

SKRIPSI

**ANALISIS KEMANTAPAN LERENG PADA PERLAPISAN
TAMBANG BATUBARA *PIT X* PT CIPTA KRIDATAMA
KABUPATEN KUTAI KARTANEGARA PROVINSI
KALIMANTAN TIMUR**

Disusun dan diajukan oleh:

**YULIATI PASANDE'
D111 19 1043**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS KEMANTAPAN LERENG PADA PERLAPISAN TAMBANG BATUBARA *PIT X PT CIPTA KRIDATAMA* KABUPATEN KUTAI KARTANEGARA PROVINSI KALIMANTAN TIMUR

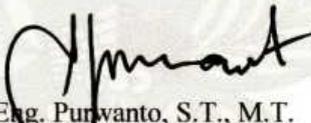
Disusun dan diajukan oleh

Yuliati Pasande'
D111 19 1043

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 2 Februari 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 dibawah ini ;
Nama : Yuliati Pasande'
NIM : D111191043
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Kemantapan Lereng pada Perlapisan Tambang Batubara *pit X* PT Cipta Kridatama Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur

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, 2 Februari 2024

Yang Menyatakan



Yuliati Pasande'



ABSTRAK

YULIATI PASANDE'. *Analisis Kemantapan Lereng pada Perlapisan Tambang Batubara pit X PT Cipta Kridatama Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur* (dibimbing oleh Purwanto)

Lereng *pit X* PT Cipta Kridatama merupakan lereng yang sementara aktif dalam penggalian sehingga material yang ditambang menyebabkan munculnya banyak bidang-bidang diskontinuitas pada muka lereng dan diprediksi dapat mengalami longsor. Dalam menjaga keselamatan kerja dan menghindari timbulnya kerugian untuk pekerja dan perusahaan, analisis terhadap lereng *pit X* sangat diperlukan. Analisis dilakukan menggunakan metode *Rock Mass Rating* (RMR), metode Kinematika, dan metode Kesetimbangan Batas Morgenstern-Price. Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai RMR pada lokasi 1 yaitu 77 (kelas 2, batuan baik), sedangkan lokasi 2 memiliki nilai RMR yaitu 60 (kelas 3, batuan sedang). Lereng *seam 190* memiliki nilai faktor keamanan sebesar 2,214 dengan potensi terjadinya longsoran guling tipe *oblique toppling* pada arah N137°E, dapat disimpulkan bahwa lereng *seam 190* adalah stabil. Untuk lereng keseluruhan, memiliki nilai faktor keamanan sebesar 1,041 dimana lereng ini berada dalam kondisi kritis (tidak aman). Pemodelan ulang desain *lereng* dilakukan apabila nilai FK tidak memenuhi standar dengan melakukan perubahan pada jenjang dengan *bench RL-41* sampai *bench RL-71*. Rekomendasi perubahan pada desain lereng tersebut didapatkan nilai FK sebesar 1,372 yang berarti sudah stabil menurut standar perusahaan.

Kata Kunci: Kemantapan Lereng, Jenis Longsoran, *Limit Equilibrium Method*, Metode Morgenstern-Price, Faktor Keamanan.



ABSTRACT

YULIATI PASANDE'. *Slope Stability Analysis Of Coal Seam at pit X PT Cipta Kridatama Kutai Kartanegara Regency, East Kalimantan Province* (supervised by Purwanto)

The pit X slope of PT Cipta Kridatama is a slope that is temporarily active in excavation so that the mined material causes the appearance of many discontinuity planes on the slope face and is predicted to experience landslides. In order to maintain work safety and avoid losses for workers and the company, an analysis of the pit X slope is needed. The analysis was conducted using the rock mass rating (RMR) method, the kinematics method, and the Morgenstern-Price limit equilibrium method. Based on the analysis results, the RMR value at location 1 is 77 (class 2, good rock), while location 2 has an RMR value of 60 (class 3, medium rock). The seam 190 slope has a safety factor value of 2.214. With the potential for oblique toppling avalanches in the N137°E direction, it can be concluded that the seam 190 slope is stable. For the overall slope, it has a safety factor value of 1.041, indicating that this slope is in critical condition (unsafe). Re-modeling of the slope design is done if the FK value does not meet the standard by making changes to the level from bench RL-41 to bench RL-71. Recommendations for changes to the slope design obtained an FK value of 1.372, which means it is stable according to company standards.

Keywords: *Slope Stability, Kinematic Analysis, Limit Equilibrium Method, Morgenstern-Price Slice Method, Factor of Safety.*



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
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.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Lereng.....	5
2.2 Longsoran.....	9
2.3 Bidang Diskontinuitas.....	12
2.4 Klasifikasi Massa Batuan.....	13
2.5 Analisis Kinematika.....	24
2.6 Analisis Kestabilan Lereng.....	26
2.5 Kriteria Keruntuhan <i>Hoek Brown</i>	31
2.6 <i>Probability of Failure (PoF)</i>	34
BAB III METODE PENELITIAN.....	35
3.1 Lokasi Penelitian.....	35
3.2 Teknik Pengumpulan Data.....	35
3.3 Pengolahan dan Analisis Data.....	36
BAB IV ANALISIS KEMANTAPAN LERENG.....	48
4.1 Kondisi Lereng.....	48
4.2 <i>Rock Mass Rating (RMR)</i>	50
4.3 <i>Geological Strength Index (GSI)</i>	57
4.4 Data Uji Laboratorium.....	59
4.5 Analisis Kinematika.....	62
4.6 Analisis Kestabilan Lereng.....	63
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN.....	68
5.1 Kesimpulan.....	68
5.2 Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA.....	70



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Faktor keamanan sederhana	6
Gambar 2	Longsoran Busur	10
Gambar 3	Longsoran Bidang	11
Gambar 4	Longsoran Baji	11
Gambar 5	Longsoran Guling.....	12
Gambar 6	Prosedur pengukuran dan perhitungan RQD	17
Gambar 7	Sketsa parameter-parameter untuk mendeskripsikan massa batuan	22
Gambar 8	<i>Geological Strength Index</i>	23
Gambar 9	Nilai GSI untuk tipe batuan heterogen (<i>flysch</i>).....	24
Gambar 10	Diagram kontur dari data bidang diskontinuitas	25
Gambar 11	Gaya yang bekerja pada potongan bidang gelincir dalam metode irisan.....	31
Gambar 12	Lokasi penelitian	35
Gambar 13	Pengamatan singkapan dan pengambilan sampel batuan: (a) <i>Interburden seam</i> 190 – 210, (b) <i>Interburden seam</i> 220 – 270, (c) <i>Interburden seam</i> 270 – 300, (d) <i>Interburden seam</i> 310 – 320, (e) Pengambilan sampel batuan untuk analisis laboratorium... ..	37
Gambar 14	Alat dan bahan preparasi sampel: (a) Alat bor inti, (b) Gerinda, (c) Alat ukur, (d) Sampel batuan.....	38
Gambar 15	Proses preparasi sampel: (a) Pengeboran bongkahan batuan, (b) Sampel batuan hasil <i>coring</i> , (c) Penimbangan sampel batuan	39
Gambar 16	Peralatan uji kuat tekan uniaksial pada batuan: (a) <i>Digital compression machine</i> ; (b) Jangka sorong	40
Gambar 17	Kondisi batuan setelah pengujian.....	41
Gambar 18	Peralatan uji sifat fisik batuan: (a) Sampel batuan; (b) Timbangan digital	42
Gambar 19	Penimbangan sampel batuan	42
Gambar 20	Pengujian kuat tekan batuan utuh.....	43
Gambar 21	Pengukuran jarak antar kekar dan pengamatan kondisi kekar	44
Gambar 22	Diagram alir penelitian.....	47
Gambar 23	Kenampakan <i>pit</i> X PT Cipta Kridatama	48
Gambar 24	Letak penampang untuk analisis desain <i>pit</i> X.....	49
Gambar 25	Penampang dua dimensi penyusun lereng <i>pit</i> X PT Cipta Kridatama.....	49
Gambar 26	Kenampakan kekar pada lokasi 1	51
Gambar 27	Kondisi air tanah kering pada lokasi 1	52
Gambar 28	Pengukuran dan pengamatan kondisi bidang diskontinuitas lokasi 2.....	55
Gambar 29	Lapisan blok-blok batuan pada lereng	58
Gambar 30	Nilai sudut gesek dalam	59
Gambar 31	Analisis kinematika	63
	32 Kestabilan lereng <i>seam</i> 190 menggunakan metode MP.....	65
	33 Nilai faktor keamanan lereng keseluruhan.....	65
	34 Nilai faktor keamanan dan rekomendasi desain lereng.....	67



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor lereng tambang	6
Tabel 2	Nilai pembobotan RMR	15
Tabel 3	Hubungan RQD dengan Kualitas Batuan	17
Tabel 4	Deskripsi spasi diskontinuitas	18
Tabel 5	Klasifikasi persistensi kekar	18
Tabel 6	Tingkat pelapukan	20
Tabel 7	Kondisi Air Tanah	20
Tabel 8	Kesesuaian bidang lemah atau diskontinuitas	21
Tabel 9	Pengaruh orientasi kekar dalam pembuatan terowongan dan penggalan	21
Tabel 10	Asumsi-asumsi dan kondisi kesetimbangan yang digunakan oleh beberapa Metode Irisan	29
Tabel 11	Kondisi kesetimbangan yang dipenuhi	29
Tabel 12	Pembobotan nilai D	32
Tabel 13	Nilai faktor M_i	33
Tabel 14	Deskripsi nilai PoF pada lereng tambang	34
Tabel 15	Klasifikasi massa batuan RMR	45
Tabel 16	Nilai pembobotan RMR Bieniawski 1989 lokasi 1	52
Tabel 17	Klasifikasi massa batuan RMR lokasi 1	53
Tabel 18	Nilai pembobotan RMR Bieniawski 1989 lokasi 2	55
Tabel 19	Klasifikasi massa batuan RMR lokasi 2	56
Tabel 20	Hasil uji kuat tekan batuan dan hasil uji berat volume batuan	59
Tabel 21	Hasil uji berat volume batuan	61
Tabel 22	Material isian lereng	64
Tabel 23	Data geometri lereng	65
Tabel 24	Data perubahan geometri lereng rekomendasi	67



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Lembar Deskripsi Batuan	73
Lampiran 2	Penampang 2 Dimensi	76
Lampiran 3	Data Pengukuran Orientasi Kekar	77
Lampiran 4	Data Pengamatan Kekar	78
Lampiran 5	Perhitungan Nilai Kuat Tekan Batuan (UCS)	80
Lampiran 6	Perhitungan Nilai Berat Volume	92
Lampiran 7	Hasil Pemetaan Geoteknik Lapangan.....	105
Lampiran 8	Peta Zonasi Gempa di Indonesia	107
Lampiran 9	Panduan Pengisian Formulir Kegiatan Pengamatan dan Pemetaan Geoteknik Permukaan	108
Lampiran 10	Lokasi <i>Scanline</i>	109
Lampiran 11	Hasil Analisis Kemantapan Lereng <i>Seam</i> 190.....	110
Lampiran 12	Hasil Analisis Kemantapan Lereng Keseluruhan.....	111
Lampiran 13	Hasil Analisis Kemantapan Lereng Rekomendasi.....	112
Lampiran 14	Dokumentasi Longsoran di <i>Pit X</i>	113
Lampiran 15	Kartu Konsultasi Tugas Akhir.....	114



KATA PENGANTAR

Shalom

Puji dan Syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas kasih dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisis Kemantapan Lereng pada Perlapisan Tambang Batubara *pit X* PT Cipta Kridatama Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur”.

Penelitian ini merupakan tugas akhir penulis selama melakukan kegiatan penelitian pada area operasional PT Cipta Kridatama. Tugas akhir ini dibuat sebagai syarat lulus matakuliah skripsi di Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

Penelitian ini tidak akan terwujud tanpa adanya dukungan dan kesempatan yang diberikan oleh PT Cipta Kridatama *site* Multi Harapan Utama yang telah memberikan kesempatan dan bimbingan pada penulis untuk melakukan penelitian tugas akhir. Bapak Adrian selaku *Project Manager* dan Bapak Willi Mahesa selaku *Deputy Project Manager*. Bapak Ari Yulindra selaku *Production, Planning and Control Department Head*. Bapak Grinus Halilintar selaku *Engineering Services Head* sekaligus pembimbing yang telah memberikan arahan serta masukan selama melakukan penelitian tugas akhir di PT Cipta Kridatama *site* Multi Harapan Utama. Ibu Adit, Ibu Desi, Bapak Sanjai, Bapak Aqip, Bapak Gabriel, Bapak Gusma, Ibu Tasya, Ibu Lulu, Bapak Adnan Alexander, Bapak Anang, Bapak D.A. Iqbal, Bapak Reza Krista, Bapak Febi Sumanto, Ibu Niapusita, Bapak Ida Bagus, dan seluruh karyawan PT Cipta Kridatama *site* Multi Harapan Utama 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 Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Geomekanika sekaligus dosen pembimbing yang telah mendidik dan mengarahkan penulis. Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T. selaku dosen yang membantu penulis dalam menemukan lokasi penelitian. Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Pertambangan FT-UH. Seluruh Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu yang sangat bermanfaat selama berkuliah di Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Keluarga besar Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang senantiasa membantu dan memberi semangat kepada penulis selama melakukan penelitian dan penyusunan laporan, terima kasih atas segala bantuan, doa, dan dukungannya yang tak pernah terlupakan. Terima kasih kepada Salmawati, Almira Yovita, Faidel Afrian kemong, Muh. Yayan Pranata, Ahmad Alfian Faisal, Syukur Alkurdi, Muh. Attrariq Idham I, serta semua teman-teman Teknik Pertambangan Angkatan 2019 yang telah memberikan bantuan dan saran kepada elama melaksanakan penelitian. Ucapan terima kasih kepada Febriyanti sebagai kakak penulis yang senantiasa memberikan bantuan finansial enulis. Tak lupa ucapan terima kasih untuk kedua orang tua tercinta nyamin Pasande’ dan Ibu Lisu Rante serta seluruh keluarga besar yang



senantiasa memberikan motivasi dan semangat kepada penulis sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa 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.

Gowa, 2 Februari 2024

Yuliati Pasande'



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Produksi batubara secara substansial akan meningkat seiring berjalannya waktu untuk memenuhi tuntutan pertumbuhan ekonomi di beberapa negara. Peningkatan produksi akan berpengaruh terhadap pengembangan perencanaan kedalaman yang lebih besar pada tambang terbuka. Akibatnya tinggi lereng akan semakin meningkat sementara sudut kemiringan akan semakin curam yang menyebabkan adanya ketidakstabilan lereng (Seib, 1993).

Analisis kemantapan lereng merupakan komponen yang sangat penting dalam operasi tambang terbuka. Karena produksi material dalam jumlah besar, maka terjadi perubahan dimensi lubang bukaan tambang, yaitu kedalaman dan tinggi *bench*. Perubahan dimensi tersebut menimbulkan masalah yang berkaitan dengan stabilitas lereng. Oleh karena itu, penting untuk mengevaluasi berbagai mode keruntuhan yang terjadi pada lereng *bench* dan mengambil langkah-langkah yang layak secara ekonomi untuk dan mengurangi risiko yang terkait dengan stabilitas lereng serta menyediakan lingkungan yang aman dan nyaman bagi tenaga kerja dan alat berat yang digunakan (Pradhan, 2013).

PT Cipta Kridatama merupakan salah satu perusahaan kontraktor penyedia jasa pertambangan di Provinsi Kalimantan Timur yang melakukan kegiatan penambangan milik PT Multi Harapan Utama (MHU) yang terdapat di Desa Sungai Payang, Kecamatan Loa Kulu, Kabupaten Kutai Kartanegara. Lokasi tersebut melakukan penambangan batubara dengan sistem tambang terbuka. Selama beberapa bulan terakhir telah terjadi beberapa longsoran lereng terutama lereng di *pit X*, yang mengakibatkan terganggunya proses penambangan dan juga kerugian dari berbagai aspek.

Kegiatan penambangan di *pit X* PT Cipta Kridatama selalu berkaitan dengan aktivitas penggalian (*loading*), peledakan (*blasting*), dan pengangkutan (*hauling*).

tersebut dapat mengganggu kestabilan lereng yang dapat menyebabkan runtuh. Selain aktivitas penambangan, ketidakstabilan lereng batuan juga di dipengaruhi oleh kondisi stuktur geologi, arah diskontinuitas pada



batuan seperti kekar (*joint*), rekahan (*fracture*), bidang perlapisan (*plane*), sesar (*fault*) dan jenis-jenis retakan lain pada batuan, sifat-sifat fisik dan mekanis batuan pembentuk lereng, tekanan air tanah, beban di atas lereng, dan geometri tempat lereng tersebut digali (Wyllie and Mah, 2004).

Lereng *pit* X PT Cipta Kridatama *site* MHU merupakan lereng yang sementara aktif dalam penggalian sehingga material yang ditambang menyebabkan munculnya banyak bidang-bidang diskontinuitas pada muka lereng dan diprediksi dapat mengalami longsor. Dalam beberapa bulan terakhir, longsor sering terjadi pada *pit* ini yang menunjukkan bahwa perlu dilakukan analisis kemantapan lereng pada kondisi aktual area penambangan tersebut untuk menjaga keselamatan kerja dan menghindari timbulnya kerugian bagi pekerja dan perusahaan. Klasifikasi RMR (*Rock Mass Rating*), analisis kinematik dan analisis kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium*) adalah teknik-teknik modern yang banyak digunakan untuk analisis stabilitas lereng. Klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR) merupakan salah satu metode perhitungan untuk mengetahui karakterisasi lereng batuan. Nilai RMR didapatkan dari hasil pembobotan enam parameter yang kemudian dibobotkan ke dalam kelas massa batuan RMR (Bieniawski, 1989). Untuk melakukan analisis kinematik, orientasi diskontinuitas, dan *joint set* merupakan parameter utama yang dapat dipertimbangkan. Analisis kinematik adalah metode yang digunakan untuk mengetahui arah dan tipe longsoran dengan menggunakan diskontinuitas dan orientasi diskontinuitas (Rahman *et al.*, 2023). *Limit Equilibrium Method* (LEM) pada dasarnya membagi massa tanah/batuan di atas permukaan bidang gelincir menjadi beberapa irisan yang dapat disegmentasi baik secara vertikal maupun horizontal yang berpotensi longsor dan menunjukkan nilai faktor keamanan suatu lereng. Nilai faktor keamanan dapat memberikan informasi apakah lereng tersebut stabil atau tidak tidak stabil (Naghadehi *et al.*, 2011).

Menanggapi permasalahan atau kekhawatiran perusahaan terhadap lereng *pit* X PT Cipta Kridatama, dianggap perlu untuk melakukan analisis lanjut kemantapan lereng. Oleh sebab itu, dibuat penelitian dengan judul Kemantapan Lereng pada Perlapisan Tambang Batubara *pit* X PT Cipta



Kridatama Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur” dalam upaya menghindari potensi bahaya yang dapat terjadi.

1.2 Rumusan Masalah

PT Cipta Kridatama *site* MHU melakukan proses penambangan batubara pada *pit* X dengan cara membuat jenjang. Lereng pada *pit* X selalu berkaitan dengan aktivitas penambangan sehingga menimbulkan banyaknya bidang diskontinuitas yang memengaruhi tingkat kestabilan lereng. Desain yang diterapkan saat ini dianggap tidak aman pada beberapa lokasi, ditandai dengan longsor yang terjadi pada *pit* X. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. bagaimana klasifikasi massa batuan lereng berdasarkan nilai RMR pada lereng *pit* X;
2. bagaimana potensi arah dan tipe longsor *pit* X menggunakan analisis Kinematika; dan
3. bagaimana nilai faktor keamanan lereng menggunakan metode *Limit Equilibrium* dan rekomendasi desain lereng yang aman apabila FK tidak memenuhi nilai standar untuk mencapai kestabilan lereng.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. menentukan klasifikasi massa batuan lereng berdasarkan nilai RMR pada lereng *pit* X;
2. menganalisis potensi arah dan tipe longsor *pit* X menggunakan analisis Kinematika; dan
3. menganalisis nilai faktor keamanan lereng menggunakan metode *Limit Equilibrium* dan memberikan rekomendasi desain lereng yang aman untuk mencapai kestabilan lereng.



Manfaat Penelitian

dilakukannya penelitian ini adalah untuk memberikan informasi dan data asifikasi massa batuan, tingkat kestabilan lereng, nilai faktor keamanan

lereng kepada PT Cipta Kridatama *site* MHU. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam upaya meningkatkan stabilitas lereng guna mencegah terjadinya longsor di lokasi penambangan, 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 Sungai Payang Kecamatan Loa Kulu Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. Penelitian ini dilakukan selama 3 bulan terhitung sejak bulan Januari 2023 hingga Maret 2023 dengan mengumpulkan data primer seperti sifat fisik dan sifat mekanik batuan, RQD, orientasi kekar, orientasi lereng, jarak antar kekar, kondisi kekar, dan data sekunder berupa topografi, penampang, dan situasi dari perusahaan PT Cipta Kridatama *site* Multi Harapan Utama. Penelitian ini fokus pada analisis kestabilan lereng tambang yang dipengaruhi oleh aktivitas penambangan seperti peledakan, struktur geologi, sifat fisik dan sifat mekanik batuan. Data yang dikumpulkan diolah dan dianalisis menggunakan bantuan perangkat lunak *Rockscience* RSDData untuk mengetahui nilai sudut gesek dalam, *Rockscience* Dips untuk mengetahui potensi arah dan tipe longsoran dan AutoCad2021, *Rockscience* Slide2D untuk mendapatkan nilai faktor keamanan yang telah menjadi ketetapan oleh perusahaan dan akan dilakukan *redesign* apabila Nilai FK tidak memenuhi standar aman bagi perusahaan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lereng

Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia. Lereng yang terbentuk secara alami misalnya, lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia antara lain, galian dan timbunan, tanggul dan dinding tambang terbuka (Arief, 2007).

Terdapat tiga macam lereng yang perlu mendapat perhatian dari ahli geoteknik, yaitu lereng alam, lereng buatan dan lereng penimbunan (Wesley, 2012):

1. Lereng alami

Lereng alami adalah lereng yang terbentuk karena adanya proses alam, misalnya lereng suatu bukit.

2. Lereng buatan

Lereng buatan adalah lereng yang dibuat oleh manusia untuk kepentingan tertentu baik dibuat dalam tanah asli seperti tanah yang dipotong untuk pembuatan jalan atau saluran irigasi maupun dibuat dari tanah yang dipadatkan misalnya tanggul untuk keperluan jalan.

3. Lereng penimbunan

Contoh daripada lereng penimbunan antara lain adalah tanggul, dam, jalan, termasuk *disposal/waste dump*. Lereng penimbunan dibuat kohesif dan diperlukan pembangunan bertingkat dengan konsolidasi dan pengawasan tingkat beban untuk memperkuat pondasi tanah.

Untuk menyatakan tingkat kestabilan suatu lereng, dikenal istilah faktor keamanan (FK). Faktor keamanan diperlukan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng untuk mencegah bahaya longsor di waktu-waktu yang akan datang. Gaya yang bekerja pada suatu lereng yang dapat dilihat melalui Gambar 1 adalah gaya

mudian dihasilkan gaya penggerak dan gaya penahan. Untuk menjaga la di atas lereng tidak jatuh (*failure*), diperlukan perhitungan terhadap

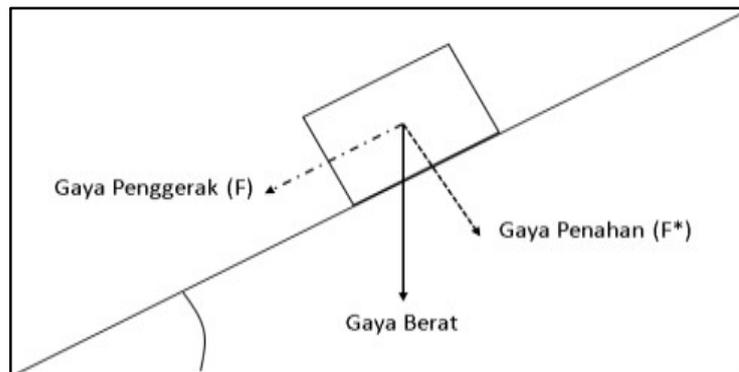


kemiringan sesuai dengan Faktor Keamanan (FK) yang diinginkan. Faktor keamanan dapat dirumuskan sebagai berikut (Arif, 2016):

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

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

Dimana, τ adalah kekuatan geser, c adalah kohesi, σ_n adalah tegangan normal, dan ϕ adalah Sudut geser dalam. Dengan perhitungan lebih rinci didapatkan faktor keamanan sebagai berikut (Arif, 2016).



Gambar 1 Faktor keamanan sederhana (Arif, 2016)

Apabila nilai FK untuk suatu lereng $> 1,0$ (gaya penahan $>$ gaya penggerak), lereng tersebut berada dalam kondisi stabil. Namun, apabila harga $FK < 1,0$ (gaya penahan $<$ gaya penggerak), lereng tersebut dalam kondisi tidak stabil (Arif, 2016). Adapun 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 Longsoran	Keparahan Longsor	Kriteria dapat diterima		
		Faktor Keamanan Statis	Faktor Keamanan (FK) Dinamis	Probabilitas Longsor
Tunggal/Jenjang (<i>Bench</i>)	Rendah	1,1	Tidak ada	25 – 50%
	Tinggi			
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%
	Rendah	1,2 – 1,3	1	15 – 20%
Keseluruhan (<i>all</i>)	Sedang	1,3	1,05	5 – 10%
	Tinggi	1,5	1,1	$< 5\%$

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



2.1.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng Tambang

Terjadinya suatu longsoran lereng tambang yang dimulai dengan longsoran yang kecil yang kemudian menjadi besar sehingga menimbulkan masalah pada operasi penambangan (Seegmilier, 1972). Ada dua penyebab terjadinya longsoran, yaitu (Terzaghi, 1967; Brunsten, 1984):

1. Penyebab eksternal, menyebabkan naiknya gaya geser yang bekerja sepanjang bidang runtuh, antara lain:
 - a. perubahan geometri lereng (pemotongan kaki lereng, erosi, perubahan sudut kemiringan, panjang, dll);
 - b. pembebasan beban (erosi, penggalian);
 - c. pembebanan (penambahan material, penambahan tinggi);
 - d. gaya vibrasi yang ditimbulkan oleh gempa bumi atau ledakan;
 - e. penurunan muka air tanah secara mendadak; dan
 - f. perubahan kelakuan air (hujan, tekanan pori, dll).
2. Penyebab internal, menyebabkan turunnya kekuatan geser material, antara lain:
 - a. longsoran, progresif (mengikuti ekspansi lateral, perekahan, dan erosi);
 - b. pelapukan;
 - c. erosi *seepage* (*solution*, pemipaan).

Sejumlah penyebab baik internal maupun eksternal yang dapat menyebabkan naiknya gaya geser sepanjang bidang runtuh ataupun menyebabkan turunnya kekuatan geser material, bahkan kedua hal tersebut juga dapat dipengaruhi secara bersamaan (Varnes, 1978).

Terdapatnya sejumlah tipe longsoran menunjukkan beragamnya kondisi yang dapat menyebabkan lereng menjadi tidak stabil dan proses-proses yang memicu terjadinya longsoran. Stabilitas lereng pada lereng batuan selalu dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu (Rai, 1995):

1. Penyebaran batuan

Macam batuan atau tanah yang terdapat di daerah penyelidikan harus diketahui, demikian juga penyebaran serta hubungan antar batuan. Hal ini diketahui karena sifat-sifat fisik dan mekanis suatu batuan berbeda-beda dengan batuan lain sehingga kekuatan menahan bebannya juga berbeda.



2. Relief permukaan bumi

Faktor ini memengaruhi laju erosi dan pengendapan serta menentukan arah aliran air permukaan dan air tanah. Hal ini disebabkan karena untuk daerah yang curam, kecepatan aliran air permukaan tinggi dan mengakibatkan pengikisan lebih intensif dibandingkan pada daerah yang landai, karena erosi yang intensif banyak dijumpai singkapan batuan menyebabkan pelapukan yang lebih cepat. Batuan yang lapuk mempunyai kekuatan yang rendah sehingga kemantapan lereng menjadi berkurang.

3. Geometri lereng

Geometri lereng mencakup tinggi lereng dan sudut kemiringan lereng. Kemiringan dan tinggi suatu lereng sangat memengaruhi kemantapannya. Semakin besar kemiringan dan tinggi suatu lereng maka kemantapannya semakin kecil.

4. Muka air tanah

Muka air tanah menjadikan lereng sebagian besar basah dan batumannya memiliki kandungan air yang tinggi, sehingga menyebabkan kekuatan batuan menjadi rendah dan lereng lebih mudah longsor.

5. Orientasi bidang lemah (diskontinuitas) terhadap orientasi lereng

Struktur batuan yang sangat memengaruhi kemantapan lereng adalah bidang-bidang sesar, perlapisan dan rekahan. Oleh karena itu perlu diperhatikan dalam analisa adalah struktur regional dan lokal. Struktur batuan tersebut merupakan bidang-bidang lemah dan sekaligus sebagai tempat merembesnya air sehingga batuan menjadi lebih mudah longsor. Dalam mendesain lereng perlu mempertimbangkan arah atau orientasi bidang lemah tersebut. Dalam istilah struktur geologi terdapat dua macam diskontinuitas, yaitu:

- a. *major discontinuity*, seperti sesar (patahan); dan
- b. *minor discontinuity*, seperti kekar dan bidang perlapisan.

Adanya bidang-bidang lemah ini yang mempunyai arah atau orientasi, jang, spasi dan kekuatan dari material pengisinya akan menentukan el dari potensial longsor yang terjadi.



6. Iklim

Iklim memengaruhi temperatur dan jumlah hujan, sehingga berpengaruh pula pada proses pelapukan. Daerah tropis yang panas, lembab dengan curah hujan tinggi akan menyebabkan proses pelapukan batuan jauh lebih cepat dari pada daerah sub-tropis. Karena itu ketebalan tanah di daerah tropis lebih tebal dan kekuatannya lebih rendah dari batuan induknya.

7. Tingkat pelapukan

Tingkat pelapukan memengaruhi sifat-sifat asli dari batuan, misalnya nilai kohesi, besarnya sudut gesek dalam, bobot isi, dan lain-lain. Semakin tinggi tingkat pelapukan maka kekuatan batuan akan menurun.

8. Aktivitas manusia

Selain faktor alamiah, manusia juga memberikan andil yang tidak kecil, misalnya suatu lereng yang awalnya stabil karena manusia menebangi pohon pelindung, pengolahan tanah yang tidak baik, saluran air yang tidak baik, penggalian atau tambang, dan lainnya menyebabkan lereng tersebut menjadi tidak stabil, sehingga erosi dan longsor mudah terjadi.

9. Sifat fisik dan mekanis batuan

Sifat fisik batuan yang memengaruhi kemantapan lereng yaitu, berat volume porositas dan kandungan air, sedangkan untuk sifat mekanis batuan yaitu, kuat tekan, kuat tarik, kuat geser, kohesi dan sudut gesek dalam yang semuanya memengaruhi kestabilan lereng.

2.2 Longsor

Tipe longsor atau *landslide* mengandung pengertian luas, maka istilah *slides* digunakan pada longsor gelincir yang terdiri dari atas luncuran atau *slide* (longsor gelincir translasional) dan kemerosotan atau slump (longsor gelincir rotasional) (zakaria, 2009).

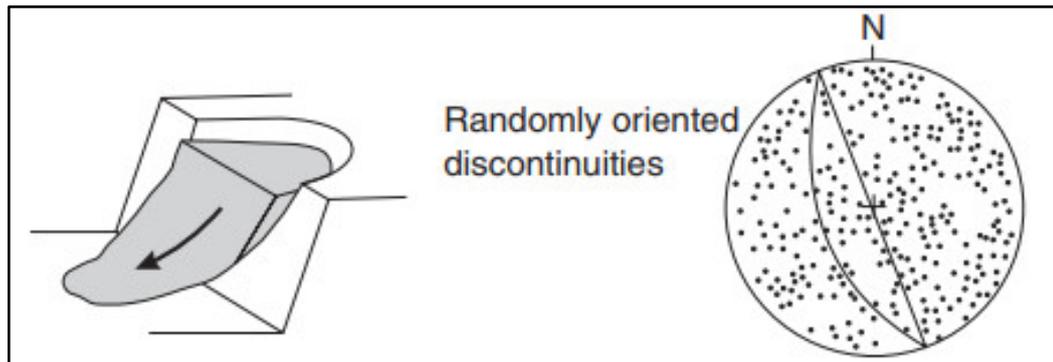
Kekuatan material dapat menghasilkan lereng yang besar menjadi stabil, tetapi jika lereng tersebut memiliki bidang-bidang diskontinuitas, maka bidang penting untuk diperhatikan. Menurut Hoek *and* Bray (1981) terdapat jenis longsor umum yang terjadi di tambang terbuka, yaitu longsor *lane failure*), longsor baji (*wedge failure*), longsor guling (*toppling*



failure), dan longSORAN busur (*circular failure*).

2.2.1 LongSORAN Busur (*Circular Failure*)

LongSORAN jenis ini 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.



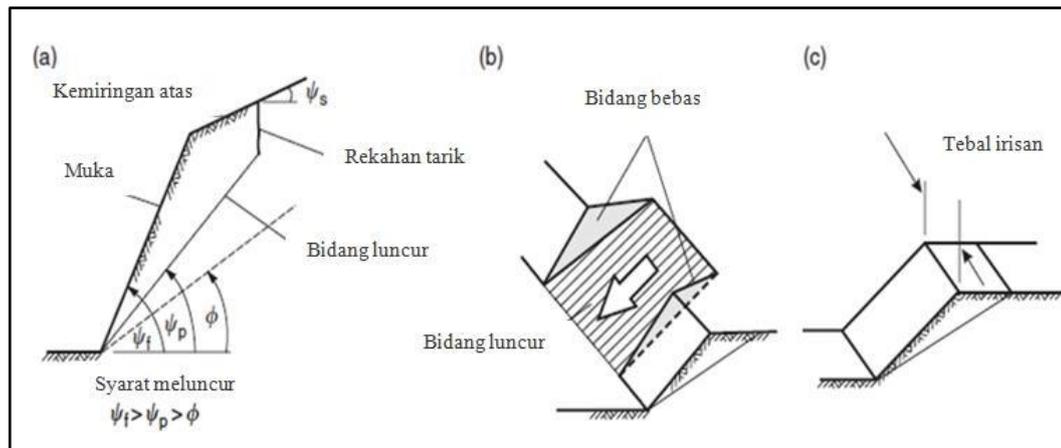
Gambar 2 LongSORAN Busur (Hoek and Bray, 1981)

2.2.2 LongSORAN Bidang (*Plane Failure*)

LongSORAN bidang merupakan suatu longSORAN batuan yang terjadi sepanjang bidang lurus yang dianggap rata. Bidang lurus tersebut dapat berupa sesar/patahan, kekar (*joint*) maupun bidang perlapisan batuan. Syarat-syarat terjadinya longSORAN bidang sebagai berikut (Wyllie and Mah, 2004):

- terdapatnya bidang lurus bebas, berarti kemiringan bidang lurus harus lebih kecil daripada kemiringan lereng ($\varphi_p < \varphi_f$);
- arah bidang lurus sejajar atau mendekati sejajar dengan arah lereng (maksimum 20°);
- kemiringan bidang gelincir lebih besar daripada sudut geser dalam batumannya ($\varphi_p > \varnothing$); dan
- terdapat bidang bebas (tidak terdapat gaya penahan) pada kedua sisi longSORAN.



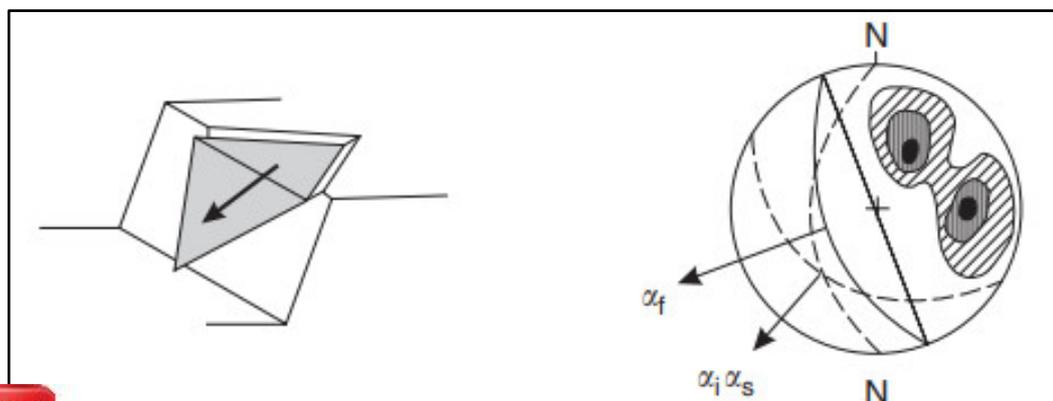


Gambar 3 Longoran Bidang (Hoek and Bray, 1981)

2.2.3 Longoran Baji

Longoran baji merupakan jenis longoran yang sering terjadi di lapangan. Longoran baji diakibatkan oleh adanya struktur geologi yang berkembang. Longoran baji dapat terjadi dengan syarat geometri sebagai berikut:

- permukaan bidang lemah A dan bidang lemah B rata, tetapi kemiringan bidang lemah B lebih besar daripada bidang lemah A;
- arah penujaman garis potong harus lebih kecil daripada sudut kemiringan lereng;
- bentuk longoran dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dan kedua bidang lemah; dan
- bentuk longoran dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dari kedua bidang lemah.



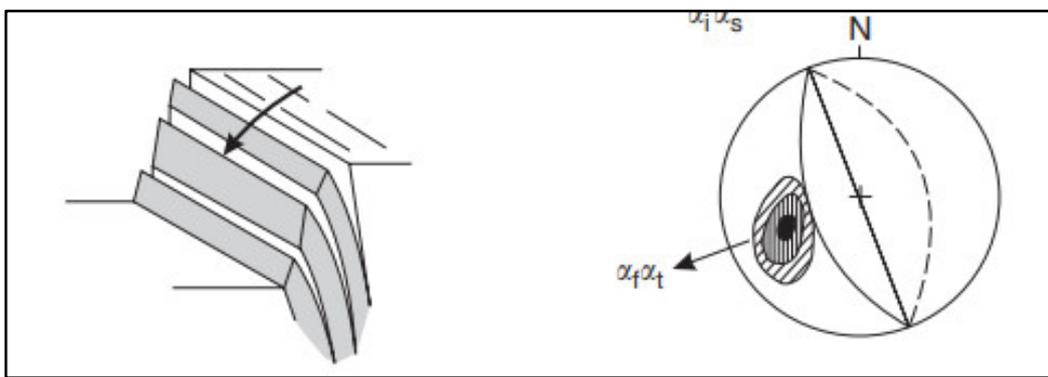
Gambar 4 Longoran Baji (Hoek and Bray, 1981)



2.2.4 Longsoran Guling

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

- longsoran guling setelah mengalami benturan (*flexural toppling*);
- longsoran guling yang berupa blok (balok-balok); dan
- gabungan antara kedua longsoran sebelumnya (*block-flexural*).



Gambar 5 Longsoran Guling (Hoek and Bray, 1981)

2.3 Bidang Diskontinuitas

Secara umum, bidang diskontinuitas merupakan bidang yang memisahkan massa batuan menjadi bagian yang terpisah. Menurut Priest (1993), pengertian bidang diskontinuitas adalah setiap bidang lemah yang terjadi pada bagian yang memiliki kuat tarik paling lemah dalam batuan. Beberapa jenis bidang diskontinuitas yang digolongkan berdasarkan ukuran dan komposisinya adalah sebagai berikut:

1. *Joint*

Joint atau kekar dapat didefinisikan sebagai retakan atau patahan pada batuan yang tidak mengalami pergerakan, atau meskipun mengalami pergerakan tetapi sangat kecil sehingga bisa diabaikan (Price, 1966).

2. *Faults*

Faults atau patahan adalah bidang diskontinuitas yang secara jelas memperlihatkan tanda-tanda bidang tersebut mengalami pergerakan. Tanda-tanda tersebut diantaranya adalah adanya zona hancuran seperti *slickenside*,



offset dari litologi, ataupun striasi yang terdapat disepanjang bidang *fault*. *Fault* dikenal sebagai *weakness zone* karena akan memberikan pengaruh pada kestabilan massa batuan dalam wilayah yang luas.

3. *Crack*

Crack adalah bidang diskontinuitas yang berukuran kecil atau tidak menerus. Namun di beberapa *rock mechanic engineer* menggunakan istilah *fracture* dan *crack* untuk menjelaskan pecahan atau *crack* yang terjadi pada saat pengujian batuan, peledakan dan untuk menjelaskan mekanisme pecahnya batuan.

4. *Bedding*

Bedding merupakan istilah untuk bidang perlapisan pada batuan sedimen. *Bedding* terdapat pada permukaan batuan yang mengalami perubahan ukuran dan orientasi butir dari batuan tersebut serta perubahan mineralogi yang terjadi selama proses pembentukan batuan sedimen.

5. *Seam*

Seam merupakan sesar kecil atau zona alterasi yang berada di sepanjang bidang lemah. Bisa juga terdapat pada bidang perlapisan batubara dengan lapisan-lapisan yang berbeda dan mudah terpisahkan.

2.4 Klasifikasi Massa Batuan

Klasifikasi Massa Batuan adalah proses menempatkan massa batuan ke dalam kelompok atau kelas pada hubungan yang ditentukan (Bieniawski, 1989) dan memberikan deskripsi pada batuan tersebut berdasarkan sifat/karakteristik yang sama sehingga perilaku massa batuan dapat diprediksi. Massa batuan mengacu pada kumpulan material batuan yang dipisahkan oleh diskontinuitas batuan, sebagian besar oleh kekar, bidang-bidang perlapisan, intrusi tanggul, dan sesar, dll. Bidang-bidang lapisan, intrusi tanggul, dan sesar tidak begitu umum dibandingkan dengan kekar dan dibahas secara terpisah (Bieniawski, 1993). Sistem klasifikasi massa batuan memungkinkan pengguna untuk mengikuti

dan menempatkan objek pada kelas yang sesuai.

la dasarnya pembuatan klasifikasi massa batuan bertujuan untuk (Bieniawski, 1989):



- a. mengidentifikasi parameter-parameter penting yang memengaruhi perilaku massa batuan;
- b. membagi formasi massa batuan kedalam grup yang mempunyai perilaku sama menjadi kelas massa batuan;
- c. memberikan dasar-dasar untuk pengertian karakteristik dari setiap kelas massa batuan;
- d. menghubungkan kondisi massa batuan di satu lokasi dengan lokasi lainnya; dan
- e. mengambil atau memberikan dasar umum.

Agar dapat dipergunakan dengan baik dan cepat maka klasifikasi massa batuan harus mempunyai beberapa sifat seperti berikut (Bieniawski, 1989):

- a. sederhana, mudah diingat dan dimengerti;
- b. sifat-sifat massa batuan yang penting harus disertakan;
- c. parameter dapat diukur dengan mudah dan murah;
- d. pembobotan dilakukan secara relatif; dan
- e. menyediakan data-data kuantitatif.

Beberapa klasifikasi massa batuan yang banyak dipakai atau dimodifikasi untuk kemantapan lereng antara lain:

2.4.1 Rock Mass Rating (RMR)

Rock Mass Rating (RMR) adalah sistem klasifikasi geomekanik oleh Bieniawski pada tahun 1973 yang pertama kali mengembangkan sistem *Rock Mass Rating* (RMR) berdasarkan pengalaman dalam terowongan dangkal di batuan sedimen di South African Council of Scientific and Industrial Research (CSIR). Bieniawski (1976) mempublikasikan rincian klasifikasi massa batuan yang disebut Klasifikasi Geomekanika atau sistem *Rock Mass Rating* (RMR) berdasarkan lima parameter yaitu kekuatan tekan uniaksial dari material batuan, *Rock Quality Designation* (RQD), jarak diskontinuitas, kondisi diskontinuitas, dan kondisi air tanah. Bieniawski telah melakukan perubahan signifikan dalam pembobotan yang

pada parameter yang berbeda. Pembahasan berikut ini didasarkan pada klasifikasi tahun 1989 (Bieniawski, 1989). Keduanya, versi 1989 dan versi 1973 berkaitan dengan estimasi kekuatan massa batuan.



Selama bertahun-tahun, RMR telah disempurnakan secara berturut-turut seiring dengan semakin banyaknya catatan kasus telah diperiksa (Zhang *et al*, 2019). Sistem ini telah diterapkan pada *tunneling*, penambangan, lereng dan fondasi batuan, dan merupakan cara yang sederhana, murah, dan dapat direproduksi untuk menentukan kualitas batuan. Sistem RMR terdiri dari enam parameter yang meliputi kekuatan tekan uniaksial dari material batuan, *Rock Quality Designation* (RQD), jarak diskontinuitas, kondisi diskontinuitas, kondisi air tanah, dan orientasi diskontinuitas dengan setiap parameter memiliki masing-masing bobot (lihat Tabel 2). Persamaan RMR dapat dilihat pada Persamaan 3.

$$RMR = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (3)$$

dimana:

R_1 = Nilai UCS

R_2 = Nilai RQD

R_3 = Jarak antar spasi diskontinuitas

R_4 = Kondisi bidang diskontinuitas

R_5 = Kondisi air tanah

R_6 = Orientasi bidang kekar

Tabel 2 Nilai pembobotan RMR

No	Parameter	Pembobotan						
1	Kekuatan Massa Batuan	<i>Point-Load Strength Index (MPa)</i>	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2		
		<i>Uniaxial Compressive Strength (MPa)</i>	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5
		Bobot	15	12	7	4	2	1
2	RQD (%)		90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25	
		Bobot	20	17	13	8	3	
3	Jarak Diskontinuitas (m)		> 2	0,6 – 2	0,2 – 0,6	0,06 – 0,2	< 0,06	
		Bobot	20	15	10	8	5	
		Kondisi Diskontinuitas						
	Kemenerusan Kekar (m)	< 1	1 – 3	3 – 10	10 – 20	> 20		
	Bobot	6	4	2	1	0		
	Bukaan Kekar (cm)	Tidak Ada	< 0,1	0,1 – 1,0	1 – 5	> 5		
	Bobot	6	5	4	1	0		
	Kekerasan Kekar	Sangat Kasar	Kasar	Sedikit Kasar	Halus	<i>Slickenside</i>		



No	Parameter	Pembobotan				
		Bobot	6	5	3	1
4	Material Pengisi (mm)	Tidak Ada	Keras < 5	Keras > 5	Lunak < 5	Lunak > 5
	Bobot	6	4	2	2	0
	Pelapukan	Tidak Lapuk	Sedikit Lapuk	Lapuk	Sangat Lapuk	Hancur
	Bobot	6	5	3	1	0
5	Kondisi Air Tanah	Kering	Lembab	Basah	Menetes	Mengalir
	Bobot	15	10	7	4	0
6	<i>Rating Adjustment for Discontinuity Orientations</i>					
	Orientasi Jurus dan Dip Kekar	Sangat Menguntungkan	Menguntungkan	Cukup Menguntungkan	Tidak Menguntungkan	Sangat Tidak Menguntungkan
	Terowongan	0	-2	-5	-10	-12
	Fondasi	0	-2	-7	-15	-25
	Lereng	0	-2	-25	-50	-60

Sumber: (Bieniawski, 1989)

A. Kuat Tekan Batuan (σ_c) (R_1)

Ahli geologi menggunakan uji laboratorium atau palu geologi untuk memukul permukaan lapisan batuan yang terbuka. Reaksi batuan dibobotkan sesuai dengan kekuatan dalam *Megapascal* (MPa) menggunakan alat UCS. Kuat tekan uniaksial adalah perbandingan beban yang diberikan pada suatu sampel batuan terhadap luas permukaan sampel yang menerima beban. Hal ini dapat dituliskan dengan rumus:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Dimana:

σ_c = Kuat tekan uniaksial (MPa)

F = Beban (kN)

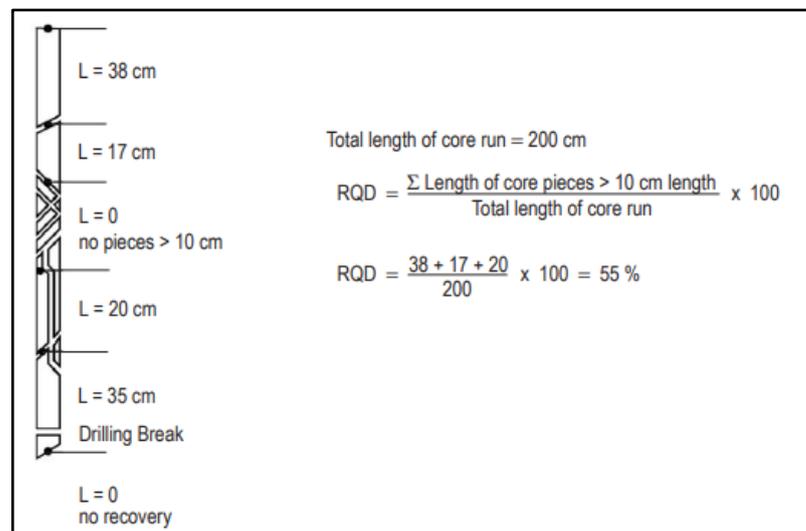
A = Luas sampel (mm²)

B. *Rock Quality Designation* (RQD) (R_2)

Rock Quality Designation (RQD) dikembangkan oleh D.U. Deere (1964) dan digunakan sebagai salah satu parameter untuk mendeskripsi massa batuan secara kuantitatif. RQD merupakan parameter yang dapat menunjukkan kualitas massa batuan sebelum penggalian dilakukan. RQD at didefinisikan sebagai persentase potongan inti yang utuh dengan jang lebih dari 100 mm (4 inci) dari total panjang inti (Dereedkk, 1967).



Pengukuran panjang potongan inti dan perhitungan RQD dapat dilihat dalam Gambar 6.



Gambar 6 Prosedur pengukuran dan perhitungan RQD (Deere, 1967)

Hubungan antara RQD dengan kualitas batuan dikemukakan oleh Deere (1967), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hubungan RQD dengan Kualitas Batuan

RQD (%)	Kualitas Batuan
< 25	Sangat Jelek
25 – 50	Jelek
50 – 75	Sedang
75 – 90	Baik
90 – 100	Sangat Baik

Sumber: (Deere, 1967)

RQD juga dapat dihitung secara tidak langsung dengan melakukan pengukuran orientasi dan jarak antar diskontinuitas pada singkapan batuan. Perhitungan RQD biasa didapat dari perhitungan langsung dari singkapan batuan yang mengalami retakan-retakan (baik lapisan batuan maupun kekar atau sesar). Persamaan Priest and Hudson (1976) dapat digunakan:

$$RQD = 100 (0,1\lambda + 1)e^{-0,1\lambda} \quad (5)$$

Keterangan:

λ = Jumlah total kekar per panjang *scanline*

R_3 = Jarak Diskontinuitas (R_3)

Geologi menentukan jarak diskontinuitas menggunakan pita pengukur penggaris untuk mengukur jarak antara diskontinuitas yang saling berdekatan dalam satu *cell* sejajar dengan arah normal atau tegak lurus



bidang diskontinuitas, sehingga pengukuran dilakukan dalam set yang sama pada singkapan batuan. RMR menentukan *rating* berdasarkan jarak antar kekar yang paling dominan (Goodman, 1989). Batas terbesar dari jarak antar kekar yang dipakai dalam RMR yaitu > 2 m dengan *rating* 20, sedangkan batas terendah < 60 mm dengan *rating* 5. Keterdapatannya di alam biasanya terdiri dari beberapa *set* kekar, sehingga agak sulit dalam menentukan jarak antar kekar. Jika hal ini terjadi maka diambil kondisi yang paling dominan atau beberapa model kekar tersebut tetap diukur jaraknya dan dirata-ratakan. Sen and Eissa (1991) mendefinisikan spasi kekar sebagai suatu panjang utuh pada suatu selang pengamatan. Spasi diskontinuitas dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Deskripsi spasi diskontinuitas

<i>Description</i>	<i>Spacing (mm)</i>	<i>Rating</i>
<i>Very close</i>	< 60	5
<i>Close</i>	60 – 200	8
<i>Moderate</i>	200 – 600	10
<i>Wide</i>	600 – 2000	15
<i>Very wide</i>	> 2000	20

Sumber: (Bieniawski, 1989)

D. Kondisi Bidang Diskontinuitas (R_4)

Ada beberapa parameter yang digunakan oleh Bieniawski dalam memperkirakan kondisi permukaan bidang diskontinuitas. Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

1) Kemenerusan bidang diskontinuitas (*persistence*)

Kemenerusan bidang diskontinuitas ditentukan dengan mengamati dan mengukur panjang dari bidang kekar di massa batuan. Klasifikasi persistensi kekar menurut Bieniawski (1989) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Klasifikasi persistensi kekar

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

Sumber: (Bieniawski, 1989)



2) Lebar bukaan/celah (*aperture*)

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

3) Kekasaran (*roughness*)

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

4) Material pengisi

Material pengisi didefinisikan sebagai material yang mengisi kekar. Keberadaan material pengisi ini akan memengaruhi kekuatan massa batuan (Singh and Goel, 2011). Wyllie and Mah (2004) mendefinisikan pengisi sebagai material yang memisahkan dinding batuan yang berdekatan pada suatu diskontinuitas. Giani (1992) pengisi ini biasanya lebih lemah kekuatannya dari batuan induk. Tipe pengisi bisa berupa pasir, lanau, lempung, breksi, *gauge*, dan *mylonit*. Adapun untuk mineral pengisi seperti kalsit, kuarsa dan pirit memiliki kekuatan yang tinggi. Sehingga secara mekanika material pengisi ini mempengaruhi kuat geser diskontinuitas. Lebih lanjut menurut Wyllie and Mah (2004) material pengisi dapat dipergunakan untuk memprediksi perilaku diskontinuitas batuan.

5) Pelapukan pada batuan (*weathering*)

Pelapukan batuan adalah proses yang menyebabkan alterasi batuan, disebabkan oleh air, karbon dioksida dan oksigen (Giani, 1992), atau proses eksternal menyebabkan hilang dan berubahnya sifat asal mula menjadi kondisi yang baru. Prosesnya melibatkan agen-agen fisika, kimia, biologi (Bates, 1987), atau melalui proses mekanika dan dipengaruhi oleh keadaan iklim (Giani, 1992). Wyllie and Mah (2004) pelapukan berbentuk desintegrasi dan dekomposisi. Desintegrasi adalah hasil perubahan lingkungan, seperti kelembaban, pembekuan dan pemanasan. Sedangkan dekomposisi menunjukkan perubahan batuan



oleh agen-agen kimia seperti proses oksidasi pada batuan mengandung besi, hidrasi seperti perubahan feldspar menjadi kaolinit, dan karbonisasi seperti pelarutan batugamping.

Tabel 6 Tingkat pelapukan

Jenis	Defenisi
Segar	Tidak ada tanda-tanda pelapukan, warna tidak berubah pada permukaan diskontinuitas, 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.

Sumber: (Bieniawski, 1989)

E. Kondisi air tanah (R_5)

Ahli geologi menentukan kondisi air tanah berdasarkan apakah singkapan batuan memiliki kandungan air yang dapat digolongkan menjadi benar-benar kering, basah, menetes, dan mengalir, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7 (Beemer *and* Worrells, 2017).

Tabel 7 Kondisi Air Tanah

Kondisi Air Tanah	Rating
Kering (<i>dry</i>)	15
Lembab (<i>damp</i>)	10
Basah (<i>wet</i>)	7
Menetes (<i>dripping</i>)	4
Mengalir (<i>flowing</i>)	0

Sumber: (Bieniawski, 1989)

F. Orientasi Diskontinuitas (R_6)

Nilai *srike* dan *dip* merepresentasikan orientasi dan kemiringan dari bidang diskontinuitas. Nilai *srike* dan *dip* pada pekerjaan rekayasa batuan berhubungan dengan prediksi stabilitasa massa batuan dan arah penggalian, serta sangat berperan untuk memberikan penilaian kuantitatif bidang diskontinuitas yang kritis pada penggalian terowongan dan rekayasa lereng batuan. Nilai orientasi bidang diskontinuitas terhadap lereng memiliki nilai penilaian kualitatif dan kuantitatif yang sedikit berbeda antara satu dengan lainnya.



Tabel 8 Kesesuaian bidang lemah atau diskontinuitas

Orientasi Jurus dan Dip Kekar	Sangat Menguntun gkan	Menguntu ng kan	Cukup Menguntun gan	Tidak Menguntun gan	Sangat Tidak Menguntun gan
Terowon gan	0	-2	-5	-10	-12
Fondasi	0	-2	-7	-15	-25
Lereng	0	-2	-25	-50	-60

Sumber : Bieniawski, 1989

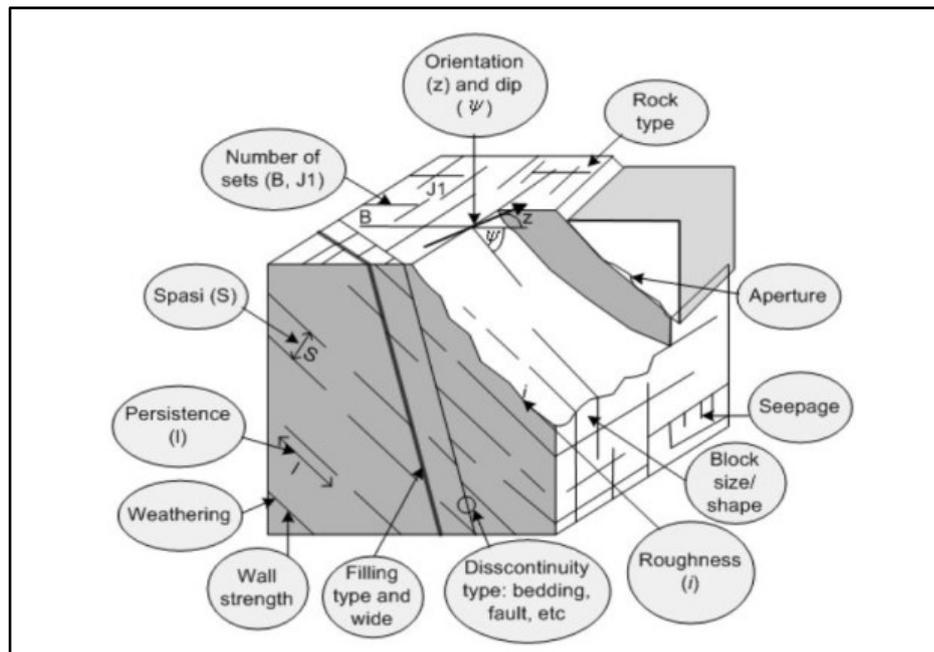
Tabel 9 Pengaruh orientasi kekar dalam pembuatan terowongan dan penggalian

Pengaruh jurus dan kemiringan kekar untuk penerowongan						
Jurus tegak lurus sumbu terowongan			Jurus paralel		Dip 0-20°	
Galian searah kemiringan		Galian melawan terowongan		Sumbu terowongan		Tidak tergantun jurus
Kemiringan	$\alpha=20-$ 45-90°	$\alpha=45-$ 90°	$\alpha=20-45^\circ$	$\alpha=45-90^\circ$	$\alpha=20-$ 45°	
Sangat menguntun gan	menguntun gkan		Tidak menguntun gan	Sangat tidak menguntun gan	Sedang	Tidak menguntun gan

Sumber : Rai, 1995

Penerapan analisis mekanika batuan membutuhkan model dan data geologi berdasarkan definisi tipe-tipe batuan, struktur diskontinuitas dan sifat material (Hoek, 2006). Pengumpulan data diskontinuitas melalui investigasi geologi dengan melakukan pengkategorian diskontinuitas, termasuk proses terbentuknya. Parameter-parameter yang perlu dicatat dalam investigasi geologi diskontinuitas seperti tipe batumannya, tipe diskontinuitas, skala, orientasi, spasi, *persistence*, kekasaran, kekuatan (*wall strength*), *aperture*, pengisi, *seepage*, jumlah set kekar, bentuk dan ukuran blok, serta tingkat pelapukan tersaji pada Gambar 7 (Wyllie and Mah, 2004). Palmstrom (1995) secara umum berkaitan dengan investigasi geologi dari semua hal yang berkaitan dengan mekanika batuan, rekayasa batuan dan desain adalah kualitas geodata yang menjadi dasar perhitungan dan estimasi yang dibuat.





Gambar 7 Sketsa parameter-parameter untuk mendeskripsikan massa batuan (Wyllie *and* Mah, 2004)

2.4.2 Geological Strength Index (GSI)

Hoek *and* Brown (1980) mengusulkan metode untuk mendapatkan kekuatan massa batuan terkekarkan, yang dikenal sebagai *Original Hoek-Brown Criterion*. Kriteria ini dimulai dari kekuatan batuan utuh kemudian diperkenalkan faktor-faktor untuk mengurangi kekuatan tersebut berdasarkan pada karakteristik pada bidang diskontinuitas (*joints*) di dalam massa batuan. Kriteria ini terus dikembangkan oleh Hoek *et al* (1995) dimasukkan konsep *Geological Strength Index* (GSI).

Geological Strength Index (GSI) diperkenalkan pada tahun 1994 oleh Evert Hoek kemudian dikembangkan untuk membantu mengatasi ketidakmampuan klasifikasi geomekanika massa batuan RMR dari Bieniawski (1974) dalam penentuan kualitas massa batuan yang buruk (Hoek *and* Marinos, 2007). Pada tahap awal pengembangan, nilainya langsung diestimasi berdasarkan sistem RMR. Sistem GSI mampu mengestimasi pengurangan kekuatan massa batuan untuk berbagai kondisi geologi melalui observasi di lapangan. Misalkan mampu erapkan pada massa batuan berupa blok-blok, massa batuan heterogen *ish* (Marinos *et al*, 2005). Klasifikasi GSI tidak perlu diterapkan pada atuan tanpa diskontinuitas.



GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)

From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI=35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavorable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behavior. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

STRUCTURE		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Stickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Stickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
 INTACT OR MASSIVE —intact rock specimens or massive <i>in situ</i> 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			
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY —folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				50		
 DISINTEGRATED —poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				40	30	
 LAMINATED/SHEARED —lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					20	10
		N/A	N/A			

Gambar 8 Geological Strength Index (Hoek and Marinos, 2000)

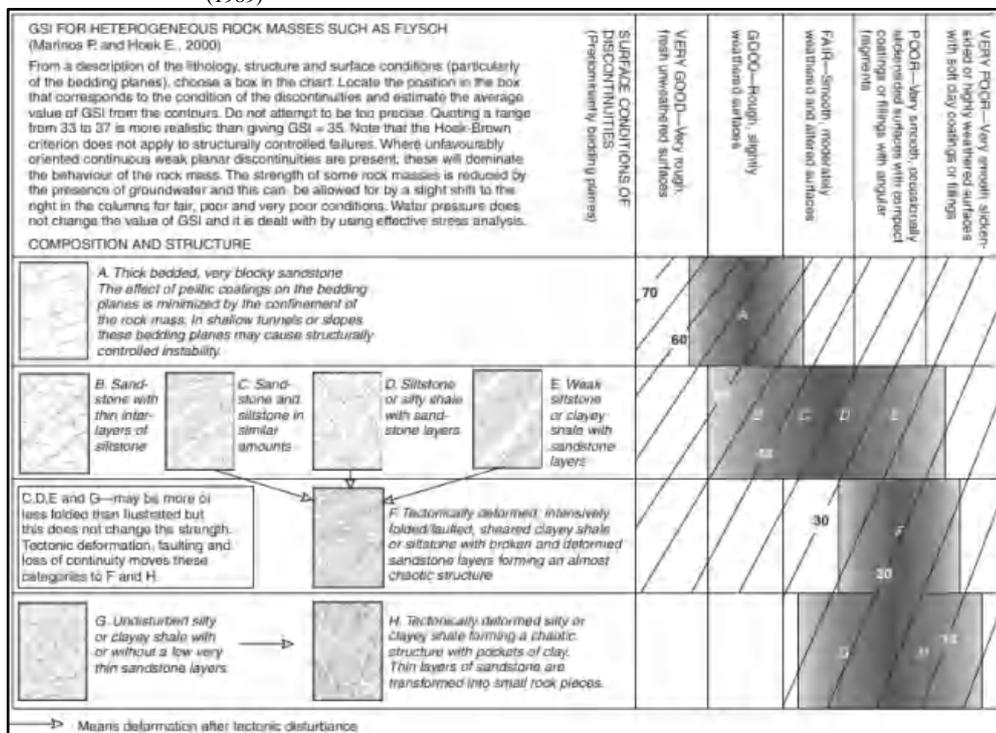
Hubungan kualitas massa batuan menggunakan metode RMR dan GSI adalah sangat erat sekali, karena seperti yang telah dijelaskan di atas oleh Hoek (2006) bahwa GSI dibuat untuk menyempurnakan dan perpedoman dari metode RMR dalam estimasi kualitas massa batuan yang rendah pada tahap awal angannya dan parameternya secara umum didasarkan pada RMR. an lebih lanjut dari RMR adalah untuk memperkirakan nilai *Geological Index (GSI)*. GSI adalah suatu indeks yang berhubungan dengan massa batuan. Nilai GSI didapat dengan dua cara, yaitu pengamatan



dengan observasi geologi di lapangan dengan bantuan *chart* dan dengan hasil analisis RMR.

GSI adalah suatu indeks yang dipakai untuk memperkirakan nilai konstanta m_b , s , dan a . Konstanta m_b , s , dan a digunakan dalam menentukan kekuatan massa batuan berdasarkan kriteria runtuh (*failure*) Hoek-Brown (1980). Nilai GSI diperoleh dari hasil deskripsi geologi dengan berdasarkan struktur dan kondisi permukaan struktur. RMR pertama kali digunakan oleh Hoek-Brown (1980) untuk memprediksi nilai GSI. Nilai GSI dapat juga diperoleh dari nilai RMR dengan Persamaan sebagai berikut:

$$GSI = RMR_{(1989)} - 5 \tag{6}$$



Gambar 9 Nilai GSI untuk tipe batuan heterogen (*flysch*) (Marinos and Hoek, 2000)

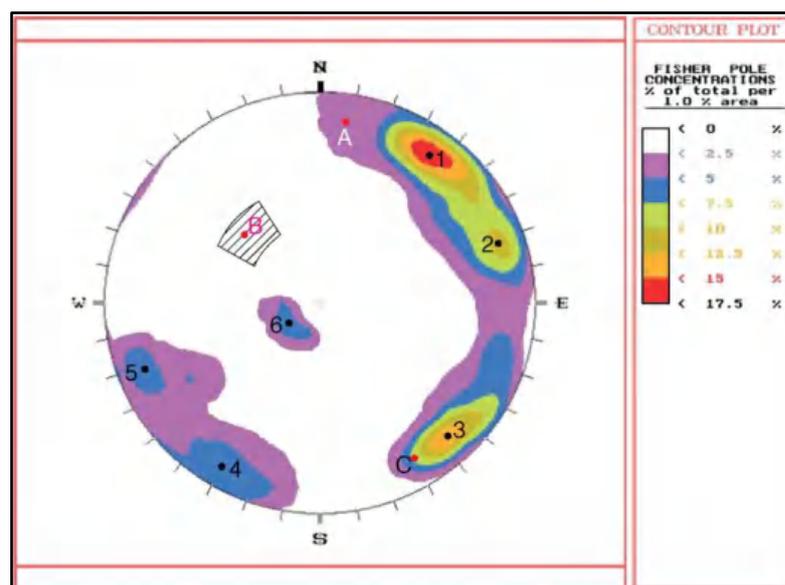
2.5 Analisis Kinematika

Analisis kinematik secara geometris digunakan untuk memeriksa mode keruntuhan geser lereng yang mungkin terjadi dalam massa batuan sehubungan dengan lereng batuan yang ada dengan bantuan proyeksi stereografik. Dalam menganalisis menggunakan metode kinematika, kombinasi dari orientasi bidang uitas, permukaan lereng, dan juga sudut gesekan, akan dihubungkan



sehingga akan diketahui jenis dan arah keruntuhan geser yang kemungkinan dapat terjadi pada suatu lereng (Kliche, 2009).

Analisis kinematik dari batuan yang dikontrol oleh diskontinuitas ketidakstabilan lereng memperhitungkan perbandingan orientasi bidang diskontinuitas atau perpotongannya dengan sudut gesekan, geometri lereng, dan orientasi lereng orientasi lereng. Ketika diplot pada proyeksi stereografis, kutub-kutub bidang diskontinuitas dalam banyak kasus menampilkan gambar yang agak tersebar, namun banyak kutub mungkin bertepatan dengan yang lain jika jumlah kutub yang diplot meningkat. Seperti yang dijelaskan dalam Priest (1993), dan ditunjukkan dalam Gambar 10, yang mencerminkan distribusi aktual dari diskontinuitas dalam penelitian ini, kutub-kutub ini mungkin menjadi terkonsentrasi pada zona tertentu sesuai dengan jumlah bidang yang diukur dan diplot pada stereo-net, yang diwakili oleh interval kontur (Aksoy & Ercanoglu, 2007).



Gambar 10 Diagram kontur dari data bidang diskontinuitas (Aksoy & Ercanoglu, 2007)

2.5.1 Orientasi Struktur Geologi

Struktur geologi adalah gambaran arsitektur bumi akibat deformasi batuan oleh gaya tektonik. Struktur geologi akibat gaya tektonik akan menghasilkan patahan, an kekar. Kehadiran struktur geologi pada batuan akan menghasilkan bidang lemah yang merupakan bidang diskontinuitas yang berpotensi menimbulkan longsor. Jenis-jenis bidang lemah antara lain kekar, sesar, *shear*



zone, bidang perlapisan dan foliasi. Tahap pertama dalam penyelidikan diskontinuitas pada lereng adalah menganalisis orientasi diskontinuitas tersebut. *Dip* adalah besar sudut kemiringan bidang diskontinuitas terhadap bidang datar (sudut ψ). *Dip direction* adalah sudut antara arah perpanjangan horizontal garis *dip* dengan arah utara, diukur searah jarum jam (sudut α). Pengukuran *dip* dan *dip direction* menggunakan kompas geologi.

1. Orientasi Lereng

Orientasi lereng adalah besar kemiringan lereng terhadap bidang datar (*dip*) dan arah muka lereng tersebut terhadap arah utara diukur searah jarum jam (*dip direction*). Pengukuran *dip* dan *dip direction* lereng dilakukan menggunakan kompas geologi.

2. Sudut Gesek Dalam Batuan

Sudut gesek dalam batuan adalah besar sudut (ϕ) ketika batuan berada pada permukaan miring akan melebihi gaya gesek dan mulai bergerak, diukur dari bidang normal terhadap permukaan dan gaya-gaya yang bekerja pada tubuh batuan. Nilai sudut gesek dalam batuan didapatkan melalui pengujian batuan di laboratorium dan juga bisa didapat melalui pendekatan dengan kriteria Hoek and Brown.

2.6 Analisis Kestabilan Lereng

Beragam metode yang dapat digunakan untuk menganalisis kemantapan suatu lereng. Penggunaan metode ini tergantung pada data yang tersedia, program komputer (*software*) yang tersedia, tingkat ketelitian perhitungan yang diperlukan, dan keluaran (*output*) yang diperlukan. Semakin teliti data yang digunakan untuk perhitungan kestabilan lereng ini, hasil yang diperoleh akan semakin mendekati kenyataan sebenarnya. Hal lain yang perlu diperhatikan juga ialah kemampuan dari ahli geoteknik (Arif, 2016).

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



Metode keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*) merupakan pendekatan yang populer dalam analisis stabilitas lereng. Penggunaan metode ini tergantung pada data yang tersedia, program komputer (*software*) yang tersedia,

tingkat ketelitian perhitungan yang diperlukan, dan keluaran (*output*) yang diperlukan. Semakin teliti data yang digunakan untuk perhitungan kestabilan lereng ini, hasil yang diperoleh akan semakin mendekati kenyataan sebenarnya. Hal lain yang perlu diperhatikan juga ialah kemampuan dari ahli geoteknik (Arif, 2016).

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 longsoran yang dipilih sebelumnya. Hipotesis yang dibuat secara umum adalah bahwa 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. Faktor keamanan dihitung menggunakan kesetimbangan gaya atau kesetimbangan momen, atau menggunakan kedua kesetimbangan gaya tersebut tergantung dari metode perhitungan yang dipakai. Penentuan faktor keamanan menggunakan metode ini terdapat beberapa persamaan statis yang digunakan dalam penentuan faktor keamanan, meliputi (Giani, 1992):

- a. penjumlahan gaya pada arah vertikal untuk setiap irisan yang digunakan untuk menghitung gaya normal pada bagian dasar irisan;
- b. penjumlahan gaya pada arah horizontal untuk setiap irisan yang digunakan untuk menghitung gaya normal antar irisan;
- c. penjumlahan momen untuk keseluruhan irisan yang bertumpu pada suatu titik; dan
- d. penjumlahan gaya pada arah horizontal untuk seluruh irisan.

Metode kesetimbangan batas atau metode *Limit Equilibrium* dikenal sebagai metode irisan karena bidang longsoran dari lereng tersebut dibagi menjadi beberapa irisan. Metode ini terbukti sangat berguna dan dapat diandalkan dalam praktik rekayasa serta menumbuhkan data yang relatif sedikit dibandingkan metode

seperti metode elemen hingga, metode beda hingga, dan metode elemen semua metode irisan menyatakan kondisi kestabilan suatu lereng,



dinyatakan dalam suatu indeks yang disebut faktor keamanan (FK), didefinisikan sebagai berikut :

$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{kekuatan penggerak}} \quad (8)$$

Adapun gaya penahan adalah kekuatan yang menahan lereng tersebut bergerak, yaitu kekuatan dari material tersebut seperti kohesi dan sudut gesek dalam. Sedangkan gaya penggerak adalah, gaya yang menyebabkan pergerakan pada lereng. Keruntuhan (*failure*) terjadi akibat tegangan geser melampaui kekuatan geser material.

Kekuatan geser material yang tersedia yang tersedia untuk menahan material sehingga lereng tidak longsor dinyatakan mencapai syarat batas yang dirumuskan sesuai dengan Persamaan 9.

$$T_f = c + \tan \phi \quad (9)$$

Ada beberapa macam metode irisan yang biasa digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng antara lain:

1. Metode Bishop

Metode ini berdasarkan prinsip kesetimbangan batas yaitu menghitung besarnya kekuatan geser yang akan mempertahankan kestabilan, dibandingkan dengan besarnya tegangan geser yang bekerja. Harga perbandingan ini adalah faktor keamanan.

2. Metode Janbu

Metode ini digunakan untuk menganalisis lereng yang bidang longsornya tidak berbentuk busur lingkaran. Dalam hal ini bidang longsornya ditentukan berdasarkan zona lemah yang terdapat pada massa batuan.

3. Metode Morgenstern-Price

Metode ini digunakan untuk perbandingan antara resisten gaya dengan *shearing force*. Agar *bench/jenang* dapat lebih stabil harus lebih besar daripada satu, berarti resisten gaya harus lebih besar daripada *shearing force*.

Menurut (Krahn, 2004 dalam Arif, 2016) terdapat sejumlah variasi dari irisan disebabkan oleh perbedaan asumsi-asumsi yang digunakan (Tabel kondisi kesetimbangan yang dapat dipenuhi seperti yang ditunjukkan di 11.



Tabel 10 Asumsi-asumsi dan kondisi kesetimbangan yang digunakan oleh beberapa Metode Irisan

Metode	Asumsi
Irisan Biasa (Fellenius)	Resultan gaya antar-irisan sama dengan nol dan bekerja sejajar dengan permukaan bidang runtuh.
Bishop 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
Lowe-Karafiath	Kemiringan dari resultas gaya geser dan normal antar-irisan sam dengan rata-rata dari kemiringan permukaan lereng dan kemiringan bidang runtuh
Crops of Engineer	Kemiringan dari resultan gaya geser normal antar-irisan besarnya sama dengan: a. Kemiringan permukaan lereng; atau b. Kemiringan dari kaki bidang runtuh ke puncak bidang runtuh.
Spencer	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan adalah sama untuk semua irisan.
Morgenstern-Price	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)

Tabel 11 Kondisi kesetimbangan yang dipenuhi

Metode	Keseimbangan Gaya		Kesetimbangan Momen	Kemiringan Resultan
	Vertikal	Horizontal		
Irisan Biasa (Fellenius)	Tidak	Tidak	Ya	Tidak ada
Bishop yang disederhanakan	Ya	Tidak	Ya	Horizontal
Janbu yang disederhanakan	Ya	Ya	Tidak	Horizontal



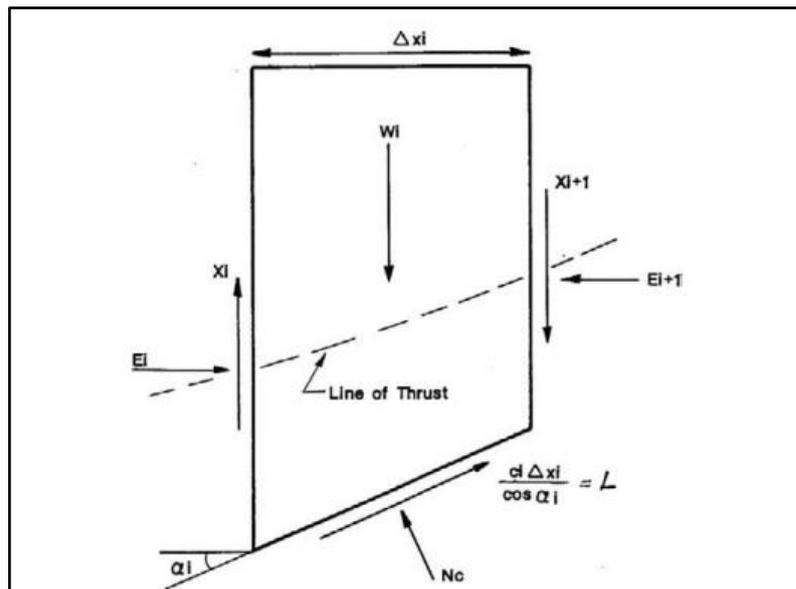
Metode	Keseimbangan Gaya		Keseimbangan Momen	Kemiringan Resultan
	Vertikal	Horizontal		
Janbu yang Umum	Ya	Ya	Tidak	
Lowe-Karafiath	Ya	Ya	Tidak	Rata-rata kemiringan permukaan dan kemiringan dasar irisan
Crops of Engineer	Ya	Ya	Tidak	Irisan kemiringan permukaan tanah atas
Spencer	Ya	Ya	Ya	Konstan
Morgenstern-Price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

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 (Read & Stacey, 2009).

Solusi untuk kondisi tersebut biasanya didasarkan pada metode irisan 2D, yang membagi tubuh menjadi n irisan di atas permukaan bidang gelincir. Permukaan ini sering diasumsikan melingkar, tetapi dapat mengambil bentuk apa pun karena metode irisan dapat dengan mudah mengakomodasi kemiringan kompleks dan geometri potensial permukaan kegagalan, kondisi massa batuan variasi, dan beban batas eksternal. Namun, masalahnya adalah keadaan tak tentu karena solusinya memiliki lebih banyak yang tidak diketahui persamaan. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan individu dalam metode diustrasikan pada Gambar 11 (Read & Stacey, 2009).





Gambar 11 Gaya yang bekerja pada potongan bidang gelincir dalam metode irisan (Read & Stacey, 2009)

2.5 Kriteria Keruntuhan *Hoek Brown*

Hoek dan Brown (1980) mengusulkan metode untuk mendapatkan estimasi kekuatan massa batuan terkekarkan berdasarkan pada penilaian ikatan antar struktur pada massa batuan dan kondisi permukaan struktur geologi tersebut yang dikenal sebagai *Original Hoek-Brown criterion*.

Tahun 1995 Hoek memasukkan konsep *Geological Strength Index (GSI)* yang memberikan estimasi pengurangan kekuatan massa batuan karena perbedaan kondisi geologi. Kriteria ini kemudian dikenal sebagai *Generalized Hoek-Brown criterion* (Hoek et al., 1995).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}' \left[m_b \frac{\sigma_s}{\sigma_s} + s \right]^a \quad (10)$$

Dimana σ_1' dan σ_3' merupakan tegangan efektif maksimum dan minimum saat batuan runtuh. σ_c adalah kuat tekan (UCS) batuan utuh.

m_b merupakan penurunan konstanta material m_i yang berasal dari pengujian triaksial batuan utuh di laboratorium dengan besarnya :

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (11)$$



dan a merupakan konstanta untuk massa batuan yang diberikan dari tabel 1 (Hoek and Brown, 1981) :

$$a = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (12)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{5}} \right) \quad (13)$$

Nilai GSI didapat dengan dua cara yaitu dengan pengamatan dengan observasi geologi di lapangan dengan bantuan chart dan bisa juga didapatkan dari hasil RMR pengurangan. Nilai D adalah faktor kerusakan (*disturbance factor*) yang tergantung pada derajat kerusakan massa batuan yang disebabkan oleh peledakan maupun pelepasan tegangan akibat penggalian.

Tabel 12 Pembobotan nilai D

Deskripsi dari Massa Batuan	Nilai faktor D ketergangguan yang di sarankan
Peledakan skala kecil dalam suatu lereng menghasilkan kerusakan menengah pada massa batuan yang khususnya peledakan terkontrol digunakan, walaupun begitu menghilangkan tegangan menghasilkan beberapa gangguan.	D = 0,7 <i>Good blasting</i>
Kemiringan lereng pada tambang terbuka yang besar mengalami gangguan yang signifikan yang disebabkan oleh peledakan produksi berat dan karena kehilangan tegangan dari pelepasan kelebihan beban.	D = 1,0 <i>Poor blasting</i>
Pada beberapa batuan yang lebih lunak, penambangan dilakukan dengan ripping dan dozing serta tingkat kerusakan pada lereng tambang menjadi berkurang.	D = 0,7 <i>Productions blasting</i>
	D = 1,0 <i>Mechanical blasting</i>

Sumber: (Hoek & Brown, 2018)

Parameter material M_i bergantung pada jenis batuan (beku, metamorf, atau sedimen) yang ditentukan pada Tabel 13. Kisaran nilai M_i didapatkan untuk setiap material yang bergantung pada granulitas 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.



Tabel 13 Nilai faktor Mi

Rock Type	Class	Groups	Texture				
			Coarse	Medium	Fine	Very Fine	
Sedimentary	Clastic		Conglomerates (21 ± 3)	Sandstones (17 ± 4)	Siltstones 7 ± 2	Claystones (4 ± 2)	
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)	
						Marls (7 ± 2)	
						Chalk (7 ± 2)	
Sedimentary	Non Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)	
		Evaporites		Gypsum (8 ± 2)	Anhydrite 12 ± 2		
		Organic					
Metamorphic	Non Foliated		Marble (9 ± 3)	Hornfels (19 ± 4)	Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites (20 ± 3)	
			Slightly foliated	Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites (26 ± 6)	Gneiss (28 ± 5)	
			Foliated		Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates (7 ± 4)
Igneous	Plutonic	Light	Granite (32 ± 3)	Diorite (25 ± 5)	Granodiorite (29 ± 3)		
			Dark	Gabbro (27 ± 3)	Dolerite (16 ± 5)		
	Igneous	Hypabyssal		Norite (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
				Porphyries (20 ± 5)			
Igneous	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)		
			Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Andesite (25 ± 5)	Basalt (25 ± 5)	
				Volcanic breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)		

dek and Brown, 1980)



2.6 Probability of Failure (PoF)

Probability of failure merupakan besarnya persentase longsoran yang mungkin terjadi pada lereng, semakin tinggi nilai PoF maka kondisi lereng semakin tidak stabil. Standar aman PoF yang dapat digunakan dapat dilihat pada Tabel 14.

Tabel 14 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: SRK Consulting (2006) dalam (Read & Stacey, 2009)

