua Program Studi,


Dr. Aryanti Virtanti Anas, ST., MT
NIP 19701005 200801 2 026



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : CEACER DWINATA DARRA
NIM : D111 18 1319
Program Studi : TEKNIK PERTAMBANGAN
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Kestabilan Lereng Pada Tambang Nikel Laterit dengan Metode Bishop Pit Lola ABC di PT Ceria Nugraha Indotama

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, 20 Maret 2024

Yang Menyatakan



Ceacer Dwinata Darra



ABSTRAK

CEACER DWINATA DARRA. *Analisis Kestabilan Lereng Tambang Nikel Laterit dengan Metode Bishop Pit Lola ABC PT Ceria Nugraha Indotama (dibimbing oleh Purwanto & Rizki Amalia)*

Penambangan nikel laterit dengan metode tambang terbuka digunakan untuk endapan nikel laterit yang memiliki kemiringan lereng yang besar dan curam. Oleh karena itu, metode tambang terbuka ini sangat terkait dengan stabilisasi lereng. Kestabilan lereng pembentuk cekungan menjadi sangat penting karena berhubungan dengan keselamatan kerja, kelancaran produksi, dan pemeliharaan alat berat. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui stabilitas dari lereng PIT Lola ABC PT Ceria Nugraha Indotama dengan metode Bishop menggunakan program Rocscience Slide 2. Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan dua model penampang A dan B, didapatkan nilai faktor keamanan (FK) untuk lereng A dan B dalam keadaan tidak stabil menurut standar perusahaan yaitu $<1,3$ dengan nilai masing-masing sebesar 1.266 dan 1.129 sehingga perlu dilakukan prosedur pemodelan ulang. Pemodelan ulang desain lereng A dan B dilakukan perubahan pada lebar bench sampai tinggi bench. Rekomendasi perubahan pada desain lereng penampang A dan B didapatkan nilai FK untuk desain masing-masing sebesar 1.718 dan 1.704 yang berarti sudah stabil menurut standar perusahaan.

Kata Kunci: Analisis Kestabilan Lereng, Metode Bishop, Faktor Keamanan.



ABSTRACT

CEACER DWINATA DARRA. Analysis of Laterite Nickel Mine Slope Stability using the Bishop Pit Lola ABC Method PT Ceria Nugraha Indotama (supervised by Purwanto & Rizki Amalia)

Laterite nickel mining using the open pit method is used for laterite nickel deposits that have large and steep slopes. Therefore, this open pit mining method is closely related to slope stabilization. The stability of the slope that forms the basin is very important because it is related to work safety, smooth production and maintenance of heavy equipment. This research was carried out to determine the stability of the slopes of PIT Lola ABC PT Ceria Nugraha Indotama using the Bishop method using the Rocscience Slide 2 program. Analysis of slope stability was carried out with two cross-section models A and B, obtaining safety factor (FK) values for slopes A and B in the following conditions. unstable according to company standards, namely <1.3 with values of 1,266 and 1,129 respectively, so a remodelling procedure needs to be carried out. Remodeling of the design of slopes A and B carried out changes to the bench width and bench height. Recommendations for changes to the design of slope sections A and B obtained FK values for the designs of 1,718 and 1,704 respectively, which means they are stable according to company standards.

Keywords: Slope Stability Analysis, Bishop Method, Safety Factor.



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan.....	2
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan.....	2
1.5 Ruang Lingkup.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian.....	4
Gambar 1 Peta Geologi Regional (PT Ceria Nugraha Indotama, 2023).....	4
2.1.1 Geomorfologi	4
2.2 Nikel Laterit	8
2.3 Lereng	10
2.4 Longsoran.....	14
2.5 Kajian Geoteknik	15
2.7 Karakteristik Batuan	18
2.8 Macam-Macam Longsor	20
2.9 Klasifikasi <i>Rock Mass Rating</i> (RMR) dan <i>Geological Strength Index</i> (GSI) 23	
2.10 Kekuatan Massa Batuan.....	34
Metode Simplified Bishop	38
METODE PENELITIAN/PERANCANGAN	40
Metode Penelitian.....	40



3.2 Metode Penelitian.....	41
3.3 Jenis Data	42
3.4 Analisis Data	43
3.5 Pemodelan Ulang Geometri Lereng.....	49
3.6 Bagan Alir Penelitian	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	52
4.1 Kondisi Lapangan	52
4.2 Karakteristik Material	53
4.3 Analisis Kestabilan Lereng	55
4.3 Pemodelan Ulang Geometri Lereng.....	61
BAB 5	64
KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN.....	68



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Peta Geologi Regional PT Ceria Nugraha Indotama	4
Gambar 2 Korelasi Satuan Lembar Lasusua Kendari	7
Gambar 3 Faktor Keamanan Sederhana	16
Gambar 4 Skema Longsor Busur	21
Gambar 5 Skema Longsor Bidang	21
Gambar 6 Skema Longsor Baji	22
Gambar 7 Skema Longsor Guling	23
Gambar 8 Grafik untuk memperkirakan GSI (Hoek et al, 1998).....	32
Gambar 9 Grafik hubungan m_i dengan GSI untuk mendapatkan rasio c'/σ_u (Fig. 1) dan hubungan m_i dan GSI untuk mendapatkan sudut geser dalam (ϕ') (Hoek and Brown, 1998).....	33
Gambar 10 Nilai Intact Rock (m_i) untuk menentukan kekuatan massa batuan dan GSI (Hoek et al, 1998)	34
Gambar 11 Kurva hasil perhitungan kriteria keruntuhan Hoek-Brown untuk berbagai nilai tegangan utama maksimum-minimum (Hoek et al, 2002).....	37
Gambar 12 Estimasi nilai disturbance factor lereng (Hoek et al, 2002)	38
Gambar 13 Gaya-gaya yang berkerja pada irisan	39
Gambar 14 Peta Wilayah IUP PT. Ceria Nugraha Indotama	41
Gambar 15 Geometri external boundary di-import ke Rocscience Slide2	45
Gambar 16 Menu pengaturan metode yang akan digunakan	46
Gambar 17 Menu pengaturan material	47
Gambar 18 Menu pengaturan surface option	48
Gambar 19 Proses kalkulasi stabilitas lereng	48
Gambar 20 Menu Interpret pada Rocscience Slide2	49
Gambar 21 Interpretasi nilai <i>safety factor</i> (faktor keamanan)	50
Gambar 22 Bagan alir penelitian	51
23 Situasi Lokasi Pengamatan Lereng A	52
24 Situasi Lokasi Pengamatan Lereng B	53
25 Model penampang lereng A	56
26 Nilai faktor keamanan lereng (<i>overall slope</i>) A	58



Gambar 27 Model penampang lereng B59

Gambar 28 Nilai faktor keamanan lereng (*overall slope*) B60

Gambar 29 Nilai faktor keamanan & desain lereng rekomendasi lereng A62

Gambar 30 Nilai faktor keamanan & desain lereng rekomendasi lereng B63



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang	19
Tabel 2 Klasifikasi Kuat Massa Batuan (Hoek, 1981)	25
Tabel 3 Hubungan RQD dengan Kualitas Batuan (Deere, 1967)	26
Tabel 4 Klasifikasi Persistensi Kekar (Bieniawski, 1989)	27
Tabel 5 Tingkat Pelapukan (Bieniawski, 1989)	28
Tabel 6 Kondisi Air Tanah (Bieniawski, 1989)	29
Tabel 7 Pengaruh orientasi kekar dalam pembuatan terowongan dan penggalian	29
Tabel 8 Nilai bobot orientasi kekar (Bieniawski, 1989)	29
Tabel 9 Pembobotan klasifikasi RMR	30
Tabel 10 Data sifat fisik material	54
Tabel 11 Data sifat mekanik material batuan	55
Tabel 12 Data sifat mekanik material <i>cohesion</i> dan sudut geser dalam	56
Tabel 13 Data geometri pada penampang lereng A	57
Tabel 14 Data sifat fisik material pada penampang lereng A	57
Tabel 15 Data sifat mekanik material pada penampang lereng A	57
Tabel 16 Data geometri pada penampang lereng A	59
Tabel 17 Data sifat fisik material pada penampang lereng B	59
Tabel 18 Data sifat mekanik material pada penampang lereng B	60
Tabel 19 Data perubahan geometri lereng rekomendasi lereng A	62
Tabel 20 Data perubahan geometri lereng rekomendasi lereng B	63
Tabel 21 Data perubahan geometri lereng rekomendasi lereng A dan B.....	65



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Parameter Nilai Sifat Fisik dan Mekanika	81
Lampiran 2 Peta Lokasi Penelitian Pit Lola ABC	82
Lampiran 3 Peta Countour dan Topografi	83



KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena hanya atas kehendak-Nya dan karunia-Nya, tugas akhir yang berjudul "Analisis Kestabilan Lereng Tambang Nikel Laterit dengan dengan Metode Bishop" ini dapat terselesaikan. Tugas akhir ini sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik (S1) pada Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Dalam proses pengerjaan tugas akhir banyak hambatan yang dihadapi oleh penulis. Harapan penulis adalah tugas akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat kepada orang-orang yang membutuhkan data maupun informasi dari hasil penelitian yang dilakukan.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T., kepala Laboratorium Geomekanika Universitas Hasanuddin serta selaku pembimbing utama, yang selalu membimbing dan mendukung dalam menyelesaikan penelitian ini, dosen pembimbing pendamping Ibu Rizki Amalia, S.T., M.T yang telah meluangkan waktu untuk penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih orang tua penulis Bernadetta yang selalu memberikan motivasi dan dukungan dalam bentuk apapun kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada teman-teman Tunnel 18 yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dan keterbatasan dalam penyusunan tugas akhir ini sehingga kritik dan saran sangat penulis harapkan guna kesempurnaan tugas akhir ini. Penulis berharap penelitian tugas akhir ini dapat menjadi referensi dalam ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang geoteknik. Akhir kata, semoga penelitian tugas akhir ini bermanfaat bagi penulis khususnya dan juga dapat menjadi referensi pada bidang geomekanika.

Gowa, Februari 2024

Ceacer Dwinata Darra



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambangan didalam undang-undang No 3 Tahun 2020 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara (UU NO. 3/2020) adalah sebagian atau seluruh tahapan kegiatan dalam rangka, pengelolaan dan pengusahaan mineral atau batubara yang meliputi penyelidikan umum, eksplorasi, studi kelayakan, konstruksi, penambangan, pengolahan dan pemurnian atau pengembangan dan pemanfaatan, pengangkutan dan penjualan, serta kegiatan pasca tambang.

PT Ceria Nugraha Indotama adalah salah satu perusahaan pertambangan yang bergerak di bidang usaha pertambangan dengan bahan galiannya yaitu nikel terutama nikel laterit. Lokasi pada perusahaan ini tepatnya pada koordinat $121^{\circ}14'58''$ s.d $121^{\circ}18'04''$ BT dan $3^{\circ}50'56''$ LS. Pit Lola ABC adalah sebuah tambang terbuka yang memiliki dua lereng yang berpotensi menjadi area yang rentan terhadap masalah kestabilan lereng. Kondisi lereng pada Pit ini terdapat titik rekahan yang berada pada jenjang lereng Pit hal inilah juga yang akan mempengaruhi kestabilan lereng pada pit tersebut.

Ketidakstabilan pada lereng dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti sifat fisik dan mekanik tanah, geometri lereng, atau pengaruh akibat getaran yang menyebabkan lereng yang tidak stabil menjadi longsor. Longsor yang terjadi akibat lereng tambang yang tidak stabil akan menimbulkan korban jiwa, kerugian waktu, dan kerugian biaya, serta dapat mengganggu kelancaran produksi sehingga dalam 2 pembuatan lereng penambangan harus memperhitungkan kondisi geologi teknik dengan sebaik mungkin.

Kegiatan penambangan seperti penggalian pada suatu lereng akan menyebabkan terjadinya perubahan besarnya gaya yang bekerja pada lereng tersebut yang berpotensi mengganggu kestabilan lereng dan mengakibatkan keruntuhan atau longsor yang dapat mengganggu kegiatan produksi. Oleh karena itu

perlu dilakukan analisis untuk mengetahui nilai faktor keamanan yang ada pada lereng Pit Lola ABC agar dapat mengidentifikasi potensi bahaya dan memilih langkah-langkah yang tepat untuk mengurangi risiko.



1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan diatas, maka didapatkan rumusan masalah yaitu :

1. Berapa nilai faktor keamanan yang terdapat pada lereng Pit Lola ABC pada PT Ceria Nugraha Indotama?
2. Bagaimana perancangan atau pemodelan ulang geometri lereng jika hasil dari analisis yang diperoleh nilai faktor keamanannya belum sesuai standar keamanan lereng untuk lereng Pit Lola ABC PT Ceria Nugraha Indotama?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Tujuan dilakukan penelitian ini yaitu :

1. Menganalisis nilai faktor keamanan lereng pada Pit Lola ABC di PT. Ceria Nugraha Indotama.
2. Pemodelan kembali atau perancangan ulang geometri lereng untuk lereng Pit Lola ABC PT Ceria Nugraha Indotama.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Manfaat dari penelitian yaitu :

1. Memperluas wawasan dan memperdalam ilmu pengetahuan yang nantinya dapat diterapkan dalam dunia kerja.
2. Menerapkan ilmu yang didapatkan selama kuliah secara langsung di lapangan.
3. Memperoleh pengetahuan lebih lanjut tentang analisis kestabilan lereng, terutama mengetahui nilai faktor keamanan dan bentuk geometri lereng yang aman.
4. Melatih mahasiswa untuk berfikir ilmiah dalam menganalisis masalah secara lebih detail hingga mampu memperoleh cara dalam penyelesaian yang sesuai untuk diterapkan.

1.5 Ruang Lingkup



ini dilakukan pada Pit Lola ABC yang memiliki dua lereng untuk nilai faktor keamanan pada suatu lereng. Analisis kestabilan lereng untuk mengetahui nilai faktor keamanan dari suatu lereng dengan metode

Bishop menggunakan software slide2. Data yang digunakan adalah data geometri lereng dan sifat fisik material yang didapatkan dari perusahaan.

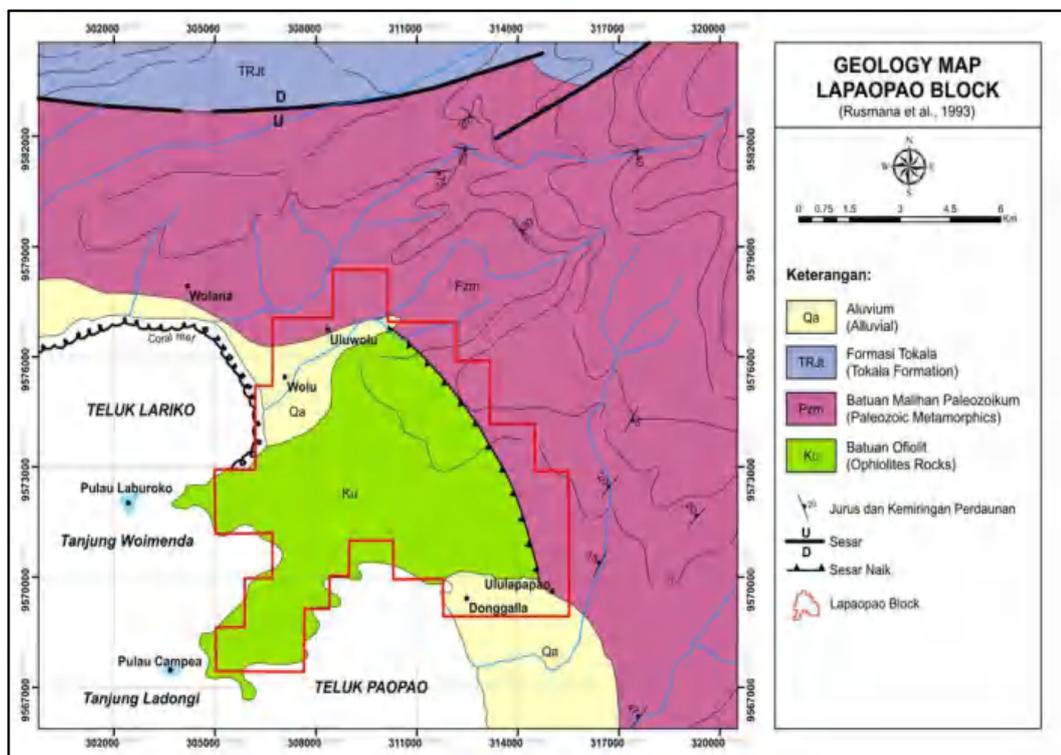


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian

Berdasarkan peta geologi regional lembar Lasusua-Kendari, yang dimodifikasi dari Simanjuntak, dkk (1994) dengan skala 1:120.000, susunan litologi di daerah kerja praktik tersusun oleh batuan sedimen pratersier anggota formasi Meluhu dan formasi Tokala, kompleks batuan ultrabasa berumur kapur serta batuan sedimen tersier anggota formasi alangga dan endapan aluvial berumur kuartar.



Gambar 1 Peta Geologi Regional (PT Ceria Nugraha Indotama, 2023).

2.1.1 Geomorfologi

Tinjauan yang menjelaskan mengenai geomorfologi regional yang mencakup daerah kerja praktik yang meliputi Daerah PT Ceria Nugraha Indotama didasari oleh data dan hasil pemetaan yang telah ada atau laporan hasil pemetaan geologi regional di daerah kerja praktik, Sulawesi Tenggara yang disusun oleh Simadajuntak, dkk (1993). Daerah penelitian ini merupakan daerah yang termasuk dalam geomorfologi



regional lembar Kolaka yang mencakup daerah pegunungan, perbukitan dan daerah pedataran.

Bagian selatan dan utara termasuk dalam daerah pegunungan. Di bagian selatan terdapat pegunungan Blok Lapao-pao yang dibentuk oleh garnit, sedangkan pada bagian utara terdapat pegunungan Tamborasi yang tersusun oleh batugamping. Pada daerah perbukitan bagian timur dengan ketinggian 200-700 m dan merupakan perbukitan yang agak landai yang terletak diantara pegunungan dan daratan yang dibentuk oleh batuan vulkanik, ultramafik, dan batupasir.

2.1.2 Strategi Regional

Strategi regional lokasi kerja praktik berdasarkan peta geologi bersistem indonesi yang diterbitkan oleh pusat penelitian dan pengembangan geologi, Bandung yaitu Peta Geologi Lembar Lasusua-Kendari, Sulawesi (Rusmana dkk, 1993). Dimana dijelaskan kondisi lokasi kegiatan kerja praktik terdiri dari tiga, yaitu Quarter Alluvium (Qa), Kompleks Ultramafik (Ku) dan Batuan Metamorf Paleozoikum (Pzm) sebagai berikut:

1. Quarter Aluvium (Qa)

Aluvium (Qa) terdiri atas kerikil, kerakal, pasir lempung dan lumpur (Surono, dkk 2013). Satuan ini merupakan hasil dari endapan sungai, rawa dan endapan pantai. Dari hasil interpretasi Peta geologi Lembar Lasusua-Kendari, umur satuan ini adalah Holosen. Endapan aluvium yang ditemukan di sekitar lokasi merupakan endapan aluvium yang terendapkan dari hasil transportasi sungai dengan orientasi pengendapan sejajar garis pantai. Di sebelah selatan lokasi kegiatan, endapan aluvium yang berasal dari sungai Tamboli, sungai Konaweha dan beberapa sungai kecil lainnya. Kedua sungai memiliki pola aliran paralel dengan hulu sungai berada di pegunungan Mekongga dan bermuara di Teluk Pao-pao. Endapan material sedimen yang dihasilkan berukuran pasir halus-pasir kasar. Sementara itu, di sebelah utara lokasi kegiatan, endapan aluvium bersumber dari sungai Ulu Wolo yang hulunya berada di Pegunungan Mekongga dan bermuara di Teluk Lariko.



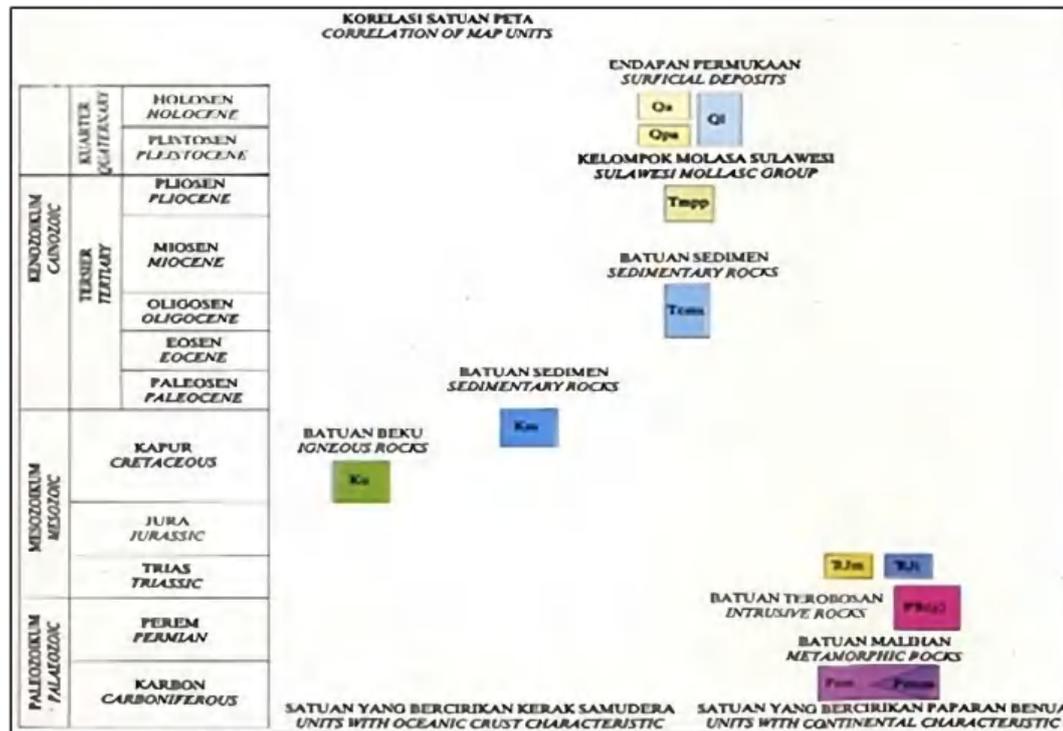
2. Kompleks Ultramafik (KU)

Kompleks Ultramafik (KU) terdiri atas Peridotit, Dunit dan Serpentinit. Serpentinit berwarna kelabu tua sampai kehitaman; padu dan pejal. Batuannya bertekstur afanitik dengan susunan mineral antigorit, lempung dan magnetit. Umumnya memperlihatkan struktur kekar dan cerminan sesar yang berukuran megaskopis. Dunit, kehitaman padu dan pejal, bertekstur afanitik. Mineral penyusunnya ialah Olivin, Piroksin, Plagioklas, sedikit serpentin dan magnetit; berbutir halus sampai sedang. Mineral utama Olivin berjumlah sekitar 90%. Tampak adanya penyimpangan dan pelengkungan kembaran yang dijumpai pada Piroksin, mencirikan adanya gejala deformasi yang dialami oleh batuan ini. Peridotit terdiri atas jenis harzburgit dan Iherzolit. Harzburgit, hijau sampai kehitaman, holokristalin, padu dan pejal. Mineralnya halus sampai Makassar, terdiri atas Olivin (60%) dan Piroksin (40%). Di lokasi kegiatan, ultrabasa menempati hampir seluruh lokasi kegiatan. Batuan ultrabasa tersebut mengalami pengangkatan akibat adanya struktur berupa sesar naik, dimana batuan-batuan metamorf dari formasi batuan Malihan Paleozoikum sebagai *Foot Wall* dari sesar tersebut. Litologi kompleks ultramafik di lokasi CNI sama seperti daerah ultrabasa lainnya seperti adanya Dunit, Peridotit dan Serpentinit.

3. Batuan Malihan Paleozoikum (Pzm)

Batuan Malihan Paleozoikum (Pzm) terdiri atas Sekis, Gneise, Filit, Batu Sabak dan sedikit Pualam. Satuan ini diperkirakan berumur karbon sampai perm dan mempunyai hubungan menjemari dengan satuan pualam paleozoikum (Pzmm) yang terdiri atas pualam dan batu gamping terdaunkan. Hadirnya beberapa struktur seperti kekar, sesar dan lipatan mengakibatkan deformasi fisik batuan sehingga di beberapa tempat di sekitar lokasi singkapan batuan ini telah hancur dan terlapukkan. Di lokasi kegiatan, formasi ini kontak struktur dengan kompleks Sofiolit, kehadiran sekis mika dan filit merupakan penciri dari batuan malihan Paleozoikum di sekitar rah Wolo.





Gambar 2 Korelasi Satuan Lembar Lasusua Kendari.

2.1.3 Struktur Geologi

Struktur geologi lembar Lasusua-Kendari memperlihatkan kompleks tumbukan dari pinggiran benua yang aktif. Berdasarkan struktur, himpunan batuan, biostratigrafi dan umur, daerah ini dapat dibagi menjadi 2 domain yang sangat berbeda, yakni:

- 1) allochton: ofiolit dan malihan, dan
- 2) autochton: batuan gunung api dan pluton tersier dan pinggiran benua Sundaland,

Serta kelompok Molasa Sulawesi. Lembar Lasusua, sebagaimana halnya daerah Sulawesi bagian timur, memperlihatkan struktur yang sangat rumit. Hal ini disebabkan oleh pengaruh pergerakan tektonik yang telah berulang kali terjadi di daerah ini. Struktur geologi yang terdapat pada daerah Wolo berupa sesar geser mendatar, sesar turun, kekar turun, kekar yang dijumpai hampir pada semua batuan kompleks mafik dan batuan ultramafik, begitu juga perlipatan-perlipatan yang diduga mulai terbentuk sejak mesozoikum. Pada daerah Wolo terdapat kekar-kekar yang terisi oleh mineral-mineral sekunder, misalnya krisopras, asbes dan kalsedon (silika) (Simanjuntak dkk, 1993).



2.2 Nikel Laterit

Nikel laterit adalah produk residual pelapukan kimia pada batuan ultramafik (dunit, peridotit) dan ubahannya (serpentinit). Proses ini berlangsung selama jutaan tahun dimulai ketika batuan ultramafik tersingkap di permukaan bumi. Salah satu faktor yang mempengaruhi pembentukan endapan nikel laterit adalah batuan asal/induk.

1. Endapan Nikel Laterit

Cebakan nikel laterit dapat terdiri atas dua jenis, yaitu nikel yang mengandung Fe dan rijang (*nickel ferros ferugenus*) dan silikat nikel (*nickel silicate*). Jenis cebakan pertama mempunyai kandungan besi 40 % dan kandungan Ni sekitar 1% seperti yang terdapat pada negara Filipina. Jenis nikel kedua umumnya memiliki kandungan besi rendah <35% Fe dengan kandungan Ni 15%, yang terdapat pada nikel garnierite dan terbentuk pada bagian bawah zona pelapukan atau pada zona saprolit yang salah satunya terdapat di New Caledonia dan dalam batuan garnierit mempunyai kandungan mencapai 10% Ni.

Kedua jenis endapan bijih nikel laterit ini membentuk lapisan selubung dengan ketebalan 1-300 kaki dan rata-rata 50 kaki. Lapisan bagian atas mempunyai kandungan <1% Ni, sedangkan bagian yang paling kaya terdapat pada bagian dasar dari zona pelapukan. Logam nikel yang terkonsentrasi dalam laterit berasal dari penghancuran mineral olivin dan piroksen selama berlangsungnya proses pelapukan (Sutisna dkk, 2006),

Konsentrasi nikel ini juga berasal dari hasil pelapukan batuan ultra basa peridotit dengan proses yang melibatkan cuaca atau iklim untuk menguraikan olivin dan ortopirksen dari batuan induknya. Pada proses ini terjadi pemisahan magnesium dan silikat, sehingga menyisakan nikel dan besi dalam tanah pelapukan. Selama pelapukan berlangsung tidak ada kehilangan unsur Ni. Endapan nikel laterit ini ditandai dengan adanya logam oksida yang mengandung Ni dan Fe. Endapan ini memiliki banyak kegunaan yaitu sebagai pahan produksi stainless steel, baterai dan lain-lain (Raivel & Firman, 2021).



or Pembentukan Nikel Laterit

or-faktor yang mempengaruhi pembentukan bijih nikel laterit ini adalah gai berikut:

Batuan asal, batuan asal untuk terbentuknya endapan nikel laterit adalah batuan ultra basa. Terdapat elemen Ni pada olivin dan piroksen

- a) Struktur yang umum dijumpai pada zona laterit nikel adalah struktur kekar (*joint*)
- b) Iklim, pergantian musim kemarau dan musim penghujan dimana terjadi kenaikan dan penurunan permukaan air tanah juga dapat menyebabkan terjadinya proses pemisahan dan akumulasi unsur-unsur.
- c) Proses pelarutan kimia dan vegetasi, adalah unsur-unsur dan senyawa-seyawa yang membantu mempercepat proses pelapukan batuan menjadi soil. Air tanah yang mengandung CO₂ memegang peranan penting didalam proses pelapukan kimia.
- d) Topografi yang landai, akan mempunyai kesempatan untuk mengadakan penetrasi lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan.
- e) Waktu yang cukup lama akan mengakibatkan pelapukan yang cukup intensif karena akumulasi unsur nikel cukup tinggi. Waktu laterisasi tiap ketebalan 1 mm membutuhkan waktu sekitar 100 tahun.

3. Profil Endapan Nikel Laterit

Pada umumnya nikel laterit terdiri dari 4 zona gradasi sebagai berikut:

- a) Tanah penutup atau *top soil* (biasanya disebut “*Iron Capping*”) tanah residu berwarna merah tua yang merupakan hasil oksidasi yang terdiri dari masa hematit, goethit serta limonit. Kadar besi yang terkandung sangat tinggi dengan kelimpahan unsur Ni yang sangat rendah.
- b) Zona limonit berwarna merah coklat atau kuning, berukuran butir halus hingga lempung, lapisan kaya besi dari limonit soil yang menyelimuti seluruh area.
- c) Zona lapisan atau “*Silica Boxwork*” zona ini jarang terdapat pada batuan dasar (bedrock) yang serpentinisasi. Berwarna putih orange chert, quartz, mengisi sepanjang rekahan dan sebagian menggantikan zona terluar dan unserpentine fragmen peridotit, sebagian mengawetkan struktur dan tekstur dari batuan asal. Terkadang terdapat



mineral opal, magnesit. Akumulasi dari garnierit-pimelit di dalam *box work* mungkin berasal dari nikel ore yang kaya akan silika.

- d) Zona Saprolit merupakan campuran dari sisa-sisa batuan, bersifat pasiran saprolitic rims, vein dari garnierite, nickeliferous quartz, mangan dan pada beberapa kasus terdapat silika boxwork, bentukan dari suatu zona transisi dari limonit ke *bedrock*. Terkadang terdapat mineral quartz yang mengisi rekahan, mineral primer yang terlupakan, chlorit. Garnierite dilapangan biasanya diidentifikasi sebagai “*colloidal talk*” dengan lebih atau kurang nickeliferous serpentine. Struktur dan tekstur batuan asal masih terlihat (Kurniadi dkk., 2018).

2.3 Lereng

Lereng merupakan setiap bagian permukaan yang memotong material di alam dan memiliki kemiringan tertentu terhadap bidang horizontal, secara umum lereng terbagi atas 3 bagian, yaitu:

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

Lereng alam (*natural slope*) merupakan lereng yang terbentuk karena adanya fenomena alam yang merupakan akibat dari proses geologi. Dalam konteks perencanaan jalan, lereng alam sering dijumpai pada kawasan dengan topografi berbukit dan pegunungan, di mana letak dari badan jalan berada pada dasar lereng (*existing ground*), atau elevasi badan jalan berada pada lereng yang sebagian digali/dipotong untuk posisi badan jalan. Dikategorikan sebagai lereng alam apabila tidak ada perlakuan dan/atau penanganan terhadap lereng tersebut. Perubahan pada

an ataupun penambahan dengan suatu konstruksi tertentu sehingga 1 dan kemandapan dari lereng alam tersebut benar-benar mengandalkan



kestabilan internal yang terbentuk akibat sifat, karakteristik, dan struktur tanah, serta bentuk alaminya (Tibri dkk., 2017).

Geometri lereng merupakan kenampakan visual yang terdapat di lapangan. Pengukuran geometri lereng dapat dilakukan dengan menggunakan total station untuk mengetahui tinggi lereng, jarak datar dan sudut kemiringan lereng. Kemiringan dan tinggi suatu lereng sangat mempengaruhi kemantapannya. Semakin besar kemiringan dan tinggi suatu lereng maka kemantapannya semakin kecil Menurut (Read, J. Peter, S. 2010).

2.2.1 Faktor Yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

Kemantapan atau kestabilan suatu lereng tergantung pada besarnya gaya penahan dan gaya penggerak yang terdapat pada bidang gelincirnya. Gaya penahan adalah gaya yang menahan terjadinya suatu longsoran sedangkan gaya penggerak merupakan gaya yang menyebabkan terjadinya longsoran (Herlambang, dkk 2020).

1. Geometri Lereng

Geometri lereng meliputi bentukan lereng, baik tinggi lereng dan besar sudut lereng. Kemiringan dan tinggi suatu lereng sangat mempengaruhi kestabilannya. Semakin besar kemiringan dan ketinggian suatu lereng, maka kestabilan semakin berkurang.

2. Struktur Batuan

Struktur batuan yang sangat mempengaruhi kestabilan lereng adalah bidang-bidang sesar, perlapisan dan rekahan. Struktur batuan tersebut merupakan bidang-bidang lemah (diskontinuitas) dan sekaligus sebagai tempat merembesnya air, sehingga batuan lebih mudah longsor. Jika orientasi umum bidang-bidang lemah tersebut searah dengan arah lereng dan kemiringan bidang lemah lebih landai dari kemiringan bidang lereng. Maka struktur tersebut mempunyai pengaruh langsung yang lebih besar terhadap stabilitas lereng, sebaliknya jika arah dan kemiringan bidang lereng berlawanan maka struktur bidang lemah tersebut mempunyai pengaruh langsung yang lebih kecil terhadap stabilitas lereng.

Struktur geologi mempunyai kemantapan lereng adalah adanya dang ketidak menerusan. Hal yang paling penting dalam bidak tidakmenerusan adalah adanya pengaruh tekanan air yang berada pada



saat rekahan ditarik. Sekain adanya rembesan air pada bidang ketidakmenerusan tersebut, rekahan tarik juga akan terisi oleh material pengisi yang dapat memisahkan dua sisi batuan, batuan tersebut akan memiliki kuat geser yang kecil untuk menahan potensi longsoran. Kondisi bidang lemah dan penyebaran perlu diketahui untuk menentukan arah dan jenis longsoran yang terjadi pada massa batuan tersebut. Bila jenis longsoran diketahui, maka lebih mudah untuk menentukan geometri yang mantap dengan melakukan analisa kestabilan lereng.

3. Kandungan Air Tanah

Kandungan air tanah sebagai moisture tanah pada lereng yang bersangkutan akan memberikan tambahan beban yang besar pada lereng. Selain itu juga, kondisi material yang jenuh dengan air tanah akan mengalami penurunan kekuatan geser akibat adanya tekanan air pori di dalam tubuh material tersebut. 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 yaitu adanya tekanan ke atas dari air pada bidang-bidang lemah yang secara efektif mengurangi kekuatan geser dan mempercepat proses pelapukan dari batuan.

4. Berat beban yang di tanggung oleh lereng

Pada suatu lereng yang menanggung beban massa, semakin berat beban yang ditanggung lereng maka semakin besar potensi lereng untuk mengalami pergerakan.

5. Sifat fisik batuan

Sifat fisik batuan didapatkan dari pengujian tidak merusak (*non-destructive*). Sifat fisik batuan yaitu massa jenis, berat jenis, kadar air, kekerasan, tekstur derajat kejenuhan, porositas, permeabilitas dan angka pori. Sifat fisik batuan yang memengaruhi kestabilan lereng adalah bobot i (unit weight), porositas dan kandungan air (Bowles, 2001).

a. Bobot isi (unit weight)



Bobot isi batuan akan memengaruhi besarnya beban pada permukaan bidang longsor. Gaya penggerak yang menyebabkan lereng longsor akan semakin besar apabila bobot isi batuan semakin besar. Kondisi ini menyebabkan kestabilan lereng tersebut semakin berkurang.

b. Porositas

Batuan yang mempunyai porositas besar akan menyerap air. Kondisi ini menyebabkan bobot isi batuan tersebut menjadi lebih besar sehingga memperkecil kestabilan lereng.

c. Kandungan air

Kandungan air sangat berpengaruh besar pada kestabilan lereng. Semakin besar kandungan air dalam batuan, maka tekanan air pori menjadi besar juga. Kondisi ini menyebabkan kuat geser batuan menjadi kecil sehingga kestabilannya berkurang.

6. Sifat mekanik batuan

Sifat mekanik dari suatu batuan didapatkan dengan pengujian yang destruktif 10 Sifat mekanik batuan didapatkan dengan pengujian yang merusak Sifat mekanik didapatkan dari pengujian yang dilakukan di laboratorium. Kuat tekan, kuat tarik, kuat geser, kohesi dan sudut geser dalam merupakan sifat mekanik batuan yang juga memengaruhi kestabilan lereng (Rai et. al, 2013).

a. Kuat tekan

Kuat tekan adalah kapasitas dari suatu bahan atau struktur dalam menahan beban yang akan mengurangi ukurannya. Kekuatan tekan dapat diukur dengan memasukkannya ke dalam kurva tegangan-regangan dari data yang didapatkan dari alat uji.

b. Kuat tarik

Kekuatan tarik (tensile strength) adalah tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah bahan ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut patah. Kekuatan tarik adalah kebalikan dari kekuatan tekan, dan nilainya bisa berbeda.

c. Kuat geser



Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Kuat geser tanah dipengaruhi oleh nilai kohesi dan sudut geser dalam

d. Kohesi

Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel dalam batuan, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi batuan akan semakin besar jika kekuatan gesernya makin besar. Salah satu aspek yang memengaruhi nilai kohesi adalah kerapatan dan jarak antar molekul dalam suatu benda. Kohesi berbanding lurus dengan kerapatan suatu benda, sehingga bila kerapatan semakin besar maka kohesi yg akan didapatkan semakin besar.

e. 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 adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya.

2.4 Longsoran

Longsoran biasanya terjadi dengan beberapa bentuk dan cara, dan ternyata hal ini sangat penting untuk membuat analisa kestabilan lereng. Longsoran yang terjadi pada batuan mempunyai mekanisme dan bentuk geometri yang berbeda dengan batuan keras (Umrao, et.al, 2011).

1. Mekanisme Dasar Terjadinya Longsor

Pemakaian alat-alat mekanis yang berat. Tanah dan batuan umumnya berada dalam keadaan setimbang, artinya keadaan distribusi tegangan pada tanah atau batuan tersebut ada kegiatan penggalian, penimbunan, penurunan, pengangkutan, erosi atau aktifitas lain, sehingga menyebabkan keseimbangan terganggu, maka tanah atau batuan itu akan berusaha untuk mencapai keseimbangan baru secara ilmiah dengan cara pengurangan beban, terutama dalam bentuk longsoran.



Dalam menganalisis stabilitas lereng, sistem tegangan yang bekerja pada tanah atau batuan serta fisik dan mekaniknya perlu diketahui terlebih dahulu. Pengujian sifat fisik meliputi kadar air, bobot isi dan berat jenis, sedangkan pengujian sifat mekanik antara uji geser langsung dan uji kuat tekan uniaksial. Sifat fisik dan mekanik tanah atau batuan secara langsung dapat mempengaruhi stabilitas dari suatu lereng.

Longsor yang terjadi pada tanah dan pasir pada umumnya adalah longsor busur, sedangkan untuk batuan yang sifatnya lebih keras dengan kuat tekan $>10\text{Mpa}$, dan tidak mempunyai banyak bidang rekah terjadi longsor lain yaitu longsor baji, longsor bidang dan longsor guling.

2. Penyebab Terjadinya Longsor

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng yaitu geologi, hidrologi, topografi, dan iklim perubahan cuaca. Namun, longsor juga terjadi akibat (Hardiyatmo, 2002):

- a. Penambahan beban lereng. Tambahan beban pada lereng berupa bangunan baru, tambahan beban pada lereng oleh air yang masuk kedalam pori-pori tanah maupun yang menggenang dipermukaan lereng.
- b. Penggalian atau pemotongan tanah pada kaki lereng.
- c. Perubahan posisi muka air secara cepat (*rapid draw down*) pada bendungan, sungai, dan lain-lain
- d. Getaran atau gempa bumi
- e. Jenis tanah
- f. Kondisi geometri lereng

2.5 Kajian Geoteknik

Kajian geoteknik banyak di gunakan untuk tambang terbuka untuk menentukan kemantapan lereng, terutama pada rancangan dan rencana penambangan. Faktor utama dalam kemantapan lereng adalah terjadinya longsor pada lereng. Longsor terjadi melalui suatu bidang tertentu yang di sebut bidang gelincir (*slip surface*). Kestabilan lereng, baik lereng alami maupun lereng buatan serta lereng buatan, di pengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat dinyatakan secara

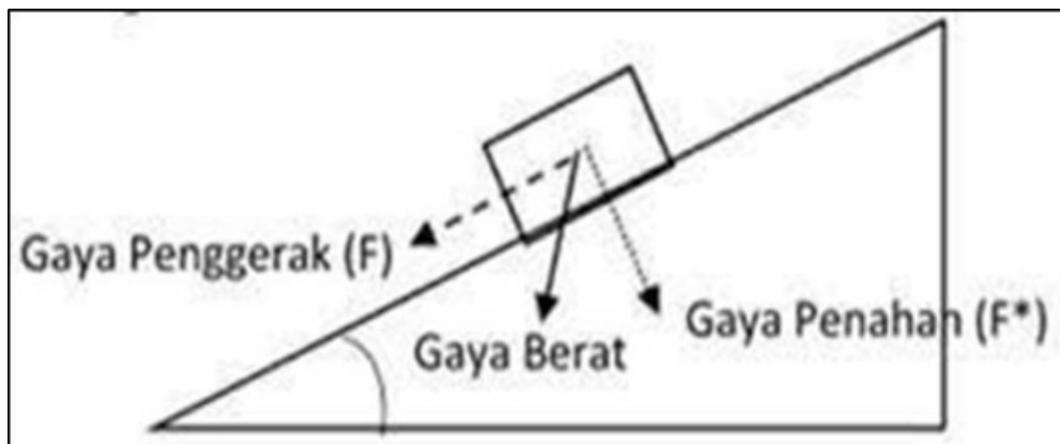


sederhana sebagai gaya-gaya penahan dan gaya-gaya penggerak yang bertanggung jawab terhadap kestabilan lereng tersebut. Pada kondisi gaya penahan (terhadap longsor) lebih besar dari gaya penggerak, lereng tersebut akan berada dalam kondisi yang stabil.

Namun, apa bila gaya penahan lebih kecil dari gaya penggerak, lereng tersebut tidak stabil dan akan terjadi longsor. Sebenarnya, longsor merupakan suatu proses alami yang terjadi untuk mendapatkan kondisi kestabilan lereng yang baru (keseimbangan baru), di mana gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak. Untuk menyatakan tingkat kestabilan suatu lereng, dikenal istilah faktor keamanan (*safety factor*). Faktor keamanan diperlukan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng untuk mencegah bahaya longsor di waktu yang akan datang (Tibri et al., 2017).

2.6 Faktor Keamanan Lereng (*Safety Factor*)

Setiap lereng pasti memiliki faktor keamanan untuk mengetahui apakah lereng tersebut aman atau tidak. Jika tidak aman maka lereng tersebut di kaji kembali agar lereng tersebut aman dan tidak terjadi yang namanya longsor berbahaya bagi karyawan dan bagi perusahaan tambang mau di disposal ataupun di pit.



Gambar 3 Faktor Keamanan Sederhana.

Dapat dilihat bahwa gaya yang bekerja pada suatu lereng adalah gaya berat, yang di hasilkan gaya penggerak dan gaya penahan. Untuk menjaga agar benda tidak jatuh (*failure*), diperlukan perhitungan terhadap kemiringan sesuai faktor keamanan yang diinginkan. Kemantapan suatu lereng dapat



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

$$FK = \frac{F_R}{F_D} = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}} \quad (1)$$

Apabila nilai FK untuk suatu lereng $>1,0$ (gaya penahan $>$ gaya penggerak), lereng tersebut berada dalam kondisi stabil. Namun apabila $FK < 1,0$ (gaya penahan $<$ gaya penggerak), lereng tersebut berada dalam kondisi tidak stabil dan mungkin akan terjadi lonsoran pada lereng tersebut (KEPMEN ESDM 1827K, 2018).

Tabel 1. Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (<i>Consequences of failure/</i> <i>CoF</i>)	Kriteria dapat diterima		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (Min)	Faktor Keamanan(FK) Dinamis (min)	Probabili tas Longsor (<i>Probabi</i> <i>lity of</i> <i>Failure</i>) (maks) <i>PoF</i> ($FK \leq 1$)
Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1,1	Tidak ada	25-50%
	ramp	Rendah	1,15-1,2	1,0
Menengah		1,2-1,3	1,0	20%
Tinggi		1,2-1,3	1,1	10%
Lereng ruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%



Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%
--------	---------	-----	----

2.7 Karakteristik Batuan

Mengetahui tentang asal usul dan mekanisme pembentukan suatu struktur geologi akan menjadi lebih mudah apabila kita memahami prinsip-prinsip dasar mekanika batuan dan faktor-faktor lainnya yang mempengaruhi karakter suatu batuan. Dalam mekanika batuan, setiap batuan memiliki sifat-sifat yang perlu diketahui. Sifat-sifat ini dapat diketahui melalui pengujian laboratorium dan pengamatan langsung dilapangan. Sifat-sifat ini berupa sifat fisik batuan dan sifat mekanik batuan.

2.7.1 Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan sangat penting untuk diketahui sifat fisik batuan, karena dengan mengetahui sifat fisik batuan dapat ditentukan kualitas batuan tersebut. Penentuan sifat fisik ini dilakukan dengan pengujian sampel batuan di laboratorium. Data-data yang diperoleh dari pengujian ini adalah Porositas, Permeabilitas, Densitas batuan, Void Ratio.

1. Porositas

Porositas merupakan kemampuan untuk menyerap fluida pada batuan atau formasi atau ruang-ruang yang terisi oleh fluida diantara zat-zat padat suatu mineral pada suatu batuan. Besar kecilnya porositas dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu ukuran butir, susunan butiran sudut kemiringan dan komposisi mineral pembentuk batuan. Atau bisa didefinisikan bahwa porositas adalah ruangan yang terdapat diantara fragmen butiran yang ada pada batuan yang akan menampung air. Porositas diklasifikasikan menjadi dua yaitu porositas primer dan porositas sekunder. Porositas primer yaitu porositas yang terbentuk pada waktu yang bersamaan dengan proses pengendapan berlangsung, sedangkan porositas sekunder yaitu porositas yang terbentuk setelah pengendapan.

2. Permeabilitas

Permeabilitas merupakan besaran yang digunakan untuk menunjukkan seberapa kemampuan suatu batuan untuk mengalirkan fluida yang terkandung di dalamnya. Permeabilitas merupakan properti suatu batuan berpori dan



merupakan besaran yang menunjukkan kapasitas medium dalam mengalirkan fluida. Jenisnya yaitu:

- a. Permeabilitas absolut (k_a), yaitu pengukuran pada medium berpori untuk fluida satu fasa ketika medium tersebut dialiri oleh suatu fluida, dimana saturasi fluida yang mengalir bernilai satu
- b. Permeabilitas efektif (k), yaitu pengukuran pada medium berpori untuk fluida satu fasa ketika medium tersebut dialiri oleh lebih dari satu jenis fluida
- c. Permeabilitas relatif (k_r), yaitu perbandingan antara permeabilitas efektif fluida pada nilai saturasi tertentu, terhadap permeabilitas absolut pada saturasi 100%.

3. Densitas Batuan

Densitas batuan dari batuan berpori adalah perbandingan antara berat terhadap volume (rata-rata dari material tersebut). Densitas spesifik adalah perbandingan antara densitas material tersebut terhadap densitas air pada tekanan dan temperatur yang normal, yaitu kurang lebih 103 kg/m^3

4. Void Ratio

Perbandingan antara volume rongga dalam batuan dengan volume butiran batuan.

2.7.2 Sifat Mekanika Batuan

Penentuan sifat mekanik batuan biasanya dilakukan dengan pengujian laboratorium yang dimana bertujuan untuk memperoleh suatu gambaran kualitas sifat struktur ataupun mekanik batuan. Pada pengujian laboratorium ada beberapa pengujian yang dilakukan yaitu:

1. Pengujian kuat tekan bebas (*unconfined compressive strength*)

Pengujian ini menggunakan mesin tekan untuk menekan percontohan batu yang berbentuk silinder, balok atau prisma dari satu arah (uniaksial). Perbandingan antara tinggi dan diameter percontohan (I/D) mempengaruhi nilai kuat tekan batuan. Untuk perbandingan $I/D = 1$ kondisi tegangan triaksial saling bertemu

tidak akan memperbesar nilai kuat tekan batuan untuk pengujian kuat tekan akan $2 < I/D < 2,5$. Makin besar I/D maka kuat tekan akan bertambah kecil. Pengujian kuat tarik (*indirect tensile strength test*). Pengujian ini dilakukan



untuk mengetahui kuat tarik dari percontoh batu berbentuk silinder secara tidak langsung. Alat yang digunakan adalah mesin tekan seperti pada pengujian kuat tekan.

2. Modus Elastisitas

Dalam penentuan elastis pada batuan, digunakan beberapa konsep percobaan untuk regangan yang di hasilkan, tegangan dan perbandingan antara keduanya atau sering di sebut sebagai modulus young.

3. Nisbah Poisson (*Poisson Ratio*)

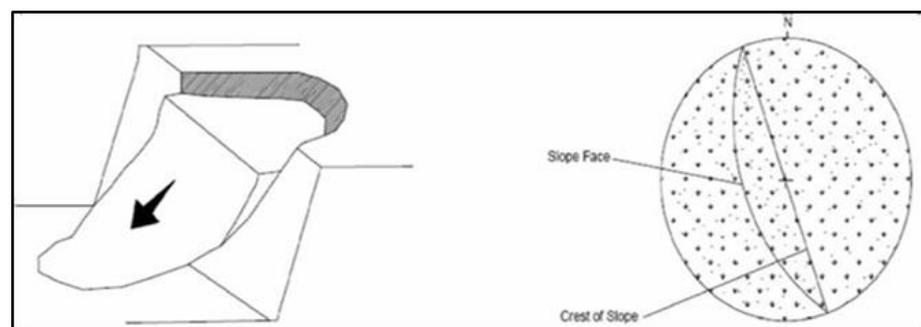
Perbandingan antara negatif antara regangan lateral dan regangan aksial. Nisbah Poisson menunjukkan adanya pemanjangan ke arah lateral akibat adanya tegangan arah aksial.

2.8 Macam-Macam Longsor

Lereng tambang yang tidak stabil akan mengalami longsoran sampai lereng tersebut menemukan keseimbangan yang baru dan menjadi stabil. (Arif, 2021), Macam-macam longsoran yang sering terjadi yaitu:

1. Longsoran Busur (*Circular Failure*)

Longsoran busur adalah yang paling umum terjadi di alam, terutama pada batuan yang lunak (tanah). Pada batuan yang keras longsoran busur hanya terjadi jika batuan tersebut sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidang- bidang lemah (rekahan) yang sangat rapat dan tidak dapat dikenali lagi kedudukannya. Pada longsoran bidang dan baji, kelongsoran dipengaruhi oleh struktur bidang perlapisan dan kekar yang membagi tubuh batuan ke dalam massa diskontinu.



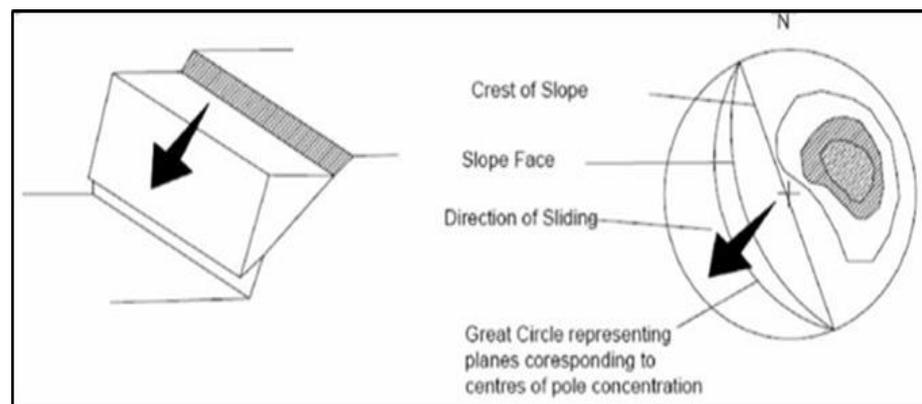
Gambar 4 Skema Longsor Busur.



2. Longsoran Bidang (*Plane Failure*)

Longsoran bidang merupakan suatu longsoran batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang dianggap rata. Bidang luncur tersebut dapat berupa sesar, rekahan, maupun bidang perlapisan batuan. Syarat-syarat terjadinya longsoran bidang adalah:

- Terdapatnya bidang luncur bebas, berarti kemiringan bidang luncur harus lebih kecil daripada kemiringan lereng.
- Arah bidang luncur sejajar atau mendekati sejajar dengan arah lereng (maksimum berbeda 20°)
- Kemiringan bidang luncur lebih besar daripada sudut geser dalam batumannya.
- Terdapat bidang bebas (tidak terdapat gaya penahan) pada kedua sisi longsoran.



Gambar 5 Skema Longsor Bidang.

3. Longsoran Baji (*Wedge Failure*)

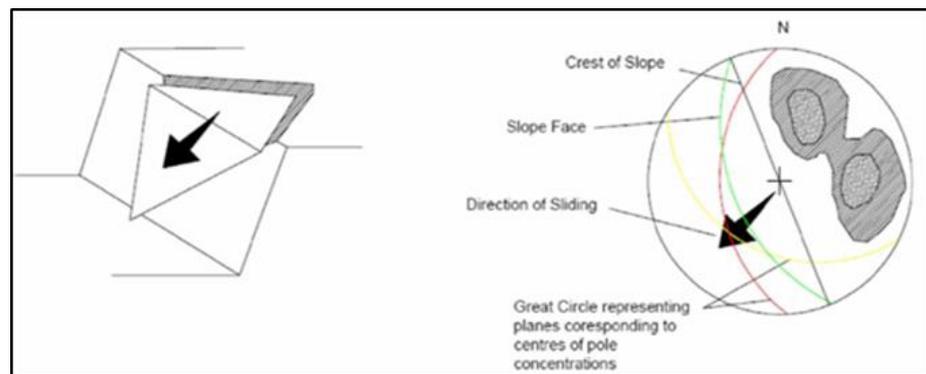
Longsoran baji dapat terjadi pada suatu batuan jika terdapat lebih dari satu bidang lemah yang bebas dan saling berpotongan. Sudut perpotongan antara bidang lemah tersebut harus lebih besar dari sudut geser dalam batumannya. Bidang lemah ini dapat berupa bidang sesar, rekahan, maupun bidang perlapisan.

Cara longsoran suatu baji dapat melalui salah satu atau beberapa bidang lemahnya, ataupun melalui garis perpotongan kedua bidang lemahnya.

Longsoran baji dapat terjadi dengan syarat geometri sebagai berikut :



- a. Permukaan bidang lemah A dan bidang lemah B rata, tetapi kemiringan bidang lemah B lebih besar daripada bidang lemah A.
- b. Arah penunjaman garis potong harus lebih kecil daripada sudut kemiringan lereng.
- c. Bentuk longsoran dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dan kedua bidang lemah.



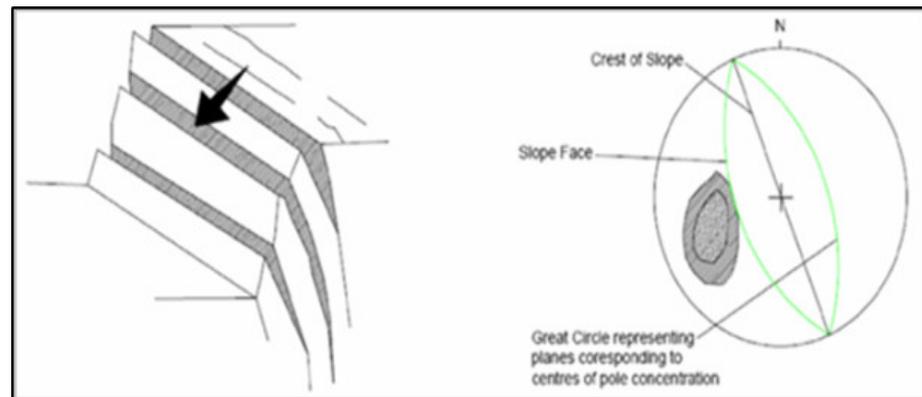
Gambar 6 Skema Longsor Baji.

4. Longsoran Guling (*Toppling Failure*)

Umumnya Longsoran guling akan terjadi pada suatu lereng batuan yang acak kemiringannya berlawanan dengan kemiringan bidang-bidang lemahnya. Keadaan tersebut dapat digambarkan dengan balok-balok yang diletakkan diatas sebuah bidang miring. Berdasarkan bentuk dan proses menggulingnya, maka longsoran guling dibedakan menjadi tiga, yaitu :

- a. Longsoran guling setelah mengalami benturan (*flexural toppling*)
- b. Longsoran guling yang berupa blok (*balok-balok*)
- c. Gambaran kedua longsoran diatas (*block-flexural*)





Gambar 7 Skema Longsor Guling.

2.9 Klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR) dan *Geological Strength Index* (GSI)

Dalam analisis kekuatan massa batuan terdapat beberapa klasifikasi yang dapat digunakan, dalam penelitian ini menggunakan klasifikasi massa batuan RMR (*rock mass rating*) dan GSI (*Geological Strength Index*).

2.9.1 Pembobotan Massa Batuan (*Rock Mass Rating* (RMR))

Klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR) merupakan suatu klasifikasi geomekanik dengan metode empiris dalam menentukan pembobotan dari massa batuan, yang digunakan untuk mengevaluasi ketahanan massa batuan, dengan memperhatikan enam (6) parameter yaitu *Unconfined Compressive Strength* (UCS), *Rock Quality Designation* (RQD), *spacing of discontinuities*, *condition of discontinuities*, *groundwater condition*, *orientation of discontinuities* (Bieniawski, 1989, dalam Swana, 2012). Sistem *Rock Mass Rating* (RMR) pada awalnya telah dikembangkan pada South African Council of Scientific and Industrial Research (CSIR) oleh Bieniawski (1973) berdasarkan pengalamannya di terowongan dangkal pada batuan sedimen (Maerz, 2000).

Klasifikasi geomekanik didasarkan pada hasil penelitian 49 terowongan di Eropa dan Afrika, di mana klasifikasi ini menilai beberapa parameter yang kemudian diberi bobot (rating) dan digunakan untuk perencanaan terowongan (Bieniawski, 1973, 1976, 1984; dalam Nurfalah, 2010). Tujuan menggunakan

ini adalah sebagai bentuk komunikasi para ahli untuk menyelesaikan masalah geoteknik. Seperti dapat diperkirakan sifat-sifat dari massa batuan dapat juga merencanakan kestabilan terowongan atau lereng.



Klasifikasi geomekanik sistem RMR adalah suatu metode empiris untuk menentukan pembobotan dari suatu massa batuan, yang digunakan untuk mengevaluasi ketahanan massa batuan sebagai salah satu cara untuk menentukan kemiringan lereng maksimum yang bisa diaplikasikan untuk hal pembuatan terowongan (Bieniawski, 1973; dalam Nurfalah 2010). Klasifikasi ini didasarkan pada enam parameter, antara lain sebagai berikut :

1. Kekuatan batuan (*Rock strength*)

Bieniawski (1984), kekuatan suatu batuan secara utuh dapat diperoleh dari Point Load Strength Index atau *Uniaksial Compressive Strength*. Beliau menggunakan klasifikasi *Uniaksial Compressive Strength* (UCS) yang telah diusulkan dan juga UCS yang telah ditentukan dengan menggunakan Hammer Test. Kekuatan batuan utuh adalah kekuatan suatu batuan untuk bertahan menahan suatu gaya hingga pecah. Kekuatan batuan dapat dibentuk oleh suatu ikatan partikel antar butir mineral atau tingkat sementasi pada batuan tersebut, serta kekerasan mineral yang membentuknya. Hal ini akan sangat berhubungan dengan genesa, komposisi, tekstur, dan struktur batuan yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi Kuat Massa Batuan (Hoek, 1981)

UCS (MPa)	Kualitas Massa Batuan	Contoh Jenis Batuan
0.25 - 1	Sangat Lemah Sekali (Extremely Low)	Dapat dihancurkan dengan mudah menggunakan tangan, mendekati soil.
1 - 5	Lemah Sekali (Very Low)	Mudah dihancurkan dengan ujung palu geologi, dapat dikupas dengan pisau, material seukuran 30 mm dapat dipatahkan dengan tekanan jari.
5 - 25	Lemah (Low)	Mudah dihancurkan dengan palu, dapat melengkung 1-3 mm saat ditumbuk. Dalam bentuk core (panjang 150 mm dan diameter 50 mm) dapat dipatahkan dengan tangan. Jika dipukul dengan palu suaranya melenting.
25 - 50	Medium (Medium)	Mudah dibaret dengan pisai, dalam bentuk core (panjang 150 mm dan diameter 50 mm) bisa namun sangat sulit untuk dipatahkan dengan tangan.



UCS (MPa)	Kualitas Massa Batuan	Contoh Jenis Batuan
50 - 100	Kuat (Strong)	Dalam bentuk core (panjang 150 mm dan diameter 50 mm) tidak dapat dipatahkan dengan tangan tetapi dengan sekali pukulan palu geologi.
100 - 250	Sangat Kuat (Very Strong)	Sampel dapat dihancurkan dengan lebih dari satu kali blow, jika dipukul dengan palu akan berdenting.
>250	Sangat Kuat Sekali (Extremely Strong)	Butuh banyak pukulan palu geologi untuk menghancurkan suara pukulan berdenting

2. *Rock Quality Designation (RQD)*

RQD digunakan sebagai salah satu parameter untuk mendeskripsi massa batuan secara kuantitatif. RQD merupakan parameter yang dapat menunjukkan kualitas massa batuan sebelum penggalian dilakukan. RQD juga dapat dihitung secara tidak langsung dengan melakukan pengukuran orientasi dan jarak antar diskontinu pada singkapan batuan. Perhitungan RQD biasa didapat dari perhitungan langsung dari singkapan batuan yang mengalami retakan-retakan (baik lapisan batuan maupun kekar atau sesar). Hubungan antara RQD dengan kualitas batuan dikemukakan oleh (Das, 2010), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hubungan RQD dengan Kualitas Batuan (Deere, 1967)

RQD	Kualitas Batuan
< 25	Sangat Rendah
25-50	Rendah
50-75	Sedang
75-90	Tinggi
90-100	Sangat Tinggi



Untuk memperkirakan RQD, persamaan Priest dan Hudson (1976) dapat digunakan (Rai, 2013):

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (2)$$

Keterangan:

λ = jumlah total kekar per panjang scanline.

3. Jarak diskontinu

Bidang lemah dalam istilah geologi bisa berupa sesar (*fault*), kekar (*joint*) dan lipatan (*bedding*) yang harus menerus. Kemenerusan joint mempunyai panjang lebih besar dari bukaan atau lebih panjang dari 3m. Bisa juga dikatakan menerus jika kurang dari 3m tetapi dipisah oleh joint lain. RMR menentukan rating berdasarkan jarak antar *joint* yang paling dominan (Zhang et.al., 2019). Batas terbesar dari jarak antar joint yang dipakai dalam RMR yaitu >2 m dengan rating 20, sedangkan batas terendah <60 mm dengan rating 5. Pengukuran di lapangan harus representative terhadap daerah yang akan diteliti. Keterdapatan di alam biasanya terdiri dari beberapa *set joint*, sehingga agak sulit dalam menentukan jarak antar *joint*. Jika hal ini terjadi maka diambil kondisi yang paling dominant atau beberapa model joint tersebut tetap diukur jaraknya dan dirata-ratakan. Menurut ISMR jarak (spasi) kekar adalah jarak tegak lurus antara bidang kekar yang berdekatan dalam satu kekar. Pada perhitungan nilai RMR parameter antara jarak (spasi) kekar.

4. Kondisi diskontinu (*Condition of discontinuities*)

Kondisi diskontinu merupakan suatu parameter yang terdiri dari beberapa subsub parameter, yakni kemenerusan bidang diskontinu (*persistence*), lebar rekahan bidang diskontinu (*aperture*), kekasaran permukaan bidang diskontinu (*roughness*), material pengisi bidang diskontinu (*infilling*), dan tingkat pelapukan dari permukaan bidang diskontinu (*weathered*).

a. Kemenerusan bidang diskontinu (*Persistence*)

Kemenerusan bidang diskontinu ditentukan dengan mengamati dan mengukur panjang dari bidang kekar di massa batuan. Klasifikasi persistensi kekar menurut Bieniawski (1989) dapat dilihat pada Tabel 4.



Tabel 4. Klasifikasi Persistensi Kekar (Bieniawski, 1989)

Deskripsi	Panjang Persistensi
Sangat rendah	< 1 m
Rendah	1-3 m
Sedang	3-10 m
Tinggi	10-20 m
Sangat tinggi	>20 m

b. Lebar Bukaan/Celah (Aperture)

Merupakan jarak tegak lurus antar dinding batuan yang berdekatan pada bidang diskontinu. Celah tersebut dapat berisi material pengisi (*infilling*) atau tidak (Singh, 2011).

c. Kekasaran (*Roughness*)

Kekasaran merupakan parameter penting dari kondisi ketidakmenerusan. Kekasaran didefinisikan sebagai tingkat kekasaran dipermukaan bidang kekar, berfungsi sebagai pengunci antar blok atau mencegah pergeseran sepanjang permukaan kekar (Singh, 2011).

d. Material Pengisi

Material pengisi didefinisikan sebagai material yang mengisi kekar. Keberadaan material pengisi ini akan mempengaruhi kekuatan massa batuan (Singh, 2011).

e. Pelapukan Pada Batuan (*Weathering*)

Tabel 5. Tingkat Pelapukan (Bieniawski, 1989)

Jenis	Definisi
Segar	Tidak ada tanda-tanda pelapukan, warna tidak berubah pada permukaan diskontinu, batuan segar.
Pelapukan Sedikit	Sedikit ada tanda-tanda pelapukan dan terdapat sedikit perubahan warna.
Pelapukan Sedang	Kurang dari setengah batuan mengalami pembusukan atau penghancuran menjadi tanah dan terdapat perubahan warna.
Pelapukan Tinggi	Lebih dari setengah batuan mengalami pembusukan atau penghancuran menjadi tanah dan terdapat perubahan warna.



Pelapukan Sangat Tinggi Semua batuan mengalami pembusukan atau penghancuran menjadi tanah.

5. Kondisi Air Tanah (*Ground water condition*)

Air tanah sangat berpengaruh terhadap lubang bukaan suatu terowongan, sehingga posisi muka air tanah terhadap posisi lubang bukaan sangat perlu diperhatikan. Kondisi air tanah dapat dinyatakan secara umum, yaitu kering (*dry*), lembab (*damp*), basah (*wet*), menetes (*dripping*), dan mengalir (*flowing*).

Tabel 6. Kondisi Air Tanah (Bieniawski, 1989)

Kondisi Air Tanah	Flow (L/min)	Rating
Kering (<i>dry</i>)	Tidak ada aliran	15
Lembab (<i>damp</i>)	< 10	10
Basah (<i>wet</i>)	10 – 25	7
Menetes (<i>dripping</i>)	25 – 125	4
Mengalir (<i>flowing</i>)	> 125	0

6. Orientasi Kekar

Orientasi kekar merupakan besar pengaruh kemiringan dan arah bidang kekar terhadap nilai kestabilan lereng.

Tabel 8. Nilai bobot orientasi kekar (Bieniawski, 1989)

Orientasi kekar (strike/dip)	Sangat menguntungkan	Menguntungkan	Biasa	Tidak menguntungkan	Sangat tidak menguntungkan
Terowongan	0	-2	-5	-10	-12
Bobot Pondasi	0	-2	-7	-15	-25
Lereng	0	-5	-25	-50	-60

Tabel 9. Pembobotan klasifikasi RMR

No	Parameter	Pembobotan					
		Point-Load Strength Index (MPa)	> 10	4-10	2-4	1-2	1-5
	ekuatan Massa Batuan	Uniaksial Compressive Strength (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25



	Bobot	15	12	7	4	2
2	RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
	Bobot	20	17	13	8	3
3	Jarak Diskontinu	>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm
	Bobot	20	15	10	8	5
4	Kondisi Diskontinu Kemenerusan Kekar	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20	>20 m
	Bobot	6	4	2	1	0
5	Bukaan Kekar	Tidak Ada	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm
	Bobot	6	5	4	1	0
6	Kekerasan Kekar	Sangat Kasar	Kasar	Sedikit Kasar	Halus	Slickens Ided
	Bobot	6	5	3	1	0
7	Material Pengisi	Tidak Ada	keras <5 mm	keras >5 mm	lunak <5 mm	lunak >5 mm
	Bobot	6	4	2	2	0
8	Pelapukan	Tidak Lapuk	Sedikit Lapuk	Lapuk	Sangat Lapuk	Hancur
	Bobot	6	5	3	1	0
9	Kondisi Air Tanah	Kering	Lembab	Basah	Menetes	Mengalir
	Bobot	15	10	7	4	0



2.9.2 Klasifikasi *Geological Strength Index* (GSI)

Kekuatan dari massa batuan yang memiliki bidang diskonunitas misalnya kekar tergantung kepada sifat dan kekuatan batuan utuh dan keadaan kelonggaran dari blok-blok batuan yang menyusun massa batuan untuk meluncur dan berotasi di bawah kondisi tegangan yang berbeda. Hal tersebut dikontrol oleh bentuk geometri dari blok-blok batuan penyusun massa batuan maupun kondisi permukaan bidang pemisah antar blok-blok batuan tersebut. Suatu blok batuan yang menyudut dengan bidang permukaan kasar cenderung akan mempunyai kekuatan massa batuan yang lebih besar dibandingkan dengan blok batuan yang membundar dan bidang permukaannya terlapukan. Hoek pada tahun 1981 mempublikasikan *Geological Strength Index* (GSI) yang dapat digunakan untuk memperkirakan berkurangnya kekuatan massa batuan yang disebabkan kondisi geologi yang berbeda. Sistem GSI dapat dilihat pada Gambar 8. Parameter-parameter yang menggambarkan karakteristik kekuatan massa batuan setelah nilai GSI diperoleh.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (3)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{5}} \right) \quad (5)$$

Nilai D adalah faktor kerusakan (disturbance factor) yang tergantung kepada derajat kerusakan massa batuan yang disebabkan oleh peledakan maupun pelepasan tegangan, m_i adalah nilai intact rock parameter Untuk $GSI > 25$, nilai GSI tersebut dapat diperkirakan dari nilai RMR 89 dengan rumus $GSI = RMR - 89 - 5$, dimana nilai RMR 89 ditetapkan untuk rating muka air tanah adalah 15 dan arah bidang diskontinu adalah 0. Tegangan normal dan tegangan geser dihitung dengan persamaan yang berikut:

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cdot \frac{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} - 1}{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} + 1} \quad (6)$$

$$= (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad (7)$$

$$= 1 + am_b (m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^{a-1} \quad (8)$$



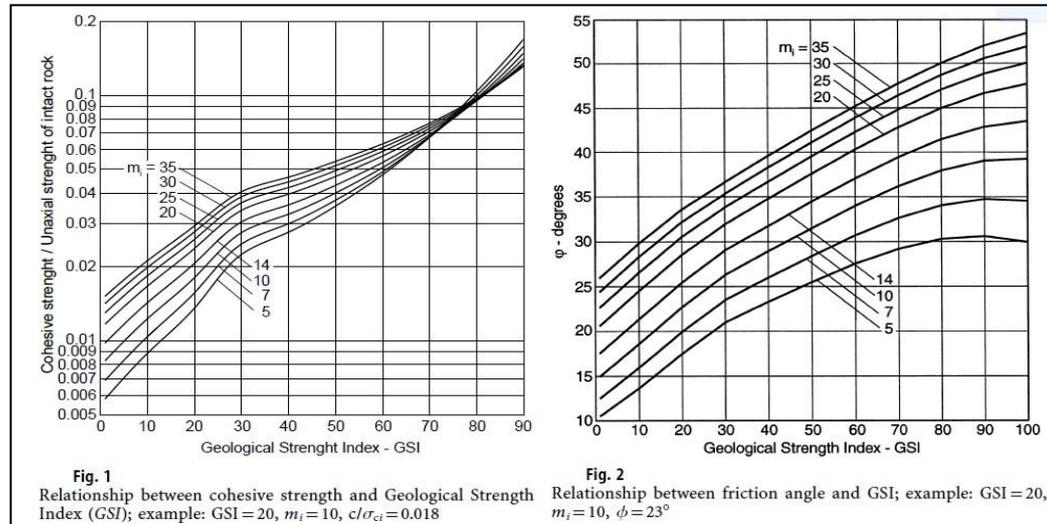
Rock Type: <input type="text" value="General"/> <input type="button" value="OK"/>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="50"/>		DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					10
		N/A	N/A			

Gambar 8 Grafik untuk memperkirakan GSI (Hoek et al, 1998).

Tegangan utama maksimum (σ_1') sesuai dengan tegangan utama minimum (σ_3') pada keadaan runtuh melalui rumus empiris yang bergantung pada faktor-faktor:

1. Kuat tekan uniaksial batuan (σ_{ci})
2. Intact rock parameter (m_i)
3. Tiga buah parameter empiris yang menggambarkan tingkat patahan massa batuan (m , s dan a)





Gambar 9 Grafik hubungan m_i dengan GSI untuk mendapatkan rasio c'/σ_u (Fig. 1) dan hubungan m_i dan GSI untuk mendapatkan sudut geser dalam (ϕ') (Hoek and Brown, 1998).

Hal-hal yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut:

1. Hubungan antara kurva tegangan selubung (*envelop*) Mohr-Coulomb dan tegangan utama maksimum diberikan dengan rumus sebagai berikut.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left[m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right]^a \quad (9)$$

2. Parameter material m_i bergantung pada jenis batuan (beku, malihan, atau sedimen) yang ditentukan pada Gambar 10. Kisaran nilai m_i didapatkan untuk setiap material yang bergantung pada granularitas dan interlocking pada struktur kristal dalam batuan. Nilai m_i yang lebih besar menggambarkan karakteristik batuan dengan kristal yang semakin interlocking dan lebih bersifat friksi. Nilai-nilai tersebut berkisar minimal 4 untuk batulumpur sampai maksimal 33 untuk gneiss dan granit.
3. Parameter kekuatan yang tertinggal untuk massa batuan tidak terganggu dengan nilai $GSI > 25$ adalah:

$$m_b = m_i \exp[(GSI - 100)/28] \quad (10)$$

$$s = \exp[(GSI - 100)/9] \quad (11)$$

$$a = 0,5 \quad (12)$$

han parameter untuk $GSI < 25$, diberikan ketentuan:]

$$= 0 \quad (13)$$

$$= 0,65 - (GSI/200) \quad (14)$$



	Texture			
	Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Conglomerates (21 ± 3)	Sandstones, 17 ± 4	Siltstones, 7 ± 2	Claystones, 4 ± 2
	Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Crystalline limestone (12 ± 3)	Sparitic limestone (10 ± 2)	Micritic limestone (9 ± 2)	Dolomite (9 ± 3)
		Gypsum, 8 ± 2	Anhydrite, 12 ± 2	Chalk, 7 ± 2
Metamorphic	Marble, 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzite, 20 ± 3	
	Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites, 26 ± 6 Schists, 12 ± 3	Gneiss, 28 ± 5	Phyllites (7 ± 3) Slates, 7 ± 4
		Diorite (25 ± 5) Granodiorit (29 ± 3)		
		Gabro, 27 ± 3	Dolerite (16 ± 5)	
Igneous	Norite, 20 ± 5			
	Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
		Rhyolite (25 ± 5) Andesite, 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)
	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

Gambar 10 Nilai *Intact Rock* (m_i) untuk menentukan kekuatan massa batuan dan GSI (Hoek et al, 1998).

5. Evaluasi lebih mudah dilakukan menggunakan lembaran terpisah dengan nilai nilai tegangan keliling efektif (σ_3') yang meliputi rentang tegangan overburden lapangan yang mungkin terjadi, untuk menghitung nilai-nilai terkait dengan tegangan utama maksimum efektif (σ_1'). Nilai-nilai σ_1' dan σ_3' yang berpasangan kemudian diplot (menggunakan lingkaran Mohr), untuk mendapatkan parameter c' dan ϕ' . Metode ini dapat juga digunakan untuk evaluasi batuan utuh (GSI=100) maupun batuan patahan. Nilai rata-rata σ_3 yang efektif telah digunakan untuk perkiraan secara cepat. Hal ini bertujuan untuk



menghasilkan solusi grafik perkiraan untuk pemilihan c' dan ϕ normal dan sudut geser secara langsung dari GSI dan konstanta material m_i , seperti diperlihatkan dalam Gambar 9.

2.10 Kekuatan Massa Batuan

Memperkirakan kekuatan dan karakteristik deformasi suatu massa batuan adalah merupakan hal yang sangat penting dalam menganalisis desain suatu lereng, pondasi, dan terowongan. Hal ini dikarenakan kekuatan batuan utuh yang didapatkan dari pengujian laboratorium belum mencerminkan kekuatan massa batuan. Hoek dan Brown pada tahun 1980 memperkenalkan suatu rumusan untuk memperkirakan nilai dari kekuatan massa batuan berdasarkan kepada hubungan antara blok batuan dengan kondisi permukaan diantara blok batuan tersebut. Sejak pertama kali, dipublikasikan rumusan tersebut telah mengalami modifikasi dengan menambahkan beberapa parameter yang sebelumnya tidak dipertimbangkan pada rumusan tersebut (Hoek & Brown, 1980).

2.10.1 Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown

Kriteria keruntuhan Hoek-Brown pertama kali dikembangkan untuk analisa terowongan pada massa batuan terkekarkan didefinisikan dengan Persamaan 15.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}' \left[m_b \frac{\sigma_s}{\sigma_s} + s \right]^a \quad (15)$$

adalah tegangan efektif maksimum dan minimum pada saat runtuh, m_b , s dan a adalah konstanta yang tergantung kepada karakteristik massa batuan, dan σ_{ci} adalah nilai kuat tekan batuan utuh. Hoek (1990) mendefinisikan kuat tekan batuan utuh sebagai nilai kekuatan batuan yang diperoleh dari hasil pengujian yang dilakukan laboratorium (misalnya core berukuran 50 mm x 100 mm) yang tidak memiliki diskontinuitas, seperti kekar atau bidang perlapisan. Nilai s dan a ditetapkan 1 dan 0,5 untuk batuan utuh, sehingga rumusan Hoek et al, (2002) dapat dijabarkan menggunakan Persamaan 16.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}' \left[m_b \frac{\sigma_s}{\sigma_s} + 1 \right]^{0,5} \quad (16)$$



2.10.2 Parameter Mohr-Coulumb

Parameter geoteknik yang umum digunakan secara luas adalah berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb, sehingga perlu untuk menentukan kesetaraan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) untuk setiap massa batuan. Hal ini dilakukan dengan cara mencocokkan kurva hasil perhitungan kriteria keruntuhan Hoek-Brown untuk berbagai nilai tegangan utama maksimum-minimum seperti dapat terlihat pada Gambar 10.

Nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) dapat dihitung dengan Persamaan 17 dan 18 berikut:

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b a_{sn}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b a_{sn}')^{a-1}} \right] \quad (17)$$

$$c' = \frac{a_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b a_{sn}'](s+m_b a_{sn}')^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b a_{sn}')^{a-1})/[(1+a)(2+a)]}} \quad (18)$$

Dimana:

$$\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max}/\sigma_{ci} \quad (19)$$

Nilai dari σ'_{3max} dapat dicari dengan menggunakan persamaan 20 dan 21:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma m} \right)^{-0,94}, \text{ untuk terowongan dimana H = kedalaman} \quad (20)$$

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma m} \right)^{-0,91}, \text{ untuk terowongan dimana H = tinggi lereng} \quad (21)$$

σ'_{cm} adalah kekuatan massa batuan global (global strength) yang dicari dengan persamaan 22 berikut:

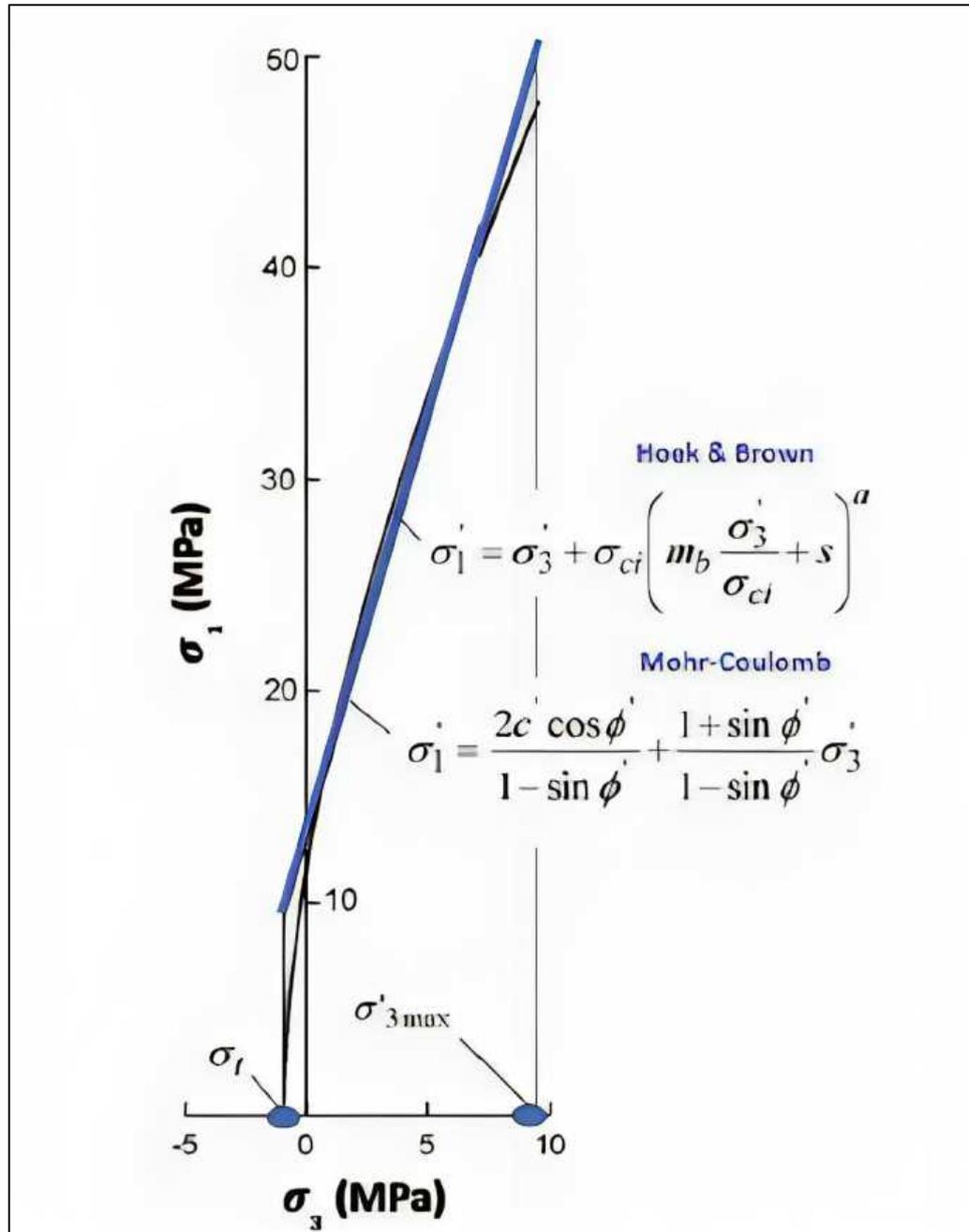
$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad \text{atau} \quad \sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{m_b + 4s - a(m_b - 8s)(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (22)$$

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulumb dapat dituliskan setelah kita terlebih dahulu mengidentifikasi nilai dari semua parameter Mohr-Coulumb diperoleh, menggunakan Persamaan 23 dan 24.

$$\tau = c' + \sigma_n \tan \phi' \quad (23)$$

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3 \quad (24)$$





Gambar 11 Kurva hasil perhitungan kriteria keruntuhan Hoek-Brown untuk berbagai nilai tegangan utama maksimum-minimum (Hoek et al, 2002).

2.10.3 Disturbance factor

Mendesain suatu lereng pada suatu tambang terbuka dengan kriteria hoek brown sumsi massa batuan insitu tidak terganggu (*undisturb insitu rock masses*) =0 dianggap terlalu optimis (Hoek et al, 2002).



Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by a road-header or tunnel boring machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Case 1: Mechanical or manual excavation in poor quality rock masses gives minimal disturbance to the surrounding rock mass. Case 2: Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	Case 1: $D = 0$ Case 2: $D = 0.5$ with no invert
	Poor control of drilling alignment, charge design and detonation sequencing results in very poor blasting in a hard rock tunnel with severe damage, extending 2 or 3 m in the surrounding rock mass.	$D = 1.0$ at surface with a linear decrease to $D = 0$ at ± 2 m into the surrounding rock mass.
	Small-scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage when controlled blasting is used, as shown on the left-hand side of this photograph. Uncontrolled production blasting can result in significant damage to the rock face.	$D = 0.5$ for controlled preplit or smooth wall blasting with $D = 1.0$ for production blasting
	Case 1: Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. Case 2: In some weak rock masses, excavation can be carried out by ripping and dozing. Damage to the slopes is due primarily to stress relief.	Case 1: $D = 1.0$ for production blasting. Case 2: $D = 0.7$ for mechanical excavation

Gambar 12 Estimasi nilai *disturbance factor* lereng (Hoek et al, 2002).

Kerusakan massa batuan dapat disebabkan oleh peledakan dan pelepasan tegangan (*stress relief*) akibat lepasnya overburden. Kondisi ini menyebabkan perlu dipertimbangkan adanya faktor tingkat kerusakan massa batuan akibat proses

Hoek et al (2002) kemudian memperkenalkan faktor kerusakan massa (*disturbance factor*) untuk mengakomodasi hal tersebut. *disturbance factor* akan suatu nilai dari tingkatan kerusakan massa batuan yang diakibatkan



oleh peledakan maupun pelepasan tegangan. pedoman untuk menentukan besaran nilai d disajikan pada Gambar 12.

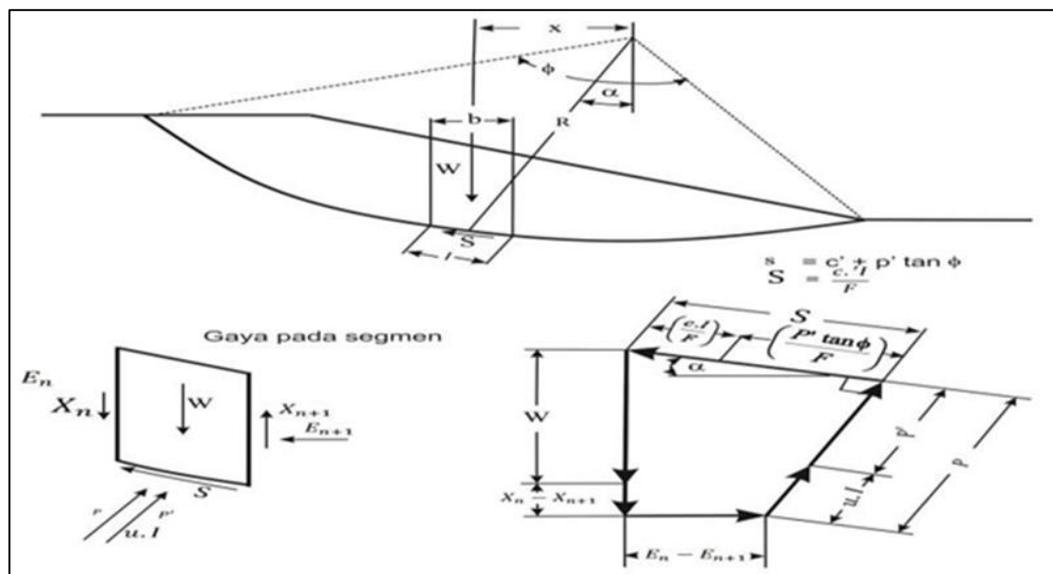
2.11 Metode Simplified Bishop

Metode ini mengabaikan gaya gesek antar irisan dan kemudian mengasumsikan bahwa gaya normal cukup untuk mendefinisikan gaya-gaya antar irisan, dan menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal. Metode bishop ini dipakai untuk menganalisis permukaan gelincir (*slip surface*) yang berbentuk lingkaran (Syafar, 2017).

Pada metode ini ada beberapa asumsi, di antaranya:

1. Pada metode ini keruntuhan diasumsikan akibat gerakan rotasi dari tanah tersebut yang mana akan untuk menghitung faktor keamanan dari sebuah keruntuhan yang tidak memiliki bidang runtuh berbentuk lingkaran
2. Nilai dari gaya horisontal pada kedua sisi dapat diabaikan karena tidak diketahui nilainya dan sulit untuk dihitung.

Gaya normal yang bekerja diasumsikan bekerja ditengah bidang irisan dan diperoleh dengan menjumlahkan gaya-gaya dalam arah vertikal.



Gambar 13 Gaya-gaya yang berkerja pada irisan.

didapatkan persamaan faktor keamanan:

$$F = \frac{b + (W - u \cdot b) \tan \phi \left(\frac{1}{\cos \alpha (1 + \frac{\tan \phi}{F})} \right)}{\sum W \sin \alpha} \quad (24)$$



Dengan $M_i = \cos \alpha \left(1 + \tan \phi \frac{\tan \phi}{F} \right)$ jadi diperoleh :

$$\frac{\Sigma [c \cdot b + (W - u \cdot b) \tan \phi] \left(\frac{1}{M_i} \right)}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (25)$$

Keterangan :

C	: Kohesi efektif	(kN/m ²)
B	: Lebar irisan	(m)
W	: Berat irisan	(Kn)
U	: Tekanan air pori	(m)
ϕ	: Sudut gesek dalam efektif	($^{\circ}$)
α	: Sudut lereng	($^{\circ}$)

