SKRIPSI

ANALISIS KESTABILAN *LERENG IN-PIT DUMP* DENGAN METODE *LIMIT EQUIBILIRIUM* PIT 303 PT PAMAPERSADA NUSANTARA

Disusun dan diajukan oleh:

GREGORIO SAMUEL ITTO
D111 18 1506

PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS KESTABILAN LERENG *IN-PIT DUMP* DENGAN METODE *LIMIT EQUIBILIRIUM* PIT 303 PT PAMAPERSADA NUSANTARA

Disusun dan diajukan oleh

Gregorio Samuel Itto
D111181506

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 30 Agustus 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Dr. Eng. Purwanto, ST. MT.
NIP 197111282005011000 2

Pembimbing Pendamping,

Asta Arjunoarwan Hatta, ST., MT
NIP 199511262020015001

Ketua Program Studi,

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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama	: Gregorio Samuel Itto
NIM	: D111181506
Program Studi	: Teknik Pertambangan
Jenjang	: S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{ Analisis Kestabilan Lereng *In-Pit Dump* dengan Metode *Limit Equibilirium* Pit 303 PT Pamapersada Nusantara}

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, 25 September 2023

Yang Menyatakan

Gregorio Samuel Itto

ABSTRAK

GREGORIO SAMUEL ITTO. *Analisis Kestabilan Lereng In-Pit Dump dengan Metode Limit Equibilirium Pit 303 PT Pamapersada Nusantara*(dibimbing oleh Purwanto & Asta Arjunoarwan Hatta)

Penambangan batubara dengan metode tambang terbuka membutuhkan area untuk membuang atau menyimpan material hasil penggalian *overburden* yang disebut sebagai *disposal/dump* sebagai kawasan pembuangan. Salah satu metode pengelolaan material *overburden* dengan menampungnya secara internal di samping ruang yang terbentuk dari penggalian batubara yang disebut *In-pit dumping*. Metode ini dapat mengurangi masalah penggunaan lahan serta menurunkan biaya transportasi, berdasarkan alasan tersebut metode ini diterapkan oleh PT. Pamapersada Nusantara *site* Pama untuk pengelolaan material *overburden*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui stablitas dari desain *in-pit dump* pada PIT 303 PT Pamapersada Nusantara *site* Baya menggunakan metode *Limit Equbilirium* metode irisan Morgernstern-Price menggunakan program Rocscience Slide 2. Analisis desain *in-pit dump* dilakukan dengan empat model penampang *crossection* (A,B,C,D), didapatkan nilai faktor kemanan (FK) untuk desain *crossection* A dan D dalam stabil menurut standar perusahaan yaitu 1,2 dengan nilai masing-masing sebesar 1,240 dan 1,244. Sedangkan nilai faktor keamanan didapatkan nilai faktor kemanan (FK) untuk desain *crossection* B dan C dalam kondisi kritis (tidak stabil) dengan nilai masing-masing sebesar 0,989 dan 1,004 sehingga perlu dilakukan prosedur pemodelan ulang. Pemodelan ulang desain *in-pit dump* pada model *crossection* B dilakukan perubahan pada jenjang dengan *bench* RL-10 sampai *bench* RL+30. Sedangkan, pada model penampang *crossection* C dilakukan perubahan pada *bench* RL-20 sampai dengan *bench* RL+40. Rekomendasi perubahan pada desain lereng penampang *crosssection* B dan C didapatkan nilai FK untuk desain nilai FK masing-masing sebesar 1,253 dan 1,218 yang berarti sudah stabil menurut standar perusahaan.

Kata Kunci: Stabilitas Lereng, *Limit Equbilirium Method*, Metode Irisan Morgernstern-Price, Faktor Keamanan.

ABSTRACT

GREGORIO SAMUEL ITTO. *Slope Stability Analysis of In-Pit Dump with Pit Equilibrium Limit Method 303 PT Pamapersada Nusantara* (supervised by Purwanto & Asta Arjunoarwan Hatta)

Coal mining using the open pit method requires an area to dispose of or store overburden excavated material which is referred to as a dump/dump as a disposal area. One method of managing overburden material is by storing it internally beside the space formed from coal excavation which is called In-pit dumping. This method can reduce land use problems and reduce transportation costs, based on this reason this method is implemented by PT. Pamapersada Nusantara site Pama for overburden material management. This research was conducted to determine the stability of the in-pit dump design at PIT 303 PT Pamapersada Nusantara site Baya using the Limit Equbilirium method of the Morgernstern-Price slice method using the Rocscience Slide 2 program. Analysis of the in-pit dump design was carried out with four cross-sectional models (A, B, C, D), the value of the safety factor (FK) for cross-sectional designs A and D was stable according to company standards, namely 1.2 with values of 1.240 and 1.244 respectively. While the value of the factor of safety obtained the value of the factor of safety (FK) for cross-sectional designs B and C in critical (unstable) conditions with respective values of 0.989 and 1.004 so that a remodeling procedure is necessary. The remodeling of the in-pit dump design on the cross-section model B is made by changing the level from bench RL-10 to bench RL+30. Meanwhile, in the cross-sectional model C, changes were made from bench RL-20 to bench RL+40. Recommendations for changes to the slope design cross sections B and C obtained FK values for design FK values of 1.253 and 1.218 respectively, which means they are stable according to company standards.

Keywords: Slope Stability, Limit Equbilirium Method, Morgernstern-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 2
1.3 Tujuan Penelitian 2
1.4 Manfaat Penelitian 3
1.5 Ruang Lingkup 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 4
2.1 Lereng 4
2.2 Keruntuhan Lereng 4
2.3 Faktor Faktor yang Mempengaruhi Keruntuhan Lereng 5
2.4 Tipe Tipe Longsoran 10
2.5 Faktor Keamanan Lereng (*Safety Factor*) 13
2.6 Klasifikasi Massa Batuan RMR & GSI 15
2.7 Kekuatan Massa Batuan 25
2.8 Metode Kestimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*) 29
2.9 Metode Morgernstern-Price 31
2.10 Klasifikasi Roscience Slide2 33
BAB III METODE PENELITIAN 34
3.1 Lokasi Penelitian 34
3.2 Metode Penelitian 36
3.3 Sumber Data 36
3.4 Pengolahan Data 39
3.5 Metode Penelitian 46
3.6 Sumber Data 46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 48
4.1 Tinjauan Umum Lokasi Penelitian 48
4.2 Karakteristik Material 52
4.3 Analisa Kestabilan Lereng Desain *In-Pit Dump* 55
4.4 Pemodelan Ulang Geometri Lereng 68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 73
5.1 Kesimpulan 73
5.2 Saran 74
DAFTAR PUSTAKA 75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Longsoran bidang 10
Gambar 2 Longsoran baji 11
Gambar 3 Longsoran gulung 12
Gambar 4 Longsoran busur 13
Gambar 5 Perhitungan nilai RQD per 100 mm (4 inci) *core run* 19
Gambar 6 Grafik hubungan antara RQD dan frekuensi bidang diskontinu 20
Gambar 7 Grafik untuk memperkirakan GSI. 22
Gambar 8 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') (Fig.2) 23
Gambar 9 Nilai *Intact Rock* (m_i) untuk menentukan kekuatan massa batuan dan GSI 24
Gambar 10 Kurva hasil perhitungan kriteria keruntuhan Hoek-Brown untuk berbagai nilai tegangan utama maksimum-minimum 27
Gambar 11 Estimasi nilai *disturbance factor* lereng 28
Gambar 12 Gaya yang bekerja pada tiap irisan metode Morgernstern-Price 31
Gambar 13 Peta tunjuk lokasi penelitian 35
Gambar 14 Letak empat *crosssection* untuk analisis desain *in-pit dump* 39
Gambar 15 Geometri *external boundary* di-*import* ke Rocscience Slide2 41
Gambar 16 Menu pengaturan metode yang akan digunakan 41
Gambar 17 Menu pengaturan material 42
Gambar 18 Model garis muka air tanah 43
Gambar 19 Menu pengaturan *surface option* 44
Gambar 20 Proses kalkulasi stabilitas lereng 44
Gambar 21 Menu *Interpret* pada Rocscience Slide2 45
Gambar 22 Interpretasi nilai *safety factor* (faktor keamanan) 46
Gambar 23 Bagan alir penelitian 47
Gambar 24 Gambar titik lokasi pengeboran geoteknik di area Pit 303 48
Gambar 25 Penampang A-A' pengeboran geoteknik di area Pit 303 49
Gambar 26 Penampang B-B' pengeboran geoteknik di area Pit 303 50
Gambar 27 Penampang C-C' pengeboran geoteknik di area Pit 303 50
Gambar 28 Distribusi presentase jenis material di area Pit 303 51
Gambar 29 Lereng model penampang *Crosssection* A 57
Gambar 30 Nilai faktor keamanan lereng model penampang *Crosssection* A 59
Gambar 31 Lereng model penampang *Crosssection* B 59
Gambar 32 Nilai faktor keamanan lereng model penampang *Crosssection* B 61
Gambar 33 Lereng model penampang *Crosssection* C 62
Gambar 34 Nilai faktor keamanan lereng model penampang *Crosssection* C 64
Gambar 35 Lereng model penampang *Crosssection* D 65
Gambar 36 Nilai faktor keamanan lereng model penampang *Crosssection* D 67
Gambar 37 Nilai faktor keamanan & desain rekomendasi *Crosssection* B 69
Gambar 38 Nilai faktor keamanan & desain rekomendasi *Crosssection* C 71

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Parameter *Rock Mass Rating* (RMR) 16
Tabel 2 Estimasi Nilai *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) batuan 17
Tabel 3 Tabel hubungan nilai RQD dengan kualitas massa batuan 20
Tabel 4 Data sifat fisik material batuan 53
Tabel 5 Data sifat fisik material *waste dump* dan *buttress* 54
Tabel 6 Data sifat mekanik material batuan 54
Tabel 7 Data sifat mekanik material *waste dump* dan *buttress* 55
Tabel 8 Data geometri pada penampang lereng *crosssection* A 57
Tabel 9 Data sifat fisik material pada penampang lereng *crosssection* A 58
Tabel 10 Data sifat mekanik material pada penampang lereng *crosssection* A .. 58
Tabel 11 Data geometri pada penampang lereng *crosssection* B 60
Tabel 12 Data sifat fisik material pada penampang lereng *crosssection* B 60
Tabel 13 Data sifat mekanik material pada penampang lereng *crosssection* B .. 61
Tabel 14 Data geometri pada penampang lereng *crosssection* C 62
Tabel 15 Data sifat fisik material pada penampang lereng *crosssection* C 63
Tabel 16 Data sifat mekanik material pada penampang lereng *crosssection* C .. 63
Tabel 17 Data geometri pada penampang lereng *crosssection* D 65
Tabel 18 Data sifat fisik material pada penampang lereng *crosssection* D 66
Tabel 19 Data sifat mekanik material pada penampang lereng *crosssection* D .. 66
Tabel 20 Data perubahan geometri lereng rekomendasi *crosssection* B 69
Tabel 21 Data perubahan geometri lereng rekomendasi *crosssection* C 71
Tabel 22 Data perubahan geometri lereng rekomendasi *crossection* B dan C 72

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 *Material Properties Waste* & *Buttress In-Pit Dump Seam* 28-29 79
Lampiran 2 *Material Properties* Batuan *In-Pit Dump Seam* 28-29 85
Lampiran 3 Hasil Analisis Kestabilan Desain Lereng *In-Pit Dump Pit* 303 88
Lampiran 4 Hasil Analisis Kestabilan Desain Lereng Rekomendasi *In-Pit Dump Crossection* B & C 92

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang merupakan syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S1). Keberhasilan dari suatu aktivitas tentu saja tidak lepas dari masalah yang dihadapi selama melaksanakannya, begitupun dalam penyusunan tugas akhir ini, akan tetapi dengan adanya arahan, bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, maka penyusunantugas akhir yang berjudul "Kestabilan Lereng *In-Pit Dum*p Dengan Metode *Limit Equibilirium* Pit 303 PT Pamapersada Nusantara" dapat diselesaikan dengan baik.

Maka dari itu, penulis ingin mengucapkan rasa hormat dan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, pentunjuk dan bimbingan baik secara langsung maupun tidak langsung. Terkhusus kepada PT Pamapersada Nusantara *site* Baya perusahaan tempat penulis melaksanakan Tugas Akhir. Bapak Khafidz Rahmawan dan Angling Putrawijaya selaku Pembimbing pada penelitian di Perusahaan, dan Bapak Aris Tandiarrang selaku Project Manager di PT Pamapersada Nusantara site Baya. Seluruh karyawan PT Pamapersada Nusantara khususnya *Engineering Department*.

Kemudian penulis juga ingin berterima kasih kepada Dr. Eng. Purwanto, ST., MT, selaku Pembimbing Utama sekaligus kepala Laboratorium Geomekanika dan Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, ST., MT selaku Pembimbing Pendamping yang dengan sabar meluangkan waktunya untuk mendidik dan mengarahkan penulis dalam penyusunan tugas akhir ini dari awal hingga selesai. Tidak lupa kepada Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, MT., dan Ibu Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. sebagai dosen penguji pada penelitian tugas akhir ini yang telah mengoreksi dan membantu penulis dalam memperbaiki kesalahan-kesalahan penulis dalam menyelesaikan laporan penelitian tugas akhir ini. Seluruh dosen serta staf administrasi Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang t membantu dan memudahkan penulis dalam segala urusan selama proses administrasi.

Kepada kedua orangtua saya Yacob Suleman dan Linda Sollu yang telah memberikan banyak dukungan moril dan materil selama kegiatan dan penyusunan laporan penelitian tugas akhir hingga selesai penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya. Lalu juga saudara/i (Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin Angkatan 2018) yang telah memberikan banyak dukungan, bantuan dan semangat kepada penulis. Penulis menyadari banyak kekurangan yang mungkin terdapat dalam laporan penelitian tugas akhir ini. Terlepas dari hal itu, penulis berharap bahwa laporan ini dapat memberikan manfaat bukan hanya untuk penulis sendiri tapi juga dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Makassar, Agustus 2023

Gregorio Samuel Itto

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara garis besar, terdapat dua metode penambangan, antara lain, tambang terbuka dan tambang bawah tanah. Eksplorasi dan eksploitasi umumnya batubara dilakukan dengan menggunakan metode tambang terbuka. Tambang terbuka mengacu pada penambangan di permukaan tanah yang membentuk lubang bukaan terbuka yang digali dari permukaan hingga ke masing-masing badan bijih & batubara di lokasi tambang terbuka, dan transportasi hubungan antara tanah dan segala mekanisme produksi. Rangkaian produksi ini membentuk sistem transportasi antara *pit* penambangan terbuka, *plant* pengolahan, disposal dan *stockpile* (Song et al, 2009).

Penambangan batubara dengan metode tambang terbuka membutuhkan area untuk membuang atau menyimpan material hasil penggalian *overburden* yang disebut sebagai *disposal/dump* sebagai kawasan pembuangan atau penampungan. Material *overburden* dalam jumlah besar dapat ditampung dengan dua metode yaitu, metode pertama ialah *external dumping*, dimana material tersebut diangkut ke tempat terpisah dari daerah produksi batubara. Metode lainnya adalah menampung *overburden* secara internal, di samping ruang yang terbentuk oleh proses pengambilan batubara yaitu *In-pit dumping*. Metode ini mengurangi masalah penggunaan lahan ekstra serta menurunkan biaya transportasi ekstra. Namun, beberapa masalah seperti ketidakstabilan yang disebabkan oleh curah hujan yang tinggi, getaran tanah yang terus menerus atau bahkan karena ketidakmampuan material timbunan untuk melawan gravitasi dapat menyebabkan masalah yang parah dan menghambat produksi tambang (Kainthola et al, 2011).

PT Pamapersada Nusantara *site* Baya menggunakan metode *in-pit dump* dalam pengolaan material *overburden* hasil penggalian batubara, serta menggunakan *counterweighting* untuk meningkatkan stabilitas *in-pit dump* untuk menyelesaikan masalah keterbatasan lahan didalam *pit* dengan lebih praktis. Penelitian ini dilakukan pada *Pit* 303 PT Pamapersada Nusantara *site* Baya, Adapun pemilihan Pit 303 pada penelitian kali ini karena pada *in-pit dump* 303 berdasarkan *monitoring*

yang dilakukan perusahaan didapati hasil analisis keadaan aktual lereng per bulan juni tahun 2022 dalam keadaan kritis.

Penelitian ini bertujuan untuk untuk mengetahui desain *in-pit dump* pada Pit 303 PT Pamapersada Nusantara dengan metode kesetimbangan batas (*limit equbilirium*) metode irisan Morgernstern-Price.Alasan pemilihan metode analisis kesetimbangan batas (*limit equbilirium*) karena analisisnya yang sederhana,akurat serta data yang dibutuhkan lebih sedikit dibanding metode lain. Pemilihan asumsi irisan Morgernstern-Price karena hasil analisisnya mempertimbangan kestimbangan setiap gaya-gaya normal dan momen gaya yang bekerja pada setiap irisan dari bidang kelongsoran sehingga analisisnya lebih menyeluruh dibanding metode lain. Selain itu pada penelitian ini juga akan dilakukan prosedur perancangan ulang (*redesign*) untuk mestabilkan lereng apabila hasil analisis menujukkan lereng yang dianalisis dalam keadaan kritis atau tidak stabil.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini yaitu:

1. Berapa nilai faktor keamanan lereng desain *in-pit dump* dengan metode Morgernstern-Price menggunakan program Rocscience Slide2?
2. Apa tindakan yang perlu dilakukan dalam perancangan ulang geometri lereng jika hasil dari analisis yang diperoleh nilai faktor keamanannya tidak sesuai dengan standar keamanan lereng?
3. Berapa nilai faktor keamanan (FK) lereng desain *in-pit dump* setelah proses perancangan ulang geometri lereng dengan metode Morgernstern-Price menggunakan program Rocscience Slide2?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai faktor keamanan lereng desain *in-pit dump* dengan metode Morgernstern-Price menggunakan program Rocscience Slide2.
2. Mengetahui tindakan yang perlu dilakukan dalam perancangan ulang geometri lereng jika hasil dari analisis yang diperoleh nilai faktor keamanan tidak sesuai dengan standar keamanan lereng.

3. Mengetahui nilai faktor keamanan (FK) lereng desain *in-pit dump* setelah proses perancangan ulang geometri lereng dengan metode Morgernstern-Price menggunakan program Rocscience Slide2.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharpakan dapat bermanfaat kedepannya sebagai sumber bahan pembelajaran dalam menambah wawasan mengenai cara mendesain desain lereng *in-pit dump* serta pengunaan *counterweight* yang stabil dan aman untuk meningkatkan kestabilan lereng serta menganalisis faktor keamaan dari lereng desain lereng *in-pit dump* serta *counterweight* yang telah didesain.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai faktor keamanan desain lereng *in-pit dump pit 303* PT Pamapersada Nusantara. Analisis kestabilan lereng pada penilitian ini dilakukan pada Pit 303 dengan alasan kondisi lereng serta data yang tersedia cukup untuk dilakukan analisis kestabilan lereng dengan metode *limit equbirilium*. Penelitian ini juga mencakup prosedur perancangan ulang dimana pada penelitian ini hanya menggunakan metode perubahan geometri lereng untuk meningkatkan kestabilan lereng, hal ini dikarenakan di lokasi penelitian sendiri perusahaan hanya menerapkan metode ini untuk meningkatkan kestabilan lereng.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lereng

Lereng adalah sebuah permukaan tanah yang terbuka membentuk sudut tertentu terhadap sumbu horizontal, atau bidang permukaan tanah yang memiliki dua elevasi yang berbeda dimana permukaan tanah tersebut membentuk sudut. Secara umum klasifikasi lereng terbagi atas dua yaitu lereng alami dan lereng buatan. Lereng buatan dapat dibagi menjadi tiga kategori yaitu lereng yang dibentuk dengan penggalian, lereng pada bendungan atau tanggul, serta lereng untuk pembuangan sampah (*waste disposal*) (Giani, 1992).

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 kemiringan ataupun penambahan dengan suatu konstruksi tertentu sehingga kestabilan dan kemantapan dari lereng alam tersebut benar-benar mengandalkan kestabilan internal yang terbentuk akibat sifat, karakterisitik, dan struktur tanah, serta bentuk alaminya (Rumansara, 2014).

Lereng buatan adalah lereng yang terbentuk akibat daerah galian ataupun daerah timbunan yang dibuat oleh manusia seusai perencanaan lereng sehingga stabil. Lereng buatan bisa berbentuk lereng yang dibat dengan penanganan konstruksi seperti penguatan lereng ataupun lereng buatan yang dibuat tanpa penangganan konstruksi dimana lereng buatan tersebut hanya mengandalkan kemiringan dan tinggi kritis berdasarkan karateristik tanah pembentuk lereng.

2.2 Keruntuhan Lereng

Keruntuhan lereng dapat terjadi pada hampir setiap kasus lereng alami atau lereng buatan secara lambat atau tiba-tiba dengan atau tanpa adanya tanda-tanda

sebelumnya. Penyebab utama terjadinya keruntuhan lereng adalah meningkatnya tegangan geser, menurunnya kuat geser pada bidang longsor atau keduanya secara simultan. Suatu beban yang dikerjakan pada suatu massa tanah akan selalu menghasilkan tegangan-tegangan dengan intensitas yang berbeda-beda di dalam zona berbentuk bola lampu (*bulb*) di bawah beban tersebut. Meninjau kekuatan tanah adalah hal pertama yang harus dilakukan. Hal ini dikarenakan beban yang bekerja pada massa tanah memerlukan dua pertimbangan (Pangemanan *et al.*, 1991):

1. Besarnya penurunan total
2. Kemungkinan terjadinya keruntuhan tanah dapat terjadi karena adanya suatu pergerakan rotasi pada tanah di bawah area yang mengalami pembebanan atau kadang-kadang berupa suatu keruntuhan yang merupakan hasil dari pergerakan atanah. Walaupun demikian, besarnya mungkin cukup untuk menyebabkan gangguan struktural yang cukup berarti pada struktur atas.

Proses keruntuhan lereng pada dasarnya merupakan proses bergeraknya tanah jika gaya mendorong pada tanah lebih besar daripada daya tahan tanah. Sekali gerakan telah dimulai, maka bentuk hubungan antara gaya dorong dan daya tahan pada tanah mungkin sangat berbeda dari suatu proses ke proses yang lainnya, sehingga perbedaan ini pada umumnya digunakan untuk mengklasifikasikan proses keruntuhan lereng (Das, 2010).

Pencegahan akan runtuhnya lereng biasanya dilakukan dengan pekerjaan penggalian (*excavation*) dengan tujuan mengurangi tinggi lereng, mengurangi kemiringan lereng, mengupas material pada lereng yang dianggap berpotensi menyebabkan keruntuhan, pembuatan jenjang, dan mengunakan teknik penggalian yang dapat meminimalisir kerusakan massa batuan (Giani, 1992).

2.3 Faktor Faktor yang Mempengaruhi Keruntuhan Lereng

Menurut Terzaghi (1987) penyebab terjadinya longoran dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

1. Penyebab eksternal

   Faktor-faktor eksternal biasanya menimbulkan naiknya gaya geser yang bekerja sepanjang bidang runtuh, antara lain yaitu;

a. Perubahan geometri lereng.
b. Beban dinamik karena *dump truck* (*traffic loading*).
c. Gaya vibrasi yang ditumbulkan oleh gempa bumi atau ledakan.
d. Penurunan muka air tanah secara mendadak.

2. Penyebab Internal

Faktor-faktor internal yang dapat menyebabkan turunnya kekuatan geser material, antara lain, yaitu;

a. Pelapukan.
b. Keruntuhan progresif.
c. Hilangnya sementasi material.
d. Berubahnya struktur material.

Menurut Varnes (1978) terdapat sejumlah penyebab internal maupun eksternal yang dapat menyebabkan naiknya gaya geser sepanjang bidang runtuh maupun meyebabkan turunnya kekuatan geser material, dan kedua hal tersebut juga dapat dipengaruhi secara serentak. Beberapa tipe longsoran memiliki berbagai macam kondisi yang dapat memicu kondisi lereng menjadi tidak stabil dan ada beberapa perubahan pada lereng yang dapat memicu terjadinya longsoran yang secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi empat kondisi material baik itu pada batuan maupun tanah, proses geomorfologi, perubahan sifat fisik dari lingkungan dan perubahan yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Kestabilan lereng pada lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut (Baskari, 2008):

1. Penyebaran batuan

Jenis batuan yang terdapat di daerah penyelidikan harus diketahui, demikian juga penyebaran serta hubungan antar batuan. Hal ini perlu dilakukan karena sifat-sifat fisik dan mekanis suatu batuan berbeda 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 landau. Erosi yang intensif banyak

dijumpai singkapan batuan menyebabkan pelapukan yang lebih cepat. Batuan yang lapuk mempunyai kekuatan yang rendah sehingga kestabilan lereng menjadi berkurang.

3. Geometri lereng

Geometri lereng mencakup tinggi lereng dan sudut kemiringan lereng. Kemiringan dan tinggi suatu lereng sangat memengaruhi kestabilannya. Semakin besar kemiringan dan tinggi suatu lereng maka kestabilannya semakin kecil. Muka air tanah yang dangkal menjadikan lereng sebagian besar basah dan batuannya memiliki kandungan air yang tinggi, sehingga menyebabkan kekuatan batuan menjadi rendah dan lereng lebih mudah longsor.

4. Struktur geologi

Struktur geologi yang sangat memengaruhi kestabilan lereng adalah bidang-bidang sesar, perlapisan dan rekahan. Hal ini menyebabkan struktur regional dan lokal perlu diperhatikan dalam analisis. Struktur batuan tersebut merupakan bidang-bidang lemah dan sekaligus sebagai tempat merembesnya air sehingga batuan menjadi lebih mudah longsor. Oleh karena itu dalam analisa kita perlu memperhatikan struktur regional dan lokal. Saat mendesain lereng haruslah mempertimbangkan arah atau orientasi bidang lemah tersebut. Arah lereng yang sejajar dengan bidang lemah akan sangat mungkin untuk mengalami kelongsoran dibanding dengan arah lereng yang berlawanan atau tegak lurus terhadap arah bidang lemah. Hal ini disebabkan karena orientasi bidang lemah yang berlawanan dengan orientasi lereng akan menahan gaya normal yang bekerja pada lereng. Adanya bidang-bidang lemah ini yang mempunyai arah atau oreintasi, panjang, spasi dan kekuatan dari material pengisinya akan menentukan model dari potensial longsoran yang terjadi.

5. Iklim

Iklim memengaruhi temperatur dan jumlah hujan atau curah hujan, sehingga nantinya akan berpengaruh pula pada proses pelapukan. Daerah tropis yang panas, lembab dengan curah hujan tinggi akan menyebabkan proses pelapukan batuan jauh lebih cepat daripada daerah subtropis. Kondisi ini menyebabkan ketebalan tanah di daerah tropis lebih tebal dan kekuatannya lebih rendah dari batuan segarnya.

6. Tingkat pelapukan

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

7. Hasil kerja manusia

Manusia juga memberikan pengaruh terhadap kesatbilan suatu lereng. Misalnya suatu lereng yang awalnya mantap, namun karena manusia menebangi pohon pelindung, pengolahan tanah yang tidak baik, saluran air yang tidak baik, penggalian/ tambang, dan lainnya menyebabkan lereng tersebut menjadi tidak mantap, sehingga erosi dan longsoran mudah terjadi.

8. 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 isi (*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.

9. Sifat mekanik batuan

Sifat mekanik dari suatu batuan didapatkan dengan pengujian yang destruktif

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 Tipe Tipe Longsoran

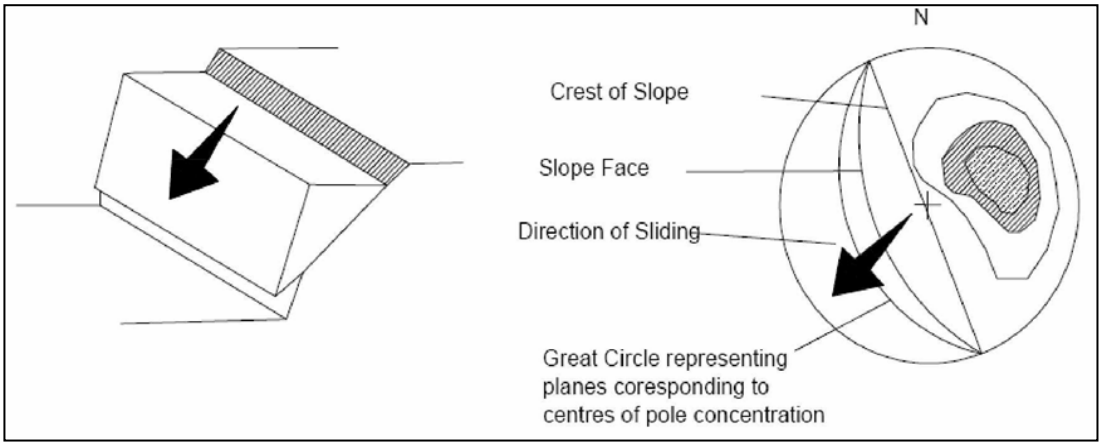
Longsoran biasanya terjadi dengan beberapa bentuk dan cara, dan ternyata hal ini sangat penting untuk membuat analisa kestabilan lereng. Longsoran yang terjadi pada batuan mempunyai mekanisme dan bentuk geometri yang berbeda dengan batuan keras (Umrao, et.al, 2011).

Hoek & Bray (1981) telah mengklasifikasikan jenis – jenis dari longsoran yang umum dijumpai khususnya pada tambang tambang terbuka dalam 4 jenis atau tipe yaitu longsoran bidang (*plane failure*), longsoran baji (*wedge failure*), longsoran guling (*toppling failure*), longsoran busur (*circular failure*).

1. Longsoran bidang

   Longsoran bidang adalah longsoran yang bidang luncurnya melalui suatu bidang dianamakan lognsoran bidang. Bidang luncur tersebut dapat berupa kekar, sesar, dan bidang perlapisan. Syarat – syarat terjadinya longsoran bidang sebagai berikut:

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

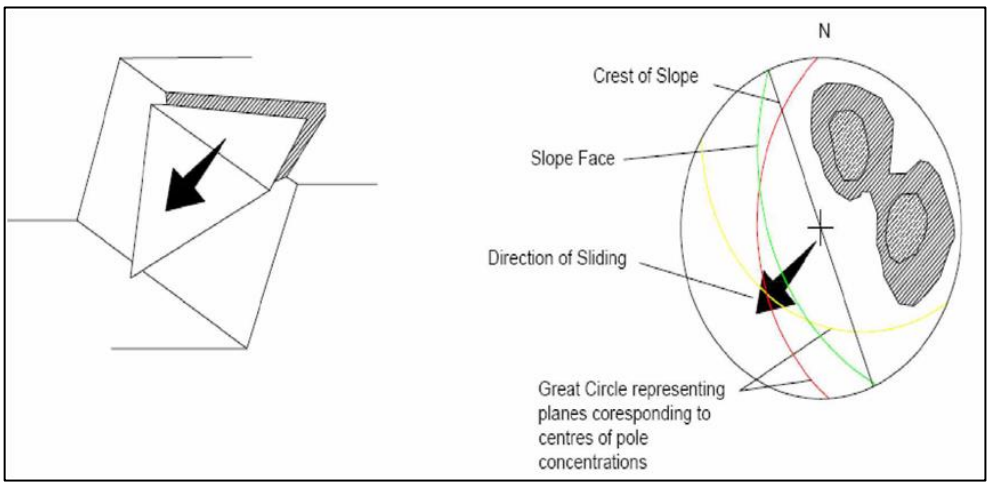


Gambar 1 Longsoran bidang (Hoek *and* Bray, 1981)

2. Longsoran baji

Longsoran baji adalah longsoran yang bidang luncurnya terbentuk akibat perpotongan lebih dari satu bidang lemah. Bidang lemah tersebut dapat berupa sesar, kekar dan bidang perlapisan. Dimana sudut perpotogna bidang bidang lemah tersebut harus lebih besar dari sudut geser dalamnya. Longsoran ini umumnya terjadi pada lereng yang tersusun dari material batuan. Longsoran baji dapat terjadi 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 penujaman garis potong harus lebih kecil daripada sudut kemiringan lereng.
c. Bentuk longsoran dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dan kedua bidang lemah.
d. Bentuk longsoran dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dari kedua bidang lemah.



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

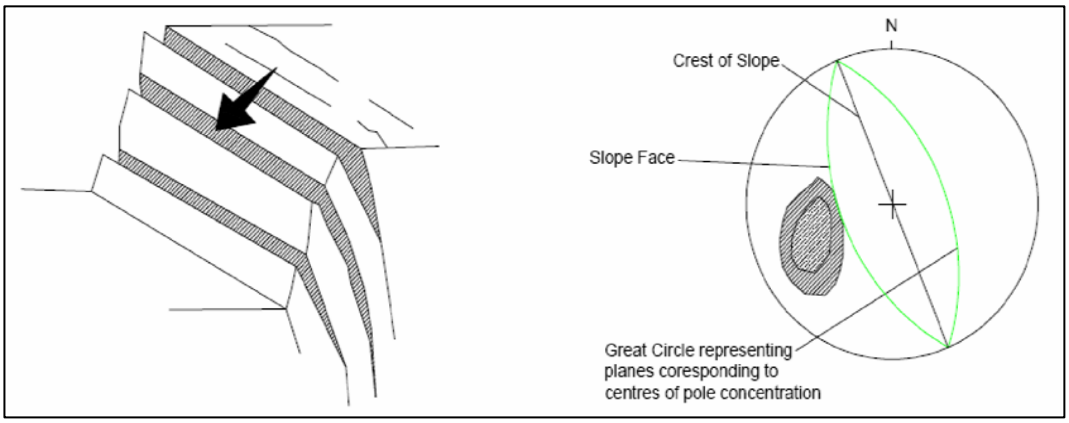
3. Longsoran guling

Longsoran guling biasanya terjadi pada batuan keras yang mempunyai pola kekar yang hampir vertikal. Syarat terjadinya longsoran ini adalah arah kemiringan lereng harus berlawanan dengan arah bidang lemahnya. Longsoran ini dapat berbentuk blok atau bertingkat. Kondisi lereng yang menggelincir atau meluncur

pada umumnya ditentukan oleh besar sudut geser dalam dan kemiringan bidang luncurnya, tinggi blok dan lebar blok yang terletak pada bidang miring.

Berdasarkan bentuk dan proses menggulingnya, longsoran guling dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu:

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



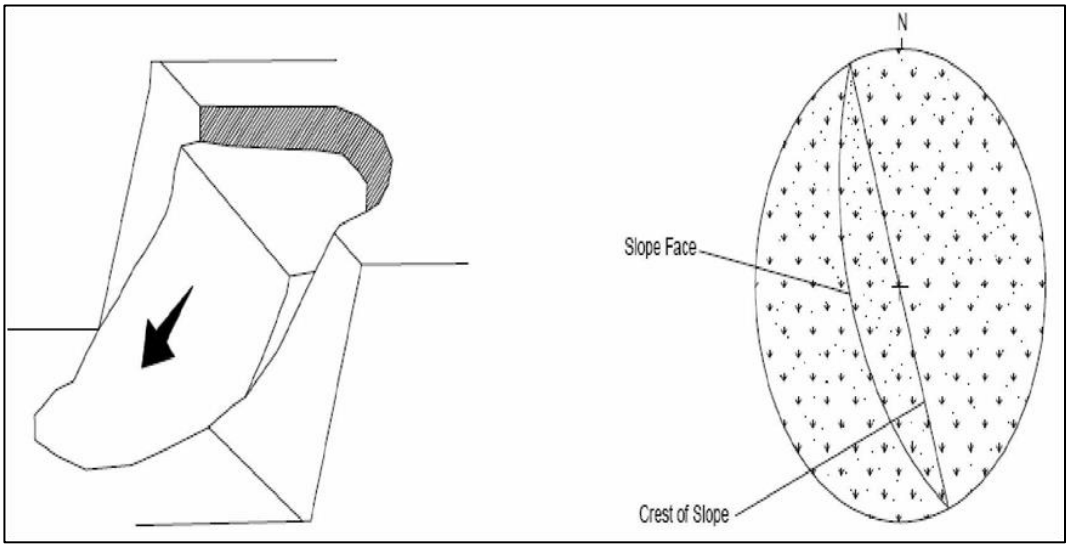
Gambar 3 Longsoran guling (Hoek *and* Bray, 1981)

4. Longsoran busur

Longsoran busur adalah longsoran yang bidang luncurnya berupa busur dan paling umum terjadi dialam terutam pada batuan yang lunak atau tanah. Longsoran ini merupakan longsoran 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.

Pada tanah pola strukturnya tidak menentu dan bidang gelincir bebas mencari posisi yang paling kecil hambatannya. Longsoran busur akan terjadi jika partikel individu pada suatu tanah atau massa batuan sangat kecil dan tidak saling mengikat. Oleh karena itu batuan yang telah lapuk cenderung bersifat seperti tanah. Tanda pertama suatu longsoran busur biasanya berupa suatu rekahan tarik permukaan atas atau muka lereng, kadang-kadang disertai dengan menurunnya

sebagian permukaan atas lereng yang berada disamping rekahan. Penurunan ini menandakan adanya gerakan lereng yang pada akhirnya akan terjadi kelongsoran lereng, hanya dapat dilakukan apabila belum terjadi gerakan lereng tersebut.



Gambar 4 Longsoran busur (Hoek *and* Bray, 1981)

2.5 Faktor Keamanan Lereng (*Safety Factor*)

Masalah kestabilan lereng di dalam suatu pekerjaan yang melibatkan kegiatan penggalian maupun penimbunan merupakan masalah penting karena melibatkan keselamatan manusia, peralatan, dan bangunan yang ada di sekitar lereng tersebut. Di alam, tanah maupun batuan umumnya berada dalam setimbang (*equilibrium*), artinya keadaan distribusi tegangan pada tanah atau batuan tersebut dalam keadaan stabil. Apabila tanah ataupun batuan tesebut dikenakan suatu kegiatan, seperti penggalian, penurunan, penimbunan, pengangkutan, erosi atau aktivitas lain yang membuat terganggunya kesetimbangan, tanah ataupun batuan tersebut akan berusaha mencapai keadaan setimbang baru dengan cara melepaskan beban terutama dalam bentuk longsoran.

Kemantapan suatu lereng dapat dinyatakan dengan suatu nilai faktor keamanan (FK). Faktor keamanan merupkan 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 pengggerak (*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):

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

Nilai faktor keamaan secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Nilai FK < 1, lereng dalam keadaan tidak stabil atau tidak mantap.
2. Nilai FK = 1, lereng dalam keadaan seimbang, namun dalam berpotensi terjadi longsor jika mendapat sedikit gangguan.
3. Nilai FK > 1, lereng dalam keadaan stabil atau mantap.

Ada beberapa persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung nilai faktor keamanan. Persamaan-persamaan yang sering digunakan untuk menentukan nilai faktor keamanan diasumsikan nilai faktor keamanan tidak akan berubah pada bidang-bidang diskontinu, dan dianggap berhubungan dengan kesetimbangan momen dan/atau kesetimbangan gaya (Cheng dan Lau, 2008):

1. Kesetimbangan Momen

Umumnya digunakan untuk analisis momen inersia, dengan mempertimbangkan bidang gelincirnya, maka persamaan kesetimbangan momen sebagai berikut:

$$M = \frac{M_r}{Md} \quad (2)$$

Keterangan:

F = Kesetimbangan momen

M_r = Jumlah dari momen panahan (*resisting moment*)

M_d = Jumlah dari momen penggerak (*driving moment*)

Titik pusat efektif digunakan sebagai pusat momen, seperti pada longsoran busur, pusat lingkaran menjadi pusat momen. Pada bidang gelincir *noncircular*, titik pusat harus dipertimbangkan.

2. Kesetimbangan Gaya

Kestimbangan gaya diimplikasikan pada keruntuhan sejajar maupun rotational termasuk bidang gelincir planar, atau bidang gelincir poligonal. Persamaan kesetimbangan gaya sebagai berikut:

$$F \ \frac{F_r}{Fd} \quad (3)$$

Keterangan:

F = Kesetimbangan gaya

F_r = Jumlah dari gaya panahan (*resisting force*)

F_d = Jumlah dari gaya penggerak (*driving force*)

Geotechnical Engineering Office (GEO) menentukan nilai dari faktor keamanan didasarkan pada pertimbangan dari periode hujan, efek keruntuhan lereng dan pengetahuan tentang perilaku jangka panjang dari material penyusun lereng. Nilai standar factor keamanan lereng yang stabil ialah 1,2.

Pembuatan geometri lereng dengan dimensi tertentu yang dilakukan dalam aktivitas penggalian tambang terbuka adalah merupakan gangguan terhadap keseimbangan yang bisa menyebabkan terjadinya kelongsoran. Bentuk dari gangguan tersebut merupakan proses dari gerakan tanah atau batuan mulai rayapan (*creep*) sampai longsoran (*failure*).

2.6 Klasifikasi Massa Batuan RMR & GSI

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

2.6.1 Klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR)

Bieniawski pada tahun 1976 mempublikasikan suatu klasifikasi massa batuan yang disebut Klasifikasi Geomekanika atau lebih dikenal dengan *Rock Mass Rating* (RMR). Setelah bertahun-tahun, klasifikasi massa batuan ini telah mengalami penyesuaian dikarenakan adanya penambahan data masukan sehingga Bieniawski membuat perubahan nilai rating pada parameter yang digunakan untuk penilaian klasifikasi massa batuan tersebut. Metode RMR ini memasukkan lima parameter utama (Tabel 2.1), yaitu:

1. *Uniaxial Compressive Strength* atau *Point Load Strength Index*.
2. *Rock Quality Designation* (RQD).
3. *Joint spacing* atau spasi bidang diskontinu.
4. Kondisi bidang diskontinu.

5. Kondisi air tanah.

Parameter-parameter di atas diberi bobot masing-masing sesuai pada Tabel 1 dan kemudian dijumlahkan untuk memperkirakan kualitas massa batuan pada suatu daerah.

Tabel 1 Parameter *Rock Mass Rating* (RMR)

Parameter		**Pembobotan**						
UCS	Nilai (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	bobot	15	12	7	4	2	1	0
RQD	Nilai (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Bobot	20	17	13	8	3		
Jarak	Nilai (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<0,06		
Kekar	Bobot	20	15	10	8	5		
Kondisi Kekar	Deskripsi	permukaan sangat kasar, tidak menerus, tidak terpisah, dinding tidak	permukaan agak kasar, pemisah <1mm, dinding agak lapuk	Permukaan agak kasar, pemisah <1mm, dinding sangat lapuk	Permukaan slickenside d, gouge mm, pemisah 5 mm, menerus	gouge <5>5mm, pemisah 1->5mm, menrus	lunak	
	Bobot	30	25	20	10	0		
Air Tanah	Deskripsi	Kering	lembab	Basah	Menetes	Mengalir		
	Bobot	15	10	7	4	0		

Sumber: Bieniawski (1989)

Penjelasan lebih terperinci tentang kelima parameter yang dipakai Bieniawski dalam sistem klasifikasinya adalah sebagai berikut:

1. *Uniaxial Compresssive Strength* (UCS)

Kekuatan batuan utuh (*intact rock*) dalam RMR dinyatakan dengan *Uniaxial Compressive Strength* (UCS). UCS merupakan kekuatan dari batuan utuh yang diperoleh dari hasil uji kuat tekan uniaksial. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mesin tekan untuk menekan sampel batuan pada permukaan sampel dari satu arah. Akan tetapi, apabila tidak dilakukan pengujian laboratorium, kita

dapat menggunakan nilai UCS dengan mengestimasi nilainya berdasarkan uji kekuatan fisik dilapangan dengan menggunakan palu geologi dan pisau. Penentuan nilai estimasi UCS dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2 dibawah.

Tabel 2 Estimasi Nilai *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) batuan

Grade (Grade by Brown, 1981)	***Term***	**UCS (Mpa)**	***Point Load Index* (Mpa)**	***Field estimate of strength***	***Examples***
R6	*Extremely Strong*	>250	>10	*specimen can only be chipped witha geological hammer*	*fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite*
R5	*Very Strong*	100-250	4-10	*specimen requires many blows with a geological hammer to fracture it*	*amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestones, marble,*
R4	*Strong*	50-100	2-4	*specimen requires mere than one blow of a geological hammer to fracture it*	*limestones, marble, phyllite, sandstone, schist, shale*
R3	*Medium Strong*	25-50	1-2	*cannot be scrapped or peeled with pocket knife, can befractured with a single blow from geological hammer*	*claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone*

Grade (Grade by Brown, 1981)	***Term***	**UCS (Mpa)**	***Point Load Index* (Mpa)**	***Field estimate of strength***	***Examples***
R2	*Weak*	5-25	*Point load tests on rocks with uniaxial compressive strength below 25 Mpa are likely yield highly ambiguous result*	*can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by a firm blow with a point of geological hammer*	*chalk, rocksalt, potash*
R1	*Very Weak*	1-5		*blow with a point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife*	*highly weathered or altered rock*
R0	*Extremely Weak*	0,25		*indented by thumbnail*	*stiff fault gouge*

Sumber: Hoek et al (2002)

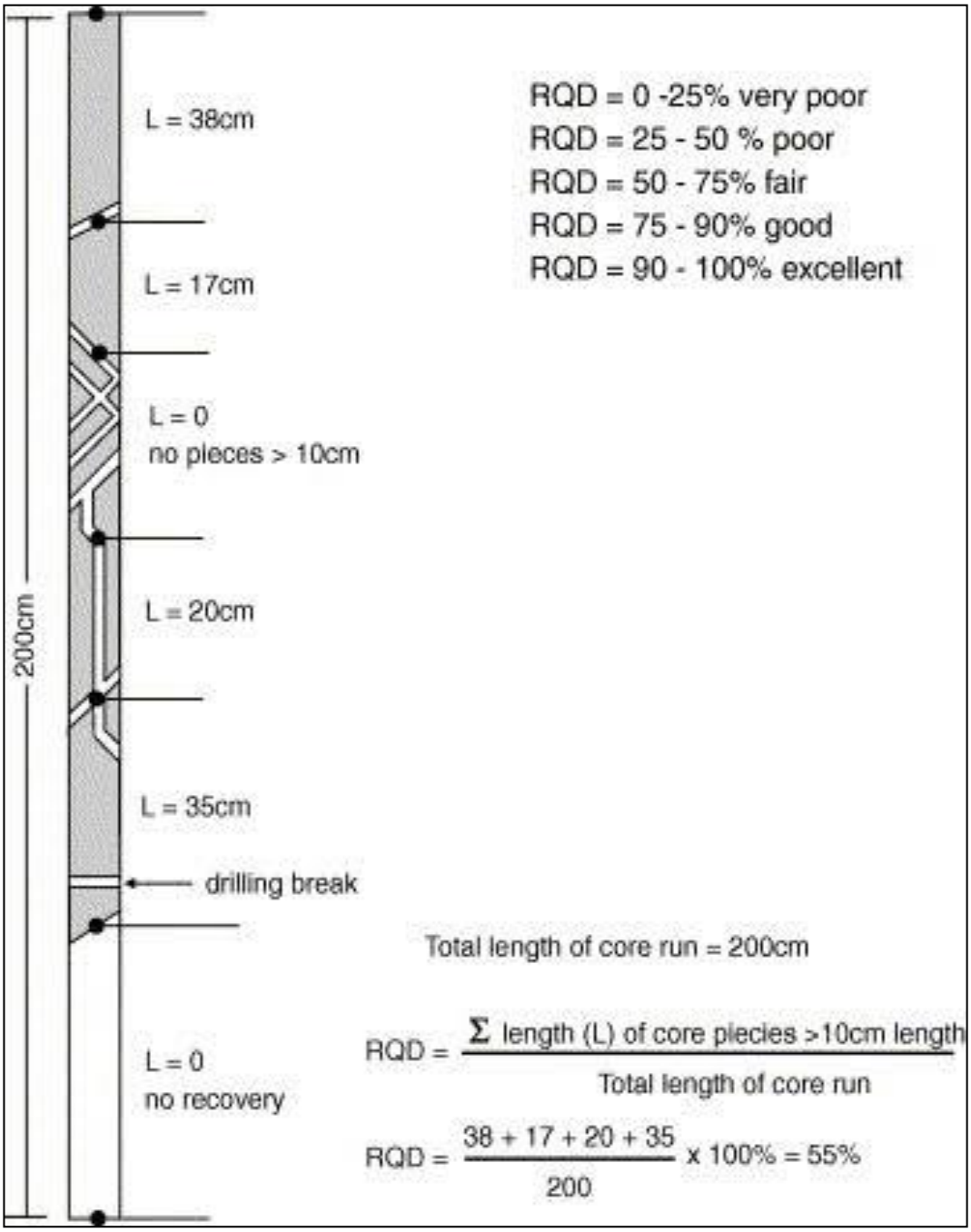
2. *Rock Quality Designation* (RQD)

RQD merupakan persentasi dari perolehan inti bor (*core*) yang secara tidak langsung didasarkan pada jumlah bidang lemah dan jumlah bagian yang lunak dari massa batuan yang diamati dari inti bor (*core*). Hanya bagian yang utuh dengan panjang lebih dari 100mm (4 inci) yang dijumlahkan kemudian dibagi nilai panjang total pengeboran (*core run*).

Namun jika menggunakan sistem *scanline*, nilai RQD tidak dapat langsung ditentukan dari rumus di atas, terlebih dahulu harus ditentukan frekuensi diskontinuitas. Frekunsi diskontinuitas merupakan perbandingan antara jumlah dari

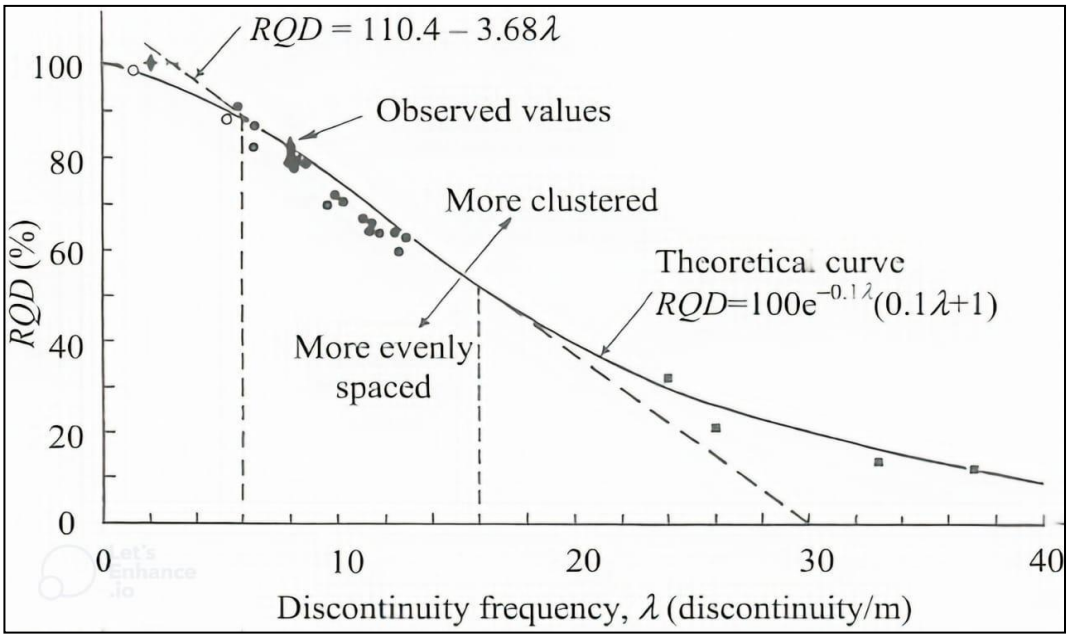
bidang diskontinuitas dalam satu *scanline* dengan panjang *scanline*.

$$Frekuensi = \frac{Jumlah\ Diskontinuias}{Panjang\ Scanline} \quad (4)$$



Gambar 5 Perhitungan nilai RQD per 100 mm (4 inci) *core run* (Deere et al, 1989)

Setelah diketahui nilai frekuensi diskontinuitas, nilai tersebut langsung dapat diplot pada grafik di bawah ini.



Gambar 6 Grafik hubungan antara RQD dan frekuensi bidang diskontinu (Hudson,1997)

Kualitas batuan dapat diklasifikasikan berdasarkan nilai RQD-nya. Keterangan mengenai pengelompokkan kualitas massa batuan berdasarkan nilai RQD dapat kita lihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Tabel hubungan nilai RQD dengan kualitas massa batuan

RQD (%)	**Kualitas Batuan**	***Rating***
<25	sangat buruk (*very poor*)	3
25-50	buruk (*poor*)	8
50-75	sedang (*fair*)	13
75-90	baik (*good*)	17
90-100	sangat baik (*very good*)	20

Sumber: Deere et al (1989)

3. Jarak antara kekar (*joint spacing*)

Jarak antar (spasi) kekar merupakan jarak tegak lurus antara kedua kekar berurutan sepanjang garis pengukuran yang dibuat dengan rentang jarak yang telah ditentukan.

4. Kondisi kekar (*joint condition*)

Kondisi bidang diskontinuitas ditentukan dari deskripsi tiap bidang diskontinuitas, berupa tingkat pelapukan, kekasaran permukaan bidang diskontinuitas, kemenerusan bidang diskontinuitas, lebar bukaan, dan material pengisi bidang diskontinuitas.

5. Kondisi air tanah (*groundwater condition*)

Kondisi airtanah yang dimaksudkan adalah kondisi air tanah pada rentang areah pengukuran dan kekar yang akan diidentifikasikan kedalam lima kondisi yaitu; kering (*completely dry*), lembab (*damp*), basah (*wet*), terdapat tetesan air pada permukaan massa batuan (*dripping*), dan terdapat aliran air pada permukaan massa batuan (*flowing*).

2.6.2 Klasifikasi *Geological Strength Index* (GSI)

Kekuatan dari massa batuan yang 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 permukaanya 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 7.

Parameter-parameter yang menggambarkan karakteritik kekuatan massa batuan setelah nilai GSI diperoleh, dapat dihitung dengan persamaan 2.5 hingga 2.7:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (5)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{5}}\right) \quad (7)$$

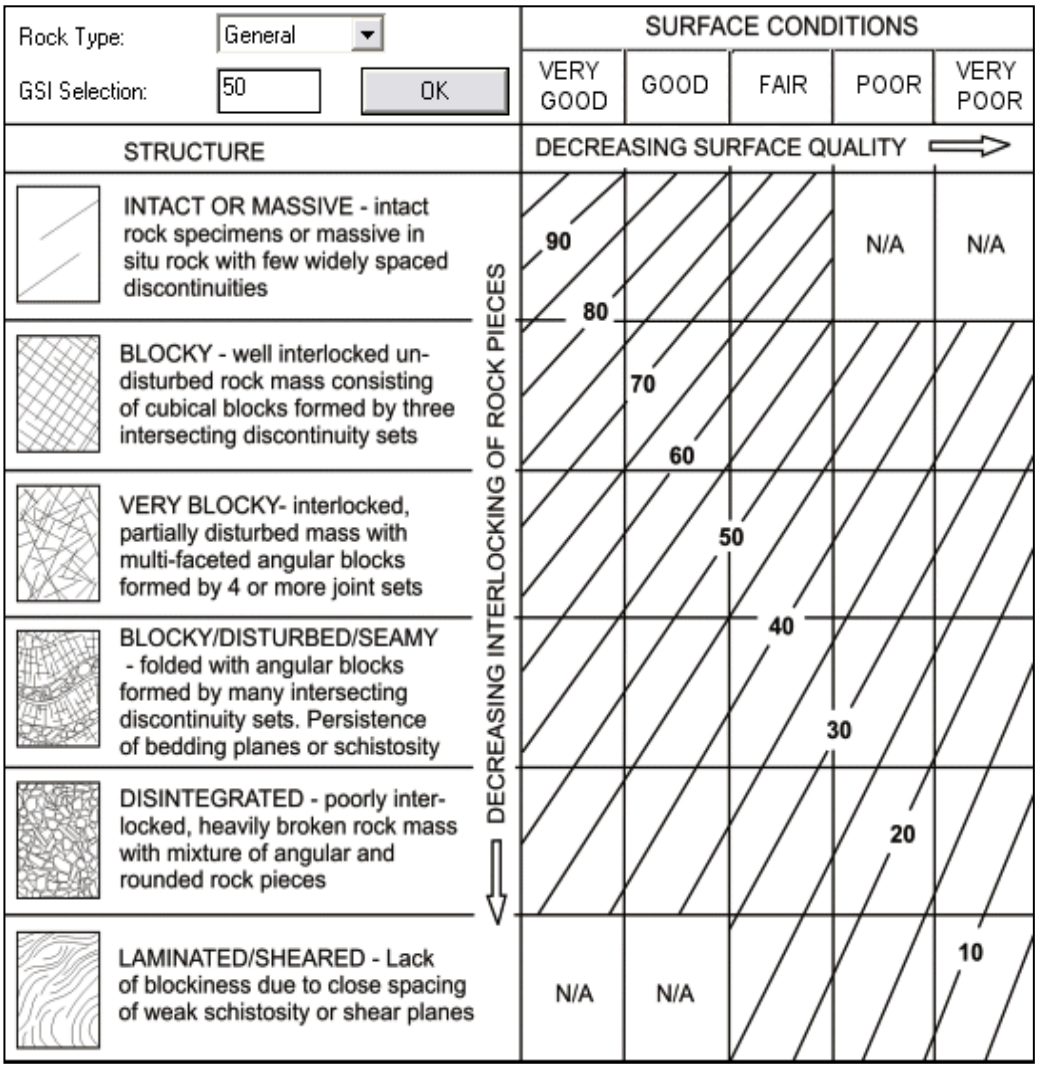
Nilai D adalah faktor kerusakan (*disturbance factor*) yang tergantung kepada derajat kerusakan massa batuan yang disebabkan oleh peledakan maupun pelepasan tegangan, mi adalah nilai intact rock parameter Untuk GSI>25, nilai GSI tersebut dapat diperkirakan dari nilai RMR89 dengan rumus GSI = RMR89 - 5, dimana nilai RMR89 ditetapkan untuk rating muka air tanah adalah 15 dan arah bidang diskontinu adalah 0. Tegangan normal dan tegangan geser dihitung dengan persamaan yang berikut:

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cdot \frac{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} - 1}{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} - 1} \quad (8)$$

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3') \frac{\sqrt{d\sigma_1'/d\sigma_3'}}{d\sigma_1'/d\sigma_3'+1} \quad (9)$$

dimana:

$$\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} = 1 + am_b\,(m_b\sigma_3'/\,\sigma_{ci}\; + s)^{a-1} \quad (10)$$



Gambar 7 Grafik untuk memperkirakan GSI (Hoek et al, 1998)

Tegangan utama maksimum (σ_1') sesuai dengan tegangan utama minumum (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_b, s dan a)

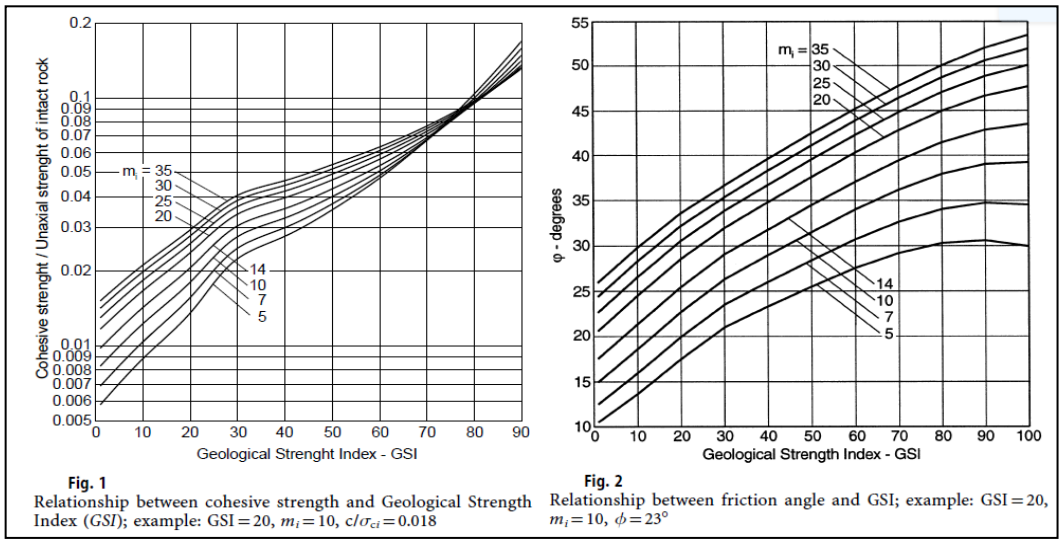


Fig. 1
Relationship between cohesive strength and Geological Strength Index (*GSI*); example: GSI = 20, $m_i = 10$, $c/\sigma_{ci} = 0.018$

Fig. 2
Relationship between friction angle and GSI; example: GSI = 20, $m_i = 10$, $\phi = 23°$

Gambar 8 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 diperhatiakan adalah sebagai berikut:

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

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}' \left[m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}'} + s \right]^a \quad (11)$$

2. Parameter material mi bergantung pada jenis batuan (beku, malihan, atau sedimen) yang ditentukan pada Gambar 9. Kisaran nilai mi didapatkan untuk setiap material yang bergantung pada granuralitas dan *interlocking* pada struktur kristal dalam batuan. Nilai mi 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:

$$m_b = mi\ exp[(GSI - 100)/28] \quad (12)$$

$$s = \exp[(GSI - 100)/9] \quad (13)$$

$$a = 0{,}5 \quad (14)$$

4. Pemilihan parameter untuk GSI < 25 ,diberikan ketentuan:

$$s = 0 \quad (15)$$

$$a = 0{,}65 - (GSI/\ 200) \quad (16)$$

	Texture			
	Coarse	**Medium**	**Fine**	**Very Fine**
Sedimentary	**Conglomerates (21 ± 3)** **Breccias (19 ± 5)** **Crystalline limestone (12 ± 3)**	**Sandstones (17 ± 4)** **Sparitic limestone (10 ± 2)** **Gypsom (8 ± 2)**	**Siltstones (7 ± 2)** **Greywackes (18+3)** **Micritic limestone (9 ± 2)** **Anhydrite (12 ± 2)**	**Claystones (4 ± 2)** **Shales (6 ± 2)** **Marls (7 ± 2)** **Dolomite (9 ± 3)** **Chalk (7 ± 2)**
Metamorphic	**Marble (9 ± 3)** **Migamatite (29 ± 3)**	**Hornfels (19 ± 4)** **Metasandstone (19 ± 3)** **Amphibiolites (26 ± 6)** **Schists (12 ± 3)**	**Quartzite (20 ± 3)** **Gneiss (28 ± 5)** **Phyllites (7 ± 3)**	**Slates (7 ± 4)**
Igneous	**Granite (32 ± 3)** **Granodiorit (29 ± 3)** **Gabro (27 ± 3)** **Norite (20 ± 5)** **Porphyries (20 ± 5)** **Agglomerate (19 ± 5)**	**Diorite (25 ± 5)** **Dolerite (16 ± 5)** **Rhyolite (25 ± 5)** **Andesite (25 ± 5)** **Breccia (19 ± 5)**	**Diabase (15 ± 5)** **Dacite (25 ± 3)** **Basalt (25 ± 5)** **Tuff (13 ± 5)**	**Peridotite (25 ± 5)** **Obsidian (17 ± 5)**

Gambar 9 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 terkaitdengan tegangan utama maksimum efektif (σ_1') dalam persamaan (2.11). Nilai-nilai σ_1' dan σ_3' yang berpasangan kemudian diplot (menggunakan lingkaran Mohr), untuk mendapatkan parameter kuat geser ekivalen c' dan ϕ'. Metode ini dapat juga digunakan untuk evaluasi kekuatan batuan utuh (GSI=100) maupun batuan patahan. Nilai rata-rata σ_3 yang representatif telah digunakan untuk perkiraan secara cepat. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan solusi grafik perkiraan untuk pemilihan c'lσ_u normal dan sudut geser secara langsung dari GSI dan konstanta material mi, seperti diperlihatkan dalam Gambar 8.

2.7 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 permukaaan 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).

2.7.1 Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown

Kriteria keruntuhan Hoek-Brown pertama kali dikembangkan untuk analisa terowongan pada massa batuan terkekarkan didefinisikan dengan persamaan (17).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}' \left[m_b \frac{\sigma_s}{\sigma_s} + s \right]^a \quad (17)$$

adalah tegangan efektif maksimum dan minimum pada saat runtuh, mb, s dan a adalah konstanta yang tergantung kepada karakteristik massa batuan, dan od adalah nilai kuat tekan batuan utuh. Hoek (1990) mendefenisikan 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 dujabarkan menggunakan persamaan (18):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}' \left[m_b \frac{\sigma_s}{\sigma_s} + 1 \right]^{0,5} \quad (18)$$

2.7.2 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 mencocokan 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 19 dan 20 berikut:

$$\phi' = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b(s+m_b a_{sn}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b a_{sn}')^{a-1}}\right] \quad (19)$$

$$c' = \frac{a_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b a_{sn}'](s+m_b a_{sn}')^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b a_{sn}')^{a-1})/[(1+a)(2+a)]}} \quad (20)$$

Dimana:

$$\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max}/\sigma_{ci} \quad (21)$$

Nilai dari σ'_{3max} dapat dicari dengan menggunakan persamaan 22 dan 23:

$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0{,}47\ (\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma m})^{-0,94}$, untuk terowongan dimana H = kedalaman (22)

$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0{,}72\ (\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma m})^{-0,91}$, untuk terowongan dimana H = tinggi lereng (23)

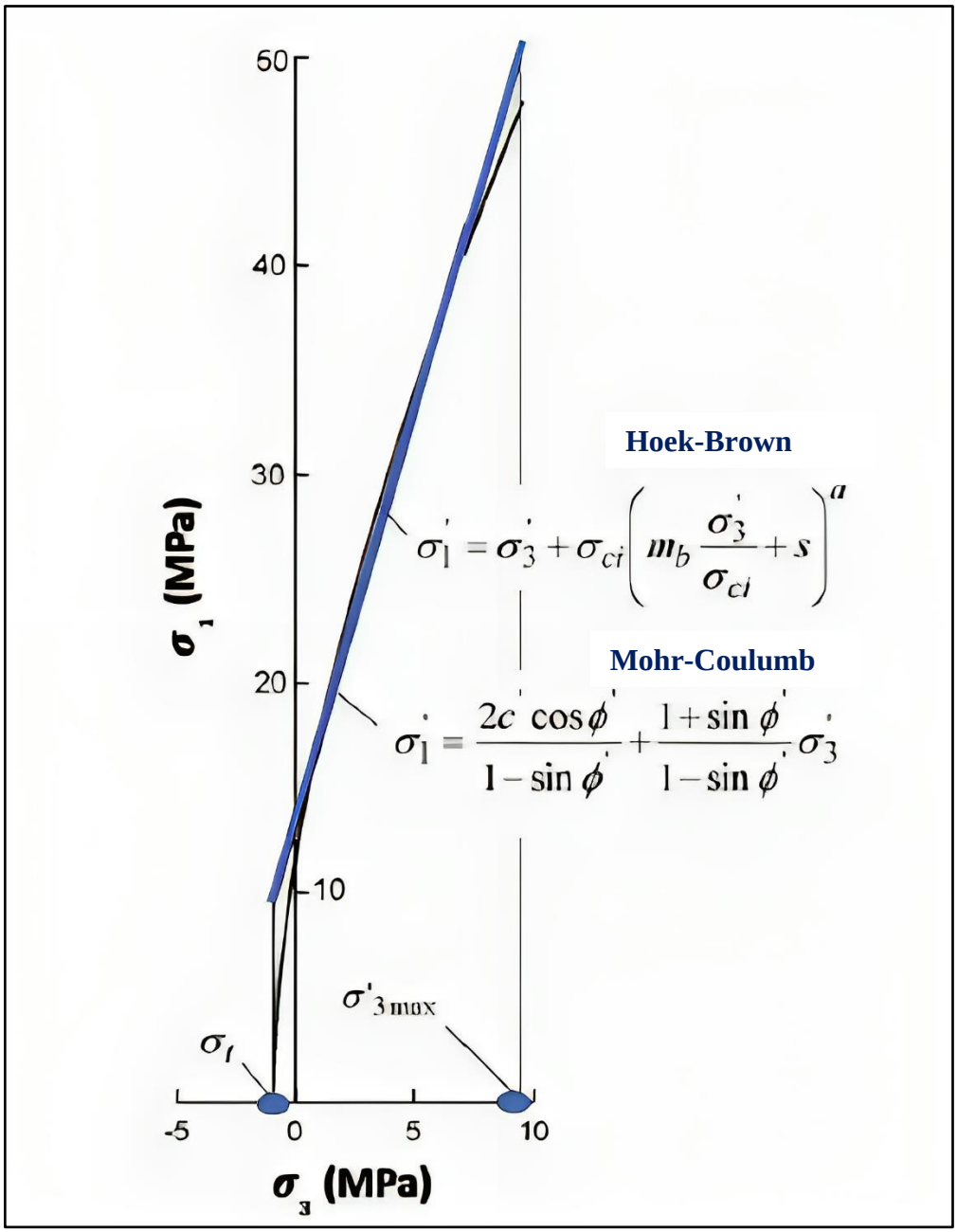
σ'_{cm} adalah kekuatan massa batuan global (*global strength*) yang dicari dengan persamaan 24 berikut:

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c'cos\phi'}{1-sin\phi'} \text{ atau } \sigma'_{cm} = \sigma_{ci}\frac{m_b+4s-a(m_b-8s)(m_b/4+s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (24)$$

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulumb dapat dituliskan setelah kita terlebih dahulu mengidentifikasi nilai dari semua parameter Mohr-Coulumb diperoleh, menggunakan persamaan 25 dan 26.

$$\tau = c' + \sigma_n tan\phi' \quad (25)$$

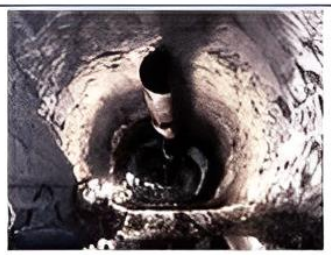
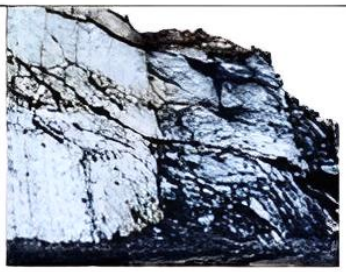
$$\sigma'_1 = \frac{2c'cos\phi'}{1-sin\phi'} + \frac{1+sin\phi'}{1-sin\phi'}\,\sigma'_3 \quad (26)$$



Gambar 10 Kurva hasil perhitungan kriteria keruntuhan Hoek-Brown untuk berbagai nilai tegangan utama maksimum-minimum (Hoek et al, 2002)

2.7.3 *Disturbance factor*

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

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excelent quality controlled blasting or excavation by a road-header or tunnel boring machine result in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = O
	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 with no invert.
	Poor control of drilling alignment, charge design and detonation sequencing result 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 ± 2m into the surrounding rock mass.
	Small scale blasting in civil engineering slopes result 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 presplit 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 sloes as due primarily to stress relief.	Case 1 : D = 1.0 for production blasting Case 2 : D = 0.7 for mechanical excavation.

Gambar 11 Estimasi nilai *disturbance factor* lereng (Hoek et al, 2002)

Kerusakkan 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 tersebut. Hoek et al (2002) kemudian memperkenalkan faktor kerusakan massa batuan (*disturbance factor*) untuk mengakomodasi hal tersebut. *disturbance factor* (d) merupakan suatu nilai dari tingkatan kerusakan massa batuan yang diakibatkan oleh peledakan maupun pelepasan tegangan. pedoman untuk menentukan besaran nilai d disajikan pada Gambar 11.

2.8 Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

Analisis Kestabilan lereng (*slope stability*) diperlukan suatu pendekatan untuk mmecahkan masalah kemungkinan longsor yang akan terjadi pada suatu lereng. Kelongsoran dapat terjadi akibat pergerakan dari material lereng karena kekuatan geser tanah telah terlampaui yaitu kekuatan geser tanah pada bidang gelincir tidak cukup besar untuk menahan gaya gaya yang bekerja pada bidang tersebut (Maerz, 2000).

Metode kesetimbangan batas atau metode *limit equilibrium* merupakan metode yang sangat populer dalam analisis kestabilan lereng. Metode ini juga dikenal sebagai metode irisan karena bidang longsoran dari lereng tersebut dibagi menjadi beberapa irisan. Metode ini terbukti sangat berguna dan dapat diandalkan dalam praktek rekayasa serta membutuhkan data yang relatif sedikit dibandingkan dengan metode lainnnya seperti metode elemen hingga, metode beda hingga dan metode elemen diskrit (Liong & Herman, 2012).

Pentingnya analisis stabilitas lereng telah mendapat perhatian luas dan dibahas dalam berbagai literatur tentang stabilisasi lereng. Analisa kesetimbangan batas (*limt equibirilium method*) telah menjadi metode yang paling populer untuk perhitungan stabilitas lereng. Metode analisis ini menggunakan konsep faktor keamanan, yaitu perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak yang diperhitungkan pada bidang gelincirnya. Namun seringkali metode ini tidak efektif untuk memprediksi longsoran pada batuan dan cara penanggulangannya. Oleh karena itu penggunaan desain empiris dan klasifikasi massa batuan untuk melakaukan analisis kestabilan lereng batuan menjadi penting (Franklin & Maerz, 1996).

Prinsip dasar dari metode kesetimbangan batas dalam menghitung tingkat kestabilan dari lereng menggunakan perhitungan dengan metode irisan. Semua metode irisan menyatakan kondisi kestabilan suatu lereng, dinyatakan dalam suatu indeks yang disebut faktor keamanan(F), dengan persmaan berikut (Romana, 1993):

$$F = \frac{F_f}{F} = \frac{gaya\ penahan}{gaya\ penggerak} \quad (27)$$

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

$$\tau = c' + (\sigma_n - u)tan\phi' \quad (28)$$

Keterangan:

τ = kekuatan geser

c’ = kohesi efektif

ϕ' = sudut geser dalam efektif

σ_n = tegangan normal total

u = tekanan air pori

Kekuatan geser tersebut dianggap tidak tergantung pada kondisi tegangan-regangan yang ada pada lereng. Besarnya tahanan geser yang diperlukan agar lerengberada dalam kondisi tepat setimbang (S_m) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$S_m = \frac{s\beta}{F} = \frac{(c'+(\sigma_n-u)tan\phi')\beta}{F} \quad (29)$$

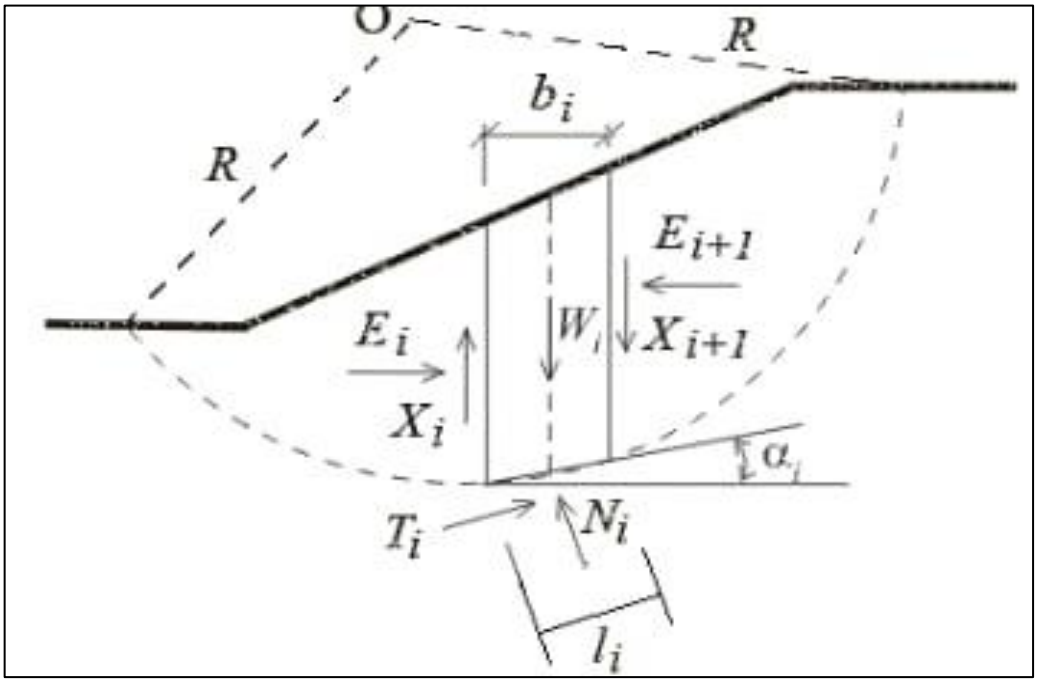
$$S_m = \frac{(c'\beta+(N-u\beta)tan\,\phi}{F} \quad (30)$$

Karakteristik lainnya yaitu geometri dari bidang gelincir harus ditentukan atau diasumsikan terlebih dahulu. Bidang runtuh biasanya dianggap berbentuk sebuah busur lingkaran, gabungan busur lingkaran dengan garis lurus, atau gabungan dari beberapa segmen garis lurus untuk menyederhanakan perhitungan. Bidang runtuh tersebut dapat terbentuk dari beberapa gaya yang terjadi pada daerah tersebut.

2.9 Metode Morgernstern-Price

Metode Morgernstein-Price yang dikemukakan pada tahun 1961 dikembangkan terlebih dahulu daripada metode kestimbangan batas umum. Metode ini dapat digunakan untuk semua bentuk bidang runtuh dan telah memenuhi semua kondisi kestimbangan (Morgernstein & Price, 1965).

Metode Morgernstein-Price menggunakan asumsi yang sama dengan metode kesetimbangan batas umum yaitu terdapat hubungan antara gaya geser antar-irisan dan gaya normal antar-irisan. Asumsi yang diterapkan dalam metode ini adalah kemiringan gaya geser antar irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan (Syaeful, 2012).



Gambar 12 Gaya yang bekerja pada tiap irisan metode Morgernstern-Price (Krahn, 2004)

Metode Morgernstein-Price dan metode kesetimbangan batas umum memiliki perbedaan cara perhitungan faktor keamanan. Perhitungan faktor keamanan pada metode kesetimbangan batas umum dilakukan dengan menggunakan kestimbangan gaya dalam arah horizontal dan kesetimbangan momen pada pusat gelincir untuk semua irisan. Sementara itu, perhitungan faktor keamanan pada metode Morgernstein-Price dilakukan dengan menggunakan kondisi kesetimbangan gaya dan moen pada setiap irisan (Krahn, 2004).

2.9.1 Persamaan kesetimbangan gaya

Kesetimbangan gaya dalam arah vertikal untuk setiap irisan menurut Morgenstern and Price (Krahn, 2004) adalah sebagai berikut:

$$(X_L - X_R) + N\cos\alpha + \tau_m \sin\alpha - W = 0 \quad (31)$$

dengan mensubstitusikan persamaaan (31) menghasilkan persamaan untuk gaya normal total (W) untuk setiap irisan, sebagai berikut:

$$N = \frac{(X_L - X_R) + W - \frac{c'\beta \sin\alpha - u\beta \sin\alpha \tan\phi}{F}}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha \tan\phi}{F}} \quad (32)$$

Besarnya gaya normal antar-irisan pada sisi kanan irisan (E_R) dapat ditentukan dari kesetimbangan gaya pada arah horizontal untuk setiap irisan, yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_R = E_L - N\sin\alpha + \tau_m \cos\alpha - kW \quad (33)$$

dengan menggunakan persamaan (31), maka persamaan (34) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$E_R = E_L - N\sin\alpha + \frac{(c'\beta + (N - u\beta)\tan\phi}{F}\cos\alpha - kW \quad (34)$$

Gaya gesek antar irisan pada sisi kiri dan sisi kanan untuk setiap irisan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$X_R = \lambda f(x) E_L \quad (35)$$

$$X_R = \lambda f(x) E_R \quad (36)$$

dengan menggunakan persamaan (33), (34), (35), dan (36) maka gaya normal antar irisan pada sisi kanan (E_R) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_R = \frac{(1 - \lambda f(x_L) z_\alpha}{(1 - \lambda f(x_R) z_\alpha} E_L + \frac{(w z_\alpha - kW)}{(1 - \lambda f(x_R) z_\alpha} + \frac{(\cos\alpha - z_\alpha \sin\alpha)}{(1 - \lambda f(x_R) z_\alpha} \frac{(c'\beta - u\beta \tan\phi')}{F} \quad (37)$$

dimana:

$$z_\alpha = \frac{\tan\phi' \cos\alpha - F \sin\alpha}{\tan\phi' \sin\alpha - F\cos\alpha} \quad (38)$$

2.9.2 Persamaan kesetimbangan momen

Persamaan kesetimbangan momen pada titik tengah dasar irisan adalah sebagai berikut:

$$E_L \left(y_L - \frac{1}{2} b \tan\alpha\right) - E_R \left(y_R - \frac{1}{2} b \tan\alpha\right) - \frac{1}{2} b (X_L + X_R) - W k h_c = 0 \quad (39)$$

dimana h_c adalah tinggi pusat massa irisan dari titik tengah pada dasar irisan. Persamaan di atas menyatakan titik kerja gaya antar-irisan pada sisi kanan irisan (Y_R) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_L = \frac{1}{E_R}\left[E_L\left(y_L - \frac{1}{2}\,b\tan\alpha\right) + \frac{1}{2}\,b\,(X_L + X_R) - Wkh_c\right] - \frac{1}{2}\,b\tan\alpha \quad (40)$$

2.10 Rocscience Slide2

Rocscience Slide2 adalah salah satu program *software* geoteknik yang mempunyai spesialisasi sebagai program perhitungan kestabilan lererng. Pada dasarnya Rocscience Slide2 adalah salah satu program didalam paket perhitungan geteknik Rocscience yang terdiri dari Swedge, Roclab, Phase2, RocPlane, Dips, Unwedge dan RocData.

Secara umum langkah analisis kesbailan lereng dengan menggunakan aplikasi *software* Rocscience Slide2 adalah pemodelan (membuat model atau desain berdasarkan pengukuran geometri lereng secara langsung di lapangan), identifikasi metode dan parameter perhitungannya, identifikasi material (jenis analisa kekuatan), penentuan bidang gelincir, kalkulasi, dan interpretasi data faktor keamanan dengan program koplemen Rocscience Slide2 yaitu Slide Interpret.

Analisa kestabilan lereng mempunyai tingakt kerumitan yang cukup tinggi dan mempunyai banyak variabel. Selain itu akurasi kestabilan lereng juga sangat dipengaruhi oleh akurasi parameter yang dimasukkan terkati kondisi sebenarnya. Perhitungan detail dan unsur ketidakpastian yang cukup besar (diwakili oleh parameter *probability*) sehingga jika perhitungan dilakukan secara manual maka akan memakan waktu yang cukup lama dan akurasinya pun tidak maksimal.

Analisis kestabilan lereng dengan bantuan program-program komputer semakin banyak digunakan baik didunia industri maupun didiunia pendidikan serta menjadi solusi perhitungan stabilitas lereng secara otomatis. Program Rocscience Slide2 banyak digunakan didunia industri khususnya dalam bidang pertambangan dan konstruksi sipil khususnya tanggul, bendungan, dan lereng pada sisi jalan.