

SKRIPSI

**ANALISIS BALIK KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN
METODE DETERMINISTIK DAN REKOMENDASI PENANGANAN
LONGSORAN DI JALAN POROS MAROS—BONE**

Disusun dan diajukan oleh

ANDI ICHWANUL MUSLIM

D621 16 006



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS BALIK KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN METODE DETERMINISTIK DAN REKOMENDASI PENANGANAN LONGSORAN DI JALAN POROS MAROS—BONE

Disusun dan diajukan oleh

ANDI ICHWANUL MUSLIM

D62116006

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 9 Mei 2022

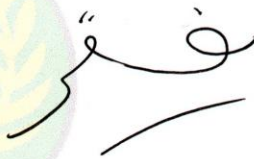
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

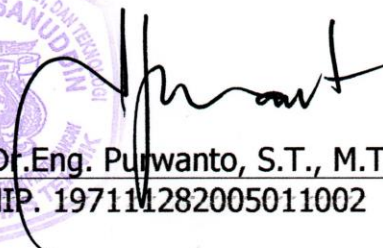
Pembimbing Pendamping,


Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T.
NIP. 197111282005011002


Nirmana Figra Qaidahiyani, S.T., M.T.
NIP. 199304222019032018

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Pertambangan


Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T.
NIP. 197111282005011002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andi Ichwanul Muslim
NIM : D621 16 006
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**Analisis Balik Kestabilan Lereng Menggunakan Metode Deterministik dan
Rekomendasi Penanganan Longsor di Jalan Poros Maros—Bone**

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

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 9 Mei 2022



Yang menyatakan

Andi Ichwanul Muslim

ABSTRAK

Longsoran dapat terjadi karena ketidaksetimbangan gaya yang bekerja pada lereng atau gaya di daerah lereng lebih besar daripada gaya penahan yang ada di lereng tersebut. Lokasi penelitian berada di Jalan Poros Maros—Bone, Desa Samangki, Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis kestabilan pada lereng pascalongsoran, analisis balik longsoran lereng untuk mendapatkan nilai parameter massa batuan, dan memberikan rekomendasi pada lereng yang mengalami longsoran. Pengujian laboratorium yang dilakukan yakni uji sifat fisik, uji kuat tekan uniaksial, dan uji kuat geser batuan. Penelitian ini menggunakan analisis kinematika dalam penentuan jenis dan arah longsoran menggunakan perangkat lunak *Dips 7.0*. Penentuan kualitas massa batuan menggunakan metode *rock mass rating* dan penentuan kualitas massa lereng berdasarkan hasil *rock mass rating* menggunakan metode *slope mass rating*. Analisis kestabilan lereng dilakukan menggunakan perangkat lunak *SWedge 4.0* dan setelah itu dilakukan analisis balik untuk mendapatkan parameter massa batuan yakni nilai kohesi dan sudut gesek dalam terendah yang menyebabkan terjadinya longsoran. Berdasarkan analisis kinematika, potensi longsoran yang terjadi pada batuan basal porfiri adalah longsoran baji dengan arah N 177° E dan potensi longsor pada batu gamping adalah longsoran baji dengan arah N 165° E. Nilai RMR pada batuan basal porfiri adalah 54 dengan kelas batuan sedang dan nilai RMR pada batu gamping adalah 57 dengan kelas batuan sedang. Nilai SMR pada batuan basal porfiri adalah 4 dengan deskripsi lereng sangat tidak stabil dan nilai SMR pada batu gamping adalah 33 dengan deskripsi lereng tidak stabil. Hasil pemodelan lereng didapatkan nilai faktor keamanan pada batuan basal porfiri adalah 1,786, sedangkan nilai faktor keamanan pada batu gamping adalah 2,164. Parameter massa batuan yang didapatkan dari analisis balik pada batuan basal porfiri adalah kohesi sebesar 2,55 t/m² dan sudut gesek dalam sebesar 5,29° dengan faktor reduksi sebesar 1,8, dan untuk batu gamping adalah kohesi sebesar 3,90 t/m² dan sudut gesek dalam sebesar 18,57° dengan nilai faktor reduksi sebesar 2,2. Rekomendasi pada lereng penelitian adalah *gravity or anchor wall or reexcavation* pada basal porfiri dan *anchor, systematic shotcrete, toe wall and/or concrete, (reexcavation) drainage* pada batu gamping.

Kata kunci: Analisis kinematika, klasifikasi massa batuan, kestabilan lereng, analisis balik, rekomendasi stabilitas lereng.

ABSTRACT

Landslides can occur because of an inequilibrium of forces acting on the slope or the force on the slope area is greater than the resisting force on the slope. The research location is in Maros—Bone Axis Road, Samangki Village, Simbang District, Maros Regency. The purpose of this study is to analyze the stability of the post-slide slope, back analysis of slope failure to obtain rock mass parameters values, and to provide recommendations on the slopes that experience landslides. Laboratory tests carried out are physical properties test, uniaxial compressive strength test, and shear strength test. This study uses kinematic analysis in determining the type and direction of landslides using Dips 7.0 software. Determining the quality of rock mass using the rock mass rating method and determining the quality of the slope mass based on the results of the rock mass rating using the slope mass rating method. Analysis of stability of the slope using the SWedge 4.0 software and after that performed a back analysis to obtain the rock mass parameters, namely the cohesion and friction angle value that caused the landslide. Based on kinematic analysis, the landslide potential in porphyry basalt rock is wedge slide with direction N 177° E and landslide potential in limestone is wedge slide with direction N 165° E. The RMR value for porphyry basalt is 54 with medium rock class and the RMR value for limestone is 57 with medium rock class. The SMR value for porphyry basalt is 4 with a very unstable slope description and the SMR value for limestone is 33 with an unstable slope description. The results of the slope modeling obtained that the safety factor value in porphyry basalt is 1.786, while the safety factor value in limestone is 2.164. The rock mass parameters obtained from the back analysis on porphyry basalt are cohesion of 2.55 t/m² and internal friction angle of 5.29° with a reduction factor value of 1.8, and for limestone the cohesion is equal to 3.90 t/m² and the internal friction angle of 18.57° with reduction factor value of 2.2. Recommendation on the research slope are gravity or anchor wall or reexcavation on the porphyry basalt and anchor, systematic shorcrete, toe wall and/or concrete, (reexcavation) drainage on limestone.

Keywords: Kinematic analysis, rock mass classification, slope stability, back analysis, slope stability recommendations.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat-Nya, penulis senantiasa diberikan petunjuk serta kemudahan hingga dapat menyusun tugas akhir ini yang berjudul "Analisis Balik Kestabilan Lereng Menggunakan Metode Deterministik dan Rekomendasi Penanganan Longsoran di Jalan Poros Maros—Bone" sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik (S-1) pada Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Shalawat serta salam penulis junjungkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW yang telah memberikan banyak pelajaran kepada umatnya.

Penyelesaian tugas akhir ini telah melalui banyak proses serta tantangan bagi penulis. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dan terus memotivasi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Harapan penulis yaitu tugas akhir ini dapat memberikan banyak manfaat nantinya kepada orang-orang yang membutuhkan informasi/data yang telah dihasilkan dari penelitian ini.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T. selaku pembimbing utama dan Kepala LBE Geomekanika, Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang selalu mendukung dalam menyelesaikan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Nirmana Fiqra Qaidahiyani, S.T., M.T. selaku pembimbing pendamping yang telah meluangkan waktunya dalam membimbing pada penyusunan tugas akhir ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Rizki Amalia, S.T., M.T. dan Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T. selaku dosen penguji dalam hasil penelitian ini.

Selanjutnya penulis juga mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua yang telah mencurahkan segenap cinta dan kasih sayang serta perhatian moral maupun

material. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan rahmat, kesehatan, karunia, serta keberkahan di dunia dan di akhirat atas budi baik yang telah diberikan kepada penulis.

Terima kasih juga kepada teman-teman LBE Geomekanika yang telah banyak membantu selama proses penyusunan tugas akhir ini yakni dalam pengerjaan sampel penelitian dan pengolahan data. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada saudara seangkatan (ROCKBOLT 2016) yang telah menemani baik suka maupun duka.

Penulis senantiasa mengharapkan kritik dan saran dari pembaca demi penyempurnaan tugas akhir ini. Penulis berharap tugas akhir ini dapat menjadi bekal ilmu pengetahuan dalam membangun wawasan khususnya dalam bidang yang berkaitan dengan geoteknik. Semoga segala amal dan kebajikannya semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini mendapatkan balasan yang berlimpah dari Tuhan Yang Maha Esa.

Gowa, Mei 2022

Andi Ichwanul Muslim

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i>.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Tahapan Penelitian.....	3
1.6 Lokasi dan Kesampaian Daerah	5
BAB II STUDI PUSTAKA	7
2.1 Lereng	7
2.2 Sifat Fisik Batuan	13
2.3 Sifat Mekanis Batuan	15
2.4 Analisis Kinematika.....	19
2.5 Klasifikasi Massa Batuan dan Rekomendasi	38
2.6 Pemodelan Lereng.....	53

2.7	Analisis Balik Menggunakan Metode Deterministik	59
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		62
3.1	<i>Scanline Mapping</i>	63
3.2	Pengambilan Sampel	64
3.3	Preparasi Sampel	65
3.4	Pengujian Laboratorium	70
3.5	Analisis Kinematika.....	81
3.6	Klasifikasi Massa Batuan	83
3.7	Pemodelan Lereng.....	86
3.8	Analisis Balik Menggunakan Metode Deterministik	89
3.9	Diagram Alir Penelitian.....	90
BAB IV ANALISIS BALIK KESTABILAN LERENG DAN REKOMENDASI		
PENANGANAN LONGSORAN.....		91
4.1	Karakteristik Lereng.....	91
4.2	Hasil Pengujian Laboratorium	92
4.3	Analisis Kinematika.....	94
4.4	Klasifikasi Massa Batuan	99
4.5	Pemodelan Lereng.....	110
4.6	Analisis Balik Menggunakan Metode Deterministik	112
4.7	Rekomendasi Stabilitas Lereng	115
BAB V PENUTUP		117
5.1	Kesimpulan.....	117
5.2	Saran.....	118
DAFTAR PUSTAKA.....		119
LAMPIRAN		122

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta lokasi penelitian	6
Gambar 2.1 Kurva tegangan regangan pada uji kuat tekan uniaksial ((Hoek & Brown, 1980); (Rangga, et al., 2019))	17
Gambar 2.2 Garis keruntuhan Mohr-Coulomb	18
Gambar 2.3 Teknik stereografis (Wyllie & Mah, 2004)	20
Gambar 2.4 Longsor bidang (Hoek & Bray, 1981).....	21
Gambar 2.5 Posisi rekahan tarik (<i>tension crack</i>) pada lereng batuan (Hoek & Bray, 1981)	23
Gambar 2.6 Longsor baji (Hoek & Bray, 1981)	25
Gambar 2.7 Gaya-gaya pada longsor baji (Hoek & Bray, 1981).....	27
Gambar 2.8 Geometri baji untuk analisis kemantapan dengan memperhitungkan kohesi air (Hoek & Bray, 1981)	28
Gambar 2.9 Stereoplot data untuk analisis kestabilan baji (Hoek & Bray, 1981)	29
Gambar 2.10 Longsor guling (Hoek & Bray, 1981).....	29
Gambar 2.11 Model longsor guling untuk model kesetimbangan batas (Goodman & Bray, 1976).....	30
Gambar 2.12 Kondisi kesetimbangan batas blok ke-n yang akan terguling dan tergelincir (Goodman & Bray, 1976).....	31
Gambar 2.13 Longsor busur (Hoek & Bray, 1981)	33
Gambar 2.14 Longsor busur dengan (a) permukaan bidang gelincir sirkular; dan (b) permukaan bidang gelincir non sirkular	34
Gambar 2.15 Metode Bishop (Hoek & Bray, 1981)	36
Gambar 2.17 Model jatuhnya batu dan proteksinya (Ritchie, 1963)	52
Gambar 2.18 Definisi analisis balik (Sakurai, 2017)	60

Gambar 3.1 Lereng lokasi penelitian.....	62
Gambar 3.2 Pengambilan data arah orientasi bidang diskontinu	63
Gambar 3.3 Proses pengukuran orientasi bidang diskontinuitas.....	64
Gambar 3.4 Proses pengambilan sampel penelitian.....	65
Gambar 3.5 Sampel batuan uji sifat fisik; (a) batuan Basal, (b) batuan Batu Gamping	66
Gambar 3.6 <i>Core drill</i>	66
Gambar 3.7 <i>Precision cutting machine</i>	67
Gambar 3.8 Sampel batuan pengujian kuat tekan uniaksial.....	68
Gambar 3.9 Sampel pengujian kuat geser	69
Gambar 3.10 Peralatan uji sifat fisik batuan; (a) desikator; (b) timbangan digital; (c) pompa vakum; (d) air; (e) oven; (f) neraca ohaus; (g) wadah sampel ..	71
Gambar 3.11 Penimbangan berat natural.....	72
Gambar 3.12 Penjenuhan sampel batuan.....	72
Gambar 3.13 Penimbangan berat jenuh batuan	73
Gambar 3.14 Pengeringan sampel batuan.....	73
Gambar 3.15 Penimbangan berat kering batuan	74
Gambar 3.16 Peralatan uji kuat tekan uniaksial; (a) <i>hydraulic compressor machine</i> ; (b) jangka sorong; (c) kacamata <i>safety</i> ; (d) sepatu <i>safety</i> ; (e) <i>dial gauge</i> ..	76
Gambar 3.17 Peralatan uji kuat geser; (a) mesin kuat geser; (b) jangka sorong; (c) kacamata <i>safety</i> ; (d) beban; (e) sepatu <i>safety</i> ; (f) <i>dial gauge</i>	79
Gambar 3.18 Proses pemutaran tuas dan pembacaan tegangan geser pada sampel uji	80
Gambar 3.19 Pemasukan data orientasi diskontinuitas pada perangkat lunak <i>Dips 7.082</i>	
Gambar 3.20 Proses pembuatan plane dari masing-masing nilai maksima	83

Gambar 3.21 Parameter input karakteristik lereng dalam pemodelan lereng dengan menggunakan perangkat lunak <i>SWedge</i> 4.0.....	87
Gambar 3.22 Proses input data geometri pada perangkat lunak <i>SWedge</i> 4.0.....	88
Gambar 3.23 Pemodelan lereng serta pembacaan nilai faktor keamanan.....	88
Gambar 3.24 Diagram alir penelitian	90
Gambar 4.1 Hasil analisis kinematika pada basal porfiri	95
Gambar 4.2 Hasil analisis kinematika pada batu gamping	97
Gambar 4.3 Hasil pemodelan lereng pada basal porfiri	111
Gambar 4.4 Hasil pemodelan lereng pada batu gamping	112

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sistem klasifikasi massa batuan utama (Cosar, 2004)	44
Tabel 2.2 Klasifikasi kuat massa batuan (Hoek & Bray, 1981).....	46
Tabel 2.3 Hubungan RQD dengan kualitas batuan (Deere, et al., 1967)	47
Tabel 2.4 Klasifikasi persistensi kekar (Bieniawski, 1989).....	48
Tabel 2.5 Tingkat pelapukan (Bieniawski, 1989)	49
Tabel 2.6 Kondisi air tanah (Bieniawski, 1989).....	49
Tabel 2.7 Pengaruh orientasi kekar dalam pembuatan terowongan dan penggalian ...	50
Tabel 2.8 Nilai bobot orientasi kekar (Bieniawski, 1989)	50
Tabel 2.9 Pembobotan SMR (Romana, et al., 2003)	51
Tabel 2.10 Nilai pembobotan untuk metode ekskavasi lereng (Romana, 1985).....	51
Tabel 2.11 Metode-metode untuk analisis stabilitas pada lereng tanah (Pusat Litbang Prasarana Transportasi, 2005)	57
Tabel 2.12 Metode analisis stabilitas pada lereng batuan (Pusat Litbang Prasarana Transportasi, 2005)	58
Tabel 3.1 Hasil pengujian sifat fisik batuan	74
Tabel 3.2 Data dimensi sampel pengujian kuat tekan uniaksial.....	78
Tabel 3.3 Data dimensi sampel pengujian kuat geser	81
Tabel 3.4 Pembobotan klasifikasi RMR (Bieniawski, 1989).....	84
Tabel 3.5 Nilai klasifikasi massa batuan RMR (Bieniawski, 1989).....	85
Tabel 3.6 Nilai pembobotan massa lereng SMR (Romana, 1985)	86
Tabel 3.7 Rekomendasi jenis perkuatan untuk setiap kelas SMR (Romana, 1985).....	86
Tabel 4.1 Hasil pengukuran geometri lereng pada daerah penelitian	91
Tabel 4.2 Deskripsi sampel batuan A	91
Tabel 4.3 Deskripsi sampel batuan B	92

Tabel 4.4 Hasil pengolahan data uji sifat fisik	92
Tabel 4.5 Hasil pengolahan data uji kuat tekan uniaksial	93
Tabel 4.6 Hasil pengolahan data uji kuat geser.....	94
Tabel 4.7 Hasil pengklasifikasian <i>rock mass rating</i> pada basal porfiri.....	102
Tabel 4.8 Hasil pengklasifikasian <i>rock mass rating</i> pada batu gamping.....	104
Tabel 4.9 Hasil pengklasifikasian <i>slope mass rating</i> pada basal porfiri	107
Tabel 4.10 Hasil pengklasifikasian <i>slope mass rating</i> pada batu gamping	109
Tabel 4.11 Parameter dalam pemodelan lereng pada basal porfiri	111
Tabel 4.12 Parameter dalam pemodelan lereng pada batu gamping	112
Tabel 4.13 Hasil analisis balik pada basal porfiri.....	113
Tabel 4.14 Hasil analisis balik pada batu gamping.....	114
Tabel 4.15 Rekomendasi perkuatan lereng berdasarkan nilai <i>slope mass rating</i> pada basal porfiri dan batu gamping.....	115

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Peta Lokasi Penelitian	123
Lampiran B Lembar Deskripsi Batuan Pada Lereng Penelitian	124
Lampiran C Data Hasil <i>Scanline Mapping</i>	126
Lampiran D Data Deformasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Uniaksial	132
Lampiran E Data Deformasi Hasil Pengujian Kuat Geser Batuan	134
Lampiran F Kurva Tegangan Regangan Hasil Pengujian Kuat Tekan Uniaksial	135
Lampiran G Grafik Hubungan Tegangan Geser dengan Tegangan Normal Hasil Pengujian Kuat Geser	136
Lampiran H Lembar Konsultasi.....	137

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kabupaten Maros memiliki keadaan topografi wilayah yang sangat bervariasi mulai dari wilayah datar sampai perbukitan. Hampir semua kecamatan terdapat daerah dataran dengan luas keseluruhan 70.822 ha atau 43% dari luas wilayah Kabupaten Maros, sedangkan daerah yang mempunyai kemiringan lereng di atas 40% atau wilayah yang berbukit mempunyai luas 49.869 ha atau 30,8% dan sisanya sebesar 26,2% merupakan wilayah pantai. Struktur geologi selalu dijadikan dasar pertimbangan dalam pengembangan suatu wilayah, misalnya pembangunan jalan, permukiman, dan bendungan, sehingga daerah yang berstruktur sesar, kekar, dan struktur yang miring seminimal mungkin dapat dihindari.

Longsor adalah pergerakan material penyusun lereng yang menuruni lereng akibat terganggunya kestabilan material penyusun lereng. Longsoran dapat terjadi karena ketidakseimbangan gaya yang bekerja pada lereng atau gaya di daerah lereng lebih besar daripada gaya penahan yang ada di lereng tersebut. Faktor-faktor penyebab terjadinya longsor dapat berupa faktor internal yang meliputi geometri lereng, struktur geologi, kondisi air tanah, ataupun faktor eksternal berupa beban luar maupun getaran seperti gempa bumi atau akibat aktivitas peledakan. Longsor merupakan gejala geologi yang umum terjadi dalam rangka mencari keseimbangan gaya. Saat memasuki musim hujan secara umum di Indonesia mengalami peningkatan peristiwa longsor, salah satunya di Jalan Poros Maros—Bone, Desa Samangki, Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros.

Dalam keadaan tidak terganggu (alamiah), tanah atau batuan umumnya berada dalam keadaan stabil atau seimbang. Perubahan kestabilan lereng dapat terjadi akibat pengangkatan, penurunan, penggalian, penimbunan, erosi, atau aktivitas lain di sekitar lereng tersebut. Untuk mengatasi perubahan itu, lereng akan berusaha untuk mencapai kondisi stabil yang baru secara alamiah. Cara ini biasanya berupa proses degradasi atau pengurangan beban, terutama dalam longsoran-longsorannya atau gerakan-gerakan lain sampai tercapai keadaan kesetimbangan yang baru.

Lereng pada Jalan Poros Maros—Bone tersebut memiliki kemiringan lebih dari 70° yang rawan akan terjadinya longsor. Runtuhan dari longsor tersebut jatuh ke ruas jalan yang mengakibatkan akses jalan pada area tersebut terhambat. Oleh karena itu, untuk menghindari adanya longsor dan juga mengantisipasi adanya kecelakaan dikarenakan lereng tersebut berada di pinggir jalan yang ramai pengguna lalu lintas, sangat diperlukan penanganan yang tepat untuk mengantisipasi longsor pada lokasi tersebut. Sebagai upaya mitigasi longsor, perlu dilakukan penyelidikan geoteknik terlebih dahulu agar upaya mitigasi yang dipilih menjadi pilihan yang tepat sehingga longsor dapat dicegah secara maksimal. Penyelidikan yang ada meliputi penyelidikan lapangan dan uji laboratorium. Keberhasilan penanganan longsor sangat ditentukan oleh ketelitian penyelidikan, ketepatan perencanaan dan pemilihan metode, serta kecepatan pelaksanaan sesuai dengan rencana yang telah disusun sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Keterdapatannya bidang diskontinu pada lereng di Jalan Poros Maros—Bone telah mengakibatkan pergerakan batuan sehingga terjadi longsor dan memicu terjadinya longsor berikutnya. Longsor yang terjadi di Jalan Poros Maros—Bone juga mengakibatkan akses jalan yang menghubungkan antara Kota Makassar dengan

Kabupaten Bone menjadi terhambat sehingga perlu dilakukannya analisis dan upaya penanganan terkait longsoran tersebut.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis kestabilan lereng di Jalan Poros Maros—Bone pascalongsoran.
2. Mendapatkan nilai parameter massa batuan dari hasil analisis balik.
3. Memberikan rekomendasi pada lereng yang mengalami longsoran.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk menghasilkan prediksi parameter massa batuan yang dapat digunakan pada analisis ke depannya dan juga memberikan rekomendasi pada lereng yang mengalami longsoran serta lereng di sekitarnya sehingga dapat mengurangi kemungkinan terjadinya longsoran.

1.5 Tahapan Penelitian

Tahapan kegiatan yang dilakukan selama penelitian yaitu:

1. Persiapan

Tahapan ini merupakan tahapan yang paling awal dilakukan sebelum dilakukan penelitian dan pengambilan data di lapangan. Tahapan ini meliputi:

- a. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dilakukan untuk mengidentifikasi masalah yang akan diteliti. Perumusan masalah akan membantu dalam kegiatan pengambilan data di lapangan agar lebih terkontrol dan juga akan membantu dalam penetapan tujuan penelitian yang akan dilakukan.

b. Studi Pustaka

Studi pustaka dilakukan untuk mempersiapkan materi penunjang yang berkaitan dengan penelitian. Studi pustaka yang digunakan sebagai dasar dalam pengolahan data penelitian tidak hanya dilakukan pada tahapan persiapan, akan tetapi juga pada tahapan penelitian di lapangan, pengolahan dan analisis data hingga pada tahap penyusunan laporan sebelum dilakukannya seminar penelitian.

2. Pengambilan Data Lapangan

Tahapan ini merupakan tahapan yang dilakukan untuk mengumpulkan data-data yang berhubungan dengan kegiatan penelitian. Data yang diperoleh dari pengukuran langsung di lapangan meliputi data topografi, geometri lereng, *rock mass rating* (RMR), *joint set*, orientasi *upper face* dan muka lereng. Metode pengambilan data yang digunakan dalam pengukuran *joint set* menggunakan metode *scanline*.

3. Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium meliputi pengujian-pengujian untuk menentukan nilai-nilai properti material yang diperlukan untuk analisis data. Pengujian-pengujian yang dilakukan, antara lain:

- a. pengujian sifat fisik batuan untuk mendapatkan parameter sifat fisik batuan;
- b. pengujian kuat tekan uniaksial untuk mendapatkan nilai kuat tekan batuan, modulus elastisitas dan nisbah Poisson; dan
- c. pengujian kuat geser langsung untuk mendapatkan nilai kohesi dan sudut gesek dalam.

4. Tahapan Analisis Data

Data yang diperoleh di lapangan dan juga pada pengujian laboratorium selanjutnya diolah untuk dijadikan bahan analisis sehingga menghasilkan suatu

nilai yang berguna untuk mendapatkan parameter massa batuan dan juga dasar dalam pemberian rekomendasi penanggulangan longsor. Analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

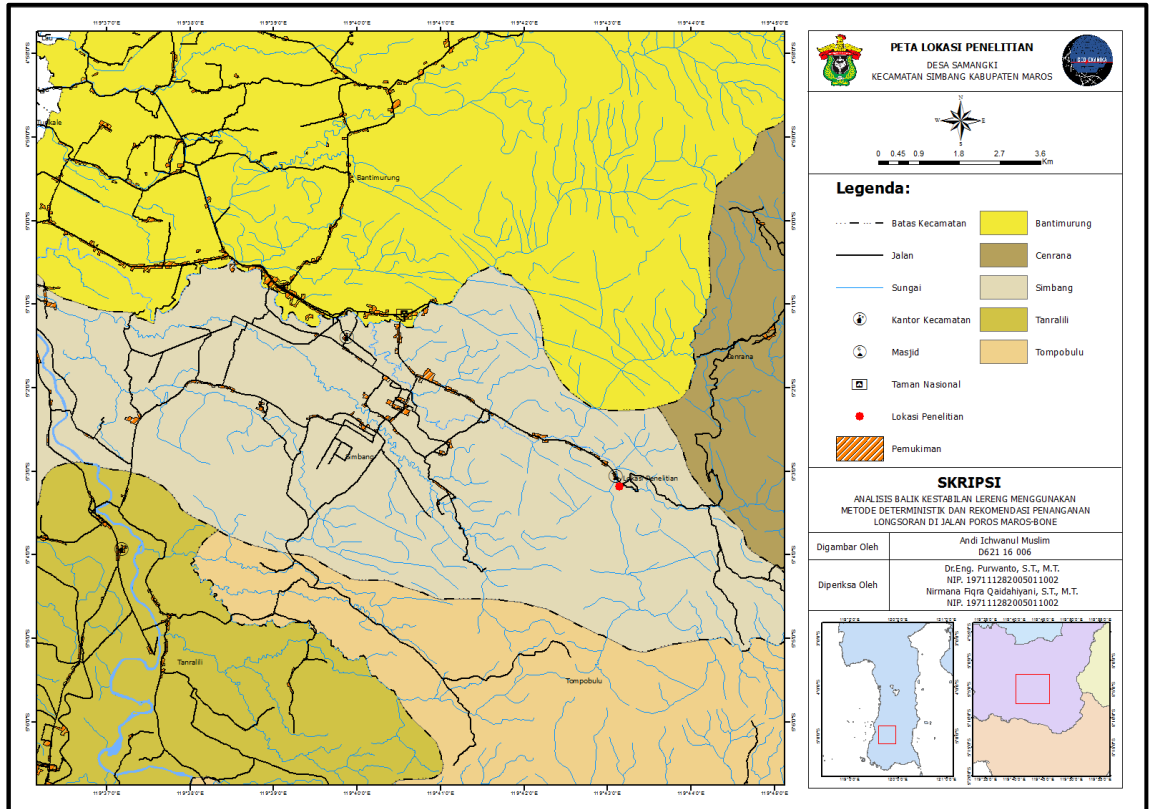
- a. Analisis kinematika untuk mengetahui arah dan jenis longsor.
- b. Pemodelan lereng untuk mengetahui nilai faktor keamanan.
- c. Analisis balik menggunakan metode deterministik untuk mencari prediksi nilai kohesi dan sudut gesek dalam terendah yang dapat mengakibatkan kelongsoran dan juga untuk mendapatkan parameter massa batuan.
- d. Klasifikasi massa batuan untuk memberikan rekomendasi penanganan longsor.

5. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan merupakan tahapan yang dilakukan setelah pengolahan dan analisis data. Keseluruhan data diakumulasikan, dianalisis, kemudian dituangkan dalam bentuk laporan hasil penelitian sesuai dengan format dan kaidah penulisan skripsi yang telah ditetapkan Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

1.6 Lokasi dan Kesampaian Daerah

Penelitian dilakukan pada lereng batuan yang terletak di pinggir Jalan Poros Maros—Bone. Secara administratif, lereng tersebut berada di Desa Samangki, Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros, Provinsi Sulawesi Selatan; sedangkan secara geografis lokasi penelitian terletak di $5^{\circ}3'12''$ S dan $119^{\circ}43'8''$ E. Lokasi penelitian berada pada daerah pegunungan dengan ketinggian 60 meter di atas permukaan laut. Lokasi penelitian ini berjarak sekitar 43 km dari Makassar dengan waktu tempuh $\pm 1,5$ jam. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Peta lokasi penelitian

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Lereng

Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia (Arif, 2016). Lereng dibedakan menjadi dua, yaitu lereng alam dan lereng buatan. Adapun perbedaan antara lereng alam dan lereng buatan menurut Rahardjo (2012) sebagai berikut.

A. Lereng Alam

Lereng alam (*natural slope*) adalah lereng yang terbentuk karena fenomena alam yang terjadi akibat dari proses geologi. Dalam konteks perencanaan teknik jalan, lereng alam sering dijumpai pada kawasan dengan topografi berbukit dan pegunungan, di mana posisi badan jalan berada pada dasar lereng (*existing ground*), atau elevasi badan jalan berada pada lereng bukit yang sebagian digali/dipotong untuk posisi badan jalan. Lereng alam adalah lereng yang apabila tidak ada perlakuan dan atau penanganan terhadap lereng tersebut, baik berupa perubahan kemiringan atau penambahan dengan suatu konstruksi tertentu sehingga kestabilan dan kemantapan dari lereng alam tersebut benar-benar mengandalkan kestabilan internal yang terbentuk akibat sifat, karakteristik, dan struktur tanah serta bentuk alaminya.

B. Lereng Buatan

Lereng buatan adalah lereng yang terjadi akibat terbentuknya daerah galian dan/atau daerah timbunan pada proses perencanaan geometrik. Lereng buatan dibentuk dengan memperhatikan kemiringan dan tinggi kritis berdasarkan karakteristik material pembentuk lereng tersebut.

Pada kedua jenis lereng ini, kemungkinan terjadi longsoran atau runtuh lereng akan selalu ada. Longsoran lereng sering kali terjadi disebabkan oleh proses yang menaikkan tegangan geser atau mengurangi kuat geser massa tanah/batuan, yaitu akibat gravitasi dan gaya-gaya lainnya, seperti aliran air, gempa bumi, kelebihan pembebanan, pergerakan lereng secara alami, dan sebagainya. Bila sudah terjadi keruntuhan pada lereng, berarti kekuatan geser tanah/batuan telah terlampaui, artinya perlawanan geser pada permukaan runtuh tidak cukup besar untuk menahan gaya-gaya yang bekerja pada permukaan lereng tersebut.

Longsoran adalah keruntuhan massa tanah/batuan yang bergerak ke arah bawah dan pada arah keluar. Longsoran dapat terjadi melalui beberapa cara, yaitu secara perlahan, mendadak, dan/atau tanpa pemicu. Biasanya setiap tanah pada lereng yang mengalami longsoran tersebut akan bergerak pada suatu bidang tertentu. Bidang tersebut disebut bidang gelincir atau bidang geser (Terzaghi & Peck, 1987).

2.1.1 Longsoran lereng

Longsor merupakan pergerakan massa batuan atau tanah yang menggelincir karena pengaruh secara langsung dari gaya gravitasi (West, 1995). Jadi, longsor terjadi akibat terganggunya kestabilan lereng tersebut sehingga mengalami pergerakan untuk mencapai kesetimbangan. Hoek dan Bray (1981) menyebutkan bahwa kestabilan lereng akan tercapai jika gaya penahan longsor lebih besar daripada gaya penggerak longsor.

Longsoran adalah pergerakan massa batuan dan/atau tanah pada suatu lereng yang berpindah tempat karena gravitasi dan terganggunya keseimbangan gaya yang bekerja antara beban sendiri (tanah/batuan) dan kemampuannya dalam menahan beban (Cruden, 1991).

Keruntuhan lereng dapat terjadi pada hampir setiap kasus lereng alami atau lereng buatan secara pelan 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.

Longsoran (*landslide*) dapat merupakan salah satu jenis bencana alam bila frekuensi kejadiannya cukup sering terjadi dan skalanya besar serta mempunyai dampak sangat signifikan terhadap beberapa hal sebagai berikut.

1. Merusak bangunan fasilitas umum dan masyarakat (tempat peribadatan, sekolah, pasar, dan sebagainya).
2. Merusak bangunan infrastruktur (jalan dan jembatan, kawasan permukiman, dan sistem jaringan irigasi).
3. Menimbulkan korban jiwa serta material yang tidak sedikit.
4. Mengganggu kegiatan ekonomi masyarakat seperti kegiatan usaha untuk kehidupan.
5. Memutus hubungan antara dua atau lebih wilayah sehingga menyebabkan suatu daerah terisolasi.

2.1.2 Faktor-faktor yang memengaruhi kestabilan lereng

Kestabilan lereng dapat didefinisikan sebagai ketahanan blok di atas suatu permukaan miring (diukur dari garis horizontal) terhadap runtuh (*collapsing*) dan gelinciran (*sliding*) dalam hal ini setiap permukaan tanah yang memiliki kemiringan terhadap garis horizontal disebut lereng, baik alami maupun buatan manusia (Azhary, et al., 2015).

Pada kondisi gaya penahan (terhadap longsoran) lebih besar dari gaya penggerak, lereng tersebut akan berada dalam kondisi yang stabil (aman). Namun apabila gaya penahan menjadi lebih kecil dari gaya penggeraknya, lereng tersebut akan menjadi tidak stabil dan akan terjadi longsoran. Pada lereng yang berupa tanah dan atau batuan, sifat fisik kimia dan biologi tanah atau batuan merupakan faktor yang sangat

berpengaruh terhadap stabilitasnya di lereng karena akan memengaruhi ada tidaknya dan banyak sedikitnya air yang mampu disimpan atau mampu dialirkannya.

Pergerakan tanah dan longsor pada lereng dapat disebabkan oleh alam maupun oleh manusia, hal tersebut sulit untuk dihindari. Pergerakan tanah yang diakibatkan oleh alam dapat berupa unsur geologi, iklim dan topografi, sedangkan yang disebabkan oleh manusia yaitu berupa penggalian lereng (Rahardjo, 2012).

Kestabilan lereng pada lereng batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor (Anwar, et al., 2018) sebagai berikut.

1. Penyebaran Batuan

Macam batuan atau tanah yang terdapat di daerah penyelidikan harus diketahui, demikian juga penyebaran serta hubungan antar batuan. Ini perlu dilakukan karena sifat-sifat fisik dan mekanik 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 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. Muka air tanah yang dangkal menjadikan lereng sebagian besar basah dan batumannya memiliki kandungan air yang tinggi, sehingga menyebabkan kekuatan batuan menjadi rendah dan lereng lebih mudah longsor.

4. Orientasi Bidang Lemah (*Discontinuity*) terhadap Orientasi Struktur Lereng

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 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 orientasi, panjang, spasi dan kekuatan dari material pengisinya akan menentukan model dari potensial longsor yang terjadi.

5. Iklim

Iklim memengaruhi temperatur dan jumlah hujan sehingga berpengaruh pula pada proses pelapukan. Daerah tropis yang panas, lembap dengan curah hujan tinggi akan menyebabkan proses pelapukan batuan jauh lebih cepat dibandingkan dengan daerah subtropis. Karena itu, 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, misalnya angka kohesi, besarnya sudut gesek dalam, bobot isi, dan lain-lain. Semakin tinggi tingkat pelapukan maka kekuatan batuan akan menurun.

7. Hasil Kerja Manusia

Manusia juga memberikan pengaruh terhadap kestabilan 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 longsor mudah terjadi.

8. Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Sifat fisik batuan yang memengaruhi kemantapan lereng adalah: densitas, porositas dan kandungan air. Kuat tekan, kuat tarik, kuat geser, kohesi dan sudut gesek dalam merupakan sifat mekanik batuan yang juga memengaruhi lereng.

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

d. Kuat Tekan, Kuat Tarik, dan Kuat Geser

Kekuatan batuan dinyatakan dengan kuat tekan (*confined and unconfined compressive strength*), kuat Tarik (*tensile strength*), dan kuat geser (*shear strength*). Batuan yang mempunyai kekuatan batuan besar akan lebih mantap atau lebih stabil.

e. Kohesi dan Sudut Gesek Dalam

Kuat geser batuan akan semakin besar apabila kohesi dan sudut gesek dalam semakin besar.

9. Pengaruh Gaya Luar

Gaya-gaya dari luar yang dapat memengaruhi kestabilan lereng antara lain getaran alat-alat berat yang bekerja pada atau sekitar lereng, peledakan, gempa bumi dan lain-lain. Gaya-gaya tersebut akan memperkecil tegangan geser sehingga dapat mengakibatkan keruntuhan pada lereng.

2.2 Sifat Fisik Batuan

Penentuan sifat fisik batuan sangat penting untuk diketahui, karena dengan mengetahui sifat fisik batuan dapat ditentukan kualitas batuan tersebut. Penentuan sifat fisik ini dilakukan dengan pengujian sampel batuan di laboratorium. Data-data yang diperoleh dari pengujian ini adalah bobot isi asli (ρ_n), bobot isi kering (ρ_d), bobot isi jenuh (ρ_s), kadar air asli (w), derajat kejenuhan (S), porositas, dan nisbah rongga (e).

2.2.1 Bobot isi (densitas)

Bobot isi (densitas) adalah properti fisik yang berubah secara signifikan antara berbagai jenis batuan karena perbedaan mineralogi dan porositas. Densitas (ρ) didefinisikan sebagai hasil bagi dari massa (m) dan volume (v) dari sebuah material. Nilai bobot isi dibagi menjadi 3 (tiga) macam berdasarkan kondisi sampel yaitu adalah bobot isi asli (ρ_n), bobot isi kering (ρ_d), bobot isi jenuh (ρ_s), yang dapat dinyatakan dengan rumus (Rosari, et al., 2017):

a. ρ_n = Densitas Natural

$$\rho_n = \frac{W_n}{(W_s - W_w)} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(2.1)$$

b. ρ_d = Densitas Kering

$$\rho_d = \frac{W_o}{(W_s - W_w)} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (2.2)$$

c. ρ_s = Densitas Jenuh

$$\rho_s = \frac{W_w}{(W_s - W_w)} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Nilai densitas yang tinggi diinterpretasikan memiliki permeabilitas yang tinggi. Kondisi permeabilitas suatu batuan mempengaruhi kestabilan lereng, di mana pada nilai densitas yang tinggi maka kestabilan lereng pun buruk, sedangkan apabila sifat batumannya berpermeabilitas rendah maka kestabilan lereng baik.

2.2.2 Kadar air (*water content*)

Kadar atau kandungan air dalam batuan yang dapat dinyatakan sebagai berat air per satuan berat batuan (%berat) atau berat air dalam satuan volume batuan (%volume), yang dapat dinyatakan dengan:

W = Kadar air

$$W = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100 \dots\dots\dots (2.4)$$

Kandungan air sangat besar pengaruhnya 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.

2.2.3 Derajat kejenuhan

Derajat kejenuhan dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara volume air dan volume pori, dinyatakan dalam persen.

S = Derajat Kejenuhan

$$S = \frac{W_n - W_o}{W_s - W_o} \times 100 \dots\dots\dots (2.5)$$

2.2.4 Porositas

Porositas adalah kemampuan batuan untuk menyerap cairan pada batuan atau ruang-ruang yang terisi oleh cairan diantara zat-zat padat atau mineral pada suatu batuan.

n = Porositas

$$n = \frac{W_s - W_o}{W_s - W_w} \times 100 \dots\dots\dots (2.6)$$

Batuan yang memiliki porositas yang besar akan menyerap air, dengan demikian densitas batuan akan menjadi lebih besar sehingga akan menurunkan tingkat kestabilan lereng.

2.2.5 Nisbah rongga

Nisbah rongga didefinisikan sebagai perbandingan volume rongga dengan volume butiran.

e = Nisbah rongga

$$e = \frac{n}{(1-n)} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.3 Sifat Mekanis Batuan

Penentuan sifat mekanik batuan dilakukan dengan pengujian sampel batuan di laboratorium. Dalam penelitian ini dilakukan 2 (dua) jenis pengujian sifat mekanik batuan yaitu pengujian kuat tekan batuan uniaksial dan pengujian kuat geser batuan.

2.3.1 Uji kuat tekan uniaksial

Uji kuat tekan uniaksial merupakan uji sifat mekanik yang paling banyak dilakukan terhadap suatu contoh batuan. Uji kuat tekan uniaksial dilakukan untuk menentukan kuat tekan batuan (σ_c), modulus elastisitas (E), nisbah Poisson (ν), dan kurva tegangan-regangan. Dari hasil pengujian kuat tekan uniaksial akan dihasilkan parameter yang berupa kurva tegangan regangan. Kurva tegangan-regangan ini

mengandung informasi parameter–parameter hasil uji kuat tekan uniaksial seperti pada Gambar 2.5 (Rangga, et al., 2019).

Kuat tekan uniaksial (σ_c) adalah gambaran dari nilai tegangan maksimum yang dapat ditanggung sebuah contoh batuan sesaat sebelum contoh batuan tersebut runtuh (failure) tanpa adanya pengaruh dari tegangan pemampatan (tegangan pemampatan sama dengan nol).

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

σ_c = kuat tekan (MPa),

F = beban total saat sampel hancur (N), dan

A = luas permukaan sampel yang ditekan (mm²).

Modulus Young adalah perbandingan antara tegangan uniaksial dengan regangan aksial. Modulus young biasanya digunakan untuk mengukur nilai keelastisan suatu benda atau contoh batuan.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_a} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

E = modulus elastisitas (MPa),

$\Delta\sigma$ = perubahan tegangan (MPa), dan

$\Delta\epsilon_a$ = perubahan regangan aksial (%).

Nisbah Poisson (ν) adalah nilai mutlak dari perbandingan antara regangan lateral terhadap nilai regangan aksial. Jika suatu material diregangkan pada satu arah, maka material tersebut cenderung mengkerut pada dua arah lainnya. Sebaliknya, jika suatu material ditekan, maka material tersebut akan mengembang pada dua arah lainnya juga.

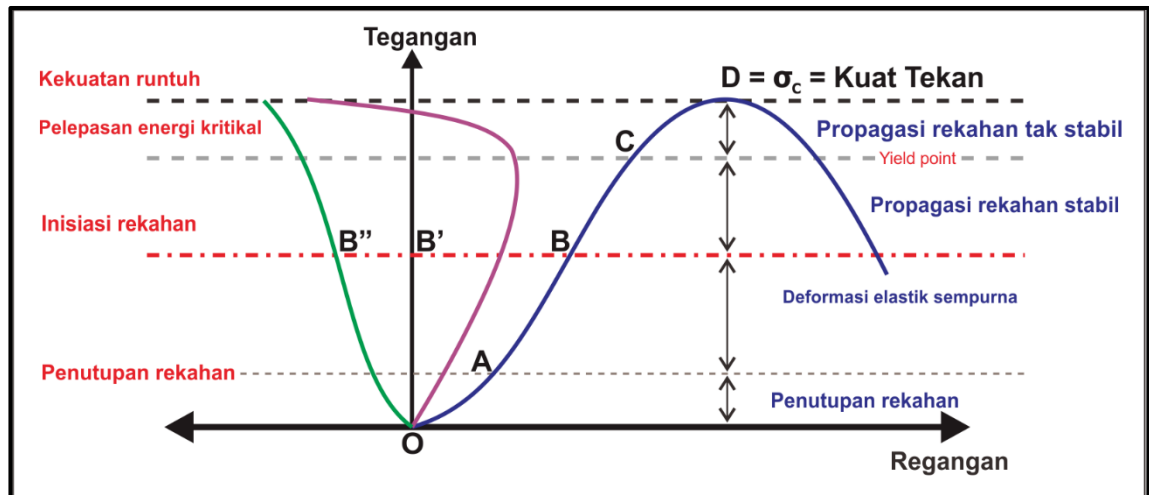
$$\nu = -\frac{\epsilon_l}{\epsilon_a} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan:

ν = nisbah Poisson,

ϵ_l = regangan lateral, dan

ϵ_a = regangan aksial.



Gambar 2.1 Kurva tegangan regangan pada uji kuat tekan uniaksial ((Hoek & Brown, 1980); (Rangga, et al., 2019))

2.3.2 Uji kuat geser batuan

Kuat geser batuan adalah kemampuan batuan untuk melawan tegangan geser yang terjadi pada saat terbebani. Keruntuhan geser atau *shear failure* suatu batuan terjadi bukan disebabkan karena hancurnya partikel-partikel batuan tersebut tapi karena adanya gerak relatif antara partikel-partikel batuan tersebut. Pada peristiwa kelongsoran suatu lereng berarti telah terjadi pergeseran dalam partikel-partikel batuan tersebut. Kekuatan geser yang dimiliki oleh suatu batuan dipengaruhi oleh faktor faktor di bawah ini (Rumbiak, et al., 2020);

1. Kohesi (c)

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.

2. Sudut gesek dalam (ϕ)

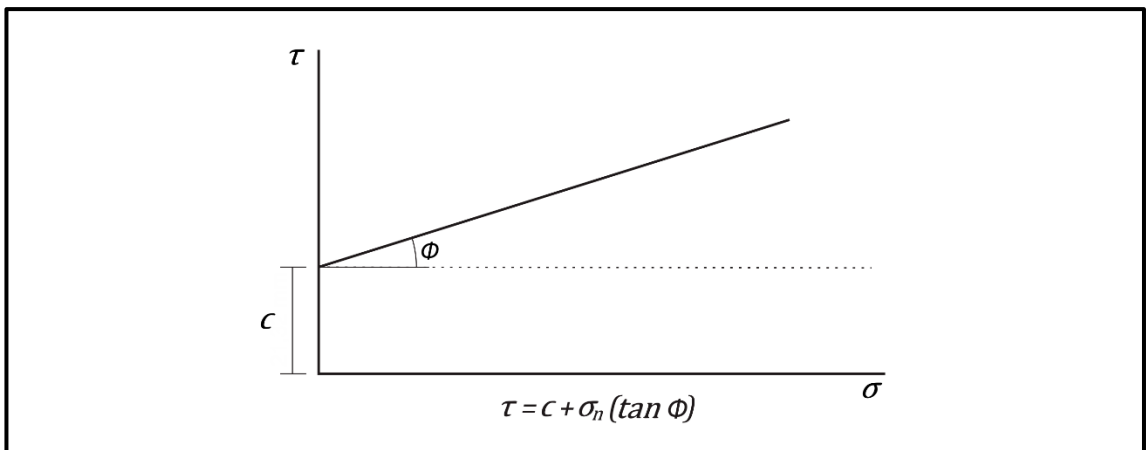
Sudut gesek dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut gesek dalam adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut gesek dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang dikenakan terhadapnya.

Kuat geser batuan berguna sebagai parameter perancangan suatu kestabilan lereng, kriteria keruntuhan geser yang sering digunakan adalah kriteria Mohr-Coulomb yang dapat ditulis dengan persamaan:

$$\tau = c + \sigma_n (\tan \phi) \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan:

- τ = kuat geser,
- c = kohesi,
- σ_n = tegangan normal
- ϕ = sudut gesek dalam



Gambar 2.2 Garis keruntuhan Mohr-Coulomb

2.4 Analisis Kinematika

Analisis kinematika merupakan salah satu metode analisis tentang pergerakan massa batuan dengan merekonstruksi pergerakan yang terjadi di dalam batuan akibat dari proses deformasi tanpa mempertimbangkan gaya-gaya yang menyebabkannya. Metode ini hanya berdasarkan pada evaluasi detail mengenai struktur geologi yang terdapat pada massa batuan dan geometri dari bidang lemah yang dapat memberikan kontribusi terhadap ketidakstabilan suatu lereng.

Analisis kinematika melibatkan penilaian potensi pergerakan yang terjadi pada struktur dalam massa batuan. Parameter analisis kinematika dibagi menjadi 3 yaitu, orientasi struktur geologi, orientasi lereng, dan sudut gesek dalam. Penilaian dilakukan dengan menggunakan *stereonet* sebagai alat grafis untuk mewakili orientasi tiga dimensi (Wyllie & Mah, 2004). *Stereonet* digunakan untuk mengidentifikasi kisaran orientasi *planar* (direpresentasikan sebagai kutub) yang rentan terhadap mekanisme spesifik ketidakstabilan struktural. Ada 2 mekanisme umum yaitu *planar* dan *toppling sliding*.

Analisis kinematika dari ketidakstabilan lereng batuan memperhitungkan perbandingan orientasi bidang diskontinu atau persimpangan mereka dengan sudut gesek, geometri lereng, dan orientasi lereng (Hunt, 2015). Ketika diplot pada jaring proyeksi stereografik, data bidang diskontinu ditampilkan dengan titik yang agak terpecah, namun banyak data bidang diskontinu mungkin berdekatan dengan yang lain jika jumlah data kutub yang diplot ada banyak.

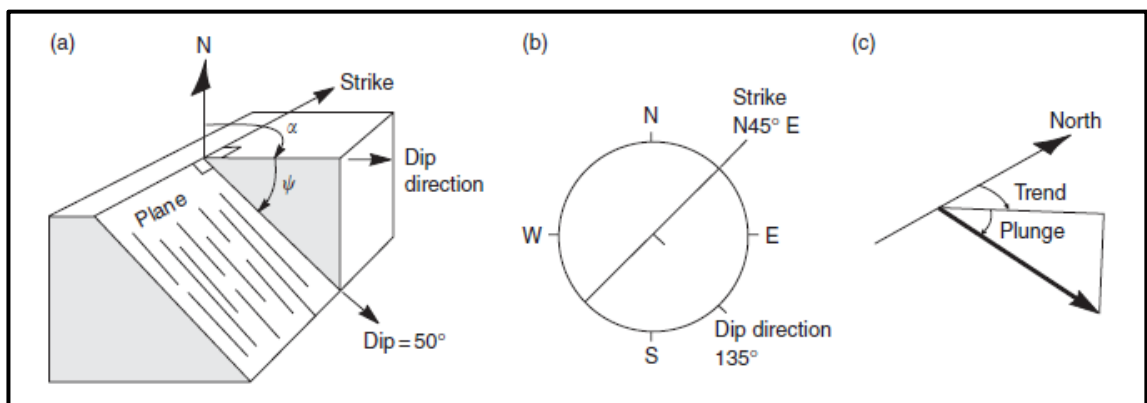
Seperti yang dijelaskan dalam Priest (1993), yang mencerminkan distribusi aktual dari diskontinu, data bidang diskontinu dapat terkonsentrasi pada zona tertentu sesuai dengan jumlah bidang yang diukur dan diplot pada *stereonet*. Jelas bahwa zona tertentu memiliki konsentrasi kutub yang lebih tinggi sementara beberapa yang lain memiliki yang

lebih rendah, nilai interval kontur diwakili oleh persentase diskontinu yang dihitung dalam zona tertentu (Aksoy & Ercanoglu, 2007).

2.4.1 Proyeksi stereografis

Metode Proyeksi Stereografis merupakan tahap awal dalam melakukan analisis kemantapan lereng sebelum melangkah ke tahap perhitungan angka faktor keamanan. Dengan melakukan analisis ini dapat diketahui jumlah bidang, jenis, dan arah longsoran yang mungkin terjadi (Arif, 2016).

Teknik Stereografis merupakan metode grafis yang digunakan untuk menunjukkan struktur dari suatu bidang yang berupa *strike* dan *dip* dari bidang tersebut. Sebelum melakukan pengeplotan pada struktur perlu dipahami dahulu beberapa istilah dalam pengukuran bidang lemah. Dalam teknik stereografis digunakan beberapa istilah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Teknik stereografis (Wyllie & Mah, 2004)

Keterangan gambar:

Strike = Arah dari garis potong yang dibentuk oleh suatu bidang lemah dengan bidang khayal horizontal.

Dip = Sudut kemiringan yang dibentuk oleh bidang lemah dengan bidang khayal horizontal.

Dip Direction = Arah kemiringan dari bidang lemah, diukur pada bidang horizontal (tegak lurus *strike*).

- Plunge* = Sudut dari kemiringan suatu garis, diukur dari bidang horizontal.
- Trend* = Arah dari kemiringan suatu garis, diukur pada bidang horizontal yang merupakan proyeksi dari garis miring tersebut pada bidang horizontal.
- Pitch/rake* = Sudut yang dibentuk oleh garis pada bidang lemah dengan *strike*, yang diukur pada bidang lemahnya.

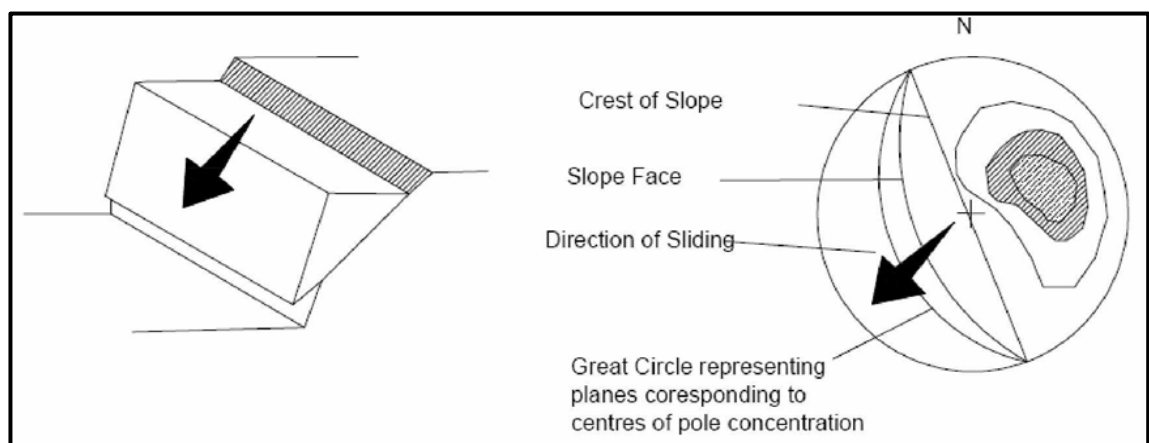
2.4.2 Jenis-jenis longsoran

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

Ada beberapa jenis longsoran yang umum dijumpai pada massa batuan (Hoek & Bray, 1981) yaitu sebagai berikut.

1. Longsoran Bidang (*Plane Failure*)

Longsoran bidang merupakan suatu longsoran batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang dianggap rata. Bidang luncur tersebut dapat berupa sesar, rekahan (*joint*) maupun bidang perlapisan batuan.



Gambar 2.4 Longsoran bidang (Hoek & Bray, 1981)

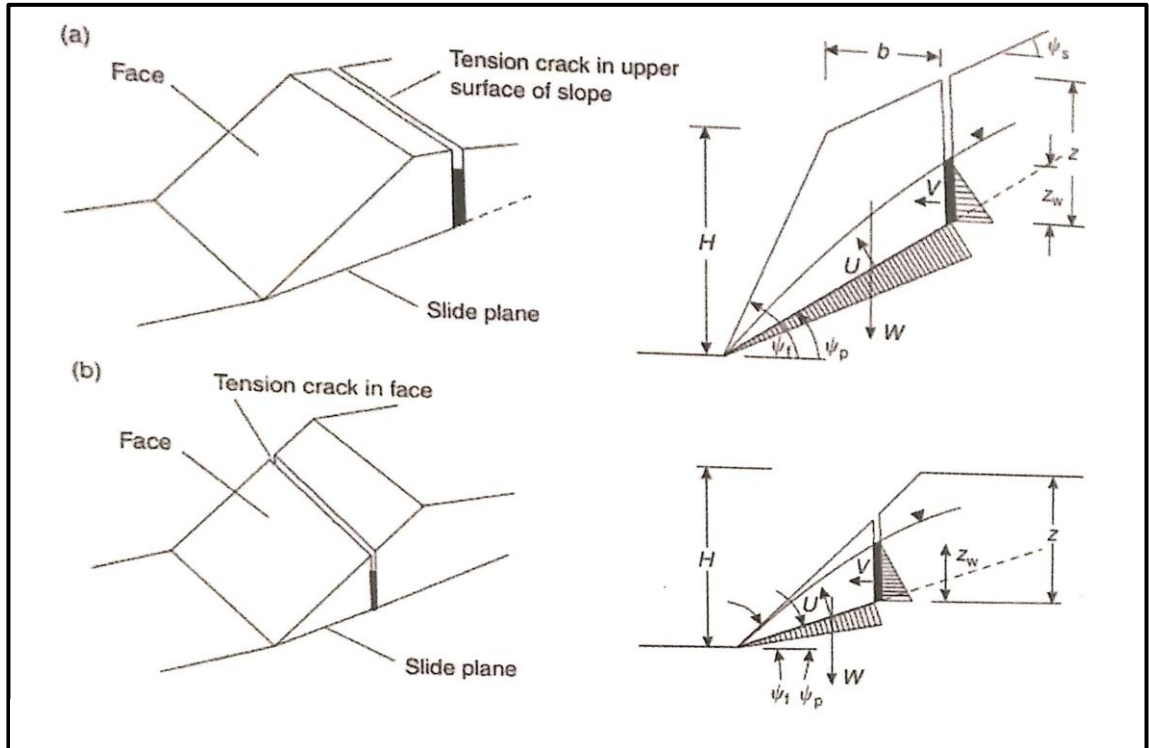
Syarat-syarat terjadinya longsoran bidang adalah:

- a. Terdapat bidang gelincir bebas (*daylight*) yang berarti kemiringan bidang luncuran lebih kecil daripada kemiringan lereng.
- b. Arah bidang perlapisan sejajar atau mendekati dengan arah lereng (maksimum berbeda 20°).
- c. Kemiringan bidang luncur lebih besar daripada sudut gesek dalam batuanannya.
- d. Terdapat bidang geser (tidak terdapat gaya penahan) pada kedua sisi longsoran.

Posisi rekahan tarik perlu diperhatikan dalam analisis longsoran bidang, apakah berada di belakang *crest* lereng atau di muka lereng.

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam analisis ini sebagai berikut (Arif, 2016).

- a. Bidang gelincir dan rekahan tarik memiliki *strike* yang sejajar dengan *strike* lereng.
- b. Posisi rekahan pada bidang adalah vertikal dan terisi air sedalam Z_w .
- c. Air membasahi bidang gelincir lewat bagian bawah bidang rekahan tarik dan merembes sampai di jejaknya di permukaan lereng.
- d. Gaya W (berat blok yang menggelincir), U (gaya angkat oleh air), dan V (gaya tekan air dalam rekahan tarik) bekerja di titik pusat blok sehingga diasumsikan tidak ada momen akibat rotasi.
- e. Kuat geser (τ) dari bidang gelincir adalah $\tau = c + \sigma \cdot \tan \Phi$; dengan c = kohesi, Φ = sudut gesek dalam, serta σ = tekanan normal.
- f. Terdapat bidang *release* di sisi kanan dan kiri blok sehingga tak ada hambatan di bagian kanan dan kiri blok yang menggelincir.



Gambar 2.5 Posisi rekahan tarik (*tension crack*) pada lereng batuan (Hoek & Bray, 1981)

Persamaan yang digunakan untuk menentukan faktor keamanan sebagai berikut.

$$F = \frac{cA + (W \cdot \cos \psi_p - U - V \cdot \sin \psi_p) \tan \phi}{W \cdot \sin \psi_p + V \cdot \cos \psi_p} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan:

$$A = (H + b \cdot \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p \dots\dots\dots (2.13)$$

H = tinggi lereng

z = kedalaman rekahan tarik

b = jarak antar kepala lereng (*crest*) dan rekahan tarik

ψ_p = kemiringan lereng yang berada di atas kepala lereng

$$U = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot z_w (H + b \cdot \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p \dots\dots\dots (2.14)$$

γ_w = berat jenis air

z_w = kedalaman air dalam rekahan

$$V = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot z_w^2 \dots\dots\dots (2.15)$$

$$W = \gamma_r [(1 - \cot \psi_f \tan \psi_p) (bH + \frac{1}{2} H^2 \cot \psi_f) + \frac{1}{2} b^2 (\tan \psi_s - \tan \psi_p)] \text{ (untuk rekahan tarik di belakang } crest) \dots\dots\dots(2.16)$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma_r \cdot H^2 [(1 - \frac{z}{h})^2 \cdot \cot \psi_p (\cot \psi_p \cdot \tan \psi_f - 1)] \text{ (rekahan tarik di muka lereng) } \dots\dots\dots(2.17)$$

Bila diinginkan adanya perbandingan antara geometri lereng, kedalaman air dalam rekahan tarik, dan pengaruh dari kuat geser yang berbeda, persamaan (2.12) dapat dimodifikasi menjadi:

$$F = \frac{(2C/\gamma H) P + (Q \cot \psi_p - R(P + S)) \tan \Phi}{Q + RS \cot \psi_p} \dots\dots\dots (2.18)$$

Dengan:

$$P = (1 - z/H) \cos \psi_p \dots\dots\dots(2.19)$$

$$Q = [(1 - (z/H)^2) \cot \psi_p - \cot \psi_f] \sin \psi_p \text{ (rekahan tarik di belakang } crest) \dots\dots\dots(2.20)$$

$$Q = [(1 - z/H)^2 \cos \psi_p (\cot \psi_p \tan \psi_f - 1) \text{ (rekahan tarik di muka lereng) } \dots\dots\dots(2.21)$$

$$R = \frac{\gamma_w \cdot z_w \cdot z}{\gamma \cdot z \cdot H} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$S = \frac{z_w \cdot z}{z \cdot H} \sin \psi_p \dots\dots\dots(2.23)$$

Jika lereng batuan tersebut berada di daerah rawan gempa dan percepatan yang ditimbulkan gempa dapat dimodelkan menjadi statis αW , perhitungan faktor keamanan dapat dilakukan dengan memasukkan pengaruh gempa dengan cara memodifikasi persamaan (2.12) menjadi persamaan (2.24).

$$F = \frac{cA + [W (\cos \psi_p - \alpha \sin \psi_p) - U - V \sin \psi_p] \tan \Phi}{W (\sin \psi_p + \alpha \cos \psi_p) + V \cdot \cos \psi_p} \dots\dots\dots (2.12)$$

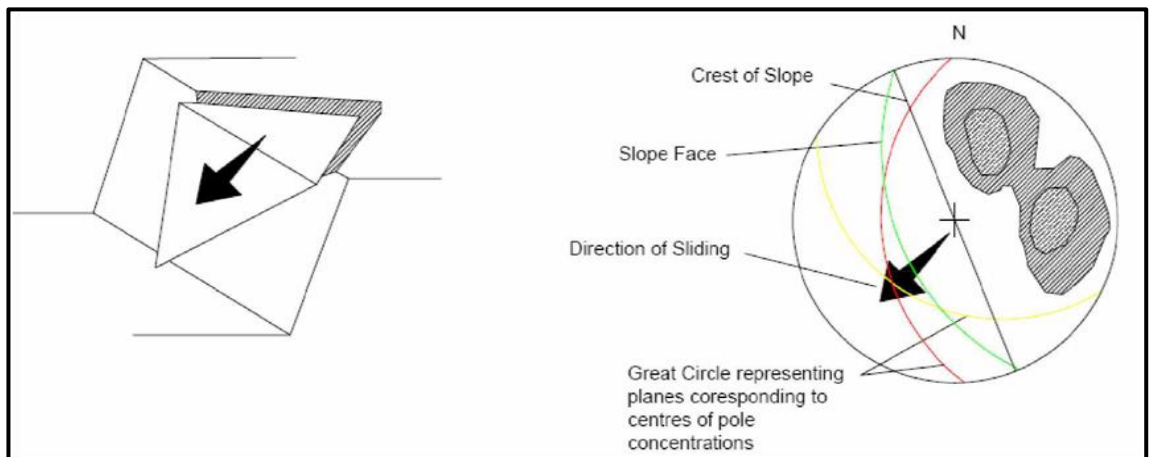
Keterangan:

F = Faktor keamanan ψ_p = Sudut kemiringan bidang lemah ($^\circ$)

A = Luas bidang kontak (m) Φ = Sudut gesek dalam ($^{\circ}$)
 U = Gaya angkat oleh air (t/m) z = kedalaman rekahan tarik
 V = Gaya tekan air dalam rekahan(t/m) γ_f = Berat jenis batuan (t/m³)
 W = Berat blok yang tergelincir (t/m) c = Kohesi (Mpa atau t/m²)
 H = Tinggi lereng (m) γ_w = Berat jenis air (t/m³), 1 t/m³
 ψ_f = Sudut kemiringan lereng α = Faktor gempa
 z_w = kedalaman rekahan tarik yang terisi air

2. Longsoran Baji (*Wedge Failure*)

Longsoran ini hanya dapat terjadi pada batuan yang mempunyai lebih dari satu bidang lemah yang saling berpotongan membentuk baji. Dalam kondisi yang sangat sederhana longsoran baji terjadi pada sepanjang garis potong kedua bidang lemah tersebut. Sudut perpotongan bidang-bidang lemah harus lebih besar dari sudut gesek dalamnya. Longsoran ini umumnya terjadi pada lereng yang tersusun dari material batuan.



Gambar 2.6 Longsoran baji (Hoek & Bray, 1981)

Longsoran baji dapat terjadi dengan syarat geometri adalah:

- a. Permukaan bidang lemah A dan bidang lemah B rata, tetapi kemiringan bidang lemah B lebih besar daripada bidang lemah A.

- b. Arah penunjaman garis potong harus lebih kecil daripada sudut kemiringan lereng.
- c. Bentuk longsor dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dan kedua bidang lemah.

Bila tahanan bidang gelincir (permukaan bidang lemah yang berpotongan) hanya tergantung pada friksi (tanpa kohesi), penentuan faktor keamanan dapat menggunakan persamaan berikut ini:

$$FS = \frac{(R_A + R_B) \tan \Phi}{W \sin \psi_i} \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan: R_A dan R_B adalah reaksi ke arah normal bidang A dan B.

Dengan membuat penampang tegak lurus garis potong kedua bidang lemah tersebut, akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$R_A \sin (\beta - 1/2 \xi) = R_B \sin (\beta + 1/2 \xi) \dots\dots\dots(2.15)$$

$$R_A \cos (\beta - 1/2 \xi) + R_B \cos (\beta + 1/2 \xi) = W \sin \psi_i \dots\dots\dots(2.16)$$

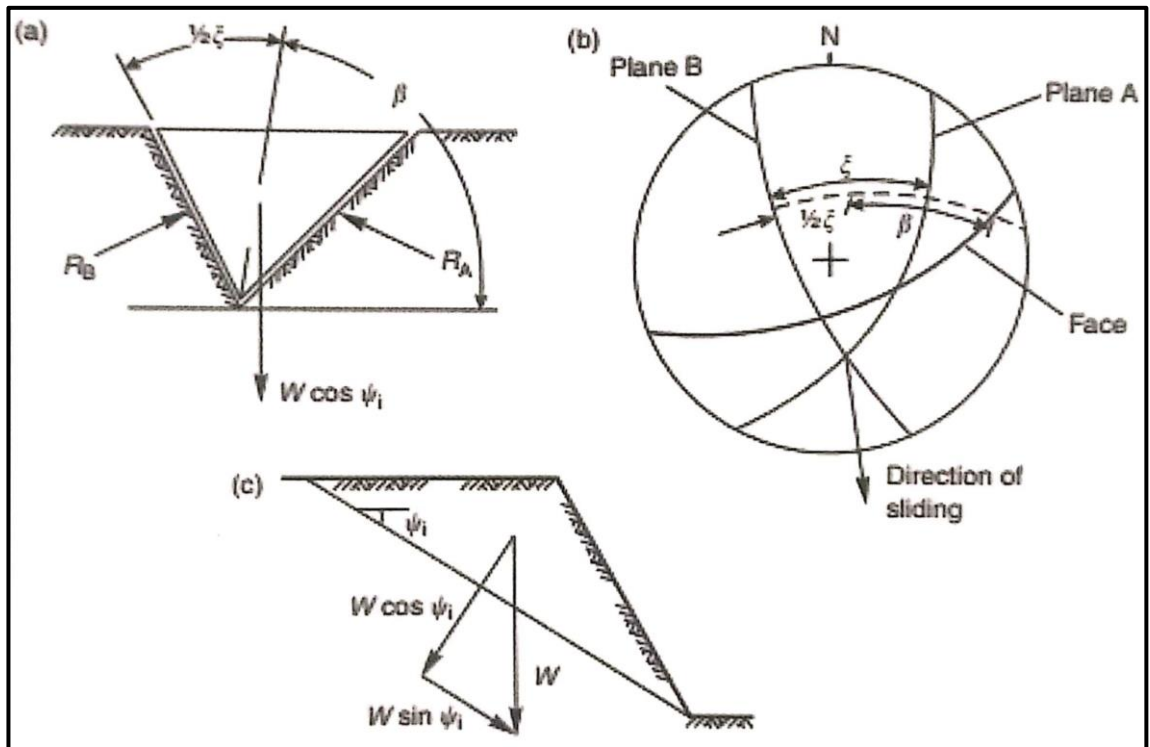
Bila kedua pasangan di atas diselesaikan, akan diperoleh:

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin 1/2 \xi} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan-persamaan tersebut akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$FS = \frac{\sin \beta \tan \Phi}{\sin 1/2 \xi \tan \psi_i} \dots\dots\dots (2.18)$$

Sudut β , ξ , dan ψ_i ini akan sangat mudah ditentukan dengan bantuan stereonet yang akan dibahas lebih terperinci.



Gambar 2.7 Gaya-gaya pada longsoron baji (Hoek & Bray, 1981)

Apabila ternyata ketahanan geser bidang gelincir juga dipengaruhi oleh kohesi dan dijumpai pula adanya rembesan air di bidang-bidang lemah tersebut, penentuan faktor keamanan harus mempertimbangkan kedua faktor tersebut. Dengan membuat asumsi untuk air bahwa air hanya masuk di sepanjang garis potong bidang lemah dengan muka atas lereng (garis 3 dan 4 pada Gambar 2.8) dan merembes keluar di sepanjang garis potong bidang lemah dengan muka lereng (garis 1 dan 2 pada Gambar 2.8), serta baji bersifat impermeabel, persamaan yang digunakan untuk menentukan faktor keamanan sebagai berikut.

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H} (C_A X + C_B Y) + (A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} X) \tan \Phi_A + (B - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y) \tan \Phi_B \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan:

C_A, C_B = Kohesi bidang lemah A dan B

Φ_A, Φ_B = Sudut gesek dalam bidang lemah A dan B ($^\circ$)

γ_r = Bobot isi batuan (t/m^3)

γ_w = Bobot isi air (t/m^3)

H = Tinggi keseluruhan dari baji yang terbentuk (Gambar 2.8)

$$X = \frac{\sin \theta_{2,4}}{(\sin \theta_{4,5} \cos \theta_{2,na})} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$Y = \frac{\sin \theta_{1,3}}{(\sin \theta_{3,5} \cos \theta_{1,nb})} \dots\dots\dots(2.21)$$

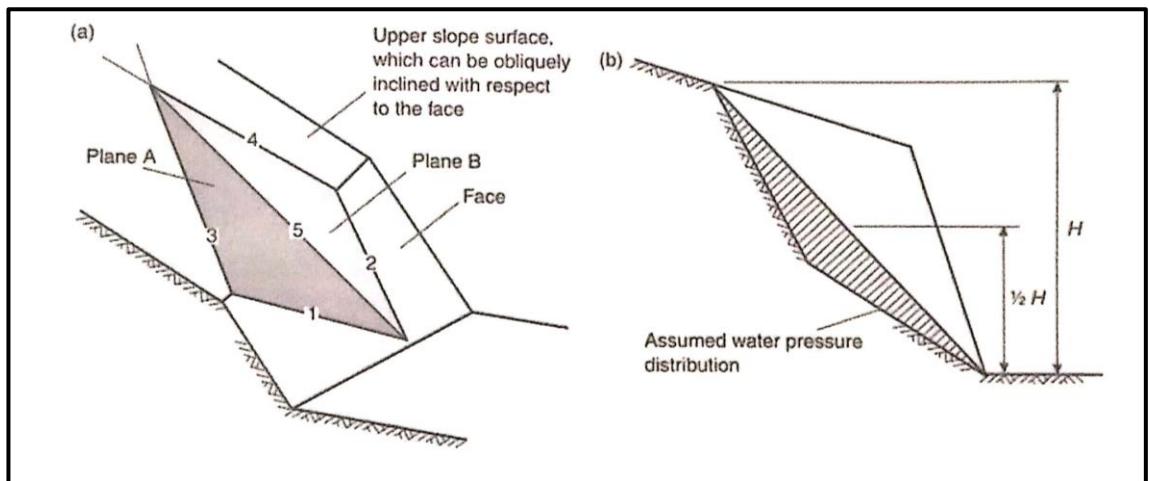
$$A = \frac{(\cos \Psi_a - \cos \Psi_b \cos \theta_{na,nb})}{(\sin \Psi_5 \sin^2 \theta_{na,nb})} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$B = \frac{(\cos \Psi_b - \cos \Psi_a \cos \theta_{na,nb})}{(\sin \Psi_5 \sin^2 \theta_{na,nb})} \dots\dots\dots(2.23)$$

Ψ_a, Ψ_b = Dip bidang lemah A dan B

Ψ_5 = *Plunge* dari garis potong kedua bidang lemah (garis nomor 5 pada Gambar 2.8)

θ_{24} , dll. = Sudut-sudut yang diperoleh dengan menggunakan stereonet seperti terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.8 Geometri baji untuk analisis kemandapan dengan memperhitungkan kohesi air (Hoek & Bray, 1981)

Keterangan:

- 1 = Perpotongan antara bidang A dan muka lereng.
- 2 = Perpotongan antara bidang B dan muka lereng.
- 3 = Perpotongan antara bidang A dan bagian atas permukaan lereng.
- 4 = Perpotongan antara bidang B dan bagian atas permukaan lereng.
- 5 = Perpotongan antara bidang A dan B.

Analisis longsor guling menggunakan asumsi bahwa longsor guling yang terjadi mempunyai n blok yang terbentuk teratur dengan lebar Δx dan tinggi y_n (Gambar 2.11). Untuk keperluan analisis, penomoran blok mulai dari bawah (*toe*) ke atas. Sudut kemiringan lereng adalah ψ_f dan kemiringan muka atas lereng ψ_b , sedangkan *dip* dari bidang-bidang lemah adalah $90-\alpha$. Undak-undakan yang terjadi (akibat longsor) berbentuk teratur dan mempunyai kemiringan β . Konstanta a_1 , a_2 , dan b (Gambar 2.11) selanjutnya dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$a_1 = \Delta x \cdot \tan (\psi_f - \psi_p) \dots\dots\dots(2.24)$$

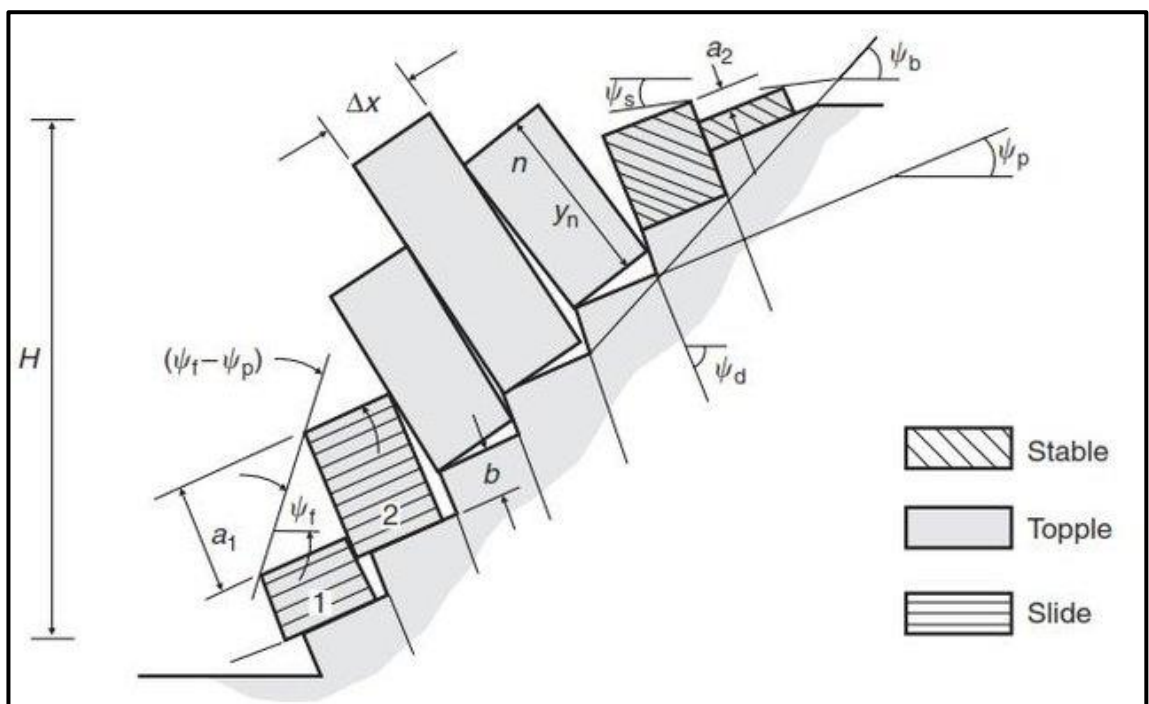
$$a_2 = \Delta x \cdot \tan (\psi_p - \psi_s) \dots\dots\dots(2.25)$$

$$b = \Delta x \cdot \tan (\psi_b - \psi_p) \dots\dots\dots(2.26)$$

Tinggi blok ke- n (y_n) dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$y_n = n (a_1 - b) \text{ (untuk blok dari } crest \text{ ke bawah)} \dots\dots\dots(2.27)$$

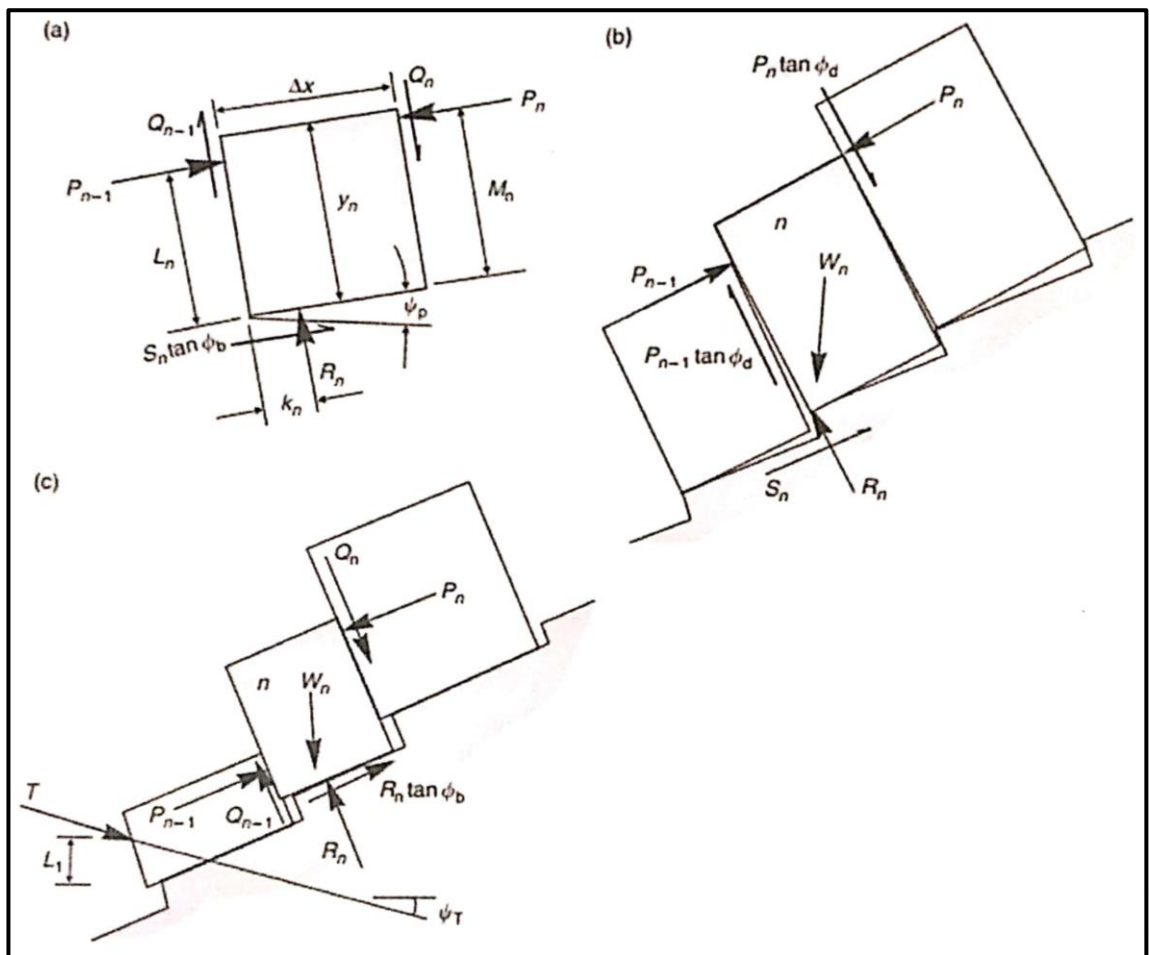
$$y_n = y_{n-1} - a_2 - b \text{ (untuk blok dari atas ke } crest) \dots\dots\dots(2.28)$$



Gambar 2.11 Model longsor guling untuk model kesetimbangan batas (Goodman & Bray, 1976)

Berdasarkan model pada Gambar 2.11, terdapat tiga grup blok yang mempunyai tingkat kemantapan yang berbeda yaitu:

- Satu set blok yang stabil (di bagian atas), ketika sudut gesek dalam material lebih besar dari *dip* bidang ($\Phi_p > \psi_p$);
- Satu set blok yang akan terguling (di bagian tengah); dan
- Satu set blok di daerah *toe*, yang terdorong oleh blok *toppling* di atasnya. Blok ini mungkin stabil, terguling, atau tergelincir (*slide*), tergantung dari kemiringan dan geometri blok. Dengan geometri yang berbeda mungkin saja set blok yang mantap dan yang akan tergelincir berubah menjadi terguling semua.



Gambar 2.12 Kondisi kesetimbangan batas blok ke-n yang akan terguling dan tergelincir (Goodman & Bray, 1976)

Selanjutnya, kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja di setiap blok ditunjukkan pada Gambar 2.12. dari gambar tersebut terlihat bahwa gaya-gaya yang bekerja di dasar blok ke-n adalah R_n dan S_n , sedangkan gaya-gaya yang bekerja di *interface* (dengan blok terdekat) adalah P_n , Q_n , P_{n-1} , Q_{n-1} . Konstanta M_n , L_n , dan K_n yang terdapat pada gambar tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

- a. Untuk blok di bawah *crest* lereng: $M_n = y_n$; $L_n = y_n - a_1$; $K_n = 0$
- b. Untuk blok tepat di *crest* lereng: $M_n = y_n - a_2$; $L_n = y_n - a_1$; $K_n = 0$
- c. Untuk blok di atas *crest* lereng: $M_n = y_n - a_2$; $L_n = y_n$; $K_n = 0$

Sementara untuk gaya-gaya Q_n , Q_{n-1} , R_n , S_n dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$Q_n = P_n \tan \Phi_d \dots\dots\dots(2.29)$$

$$Q_{n-1} = P_{n-1} \tan \Phi_d \dots\dots\dots(2.30)$$

$$R_n = W_n \cos \psi_p + (P_n - P_{n-1}) \tan \Phi_d \dots\dots\dots(2.31)$$

$$S_n = W_n \sin \psi_p + (P_n - P_{n-1}) \dots\dots\dots(2.32)$$

Dengan:

$$W_n = y_n \Delta x \dots\dots\dots(2.33)$$

Sedangkan untuk gaya-gaya P_n dan P_{n-1} , perhitungannya dibedakan untuk blok yang terguling dan blok yang tergelincir.

- a. Blok ke-n yang terguling dicirikan dengan $y_n/\Delta x > \cot(\psi_p)$, bila $\Phi > \psi_p$, maka:

$$P_{n-1,t} = \frac{[P_n (M_n - \Delta x \cdot \tan \Phi_d) + (\frac{W_n}{2}) (y_n \cdot \sin \psi_p - \Delta x \cdot \cos \psi_p)]}{L_n} \dots(2.34)$$

$$P_n = 0 \text{ (untuk blok teratas dari set yang terguling)}$$

$$= P_{n-1} \text{ (untuk blok terguling di bawahnya)}$$

Untuk kontrol lebih lanjut dapat dilihat bahwa pada blok ini harga $R_n > 0$ dan $|S_n| < R_n \tan \Phi_p$.

- b. Untuk blok ke-n yang tergelincir, dicirikan dengan $S_n = R_n \tan \Phi_p$ maka:

$$P_{n-1,s} = P_n - \frac{[W_n(\tan \phi \cdot \cos \alpha - \sin \alpha)]}{1 - \tan^2 \phi} ; \text{ dengan } \alpha = \psi_p \dots\dots\dots(2.35)$$

$$P_n = P_{n-1,t} \text{ (untuk blok teratas dari set blok yang tergelincir)}$$

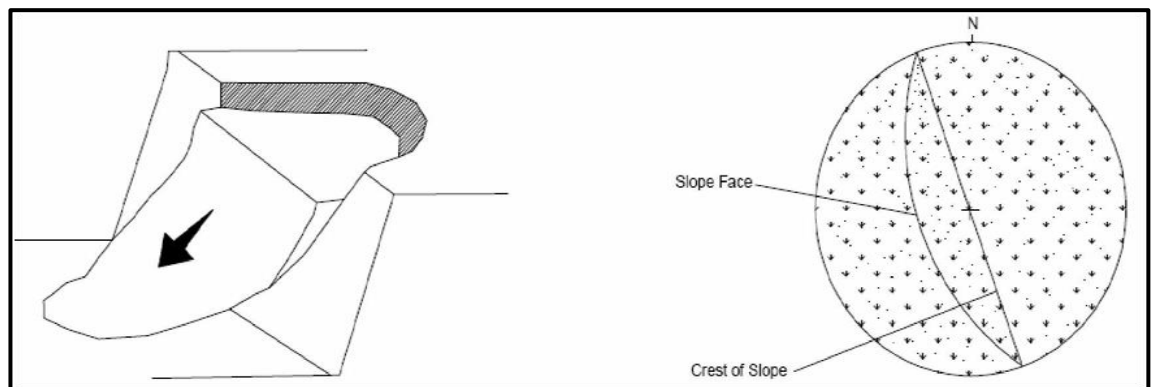
$$= P_{n-1,s} \text{ (untuk blok terguling di bawahnya, di sini akan terlihat } P_{n,t} > P_{n,s} \text{)}$$

Perhitungan di atas dilakukan dengan mengambil $\phi > \psi_p$, namun dengan memperhatikan blok no. 1 (*toe*):

- a. Jika $P_o > 0$, lereng berada pada kondisi tidak mantap untuk nilai ϕ yang diasumsikan. Oleh karena itu, disarankan untuk mengulang perhitungan dengan meningkatkan nilai ϕ ;
- b. Jika $P_o < 0$, disarankan untuk mengulang perhitungan dengan menurunkan nilai ϕ ; dan
- c. Jika $P_o > 0$ tapi cukup kecil, lereng dalam kondisi setimbang untuk nilai ϕ yang diasumsikan.

4. Longsoran Busur (*Circular Failure*)

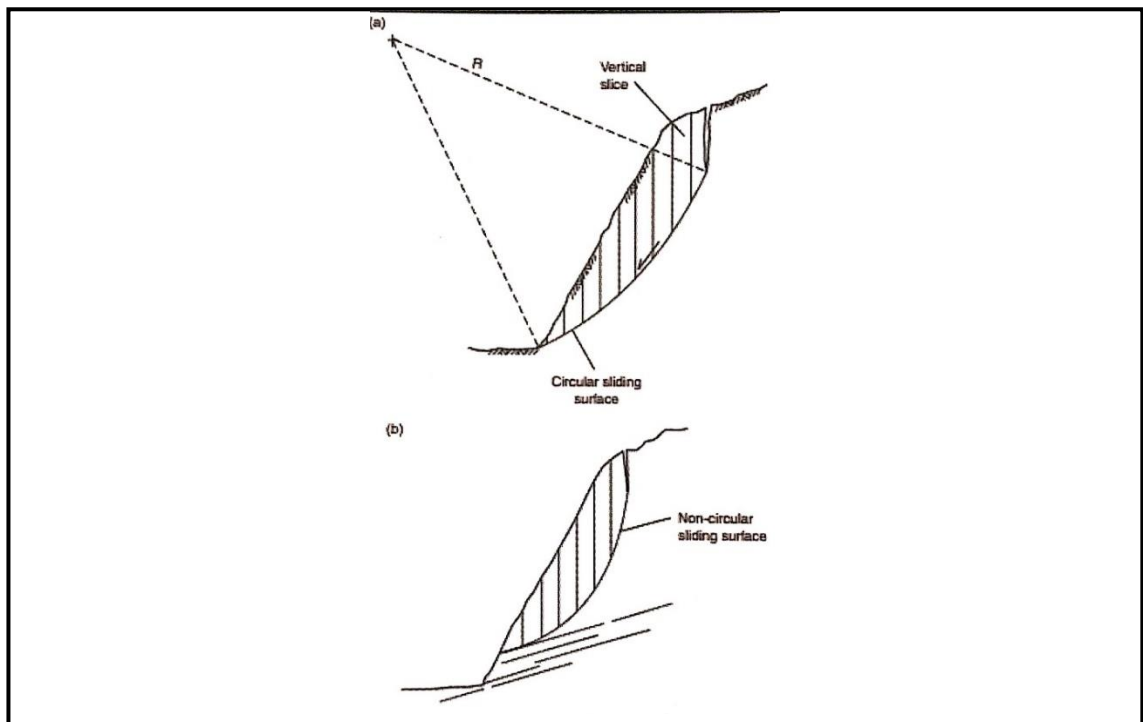
Longsoran busur merupakan longsoran yang paling umum terjadi di alam, terutama pada tanah dan batuan yang telah mengalami pelapukan sehingga hampir menyerupai tanah. Pada batuan yang keras, longsoran busur hanya dapat terjadi jika batuan tersebut sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidang-bidang lemah (rekahan) dengan jarak yang sangat rapat kedudukannya.



Gambar 2.13 Longsoran busur (Hoek & Bray, 1981)

Tanda pertama suatu longsoran busur berupa suatu rekahan tarik permukaan atas atau muka lereng, kadang-kadang disertai dengan menurunnya sebagian permukaan atas lereng yang berada di samping rekahan. Penurunan ini menandakan adanya gerakan lereng yang pada akhirnya akan terjadi longsoran lereng, hanya dapat dilakukan apabila belum terjadi gerakan pada lereng tersebut.

Untuk keperluan praktis, analisis longsoran busur dapat dilakukan dengan menggunakan diagram yang telah dibuat oleh Hoek dan Bray (1981). Namun, diagram-diagram tersebut dibuat berdasarkan asumsi bahwa material penyusun lereng memiliki karakteristik yang homogen sepanjang lereng dan longsoran busur yang terbentuk melewati kaki lereng (Gambar 2.14a) jika kondisi tersebut tidak terpenuhi, perlu dilakukan analisis menggunakan salah satu metode irisan yang dicetuskan oleh Bishop (1955), Janbu (1954), Nonveiller (1965), Spencer (1967), Morgenstern dan Price (1965), atau Sarma (1979). Untuk detail metode Bishop dan Janbu yang sudah disederhanakan untuk longsoran busur (Arif, 2016).



Gambar 2.14 Longsoran busur dengan (a) permukaan bidang gelincir sirkular; dan (b) permukaan bidang gelincir non sirkular

A. Analisis Longsor Busur dengan Metode Bishop

Metode Bishop ini menggunakan kesetimbangan gaya dalam arah vertikal dan kesetimbangan momen pada pusat lingkaran bidang gelincir seperti pada Gambar 0.0. dalam metode ini gaya geser antar irisan diasumsikan nol. Faktor keamanan untuk metode ini dirumuskan sebagai berikut:

$$FS = \frac{\sum X / (1 + Y / FS)}{\sum Z + Q} \dots\dots\dots(2.36)$$

Keterangan:

$$X = [c + (\gamma_r \cdot h - \gamma_w \cdot h_w) \tan \Phi] (\Delta x / \cos \psi_b) \dots\dots\dots(2.37)$$

$$Y = \tan \psi_p \cdot \tan \Phi \dots\dots\dots(2.38)$$

$$Z = \gamma_r \cdot h \cdot \Delta x \cdot \sin \psi_b \dots\dots\dots(2.39)$$

$$Q = 1/2 \cdot \gamma_w \cdot Z^2 (\alpha/R) \dots\dots\dots(2.40)$$

Catatan: Sudut ψ_b negatif ketika *sliding uphill*.

Kondisi berikut ini harus terdapat dalam setiap bagian:

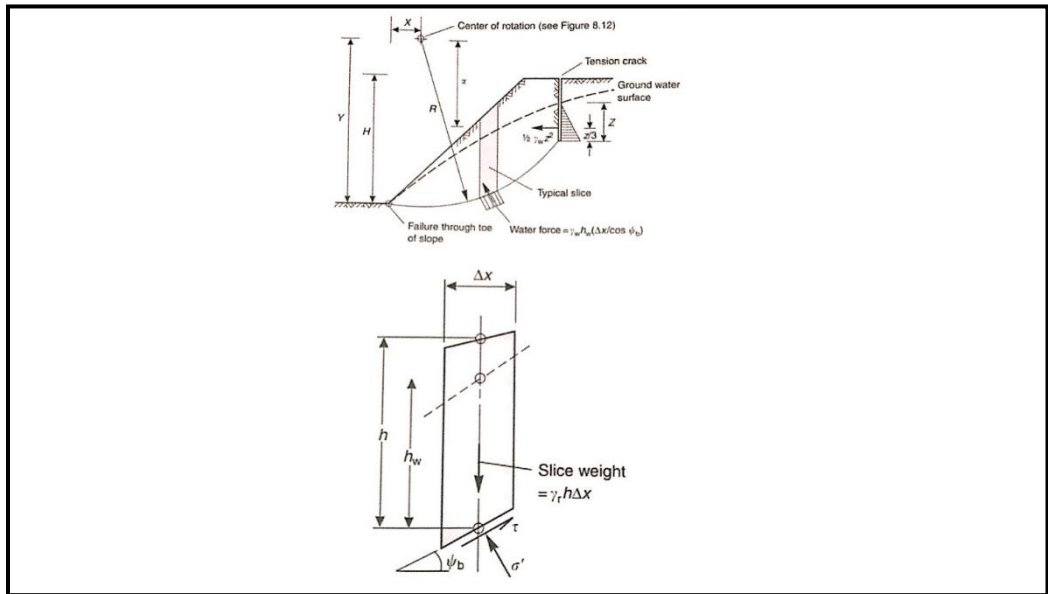
$$(1) \sigma' = \frac{\gamma_r \cdot h - \gamma_w \cdot h_w - c (\tan \psi_b / FS)}{1 + Y / FS} \dots\dots\dots(2.41)$$

$$(2) \cos \psi_b (1 + Y/FS) > 0,2 \dots\dots\dots(2.42)$$

Kondisi pertama berguna untuk memastikan bahwa tegangan normal efektif pada dasar setiap bidang irisan selalu positif. Jika syarat ini tidak terpenuhi, pengaruh tegangan akibat rekahan perlu diperhitungkan dalam analisis. Jika kondisi ini tetap tidak dapat dipenuhi setelah mempertimbangkan kembali kondisi air tanah atau memperhitungkan tegangan akibat rekahan, rumus Faktor Keamanan menurut metode Bishop tidak berlaku dan perlu analisis lebih terperinci.

Sementara itu, kondisi kedua yang diajukan oleh Whitman dan Bailey (1967) digunakan untuk memastikan bahwa analisis tidak akan dibatalkan (*invalidated*) oleh kondisi-kondisi yang kadang terjadi di kaki lereng. Jika kondisi ini tidak

terpenuhi oleh semua bidang irisan, dimensi bidang irisan perlu diganti. Namun, jika syarat ini masih tidak terpenuhi, metode Bishop ini pun tidak berlaku.



Gambar 2.15 Metode Bishop (Hoek & Bray, 1981)

B. Analisis Longsor Busur dengan Metode Janbu

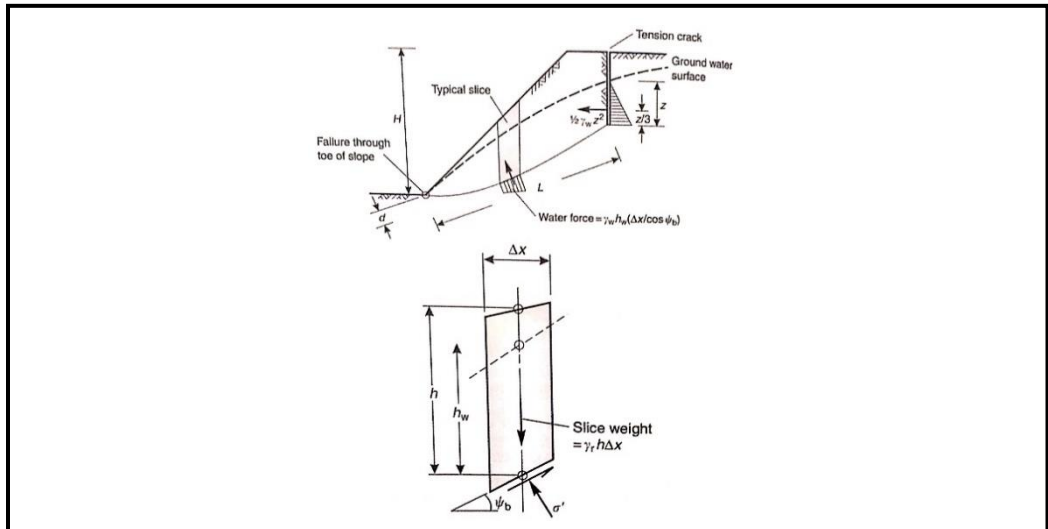
Longsor busur dengan bidang gelincir non-sirkular juga dapat dianalisis menggunakan metode Janbu. Agar pengaruh adanya beban dinamis (getaran) ikut diperhitungkan dalam analisis, dilakukan sedikit modifikasi terhadap rumus Faktor Keamanan (FK) Janbu, yaitu dengan menambahkan faktor gempa (F_g) yang didefinisikan sebagai:

$$F_g = a/g \dots\dots\dots(2.43)$$

Keterangan:

a = Percepatan yang timbul sehubungan dengan adanya beban dinamis/gempa, dapat berupa a_h yang arah kerjanya mendatar atau a_v yang arah kerjanya vertikal.

g = Percepatan gravitasi.



Gambar 2.16 Metode Janbu (Hoek & Bray, 1981)

Rumus faktor keamanan (FK) Janbu tetap berbentuk:

$$FK = \frac{f_o \cdot \Sigma X / (1 + Y / FS)}{\Sigma Z + Q} \dots \dots \dots (2.44)$$

Keterangan:

$$X = [c + (\gamma_r \cdot h - \gamma_w \cdot h_w) \tan \Phi] (1 + \tan^2 \psi_b) \Delta x \dots \dots \dots (2.45)$$

$$Y = \tan \psi_b \cdot \tan \Phi \dots \dots \dots (2.46)$$

$$Z = \gamma_r \cdot h \cdot \Delta x \cdot \tan \psi_b \dots \dots \dots (2.47)$$

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot Z^2 \dots \dots \dots (2.48)$$

Catatan: Sudut ψ_b negatif ketika *sliding uphill*.

Aproksimasi faktor koreksi f_o (Hoek & Bray, 1981):

$$f_o = 1 + K \left[\frac{d}{L} - 1.4 \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (2.49)$$

untuk: $c' = 0$; $K = 0,31$

$$c' > 0; \Phi' > 0; K = 0,50$$

Menurut Nonveiller (1965), metode Janbu memberikan nilai faktor keamanan yang logis jika diterapkan pada bidang gelincir yang landai (biasanya pada batuan dengan sudut gesek dalam $> 30^\circ$) dan sebaiknya tidak digunakan untuk permukaan lereng yang curam dengan material penyusunannya memiliki sudut gesek dalam yang rendah.

2.5 Klasifikasi Massa Batuan dan Rekomendasi

Massa batuan merupakan susunan dari sistem blok-blok batuan utuh yang dipisahkan oleh bidang-bidang diskontinu yang masing-masing saling bergantung sebagai sebuah kesatuan unit yang berupa joint, bidang perlapisan dan patahan. Massa batuan dibentuk dengan adanya bidang diskontinu, tegangan permukaan dan perubahan akibat proses pelapukan (Galih & Khanifa, 2019).

Adanya bidang diskontinu ini membedakan kekuatan massa batuan dengan kekuatan batuan utuh atau intact rock. Massa batuan akan memiliki kekuatan yang lebih kecil dibandingkan dengan batuan utuh. Variasi yang besar dalam hal komposisi dan struktur dari batuan serta sifat dan keberadaan bidang diskontinu yang memotong batuan akan membawa komposisi dan struktur yang kompleks terhadap suatu massa batuan.

Menurut Hoek dan Brown (1980), sifat atau karakteristik massa batuan dapat menentukan dalam pekerjaan penggalian seperti terowongan dan lereng. Kekuatan massa batuan, kuat geser, kekuatan batuan utuh dan perilaku tegangan-regangan batuan menjadi parameter penting dalam perhitungan desain, kegiatan pemboran dan peledakan dalam suatu pertambangan.

Klasifikasi massa batuan adalah proses menempatkan massa batuan ke dalam kelompok atau kelas pada hubungan yang ditentukan (Bieniawski, 1989) dan menetapkan deskripsi unik (atau nomor) berdasarkan sifat/karakteristik yang serupa sehingga perilaku massa batuan dapat diprediksi. Massa batuan mengacu pada kumpulan material batuan yang dipisahkan oleh diskontinuitas batuan, sebagian besar oleh kekar, bidang perlapisan, intrusi dan sesar. Bidang perlapisan, intrusi, dan sesar tidak begitu umum dibandingkan dengan kekar dan ditangani secara individual

(Bieniawski, 1993). Sistem klasifikasi massa batuan memungkinkan pengguna untuk mengikuti pedoman dan menempatkan objek di kelas yang sesuai.

Karakterisasi dan klasifikasi massa batuan merupakan sarana untuk mengomunikasikan dengan tepat karakteristik massa batuan yang diperkirakan dan tidak boleh diambil sebagai alternatif untuk prosedur desain rekayasa rinci. Menurut Bieniawski (1989), sistem klasifikasi tidak cocok untuk digunakan dalam desain yang rumit dan final, terutama untuk bukaan bawah tanah yang kompleks. Penggunaan klasifikasi seperti itu membutuhkan pengembangan lebih lanjut dari sistem ini. Sistem klasifikasi massa batuan dirancang untuk bertindak sebagai bantuan desain rekayasa dan tidak dimaksudkan untuk menggantikan pengamatan lapangan, pertimbangan analitis, pengukuran, dan penilaian teknik (Bieniawski, 1993).

Sistem ini merupakan bagian penting dari pendekatan desain terkemuka (metode desain empiris dan numerik) dan semakin banyak digunakan dalam kedua pendekatan desain seiring dengan peningkatan daya komputasi. Ini harus digunakan dalam hubungannya dengan skema desain lain untuk merancang suatu alasan keseluruhan yang kompatibel dengan tujuan desain dan geologi situs. Dalam prakteknya, sistem klasifikasi massa batuan telah memberikan bantuan desain sistematis yang berharga pada banyak proyek rekayasa terutama pada konstruksi bawah tanah, terowongan dan proyek pertambangan (Hoek, 2007).

Sistem ini memberikan dasar untuk memahami perilaku karakteristik dan berhubungan dengan pengalaman yang diperoleh dalam kondisi batuan di satu situs ke situs lainnya. Dalam tahap desain kelayakan dan pra-liminary suatu proyek, informasi lengkap terkait parameter massa batuan, tegangannya, dan karakteristik hidrologi sebagian besar tidak tersedia. Dengan demikian, klasifikasi massa batuan terbukti membantu pada tahap ini untuk menilai perilaku massa batuan. Ini tidak hanya memberikan informasi tentang komposisi, kekuatan, sifat deformasi dan karakteristik

massa batuan yang diperlukan untuk memperkirakan persyaratan dukungan tetapi juga menunjukkan informasi mana yang relevan dan diperlukan (Bieniawski, 1989).

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

1. Mengidentifikasi parameter-parameter penting yang mempengaruhi perilaku massa batuan.
2. Membagi massa batuan ke dalam grup yang mempunyai perilaku sama menjadi kelas massa batuan.
3. Memberikan dasar-dasar untuk pengertian karakteristik dari setiap kelas massa batuan.
4. Menghubungkan pengalaman dari kondisi massa batuan di satu lokasi dengan lokasi lainnya.
5. Mengambil data kuantitatif dan pedoman untuk rancangan rekayasa (*engineering*).
6. Memberikan dasar umum untuk kemudahan komunikasi diantara para insinyur dan geologiwan.

Dengan menggunakan klasifikasi massa batuan, akan diperoleh keuntungan bagi perancangan kemantapan lereng yaitu (Bieniawski, 1989):

1. Meningkatkan kualitas hasil penyelidikan lapangan dengan data masukan minimum sebagai hasil parameter klasifikasi.
2. Memberikan informasi/data kuantitatif untuk tujuan perancangan.
3. Penilaian rekayasa dapat lebih baik dan komunikasi lebih efektif pada suatu proyek.

2.5.1 Bidang diskontinu

Secara umum bidang diskontinu merupakan bidang yang membagi massa batuan menjadi bagian-bagian yang terpisah. Bidang diskontinu dapat berupa bidang

perlapisan, *joint* ataupun patahan. Bidang diskontinu dapat mempengaruhi kuat geser batuan termasuk bentuk dan tingkat kekasaran permukaan batuan (Wyllie & Mah, 2004).

Bidang diskontinu terbentuk karena tegangan tarik yang terjadi pada batuan. Hal ini yang membedakan antara diskontinu alami yang terbentuk oleh peristiwa geologi atau geomorfologi, dengan diskontinu artifisial yang terbentuk akibat aktivitas manusia misalnya pengeboran, peledakan dan proses pembongkaran material batuan. Struktur bidang diskontinu pada batuan disebut sebagai struktur batuan sedangkan batuan yang tidak pecah disebut sebagai material batuan yang bersama struktur batuan, membentuk massa batuan (Brady & Brown, 2004).

Beberapa macam bidang diskontinu sebagai berikut (Brady & Brown, 2004):

1. *Fault* atau patahan

Fault atau patahan adalah bidang diskontinu yang secara jelas memperlihatkan tanda-tanda bidang tersebut mengalami pergerakan. Tanda-tanda tersebut diantaranya adalah adanya zona hancuran maupun *slickenside* atau jejak yang terdapat di sepanjang bidang *fault*. *Fault* dikenal sebagai *weakness zone* karena akan memberikan pengaruh pada kestabilan massa batuan dalam wilayah yang luas.

2. *Joint* atau kekar

Joint adalah bidang diskontinu yang terbentuk secara alami tanpa ada tanda-tanda pergeseran yang terlihat. Kelompok *joint* yang sejajar disebut *joint set* dan saling berpotongan membentuk *joint system*.

Joint berdasarkan lokasi terjadinya atau tempat terbentuknya dapat dikelompokkan menjadi:

- a. *Foliation joint* adalah bidang diskontinu yang terbentuk sepanjang bidang foliasi pada batuan metamorf.
- b. *Bedding joint* adalah bidang diskontinu yang terbentuk sepanjang bidang perlapisan pada batuan sedimen.

3. *Fold* atau Lipatan

Lipatan adalah bidang diskontinu pada batuan yang terbentuk karena batuan mengalami deformasi sehingga terlipat. Lipatan dapat berskala luas maupun lokal. Selama proses perlipatan, tegangan dan tekanan dapat meningkat sehingga dapat mengurangi kuat geser batuan.

4. *Crack*

Crack adalah bidang diskontinu yang berukuran kecil atau tidak menerus. *Crack* untuk menjelaskan pecahan atau *crack* yang terjadi pada saat pengujian batuan, peledakan dan untuk menjelaskan mekanisme pecahnya batuan.

5. *Rupture*

Rupture adalah pecahan atau bidang diskontinu yang terjadi karena proses ekskavasi atau pekerjaan manusia yang lain.

6. *Fissure*

Fissure adalah bidang diskontinu yang berukuran kecil, terutama yang tidak terisi atau terbungkus oleh material isian.

7. *Bedding Plane*

Bedding plane 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. Bidang perlapisan dapat mengurangi kuat geser.

8. *Shear Zone*

Shear zone adalah bidang pergeseran yang berisi material hancuran akibat tergerus oleh pergerakan kedua sisi massa batuan dengan ukuran celah yang lebih lebar dari kekar. Ketebalan material hancuran yang berupa batu atau tanah ini bervariasi dari ukuran milimeter sampai meter.

9. *Cleat*

Cleat merupakan rekahan pada lapisan batubara dengan arah memotong dan searah dengan lapisan batubara.

10. *Vein*

Vein merupakan bidang diskontinu yang berupa material atau mineral yang mengisi celah pada batuan. *Vein* dapat berupa batuan beku akibat proses mineralisasi. *Vein* dapat menambah kekuatan massa batuan dan dapat mengurangi kekuatan batuan.

2.5.2 Parameter untuk klasifikasi massa batuan

Perilaku material atau balok batuan utuh bersifat kontinu sedangkan perilaku massa batuan yang sangat retak bersifat diskontinu. Untuk setiap desain teknik dalam massa batuan, sifat teknik material batuan dan diskontinuitas harus dipertimbangkan. Berbagai parameter signifikansi terbesar dan berbeda harus dipertimbangkan untuk menggambarkan massa batuan secara memuaskan untuk menjamin stabilitas massa batuan.

Berbagai parameter penting yang digunakan untuk deskripsi dan klasifikasi massa batuan (Bieniawski, 1993) adalah:

1. Kekuatan bahan batuan utuh (kuat tekan, modulus elastisitas).
2. *Rock Quality Designation* (RQD) yang merupakan ukuran kualitas inti bor atau intensitas rekahan.
3. Parameter kekar batuan seperti orientasi, jarak, dan kondisi (bukaan, kekasaran permukaan, pengisi dan pelapukan).
4. Tekanan dan aliran air tanah.
5. Tekanan in situ.
6. Struktur geologi utama (lipatan dan patahan).

2.5.3 Sistem klasifikasi massa batuan

Skema klasifikasi massa batuan berasal dari tahun 1879 ketika Ritter (1879) merancang pendekatan empiris dalam desain terowongan untuk mengetahui persyaratan dukungan. Sejak itu, sistem ini telah berkembang dan sebagian besar skema klasifikasi multiparameter (Barton et al., 1974; Bieniawski, 1968; Bieniawski, 1973, 1989; Wickham, 1972) dikembangkan dari sejarah kasus teknik sipil (Hoek, 2007).

Skema klasifikasi massa batuan yang sering digunakan dalam rekayasa batuan untuk membantu dalam merancang struktur bawah tanah adalah sistem *Rock Mass Rating* (RMR), *Q-System* dan *Geological Strength Index* (GSI). Beberapa sistem yang terkenal dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sistem klasifikasi massa batuan utama (Cosar, 2004)

Sistem Klasifikasi Massa Batuan	Originator	Negara Asal	Area Aplikasi
Rock Load	Terzaghi, 1946	USA	Terowongan dengan dukungan baja
Stand-up Time	Lauffer, 1958	Australia	Terowongan
New Austrian Tunneling Method (NATM)	Pacher et al., 1964	Austria	Terowongan
Rock Quality Designation (RQD)	Deere et al., 1967	USA	Penebangan inti, terowongan
Rock Structure Rating (RSR)	Wickham et al., 1972	USA	Terowongan
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973 (modifikasi terakhir 1989-USA)	South Africa	Terowongan, tambang, (lereng, pondasi)
Modified Rock Mass Rating (M-RMR)	Unal and Ozkan, 1990	Turkey	Pertambangan
Rock Mass Quality (Q)	Barton et al. 1974 (modifikasi terakhir 2002)	Norway	Terowongan, tambang, pondasi
Strength-Block Size	Franklin, 1975	Canada	Terowongan
Basic Geotechnical Classification	ISRM, 1981	International	Umum
Rock Mass Strength (RMS)	Stille et al., 1982	Sweden	Tambang logam
Unified Rock Mass Classification System	Williamson, 1984	USA	Umum

Sistem Klasifikasi Massa Batuan	Originator	Negara Asal	Area Aplikasi
Communication Weakening Coefficient System (WCS)	Singh, 1986	India	Tambang batubara
Rock Mass Index (RMI)	Palmstrom, 1996	Sweden	Terowongan
Geological Strength Index (GSI)	Hoek and Brown, 1997	Canada	All underground excavations

2.5.4 *Rock mass rating*

Sistem RMR atau Klasifikasi Geomekanik dikembangkan oleh Bieniawski selama 1972-1973 di Afrika Selatan untuk menilai stabilitas dan persyaratan dukungan terowongan. Sejak itu telah berturut-turut disempurnakan dan ditingkatkan karena lebih banyak sejarah kasus telah diperiksa. Keuntungan dari sistem ini adalah hanya beberapa parameter dasar yang berkaitan dengan geometri dan kondisi mekanis massa batuan yang digunakan (Bieniawski, 1973).

Untuk mengklasifikasikan massa batuan, sistem RMR menggabungkan enam parameter dasar dengan menggunakan persamaan (Bieniawski, 1989):

$$RMR = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + B \dots\dots\dots(2.50)$$

Keterangan:

- A₁ = Kekuatan Batuan
- A₂ = *Rock Quality Designation*
- A₃ = Jarak Diskontinu
- A₄ = Kondisi Diskontinu
- A₅ = Kondisi Air Tanah
- B = Orientasi Kekar

1. Kekuatan batuan (*Rock Strength*)

Kekuatan suatu batuan secara utuh dapat diperoleh dari *Point Load Strength Index* atau *Uniaxial Compressive Strength* (UCS). Kekuatan batuan utuh adalah kekuatan

suatu batuan untuk bertahan menahan suatu gaya hingga pecah. Kekuatan batuan dapat dibentuk oleh suatu ikatan adhesi antar butir mineral atau tingkat sementasi pada batuan tersebut, serta kekerasan mineral yang membentuknya. Hal ini akan sangat berhubungan dengan genesa, komposisi, tekstur, dan struktur batuan.

Tabel 2.2 Klasifikasi kuat massa batuan (Hoek & Bray, 1981)

UCS (MPa)	Kualitas Massa Batuan	Contoh Jenis Batuan
0,25 – 1	Sangat Lemah Sekali (<i>Extremely Low</i>)	Dapat dihancurkan dengan mudah menggunakan tangan, mendekati <i>soil</i> .
1 – 5	Lemah Sekali (<i>Very Low</i>)	Mudah dihancurkan dengan ujung palu geologi, dapat dikupas dengan pisau, material seukuran 30 mm dapat dipatahkan dengan tekanan jari.
5 - 25	Lemah (<i>Low</i>)	Mudah dihancurkan dengan palu, dapat melengkung 1-3 mm saat ditumbuk. Dalam bentuk <i>core</i> (panjang 150 mm dan diameter 50 mm) dapat dipatahkan dengan tangan. Jika dipukul dengan palu suaranya melenting.
25 – 50	Medium (<i>Medium</i>)	Mudah dibaret dengan pisau, dalam bentuk <i>core</i> (panjang 150 mm dan diameter 50 mm) bisa namun sangat sulit untuk dipatahkan dengan tangan.
50 – 100	Kuat (<i>Strong</i>)	Dalam bentuk <i>core</i> (panjang 150 mm dan diameter 50 mm) tidak dapat dipatahkan dengan tangan tetapi dengan sekali pukulan palu geologi
100 – 250	Sangat Kuat (<i>Very Strong</i>)	Sampel dapat dihancurkan dengan lebih dari satu kali <i>blow</i> , jika dipukul dengan palu akan berdenting.
> 250	Sangat Kuat Sekali (<i>Extremely Strong</i>)	Butuh banyak pukulan palu geologi untuk menghancurkannya, suara pukulan berdenting.

2. Rock Quality Designation

Rock Quality Designation (RQD) dikembangkan pada tahun 1964 oleh D.U. Deere (1964). RQD digunakan sebagai salah satu parameter untuk mendeskripsi massa batuan secara kuantitatif. RQD merupakan parameter yang dapat menunjukkan kualitas massa batuan sebelum penggalian dilakukan. RQD didefinisikan sebagai persentase potongan inti utuh yang lebih panjang dari 100 mm (4 inci) (Hoek, 2007).

Hubungan antara RQD dengan kualitas batuan dikemukakan oleh Deere (1967), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Hubungan RQD dengan kualitas batuan (Deere, et al., 1967)

RQD	Kualitas Batuan
< 25	Sangat Jelek
25-50	Jelek
50-75	Sedang
75-90	Baik
90-100	Sangat Baik

Ketika tidak ada data lubang bor tersedia maka dapat menggunakan data garis pemindaian (*scanline*) untuk memperkirakan RQD, persamaan Priest dan Hudson (1976) dapat digunakan (Rai, 2013):

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \dots\dots\dots(2.51)$$

Di mana:

λ = jumlah total kekar per panjang *scanline*.

3. Jarak Diskontinu

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

4. Kondisi Diskontinu

Kondisi diskontinu merupakan suatu parameter yang terdiri dari beberapa sub-sub parameter, yakni kemenerusan bidang diskontinu (*persistence*), lebar rekahan bidang diskontinu (*aperture*), kekasaran permukaan bidang diskontinu (*roughness*), material pengisi bidang diskontinu (*infilling*), dan tingkat pelapukan dari permukaan bidang diskontinu (*weathered*) (Singh & Goel, 2011).

a. Kemenerusan bidang diskontinu

Kemenerusan Bidang Diskontinu ditentukan dengan mengamati dan mengukur panjang dari bidang kekar di massa batuan. Klasifikasi persistensi kekar menurut Bieniawski (1989) dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Klasifikasi persistensi kekar (Bieniawski, 1989)

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

b. Lebar bukaan

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

c. Kekasaran

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.

d. Material pengisi

Material pengisi didefinisikan sebagai material yang mengisi kekar. Keberadaan material pengisi ini akan mempengaruhi kekuatan massa batuan.

e. Pelapukan pada batuan

Tabel 2.5 Tingkat pelapukan (Bieniawski, 1989)

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

5. Kondisi Air Tanah

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

Tabel 2.6 Kondisi air tanah (Bieniawski, 1989)

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

6. Orientasi Kekar

Tabel 2.7 Pengaruh orientasi kekar dalam pembuatan terowongan dan penggalian

Pengaruh Jurus dan Kemiringan Kekar						
Jurus Tegak Lurus Sumbu Terowongan				Jurus Paralel Sumbu Terowongan		Tidak Tergantung Jurus
Gerakan Searah Kemiringan		Gerakan Berlawanan Kemiringan				
Dip	Dip	Dip	Dip	Dip	Dip	Dip
45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	0°-20°
Sangat Menguntungkan	Menguntungkan	Sedang	Tidak Menguntungkan	Sangat Tidak Menguntungkan	Sedang	Tidak Menguntungkan

Tabel 2.8 Nilai bobot orientasi kekar (Bieniawski, 1989)

Orientasi Kekar (<i>Strike/Dip</i>)	Sangat Menguntungkan	Menguntungkan	Biasa	Tidak Menguntungkan	Sangat Tidak Menguntungkan
Terowongan	0	-2	-5	-10	-12
Bobot Pondasi	0	-2	-7	-10	-25
Lereng	0	-5	-25	-50	-60

2.5.5 *Slope mass rating*

Romana (1985) mengembangkan perpanjangan dari sistem RMR yang disebut *Slope Mass Rating* (SMR) untuk digunakan dalam rekayasa lereng batuan. Ini termasuk faktor penyesuaian baru untuk orientasi kekar dan peledakan/penggalian terhadap sistem RMR untuk lereng. Berdasarkan pengamatan Romana pada 28 lereng dengan berbagai derajat potensi kelongsoran, ditemukan bahwa 6 lereng longsor. SMR pada dasarnya tidak memperhatikan kelongsoran tanah dan longsoran baji secara langsung, dan didefinisikan sebagai (Romana, et al., 2003):

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \dots\dots\dots(2.52)$$

Di mana:

- F₁ = Menggambarkan keparalelan antara *strike* lereng dengan *strike* kekar.
= (1 – sin A)²

A = Sudut antara *strike* lereng dan kekar = $|\alpha_j - \alpha_s|$

F₂ = Menerangkan hubungan sudut *dip* kekar sesuai dengan model longsoran
 = $(\tan \beta_j)$

B_j = Sudut *dip* kekar.

F₃ = Selisih dari besar kemiringan kekar dikurangi dengan besar kemiringan
 jenjang.

F₄ = Faktor penyesuaian yang berkaitan dengan metode ekskavasi.

Tabel 2.9 Pembobotan SMR (Romana, et al., 2003)

<i>Case</i>	<i>The Calculate d value</i>	<i>Very Favourable</i>	<i>Favourable</i>	<i>Fair</i>	<i>Unfavourable</i>	<i>Very unfavourable</i>
P	$ \alpha_j - \alpha_s $					
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
P/T	F1	0.15	0.4	0.7	0.85	1
P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
P	F2 = β_j	0.15	0.4	0.7	0.85	1
T		1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
T	$\beta_j + \beta_s$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
T/P	F3	0	-6	-25	-50	-60

P = *Plane failure* α_j = *Joint dip direction* β_j = *Joint dip*

T = *Toppling failure* α_s = *Slope dip direction* β_s = *Slope dip*

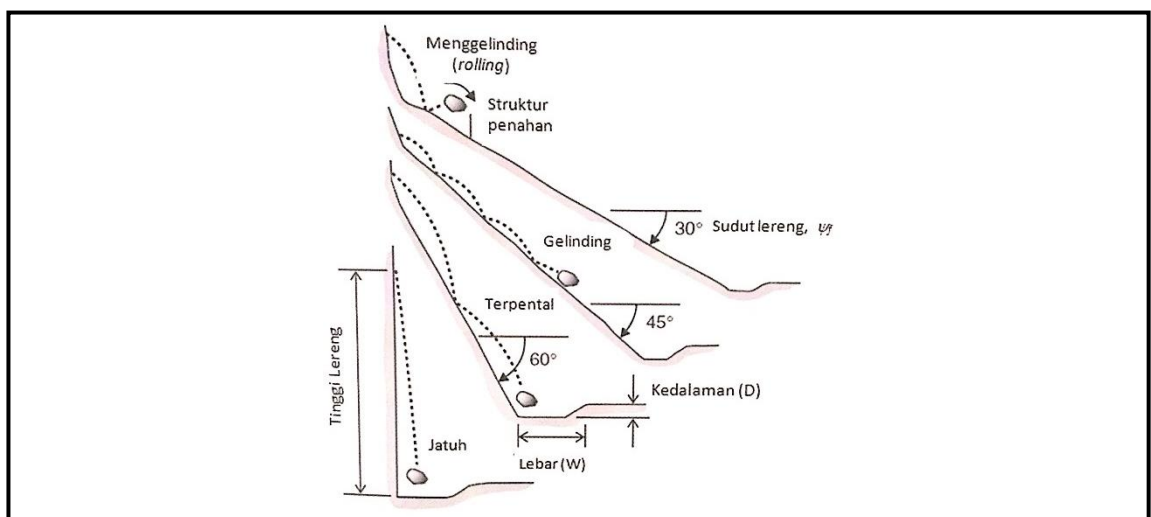
Tabel 2.10 Nilai pembobotan untuk metode ekskavasi lereng (Romana, 1985)

Metode	Lereng Alami	Peledakan Presplitting	Peledakan Smooth	Peledakan Normal / Penggalan Mekanis	Peledakan Buruk
F4	15	10	8	0	-8

Nilai pembobotan yang didapatkan dari hasil perhitungan SMR menurut Romana (1985), selanjutnya diklasifikasikan untuk menentukan tingkat massa lereng.

2.5.6 Proteksi terhadap jatuhnya batu

Salah satu bahaya yang berhubungan dengan lereng batuan adalah jatuhnya batu atau bongkah yang lepas dari lereng. Jatuhan batu ini bisa berbentuk gelindingan (*roll*), pantalan (*bounce*) dan jatuh bebas (*fall*) seperti terlihat pada Gambar 2.17. energi yang dilepaskan oleh jatuhnya batu (*boulder*) tadi tentunya dapat menimbulkan kerusakan dan bahkan kecelakaan (Arif, 2016).



Gambar 2.17 Model jatuhnya batu dan proteksinya (Ritchie, 1963)

Bentuk proteksi yang dapat dilakukan antara lain:

A. Pembuatan Selokan (*Ditch*)

Pembuatan selokan dapat ditambah dengan pengaman berupa patok yang dilengkapi rantai atau tembok pasangan batu biasa. Menurut Hoek dan Bray (1981), dimensi saluran yang aman ialah saluran dengan lebar 25 kaki dan kedalaman 6 kaki untuk lereng dengan tinggi 100 kaki. Selain itu dasar saluran perlu diletakkan lapisan kerikil untuk memecahkan atau meredam energi yang dilepaskan oleh jatuhnya *boulder*.

B. Pemasangan Jaring Kawat (*Mesh*)

Jaring kawat yang dipasang pada muka lereng dapat menjadi metode yang efektif untuk menahan jatuhnya batu dan mencegah jatuhnya batu tersebut mengenai jalan di bawahnya (Ciarla, 1986). Jaring kawat yang terpasang pada lereng akan melokalisasi jatuhnya batu.

2.6 Pemodelan Lereng

Analisis kestabilan lereng dapat dilakukan setelah geometri lereng dan kondisi lapisan tanah pada lereng telah diketahui melalui uji lapangan maupun uji laboratorium. Beberapa grafik stabilitas lereng dan program komputer yang tersedia dapat digunakan sebagai alat bantu dalam menganalisis kestabilan lereng. Sebagian besar program komputer yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng didasarkan pada pendekatan keseimbangan pembatas untuk model dua dimensi, meskipun kubah juga memungkinkan analisis tiga dimensi.

Program lain yang lebih kompleks yang menggunakan elemen hingga atau metode elemen batas juga tersedia, dan memungkinkan insinyur untuk melakukan evaluasi kemiringan dua atau tiga dimensi yang disempurnakan. Namun, analisis semacam itu memerlukan model relativitas lengkap dari lapisan tanah dan parameter konstitutifnya yang ditentukan oleh program pengujian laboratorium yang ekstensif. Kekhawatiran tentang pengujian laboratorium, kurangnya keakraban dengan metodologi penggunaan pendekatan elemen hingga.

2.6.1 Konsep kestabilan lereng

Analisis kestabilan lereng dilakukan untuk menilai tingkat kestabilan suatu lereng. Istilah kestabilan lereng dapat didefinisikan sebagai ketahanan blok di atas suatu permukaan miring (diukur dari garis horizontal) terhadap runtuh (*collapsing*) dan gelinciran (*sliding*) (Kliche, 1999). Dalam hal ini setiap permukaan tanah yang memiliki

kemiringan terhadap garis horizontal disebut lereng, baik alami maupun buatan manusia. Karena lereng tidak horizontal, melainkan membentuk sudut, akan timbul suatu gaya penggerak akibat adanya gravitasi dan cenderung membuat blok di atas permukaan miring tersebut bergerak menuruni lereng. Jika gaya penggerak tersebut sangat besar dan kekuatan geser dari material penyusun relatif kecil, dapat terjadi longsoran (Terzaghi & Peck, 1987).

Menurut Abramson (2002), tujuan analisis kestabilan lereng antara lain:

- a. Memahami pembentukan dan jenis-jenis lereng alami serta hal-hal yang memengaruhi karakteristik lereng tersebut.
- b. Menilai kestabilan lereng pada kondisi berdasarkan jangka waktu pendek (biasanya selama tahap konstruksi) dan panjang.
- c. Menilai kemungkinan terjadinya longsoran yang melibatkan lereng alami dan lereng buatan.
- d. Memahami mekanisme runtuh dan pengaruh dari faktor-faktor lingkungan serta menganalisis longsoran yang terjadi.
- e. Memungkinkan perancangan ulang suatu lereng yang telah runtuh, dan jika perlu melakukan perencanaan untuk pengukuran ulang sebagai langkah preventif.
- f. Mempelajari pengaruh beban seismik (*seismic loading*) pada lereng.

Kestabilan suatu lereng dapat dinyatakan dengan nilai Faktor Keamanan (FK) yang merupakan perbandingan antara gaya penahan dengan gaya penggerak (Wiyono, 2006). Pemahaman tentang peran Faktor Keamanan (FK) sangat penting dalam desain lereng yang rasional. Salah satu fungsi FK yang diakui dengan baik adalah untuk memperhitungkan ketidakpastian dan dengan demikian menjaga dari ketidaktahuan tentang keandalan item yang masuk ke dalam analisis, seperti parameter kekuatan, distribusi tekanan pori, dan stratigrafi. Secara umum, semakin rendah kualitas penyelidikan lokasi, semakin tinggi FK yang diinginkan, terutama jika perancang hanya

memiliki pengalaman terbatas dengan bahan yang bersangkutan. Peran lain dari FK adalah bahwa ia merupakan alat empiris di mana kinerja stabilitas deformasi terbatas pada jumlah yang dapat ditahan dalam batasan ekonomi. Dengan cara ini, pilihan FK sangat dipengaruhi oleh akumulasi pengalaman dengan massa tanah tertentu. Karena tingkat risiko yang dapat diambil juga sangat dipengaruhi oleh pengalaman, besaran sebenarnya dari FK yang digunakan dalam desain akan bervariasi menurut jenis material dan persyaratan kinerja (Abramson, et al., 2002).

Dalam menentukan kemantapan atau kestabilan lereng dikenal istilah faktor keamanan (*safety factor*) yang merupakan perbandingan antara gaya yang menahan gerakan terhadap gaya yang menggerakkan tanah hingga dianggap stabil, bila dirumuskan sebagai berikut (Hoek & Bray, 1981):

$$FK = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya penggerak}} \dots\dots\dots (2.53)$$

Nilai faktor keamanan secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut.

- a. Nilai $FK < 1$, lereng dalam keadaan tidak stabil atau tidak mantap.
- b. Nilai $FK = 1$, lereng dalam keadaan seimbang.
- c. Nilai $FK > 1$, lereng dalam keadaan stabil atau mantap.

2.6.2 Metode analisis kestabilan lereng

Metode stabilisasi lereng umumnya mengurangi gaya pendorong, meningkatkan gaya penahan, atau bisa kedua-duanya. Kekuatan pendorong dapat dikurangi dengan cara penggalan material dari bagian yang tepat dari tanah yang tidak stabil dan drainase air untuk mengurangi tekanan hidrostatik yang bekerja pada zona tidak stabil. Gaya penahan dapat ditingkatkan dengan (Abramson, et al., 2002):

- a. Drainase yang dapat meningkatkan kekuatan geser tanah.
- b. Penghapusan jenjang yang lemah atau zona kegagalan lainnya.
- c. Membangun struktur penahan atau pendukung lainnya.

- d. Penyediaan perkuatan tanah in situ.
- e. Perlakuan kimia (pengerasan tanah) untuk meningkatkan kekuatan geser tanah.

Terdapat sejumlah metode yang dapat digunakan dalam analisis kestabilan lereng mulai dari yang sederhana, seperti metode kesetimbangan batas, sampai dengan yang rumit dan canggih, seperti metode *finite-element* dan metode *discrete-element*. Setiap metode mempunyai keunggulan dan keterbatasan masing-masing.

Saat ini terdapat metode analisis dan program komputer yang tersedia untuk analisis kestabilan lereng memerlukan pemahaman tentang prinsip-prinsip dari metode tersebut, kelebihan dan keterbatasan pada setiap metode dan program komputer sehingga dapat digunakan secara tepat (Arief, 2008).

Secara garis besar metode analisis kestabilan lereng terhadap longsoran dibagi menjadi tiga kelompok yaitu (Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga , 2005):

A. Analisis Berdasarkan Pengamatan Visual

Stabilitas lereng dapat diperkirakan dengan melakukan pengamatan secara visual di lapangan, tanpa melakukan penyelidikan baik di lapangan maupun di laboratorium. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan lereng yang stabil dan bergerak, serta keadaan geologinya.

B. Analisis dengan Komputasi

Analisis stabilitas lereng dengan menggunakan komputasi mencakup metode Fellenius, Bishop, dan Janbu.

C. Analisis dengan Menggunakan Grafik

Metode analisis stabilitas lereng dengan menggunakan grafik mencakup metode Cousins, Janbu, Duncan & Buchignani, Hoek & Bray.

Tabel 2.11 Metode-metode untuk analisis stabilitas pada lereng tanah (Pusat Litbang Prasarana Transportasi, 2005)

Metode	Permukaan Keruntuhan	Asumsi-Asumsi	Keuntungan-Keuntungan	Keterbatasan-Keterbatasan	Referensi	Rekomendasi
Lereng Tak Terbatas (<i>Infinite Slope</i>)	Garis lurus	Setiap potongan vertikal merupakan perwakilan yang representatif dari lereng secara keseluruhan	Metode perhitungan secara manual yang sederhana	Asumsi bidang keruntuhan selalu hanya perkiraan. Metode ini mungkin saja digunakan untuk suatu bidang runtuh di mana perbandingan panjang terhadap kedalaman sangat besar dan efek akhir dapat diabaikan	Lambe & Whitman (1969)	Cocok untuk lereng yang panjang, terutama pada lereng dengan lapisan pelapukan yang tipis terhadap lapisan batuan.
Blok Keruntuhan (<i>Sliding Block</i>)	Dua atau lebih garis lurus	Massa keruntuhan dapat dibagi ke dalam dua atau lebih blok, keseimbangan tiap blok dipertimbangkan secara terpisah dengan menggunakan gaya-gaya antar blok	Cocok untuk perhitungan dengan tangan ketika menggunakan dua atau tiga blok	Tidak mempertimbangkan deformasi dari blok. Hasil yang didapat sensitif terhadap sudut horizontal yang dipilih untuk gaya-gaya antar blok dan inklinasi dari permukaan di antara blok	Lambe & Whitman (1969)	Sangat berguna terutama jika stratum yang lemah diantara atau di bawah lereng dan ketika lereng di atas stratum yang sangat kuat
Bishop	Lingkaran (<i>Circular</i>)	Mempertimbangkan pengaruh keseimbangan gaya-gaya dan momen untuk masing-masing potongan. Metode asumsi yang sangat teliti untuk gaya-gaya vertikal pada sisi masing-masing potongan hingga menghasilkan persamaan yang memuaskan. Metode-metode yang disederhanakan mengasumsikan resultan gaya-gaya vertikal adalah nol untuk masing-masing potongan	Hasil yang baik diperoleh jika membandingkan metode yang disederhanakan dengan metode elemen hingga (rata-rata perbedaan faktor keamanan sekitar 8%). Banyak program komputer yang tersedia	Permukaan keruntuhan lingkaran tidak selalu sesuai untuk lereng-lereng di Indonesia, jika radius lingkaran besar, kadang-kadang bisa digunakan	Bishop (1955)	Berguna jika permukaan keruntuhan lingkaran dapat diasumsikan
Grafik Bishop & Morgenstern	Lingkaran (<i>Circular</i>)	Menggunakan metode Bishop yang disederhanakan dengan nilai r_u rata-rata	Penggunaannya sangat sederhana. Lebih akurat daripada grafik Hoek	Terbatas hanya untuk tanah homogen dan lereng lebih landai dari 27°	Bishop & Morgenstern (1960)	Kegunaannya terbatas
Grafik Hoek	Lingkaran (<i>Circular</i>)	Massa keruntuhan dipertimbangkan sebagai satu keseluruhan. Pemecahan ikatan terbawah, diasumsikan tegangan-tegangan normal terkonsentrasi pada satu konsentrasi pada satu titik	Derajat kemiringan lereng dari 10° sampai dengan 90°, telah diantisipasi pada grafik. Penggunaannya sangat sederhana	Terbatas hanya untuk tanah homogen dengan lima kondisi muka air tanah yang spesifik	Hoek & Bray (1981)	Sangat berguna sebagai perhitungan awal atau untuk lereng beresiko rendah
Janbu	Non Lingkaran (<i>Non Circular</i>)	Prosedur digeneralisasikan dengan pertimbangan keseimbangan gaya dan momen untuk masing-masing potongan. Asumsi-asumsi pada garis dari aksi antar potongan tidak termasuk dalam prosedur rutin dan hasil faktor keamanan yang dihitung dikoreksi karena adanya pertimbangan gaya-gaya vertikal	Permukaan geser yang realistis dapat dipergunakan. Analisis rutin dapat dengan mudah ditangani dengan bantuan kalkulator yang berprogram atau dengan perhitungan tangan biasa	Memperkenalkan suatu faktor untuk material homogen dan prosedur rutin dapat memberikan kesalahan yang cukup besar pada lereng-lereng yang terdiri dari material yang lebih dari satu. Faktor keamanan yang dihasilkan biasanya ada di bawah nilai perkiraan pada kasus-kasus seperti ini. Metode umum tidak memiliki keterbatasan-keterbatasan yang sama	Janbu (1972) Metode rutin diberikan oleh Hoek & Bray (1981)	Sangat berguna untuk sebagian besar lereng tanah residual

Tabel 2.12 Metode analisis stabilitas pada lereng batuan (Pusat Litbang Prasarana Transportasi, 2005)

Metode	Permukaan Keruntuhan	Asumsi-Asumsi	Keuntungan-Keuntungan	Keterbatasan-Keterbatasan	Referensi	Rekomendasi
Keruntuhan Bidang (<i>Plane Failure</i>)	Bidang tunggal dengan pemunculan <i>tension crack</i>	Kedua permukaan keruntuhan dan <i>tension crack, strike</i> secara paralel terhadap permukaan lereng. Permukaan-permukaan yang lepas muncul karena itu tidak ada ketahanan terhadap batas-batas lateral	Tekanan-tekanan air pada <i>tension crack</i> dan pada bidang keruntuhan juga termasuk metode analisis yang sederhana	Momen-momen tidak dipertimbangkan dalam analisis. Dapat memberikan hasil yang lebih dari estimasi pada nilai faktor keamanannya pada lereng curam di mana <i>toppling</i> bisa terjadi	Hoek & Bray (1981)	Berguna bila bidang keruntuhan bisa diasumsikan seperti pada lembaran <i>joint</i>
Keruntuhan Baji (<i>Wedge Failure</i>)	Dua bidang kekar membentuk baji tiga dimensi	Garis dari perpotongan <i>joint-dip</i> kurang curam dibandingkan muka batu dan celah diantaranya. Kedua bidang <i>joint</i> tetap kontak selama keruntuhan terjadi	<i>Tension crack</i> dan tegangan-tegangan air dapat disertakan dalam analisis. Grafik-grafik yang hanya mempertimbangkan friksi juga tersedia	Momen tidak dipertimbangkan	Hoek & Bray (1981)	Berguna. Grafik-grafik bisa digunakan sebagai penilaian awal terhadap suatu kasus
Keruntuhan Guling (<i>Toppling Failure</i>)	Kekar-kekar bersilangan secara curam	Analisis dilakukan dengan asumsi-asumsi bahwa beberapa blok akan runtuh dan sebagian lainnya akan rebah. Tekanan-tekanan air tidak dimasukkan dalam analisis	-	Terbatas untuk beberapa kasus sederhana dengan geometri yang sesuai	Hoek & Bray (1981)	Belum ada alat bantu desain lereng batuan yang tersedia tapi metode ini kadang-kadang berguna

2.7 Analisis Balik Menggunakan Metode Deterministik

Analisis balik dilakukan pada suatu longsor untuk mengetahui parameter kekuatan batuan penyusun lereng yaitu kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ), saat lereng dalam keadaan setimbang atau sesaat sebelum longsor (Hoek & Bray, 1981).

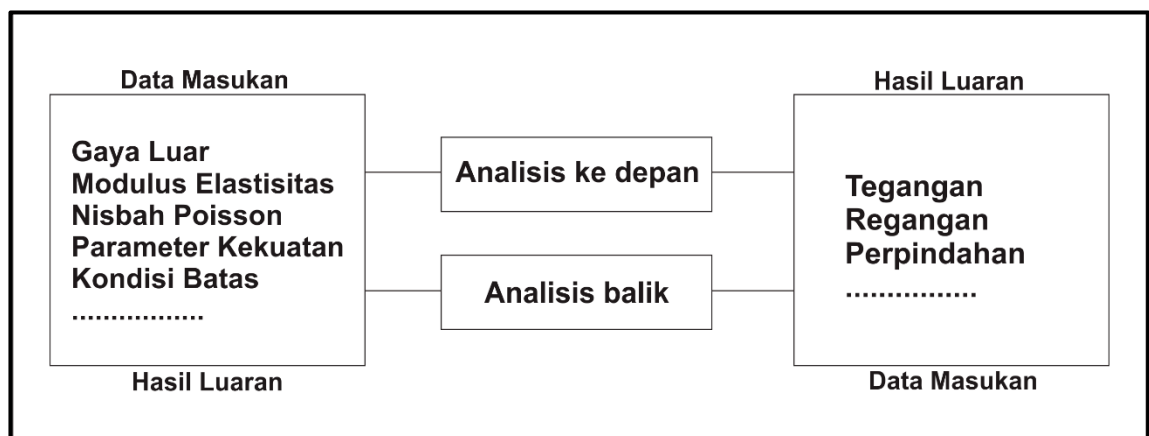
Analisis balik bertujuan untuk mencari prediksi nilai kohesi dan sudut gesek dalam terendah yang dapat mengakibatkan kelongsoran. Analisis balik dilakukan pada longsor yang telah terjadi dengan menggunakan geometri lereng sebelum longsor terjadi. Lebih lanjut, analisis balik juga menggunakan bidang gelincir yang disesuaikan dengan kondisi bidang gelincir lereng yang telah mengalami longsor. Nilai kohesi dan sudut gesek dalam bidang gelincir diperkirakan hingga diperoleh nilai faktor keamanan lereng (FK) = 1 atau mendekati 1 (Suryadi & Heriyadi, 2018).

Pada analisis balik, data masukan berupa nilai-nilai terukur, seperti perpindahan, regangan, tegangan dan tekanan, sedangkan hasil keluaran berupa parameter mekanik massa batuan, seperti modulus Young, rasio Poisson, parameter kekuatan (kohesi dan sudut gesek dalam), permeabilitas, dan bahkan keadaan awal stres. Prosedur analisis ini sepenuhnya merupakan perhitungan terbalik dari analisis biasa, sehingga disebut "*back analysis*", sedangkan analisis biasa disebut "*forward analysis*".

Dalam desain struktur batuan, analisis biasa dilakukan untuk menghitung tegangan, regangan, dan perpindahan massa batuan. Analisis tersebut memerlukan data masukan berupa gaya luar (tegangan awal), parameter mekanis massa batuan, seperti modulus Young, nisbah Poisson, parameter kekuatan (kohesi dan sudut gesek dalam), permeabilitas, dan lain lain. Data input dalam analisis balik adalah hasil pengukuran, seperti perpindahan, regangan, tegangan, dan lain lain, sedangkan hasilnya adalah parameter mekanik massa batuan, tegangan awal, permeabilitas dan lain lain. Jelas bahwa hasil dari analisis balik sesuai dengan data input dari analisis biasa, sedangkan

data input untuk analisis balik adalah data pengukuran. Oleh karena itu, analisis balik tampaknya sepenuhnya merupakan perhitungan terbalik dari analisis biasa.

Dalam analisis biasa, jelas bahwa program komputer canggih apapun dapat digunakan, tidak peduli berapa banyak data input yang diperlukan, selama semua data dapat ditentukan dengan uji laboratorium dan *in situ*, sedangkan analisis balik hanya sejumlah data pengukuran (data input untuk analisis balik) yang tersedia. Ini berarti bahwa semua data masukan yang diperlukan untuk analisis biasa hampir tidak dapat diidentifikasi oleh analisis balik. Untuk mengatasi kesulitan ini, persamaan konstitutif massa batuan yang digunakan dalam analisis balik harus cukup sederhana untuk dapat menghitung kembali semua parameter mekanik persamaan dari sejumlah data pengukuran lapangan yang terbatas. Untuk mencapai tujuan ini, hasil pengukuran lapangan harus ditafsirkan dengan benar selama konstruksi tanpa penundaan (Sakurai, 2017).



Gambar 2.18 Definisi analisis balik (Sakurai, 2017)

Faktor keamanan dapat dihitung secara otomatis berdasarkan pengurangan kekuatan teknik yang melakukan serangkaian simulasi sambil mengubah sifat kekuatan untuk menentukan kondisi tidak stabil. Faktor keamanan ditemukan sesuai dengan titik ketidakstabilan, dan permukaan kegagalan kritis terletak di model. Untuk melakukan analisis stabilitas lereng dengan teknik reduksi kekuatan geser, simulasi dijalankan untuk

serangkaian faktor percobaan keamanan F_{trial} dengan, c dan Φ disesuaikan menurut persamaan berikut.

$$c_r = c/R \dots\dots\dots(2.54)$$

$$\tan \Phi_r = \tan \Phi/R \dots\dots\dots(2.55)$$

Kestabilan lereng merupakan fungsi dari kekuatan geser dan perkembangan regangan keruntuhan yang mencerminkan zona keruntuhan potensial lereng. Regangan geser yang dikembangkan di lereng meningkat dengan pengurangan kekuatan geser. Konsep rasio keruntuhan tergabung dalam teknik reduksi kekuatan geser dan diterapkan pada lereng alami skala besar. Hubungan antara rasio reduksi kekuatan geser kritis dan faktor keamanan diperiksa. Regangan geser yang dikembangkan di lereng meningkat dengan mengurangi kekuatan geser. Hubungan antara rasio reduksi kekuatan geser dan regangan geser untuk nilai rasio kegagalan (R_f) yang berbeda dipelajari. Diamati bahwa, nilai regangan geser meningkat dengan meningkatnya nilai rasio reduksi (R) terutama meningkat dengan cepat ketika nilai ' R ' mendekati nilai kritis tertentu, yang bervariasi dengan nilai ' R_f ' dan pengamatan ditemukan sejalan dengan temuan sebelumnya. Nilai kritis R ini dikenal sebagai faktor reduksi kekuatan geser kritis ' R_c ' dan sangat sensitif terhadap tegangan pengekang. Ketika nilai R_f meningkat, mewakili transisi dari sifat elastis linier ke sifat nonlinier, nilai rasio reduksi kekuatan geser kritis menurun. Ketidaklinieran juga berhubungan dengan derajat kekar, sehingga untuk batuan yang sangat terganggu, rasio kuat geser kritis relatif lebih rendah dan sebaliknya (Maji, 2017).