

SKRIPSI

ANALISIS KESTABILAN LERENG DENGAN PEMODELAN NUMERIK MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

(Studi Kasus: Lereng Jalan Poros Trans-Sulawesi, Desa Tamboo, Kecamatan Bonepantai, Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo)

Disusun dan diajukan oleh

GABRIEL ARIRUPA

D62116310



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS KESTABILAN LERENG DENGAN PEMODELAN NUMERIK MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

(Studi Kasus: Lereng Jalan Poros Trans-Sulawesi, Desa Tamboo, Kecamatan Bonepantai,
Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo)

Disusun dan diajukan oleh

GABRIEL ARIRUPA

D62116310

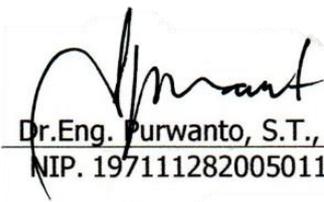
UNIVERSITAS HASANUDDIN

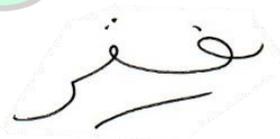
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 23 Agustus 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

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 Program Studi,


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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Gabriel Arirupa
NIM : D62116310
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Kestabilan Lereng dengan Pemodelan Numerik Menggunakan Metode Elemen Hingga

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.

Makassar, 27 Agustus 2021

Yang menyatakan



Gabriel Arirupa

ABSTRAK

Kestabilan suatu lereng dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain geometri lereng, kehadiran bidang diskontinu, kondisi air tanah, dan faktor luar, seperti getaran akibat aktivitas pada lereng atau sekitarnya. Lokasi penelitian adalah lereng yang berada di jalan trans-Sulawesi di desa tamboo, provinsi Gorontalo, yang dipengaruhi oleh getaran dari aktivitas transportasi. Penelitian dilakukan pada 2 lereng berbeda pada lokasi penelitian yakni lereng A dan B. Tujuan dilakukannya penelitian ini, adalah untuk mengetahui potensi arah dan jenis longsoran, nilai kualitas massa batuan, dan nilai kemantapan lereng penelitian. Metode yang digunakan dalam penentuan jenis dan arah longsoran pada dinding lereng yaitu analisis kinematika. Dalam Penentuan kualitas massa batuan pada lereng menggunakan metode *Rock Mass Rating* (RMR), selanjutnya nilai RMR digunakan untuk menjadi salah satu parameter acuan dalam penentuan tingkat kestabilan lereng menggunakan metode *Slope Mass Rating* (SMR). Setelah itu untuk menentukan nilai kestabilan lereng di lokasi penelitian, digunakan metode elemen hingga. Berdasarkan analisis kinematika potensi longsoran yang dapat terjadi pada lereng A dan B adalah longsoran baji dengan arah N143°E pada lereng A sedangkan lereng B N132°E dan probabilitas longsoran sebesar 32,19% pada lereng A dan 17,16% pada lereng B. Nilai RMR pada lereng A adalah 48 dan pada lereng B adalah 68. Nilai SMR lereng A adalah 40,35 yang diklasifikasikan ke dalam lereng kelas III dengan deskripsi sebagian lereng stabil dan nilai SMR lereng B adalah 67,1 yang diklasifikasikan ke dalam lereng kelas II dengan deskripsi lereng stabil. Penentuan nilai-nilai parameter masukan yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari pengujian laboratorium yang dilakukan yaitu, uji sifat fisik, uji kuat tekan uniaksial, dan uji geser langsung. Berdasarkan pemodelan tersebut, nilai kritis *Strenght Reduction Factor* (SRF) lereng A sebesar 0,43 dengan besar perpindahan 0,035 meter, sedangkan Nilai kritis SRF lereng B sebesar 1,73, dengan besar perpindahan 0,024 meter.

Kata kunci: Kestabilan lereng, *Slope Mass Rating*, analisis kinematika, metode elemen hingga, *Strenght Reduction Factor*.

ABSTRACT

The stability of a slope is influenced by many factors, including slope geometry, the presence of discontinuous fields, groundwater conditions, and external factors, such as vibration due to activities on the slope or its surroundings. The research location is a slope on the trans-Sulawesi road in the village of tamboo, Gorontalo province, which is affected by vibrations from transportation activities. The study was conducted on 2 different slopes at the research location, namely slopes A and B. The purpose of this study was to determine the potential direction and type of slope failure, the value of rock mass quality, and the value of the stability of the research slope. The method used in determining the type and direction of 1 slope failure on the slope wall is kinematics analysis. In determining the quality of rock mass on the slopes using the Rock Mass Rating (RMR) method, then the RMR value is used to be one of the reference parameters in determining the level of slope stability using the Slope Mass Rating (SMR) method. After that, to determine the value of slope stability at the research site, the finite element method is used. Based on the kinematic analysis of the potential for slope failure that can occur on slopes A and B, wedge failure with a direction of N143°E on slope A while slope B are N132°E and avalanche probability of 32.19% on slope A and 17.16% on slope B. The RMR value on slope A is 48 and on slope B is 68. The SMR value for slope A is 40.35 which is classified into a class III, witch described as some of the slopes being stable and the SMR value for slope B is 67.1 which is classified into a class II, witch described as stable slope. The determination of the input parameter values used in this study was obtained from laboratory tests carried out, namely, physical properties test, uniaxial compressive strength test, and direct shear test. Based on the modeling, the critical value of the Strenght Reduction Factor (SRF) of slope A is 0.43 with a displacement of 0.035 meters, while the critical value of SRF for slope B is 1.73, with a displacement of 0.024 meters.

Keywords: Slope stability, Slope Mass Rating, kinematic analysis, finite element method, Strength Reduction Factor.

KATA PENGANTAR

Rasa syukur dan terima kasih penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena hanya atas kehendak-Nya dan karunia-Nya, tugas akhir yang berjudul "Analisis Kestabilan Lereng dengan Pemodelan Numerik Menggunakan Metode Elemen Hingga" (Studi Kasus: Lereng Jalan Poros Trans-Sulawesi, Desa Tamboo, Kecamatan Bonepantai, Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo)" ini dapat terselesaikan. Tugas akhir ini sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik (S1) pada Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

Dalam proses pengerjaan tugas akhir banyak hambatan yang dihadapi oleh penulis, akibat pandemi COVID-19. Harapan penulis adalah tugas akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat kepada orang-orang yang membutuhkan data maupun informasi dari hasil penelitian yang dilakukan.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Provinsi Gorontalo, dalam hal ini kepada Dinas Penanaman Modal Energi Sumber Daya Mineral dan Transmigrasi Provinsi Gorontalo, yang telah mengizinkan penulis untuk melakukan penelitian tugas akhir di di jalan poros Trans-Sulawesi, dan secara administratif terletak di Desa Tamboo, Kecamatan Bonepantai, Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T., IPM Ketua Departemen Teknik Pertambangan dan kepala Laboratorium Geomekanika Universitas Hasanuddin serta selaku pembimbing utama, yang selalu membimbing dan mendukung dalam menyelesaikan penelitian ini, dosen pembimbing pendamping Ibu Nirmana Fiqra Qaidahiyani, S.T., M.T yang telah meluangkan waktu untuk penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini, dan Bapak Ir. H. Djamaluddin, M.T selaku Penasehat Akademik yang telah sering memberikan banyak arahan dan nasehat dalam masa perkuliahan penulis.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua penulis, Marthen Padu dan Mery yang selalu memberikan motivasi dan dukungan dalam bentuk apapun kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada teman-teman ROCKBOLT yang telah menemani penulis kurang lebih 5 tahun terakhir dengan bantuan dan doanya kepada penulis, teman-teman anggota Laboratorium Geomekanika yang telah banyak membantu dalam penyusunan tugas akhir penulis.

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

Makassar, 27 Agustus 2021



Gabriel Arirupa

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	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah Penelitian.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Tahapan Penelitian	5
1.6 Lokasi dan Kesampaian Daerah.....	6
BAB II PEMODELAN KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA8	
2.1 Lereng	8
2.2 Karakteristik Batuan.....	14
2.3 Massa Batuan	19
2.4 Analisis Kinematika	23
2.5 Klasifikasi <i>Rock Mass Rating</i> (RMR) dan <i>Slope Mass Rating</i> (SMR)	29
2.7 Pemodelan Numerik Menggunakan Metode Elemen hingga	38
BAB III METODE PENELITIAN.....	43

3.1	<i>Scanline Mapping</i>	43
3.2	Pengambilan Sampel.....	44
3.3	Preparasi Sampel.....	45
3.4	Uji Sifat fisik.....	50
3.5	Uji Kuat Tekan Uniaksial (<i>Unconfined Compressive Strength Test</i>).....	54
3.6	Uji Kuat Geser (<i>Direct Shear Strength Test</i>)	58
3.7	Uji Kuat Tarik Tak Langsung	60
3.8	Analisis kinematika	61
3.9	Klasifikasi Massa Batuan.....	62
3.10	Pemodelan Numerik Menggunakan Metode Elemen Hingga.....	63
3.11	Diagram Alir Penelitian.....	64
BAB IV ANALISIS KESTABILAN LERENG DENGAN PEMODELAN NUMERIK MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA		66
4.1	Karakteristik Batuan.....	66
4.2	Analisis Kinematika	70
4.3	Klasifikasi Massa Batuan.....	74
4.4	Pemodelan Numerik Menggunakan Metode Elemen Hingga.....	86
BAB V PENUTUP		95
5.1	Kesimpulan	95
5.2	Saran	96
DAFTAR PUSTAKA		97
LAMPIRAN		100
Lampiran A (Orientasi Kekar).....		101
Lampiran B (Data Uji Kuat Tekan Uniaksial)		104
Lampiran C (Data Uji Kuat Geser)		106
Lampiran D (Data Uji Kuat Tarik Tak Langsung)		111

Lampiran E (Peta Lokasi Penelitian) 112

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Peta lokasi penelitian	7
Gambar 2.1 Kurva tegangan regangan pada uji kuat tekan uniaksial (Hoek and Brown, 1980; Rangga et al, 2019).....	18
Gambar 2.2 Garis kekuatan Mohr-Coulomb	19
Gambar 2.3 Longsor Guling (Hoek and Bray, 1981).....	20
Gambar 2.4 Diagram kontur dari data bidang diskontinu	24
Gambar 2.5 Longsor Bidang (Hoek and Bray, 1981)	26
Gambar 2.6 Longsor Baji (Hoek and Bray, 1981).....	27
Gambar 2.7 Longsor Busur (Hoek and Bray, 1981).....	28
Gambar 2.8 Longsor Guling (Hoek and Bray, 1981).....	29
Gambar 2.9 Titik node dan mesh pada elemen	40
Gambar 3.1 Lereng lokasi penelitian.....	43
Gambar 3.2 Pengambilan data orientasi arah kekar.....	44
Gambar 3.3 Sampel batuan uji sifat fisik.....	46
Gambar 3.4 Alat <i>laboratory core drill</i>	46
Gambar 3.5 Alat <i>Precision cutting machine</i>	47
Gambar 3.6 Sampel batuan pengujian kuat tekan uniaksial.....	48
Gambar 3.7 Sample pengujian kuat geser	49
Gambar 3.8 Alat-alat uji sifat fisik. (a) Jangka sorong, (b) Desikator dan air, (c) Timbangan digital, (d) Wadah sampel, (e) Oven, (f) Aluminium voil, (g) neraca ohausdan (h) Pompa vakum.....	51
Gambar 3.9 Penimbangan berat natural sampel batuan.....	52
Gambar 3.10 Penjenuhan sampel batuan.....	53

Gambar 3.11 Pengeringan sampel batuan.....	54
Gambar 3.12 Mesin kuat tekan uniaksial	55
Gambar 3.13 <i>Dial gauge</i>	56
Gambar 3.14 Persiapan proses pengujian kuat tekan uniaksial sampel batuan (meletakkan sampel pada alat uji kuat tekan uniaksial dan pemasangan tiga <i>dial gauge</i>)	57
Gambar 3.15 Force gauge	58
Gambar 3.16 Diagram alir penelitian	65
Gambar 4.1 Kenampakan lapangan batuan andesit.....	66
Gambar 4.2 Fotomikrograf sampel andesit, yang memperlihatkan mineral plagioklas dan piroksin yang bertindak sebagai fenokris dan tertanam dalam masa dasar kriptokristalin (nikol silang).....	67
Gambar 4.3 Kurva tegangan-regangan lereng A dan lereng B	69
Gambar 4.4 Diagram kontur bidang diskontinu lereng A	71
Gambar 4.5 Diagram kontur bidang diskontinu lereng B	73
Gambar 4.6 Geometri lereng A.....	87
Gambar 4.7 Kontur total perpindahan massa batuan.....	88
Gambar 4.8 Grafik hubungan SRF dan total perpindahan pada lereng A.....	89
Gambar 4.9 Vektor deformasi batuan pada lereng penelitian A.....	89
Gambar 4.10 Kontur deformasi batuan pada lereng penelitian A.....	90
Gambar 4.11 Geometri lereng B.....	91
Gambar 4.12 Grafik hubungan SRF dan total perpindahan pada lereng B	92
Gambar 4.13 Kontur total perpindahan massa batuan	92
Gambar 4.14 Vektor deformasi batuan pada lereng penelitian B.....	93
Gambar 4.15 Kontur deformasi batuan pada lereng penelitian B.....	93

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nilai faktor keamanan menurut GEO (1984 dalam Cheng dan Lau,2008)....	11
Tabel 2.2 Klasifikasi Kuat Massa Batuan (Hoek, 1981)	31
Tabel 2.3 Hubungan RQD dengan Kualitas Batuan (Deere, 1967)	32
Tabel 2.4 Klasifikasi Persistensi Kekar (Bieniawski, 1989).....	34
Tabel 2.5 Tingkat Pelapukan (Bieniawski, 1989)	34
Tabel 2.6 Kondisi Air Tanah (Bieniawski, 1989).....	35
Tabel 2.7 Pengaruh orientasi kekar dalam pembuatan terowongan dan penggalian ...	35
Tabel 2.8 Nilai bobot orientasi kekar (Bieniawski, 1989)	35
Tabel 2.9 Pembobotan klasifikasi RMR	36
Tabel 2.10 Pembobotan SMR Romana, 1985 (Riquelme, et.al, 2016)	38
Tabel 2.11 Nilai Pembobotan Untuk Metode Ekskavasi Lereng (Romana, 1985)	38
Tabel 2.12 Nilai Pembobotan Massa Lereng SMR (Romana, 1985)	38
Tabel 3.1 Nilai klasifikasi massa batuan RMR (Bieniawski, 1989).....	63
Tabel 4.1 Hasil pengujian sifat fisik batuan	68
Tabel 4.2 Data hasil pengujian sifat fisik	68
Tabel 4.3 Data dimensi sampel	69
Tabel 4.4 Data hasil pengujian kuat tekan uniaksial	69
Tabel 4.5 Hasil pengujian kuat geser	70
Tabel 4.6 Hasil pengujian kuat tarik tak langsung	70
Tabel 4.7 Nilai pembobotan RMR lereng A	76
Tabel 4.8 Nilai bobot orientasi kekar lereng A.....	76
Tabel 4.9 Nilai pembobotan RMR lereng B.....	79
Tabel 4.10 Nilai bobot orientasi kekar lereng B	80
Tabel 4.11 Nilai pembobotan massa batuan SMR lereng A	82

Tabel 4.12 Metode ekskavasi lereng lereng A	82
Tabel 4.13 Massa Lereng SMR lereng A	83
Tabel 4.14 Nilai pembobotan massa batuan SMR lereng B	85
Tabel 4.15 Metode ekskavasi lereng lereng B	86
Tabel 4.16 Massa Lereng SMR lereng B	86
Tabel 4.17 Properti material lereng A	87
Tabel 4.18 Properti material lereng B	91

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu aspek dalam percepatan proses pembangunan nasional adalah pembangunan infrastruktur yang merupakan aspek yang penting dan sangat vital. Infrastruktur juga memegang peranan penting dalam menggerakkan roda pertumbuhan ekonomi dan sosial. Ini dikarenakan kemajuan pertumbuhan ekonomi di suatu negara tidak dapat dipisahkan dengan ketersediaan infrastruktur, seperti transportasi, telekomunikasi, sanitasi, dan energi. Dalam pembangunan infrastruktur transportasi khususnya pada daerah lereng, kestabilan lereng jalan sangat penting untuk diperhatikan karena berhubungan dengan keselamatan pengguna jalan serta pertumbuhan ekonomi yang dapat terhambat jika terjadi longsor. Selain itu, untuk membangun ekonomi yang berkelanjutan, diperlukan pembangunan sektor infrastruktur transportasi sebagai dasar yang kuat, termasuk pada wilayah Provinsi Gorontalo.

Pertambahan pembangunan infrastruktur yang diikuti dengan pertambahan penduduk yang cukup pesat mengakibatkan padatnya daerah permukiman sehingga tidak jarang ditemui permukiman penduduk berada di wilayah yang berada di sekitar lereng. Ini menjadi perhatian yang penting terutama dalam segi kemantapan lereng dalam menjamin keberlangsungan konstruksi permukiman serta menghindari kerugian materi dan kehilangan nyawa penduduk. Tidak semua lereng berada dalam kondisi stabil (aman) untuk dijadikan sebagai daerah permukiman. Oleh karena itu, diperlukan adanya informasi terkait zona lereng yang aman sebagai acuan tempat permukiman yang layak, terutama di daerah-daerah yang mempunyai lereng curam.

Masalah kestabilan lereng pada batuan merupakan suatu hal yang menarik karena sifat-sifat dan perilakunya yang berbeda dengan kestabilan lereng pada tanah. Kestabilan lereng batuan lebih ditentukan oleh adanya bidang-bidang lemah yang disebut dengan bidang diskontinu, tidak demikian halnya dengan lereng-lereng pada tanah. Bidang-bidang lemah pada lereng batuan memengaruhi kemantapan lereng tersebut, di mana keruntuhan biasanya berawal dari bidang diskontinu yang ada pada lereng tersebut. Bidang-bidang diskontinu ini dapat berupa kekar (*joint*), rekahan (*fissure*), bidang perlapisan (*bedding plane*), sesar (*fault*), dan jenis-jenis retakan lainnya yang terdapat pada lereng tersebut. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa perilaku massa batuan sangat dipengaruhi oleh bidang-bidang diskontinu terutama dalam analisis kestabilan lereng.

Analisis kestabilan lereng merupakan analisis terhadap tingkat kestabilan dan kemungkinan terjadinya longsor pada suatu lereng. Jarangnya perhatian terhadap tingkat kestabilan lereng menjadi salah satu penyebab kurangnya analisis geoteknik lebih lanjut pada lereng sehingga informasi terhadap kestabilan lereng juga minim. Seringnya ditemukan longsor atau jatuhnya batuan pada lereng mengindikasikan bahwa lereng tidak dalam kondisi aman atau stabil. Longsor yang terjadi dapat diakibatkan karena banyaknya bidang diskontinu pada lereng serta geometri lereng yang curam. Lereng peneitian yang memiliki banyak bidang diskontinu dan geometri lereng yang curam, serta berada di pinggir jalan poros Trans-Sulawesi menjadi bagian yang vital untuk dianalisis, karena longsor yang terjadi akan menghambat proses transportasi dan menghambat pertumbuhan ekonomi daerah penelitian. Oleh karena itu diperlukan penelitian terhadap tingkat kestabilan lereng tersebut.

Penentuan kualitas massa batuan berdasarkan bidang diskontinu pada lereng dapat menggunakan metode *Rock Mass Rating* (RMR), selanjutnya nilai RMR digunakan untuk menjadi salah satu parameter acuan yang digunakan dalam penentuan tingkat

kestabilan lereng menggunakan metode *Slope Mass Rating* (SMR). Metode yang biasa digunakan dalam penentuan jenis dan arah longsor pada dinding lereng berdasarkan bidang bidang diskontinu yaitu analisis kinematika.

Metode yang sering digunakan untuk menganalisis nilai dari kemantapan lereng adalah metode kesetimbangan batas dan metode elemen hingga. Metode kesetimbangan batas juga dikenal sebagai metode irisan karena bidang longsor dari lereng tersebut dibagi menjadi beberapa irisan. Dalam laporan "Penyelidikan Geologi Teknik untuk Menunjang Infrastruktur Daerah Ta 2020" metode ini digunakan dalam penentuan tingkat kestabilan lereng di lokasi penelitian. Penelitian ini menyatakan bahwa nilai faktor keamanan minimum di lereng penelitian dalam kondisi aman. Namun, pada kondisi lereng aktual telah terjadi jatuhnya batuan dan lereng relatif tidak stabil. Untuk meninjau kembali penelitian tersebut, maka digunakan metode elemen hingga sebagai metode pembandingan dari penelitian sebelumnya. Metode elemen hingga menggunakan model tegangan dan regangan batuan untuk menghitung tegangan dalam massa batuan. Nilai kondisi tegangan-regangan dapat digunakan untuk menilai perilaku serta kemantapan dari massa batuan (Zheng dkk., 2005). Total perpindahan material lereng digunakan sebagai parameter dalam penentuan tingkat kestabilan lereng.

1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Adanya bidang diskontinu pada lereng sangat berpengaruh pada tingkat kestabilan lereng. Maka dari itu diperlukan analisis kinematika.
2. Belum adanya analisis geoteknik lebih lanjut tentang massa batuan di lokasi penelitian. Analisis ini diperlukan karena terdapat jatuhnya batuan pada lereng penelitian.

3. Penyelidikan geoteknik yang telah dilakukan menggunakan metode kesetimbangan batas menyatakan bahwa lereng dalam keadaan aman namun pada kondisi lereng aktual terdapat jatuhnya batuan. Penentuan nilai kestabilan lereng dengan pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga diperlukan untuk memvalidasi penelitian sebelumnya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. menentukan tipe dan arah kelongsoran/keruntuhan lereng dengan menggunakan analisis kinematika;
2. menentukan kelas batuan berdasarkan klasifikasi massa batuan *Rock Mass Rating (RMR)* dan *Slope Mass Rating (SMR)*;
3. menentukan nilai kemantapan lereng menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak *Rocscience Phase2*.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini adalah informasi mengenai tingkat kestabilan lereng serta daerah rawan longsor. Hasil yang diperoleh dapat dijadikan sebagai acuan kondisi lereng pada lokasi penelitian. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menentukan usaha penanganan masalah kestabilan lereng yang efisien digunakan pada lereng di lokasi penelitian.

1.5 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan kegiatan dari penelitian ini dapat dibagi menjadi 5 (lima) yaitu: tahap persiapan, pengambilan data lapangan, pengujian laboratorium, analisis, penyusunan laporan.

1. Persiapan

Tahapan persiapan merupakan kegiatan sebelum dilakukannya penelitian dan pengambilan data di lapangan. Tahap persiapan ini terdiri dari beberapa subtahapan sebagai berikut:

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 literatur

Studi literatur merupakan tahapan dalam mempelajari metode pengambilan data dan mengetahui faktor-faktor yang dapat memengaruhi kestabilan lereng. Studi literatur ini dilakukan sebelum dan selama kegiatan penelitian.

c. Persiapan perlengkapan

Perlengkapan yang digunakan dalam penelitian berupa alat tulis-menulis, kompas geologi, *Global Positioning System* (GPS), palu geologi, kantong sampel, meteran, dan lain sebagainya.

2. Pengambilan data lapangan

Pengambilan data lapangan meliputi pengamatan morfologi, pengambilan sampel, dan pengukuran geometri lereng.

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. Uji sifat fisik batuan, seperti berat jenis, densitas dan porositas;
- b. uji sifat mekanik batuan, seperti kuat tekan, kohesi, sudut gesek dalam, modulus elastisitas dan nisbah Poisson.

4. Tahapan analisis data

Analisis dilakukan terhadap berbagai data dan informasi yang diperoleh di lapangan dan laboratorium sehingga menghasilkan suatu nilai yang berguna untuk menentukan tingkat kestabilan lereng. Analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Analisis kinematika untuk mengetahui arah dan jenis longsoran yang akan terjadi;
- b. klasifikasi massa batuan untuk mengetahui kelas batuan;
- c. pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga untuk mengetahui tingkat kestabilan lereng.

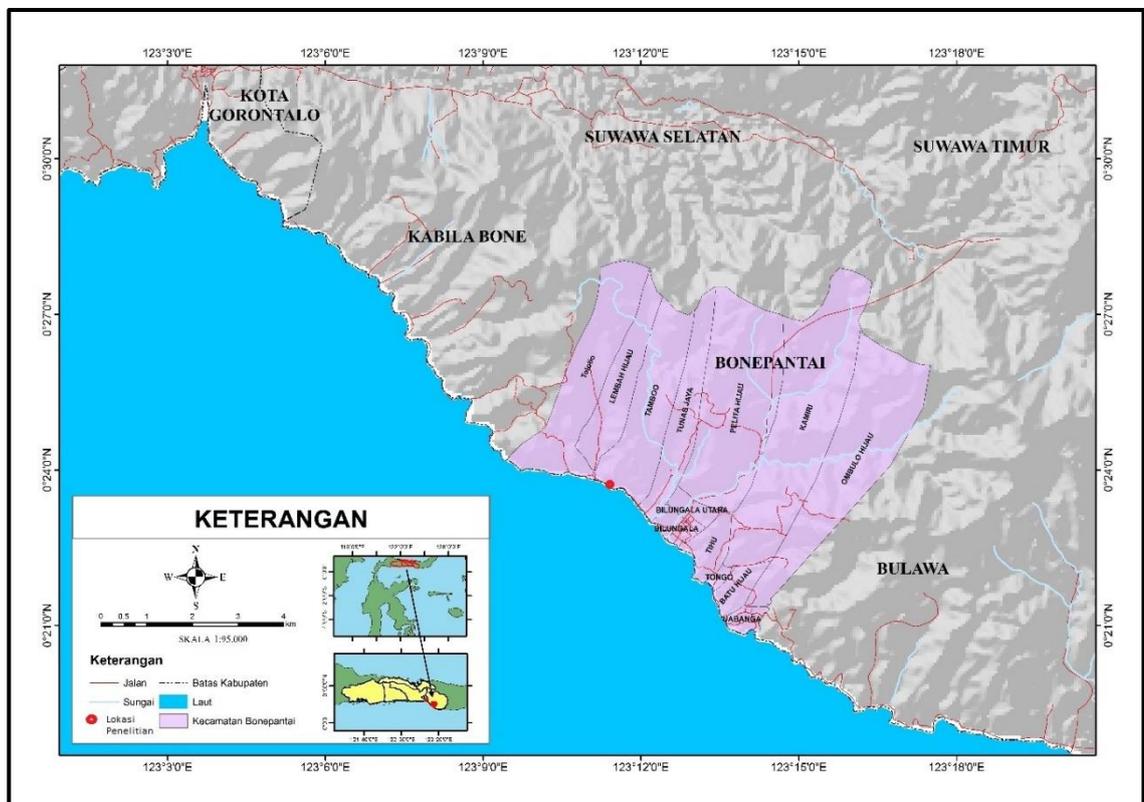
5. Penyusunan laporan

Penyusunan laporan merupakan tahapan akhir pada kegiatan penelitian. Keseluruhan data dianalisis, diakumulasikan, 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

Lokasi penelitian dilakukan pada lereng yang terletak di jalan poros Trans-Sulawesi, dan secara administratif terletak di Desa Tamboo, Kecamatan Bonepantai,

Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo. Lokasi penelitian dibagi menjadi dua titik yakni stasiun A dan B. Stasiun A dan B merupakan suatu bagian kesatuan lereng yang membentang di jalan poros provinsi gorontalo pada Desa Tamboo. Secara geografis stasiun A terletak di $N0^{\circ}23' 38,5''$ dan $E123^{\circ}11' 28,6''$ sedangkan stasiun B terletak di $N0^{\circ}23' 38,7''$ dan $E123^{\circ}11' 31,7''$. Perjalanan menuju lokasi penelitian dari Makassar menuju Kota Gorontalo ditempuh menggunakan pesawat terbang dengan waktu kurang lebih 1 jam dari Bandar Udara Sultan Hasanuddin Makassar menuju Bandar Udara Jalaluddin Gorontalo. Setelah itu dilakukan perjalanan darat menuju lokasi penelitian yang membutuhkan waktu kurang lebih 3 jam perjalanan. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Peta lokasi penelitian

BAB II

PEMODELAN KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

2.1 Lereng

Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia. Lereng yang terbentuk secara alami, misalnya lereng bukit dan tebing sungai; sedangkan lereng buatan manusia, antara lain, galian dan timbunan, tanggul dan dinding tambang terbuka (Arief, 2007 dalam Rumansara, 2014)

2.1.1 Lereng Alam

Lereng alam (*natural slope*) adalah lereng yang terbentuk karena fenomena alam yang terjadi akibat dari proses geologi. Dalam konteks perencanaan 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 yang sebagian digali/dipotong untuk posisi badan jalan. Dikategorikan sebagai lereng alam apabila tidak ada perlakuan dan/atau penanganan terhadap lereng tersebut, baik berupa perubahan kemiringan ataupun 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.

2.1.2 Lereng Buatan

Lereng buatan adalah lereng yang terjadi akibat terbentuknya daerah galian dan/atau daerah timbunan pada proses perencanaan lereng. Lereng buatan dapat berbentuk lereng buatan dengan penanganan konstruksi berupa penguatan lereng, atau lereng buatan tanpa

penanganan konstruksi yaitu lereng yang hanya mengandalkan kemiringan dan tinggi kritis berdasarkan karakteristik tanah pembentuk lereng tersebut.

2.1.3 Kestabilan Lereng

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

Untuk menganalisis longsoran, perlu terlebih dahulu diketahui sistem tegangan yang bekerja pada batuan atau tanah serta sifat fisik dan sifat mekanis dari tanah atau batuan tersebut. Tegangan batuan di dalam massa alamiahnya adalah tegangan horizontal, tegangan vertical, dan tekanan pori air. Adapun sifat mekanik yang memengaruhi kestabilan suatu lereng adalah kohesi, sudut gesek dalam, dan bobot isi. Secara prinsipnya, pada suatu lereng terdapat dua macam gaya, yaitu gaya yang membuat massa batuan bergerak (gaya penggerak) dan gaya yang menahan massa batuan tersebut (gaya penahan). Suatu lereng akan longsor jika gaya penggeraknya lebih besar dari penahannya. Secara matematis, kestabilan lereng dapat dinyatakan dalam bentuk faktor keamanan (FK) di mana:

$$FK = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya penggerak}} \dots \dots \dots (2.1)$$

FK > 1, lereng dianggap stabil

FK < 1, lereng dianggap tidak stabil

FK = 1, lereng dalam keadaan setimbang, tetapi akan segera longsor jika mendapat sedikit gangguan.

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

1. Kesetimbangan Momen

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

$$F_m = \frac{M_r}{M_d} \dots\dots\dots(2.2)$$

Di mana:

M_r = jumlah dari momen penahan (*resisting moment*).

M_d = jumlah momen penggerak (*driving moment*)

Titik pusat efektif digunakan sebagai pusat momen, seperti pada longsoran busur, pusat lingkaran menjadi pusat momen. Pada bidang gelincir *noncircular*, titik pusat harus dipertimbangkan (Cheng dan Lau,2008)

2. Kesetimbangan Gaya

Diaplikasikan pada keruntuhan sejajar maupun rotasional termasuk pada bidang gelincir planar, atau bidang gelincir poligonal. Persamaan kesetimbangan gaya sebagai berikut:

$$F_f = \frac{F_r}{F_d} \dots\dots\dots(2.3)$$

di mana

F_r = jumlah dari gaya penahan (*resisting forces*)

F_d = jumlah momen penggerak (*driving forces*)

Geotechnical Engineering Office (GEO) menentukan nilai dari faktor keamanan didasarkan pada pertimbangan dari periode hujan, efek keruntuhan lereng dan

pengetahuan tentang perilaku jangka panjang dari material penyusun lereng. Nilai dari faktor keamanan dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Nilai faktor keamanan menurut GEO (1984 dalam Cheng dan Lau,2008)

resiko ekonomi	resiko pekerja		
	dapat diabaikan	menengah	Tinggi
dapat diabaikan	1,1	1,2	1,4
Menengah	1,2	1,3	1,4
Tinggi	1,4	1,4	1,5

2.1.4 Faktor–faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng

Ada dua penyebab terjadinya longsor menurut terzaghi (1950) dibagi menjadi dua kelompok yaitu:

a. Penyebab Eksternal

Menyebabkan naiknya gaya geser yang bekerja sepanjang bidang runtuh, antara lain yaitu:

1. Perubahan geometri lereng
2. Beban dinamik karena dump truck (*traffic loading*)
3. Gaya vibrasi yang ditimbulkan oleh gempa bumi atau ledakan.
4. Penurunan muka air tanah secara mendadak.

b. Penyebab Internal

Faktor–faktor internal antara lain menyebabkan turunnya kekuatan geser material, antara lain yaitu:

1. Pelapukan.
2. Keruntuhan progressive.
3. Hilangnya sementasi material.
4. Berubahnya struktur material.

Menurut Varnes (1978) terdapat sejumlah penyebab internal maupun eksternal yang dapat menyebabkan naiknya gaya geser sepanjang bidang runtuh maupun menyebabkan turunnya kekuatan geser material, dan kedua hal tersebut juga dapat dipengaruhi secara

serentak. Terdapatnya sejumlah tipe longsor menunjukkan beragamnya kondisi yang dapat menyebabkan lereng menjadi tidak stabil dan proses-proses yang memicu terjadinya longsor, yang secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi empat yaitu kondisi material (tanah/batuan), proses geomorfologi, perubahan sifat fisik dari lingkungan dan proses yang ditimbulkan oleh aktivitas manusia. Stabilitas lereng pada lereng batuan selalu dipengaruhi oleh beberapa faktor (Anwar,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 mempengaruhi 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 mempengaruhi kemantapannya. Semakin besar kemiringan dan tinggi suatu lereng maka kemantapannya semakin kecil. Muka air tanah yang dangkal menjadikan lereng sebagian besar basah dan batuan memiliki kandungan air yang tinggi, sehingga menyebabkan kekuatan batuan menjadi rendah dan lereng lebih mudah longsor.

4. Orientasi bidang lemah (*discontinuitas*) terhadap orientasi struktur lereng.

Batuan yang sangat mempengaruhi 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 mempengaruhi temperatur dan jumlah hujan, sehingga berpengaruh pula pada proses pelapukan. Daerah tropis yang panas, lembab dengan curah hujan tinggi akan menyebabkan proses pelapukan batuan jauh lebih cepat 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 mempengaruhi sifat-sifat asli dari batuan, misalnya angka kohesi, besarnya sudut geser dalam, bobot isi, dll. Semakin tinggi tingkat pelapukan maka kekuatan batuan akan menurun.

7. Sifat fisik dan mekanik batuan

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

8. 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 kelongsoran pada lereng.

2.2 Karakteristik Batuan

Mengetahui tentang asal usul dan mekanisme pembentukan suatu struktur geologi akan menjadi lebih mudah apabila kita memahami prinsip-prinsip dasar mekanika batuan dan faktor-faktor lainnya yang mempengaruhi karakter suatu batuan (Noor, 2009 dalam Rosari, 2017). Dalam mekanika batuan, setiap batuan memiliki sifat-sifat yang perlu diketahui. Sifat-sifat ini dapat diketahui melalui pengujian laboratorium dan pengamatan langsung di lapangan. Sifat-sifat ini berupa sifat fisik batuan dan sifat mekanik batuan.

2.2.1 Sifat fisik batuan

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

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

$$\rho_n = \frac{W_n}{(W_s - W_w)} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (2.4)$$

b. ρ_d = Densitas Kering

$$\rho_d = \frac{W_o}{(W_s - W_w)} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (2.5)$$

c. ρ_s = Densitas Jenuh

$$\rho_s = \frac{W_w}{(W_s - W_w)} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (2.6)$$

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. 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

$$W = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100 \dots\dots\dots (2.7)$$

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.

3. Derajat kejenuhan

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

S = Derajat Kejenuhan

$$S = \frac{W_n - W_o}{W_s - W_o} \times 100 \dots\dots\dots (2.8)$$

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 (Rosari et al, 2017)

n = Porositas

$$n = \frac{W_s - W_o}{W_s - W_w} \times 100 \dots\dots\dots (2.9)$$

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

5. Nisbah rongga

Nisbah rongga didefinisikan sebagai perbandingan volume rongga dengan volume butiran.

e = Nisbah rongga

$$e = \frac{n}{(1-n)} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.1.2 Sifat mekanik 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.

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 2.1 (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).

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan 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.

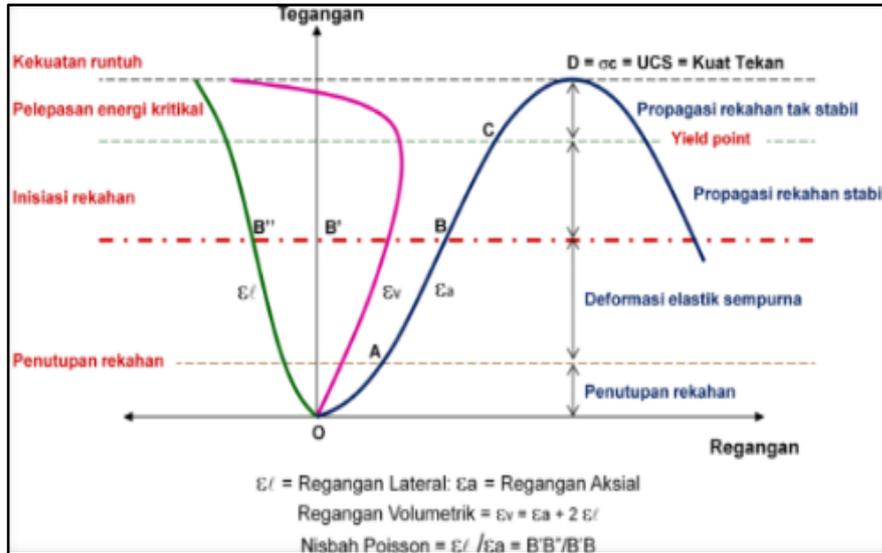
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_a} \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan E = modulus young (MPa), $\Delta\sigma$ = perubahan tegangan (MPa), $\Delta\epsilon_a$ = perubahan regangan aksial (%).

Nisbah Poisson (ν) adalah nilai mutlak dari perbandingan antara regangan lateral terhadap nilai regangan aksial. Jika suatu material di regangkan 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.

$$\nu = -\frac{\epsilon_l}{\epsilon_a} \dots\dots\dots (2.13)$$

dengan ν = nisbah Poisson, ϵ_l = regangan lateral, dan ϵ_a = regangan aksial.



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

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 dibawah 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.

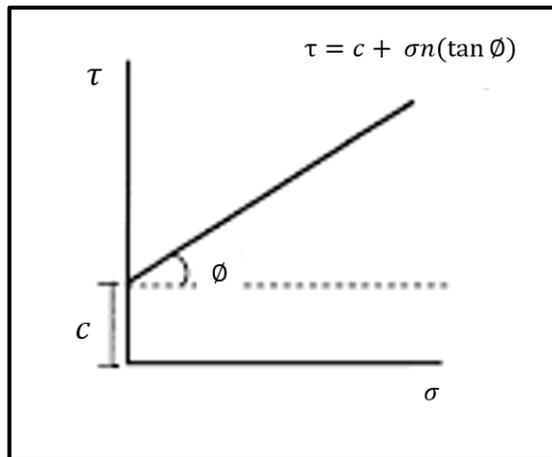
2. Sudut gesek dalam (ϕ)

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 dilihat pada Gambar 2.2 dan ditulis dengan persamaan:

$$\tau = c + \sigma_n(\tan \phi) \dots\dots\dots (2.14)$$

Dengan τ = kuat geser, c = kohesi, σ_n = tegangan normal, dan ϕ = sudut gesek dalam.



Gambar 2.2 Garis kekuatan Mohr-Coulomb

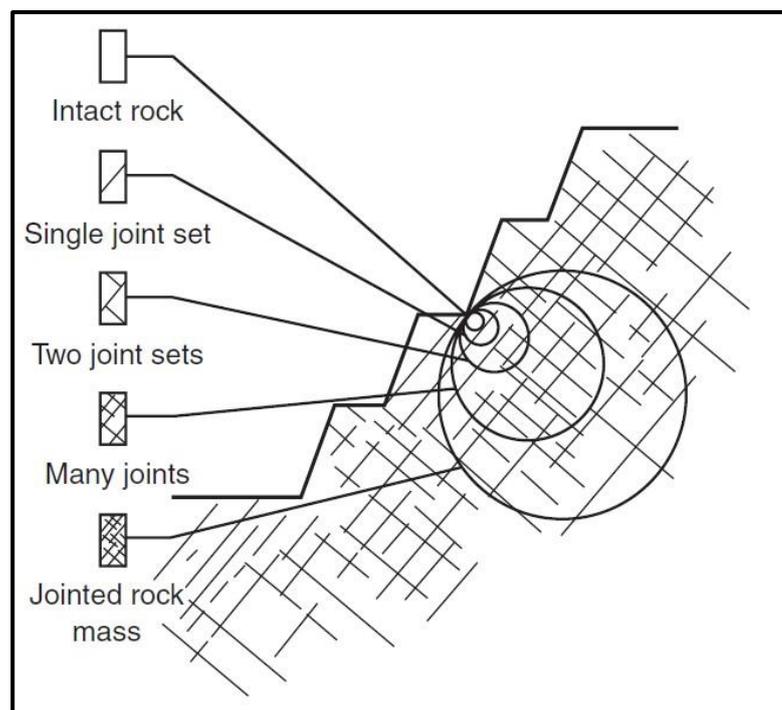
2.3 Massa Batuan

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, 2019). Pada Gambar 2.3 di bawah menjelaskan bahwa konsep dasar dari massa batuan berasal dari batuan utuh yang memiliki sifat homogen dan kemudian adanya bidang diskontinu membuat kekuatan massa batuan menjadi berkurang.

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.



Gambar 2.3 Longsor Guling (Hoek and Bray, 1981)

2.3.1 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 and Mah, 2004).

Dari beberapa pengertian diatas, dapat disimpulkan bahwa 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 pemboran, 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 and Brown, 2004).

Beberapa macam bidang diskontinu sebagai berikut (Brady and 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 disepanjang 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 ataupun 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*

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.

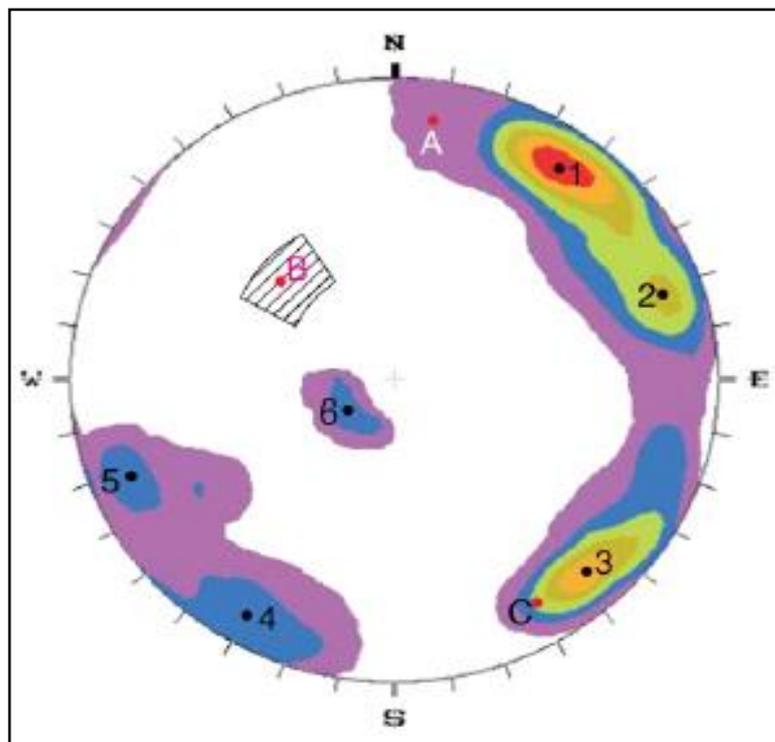
2.4 Analisis Kinematika

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, 2004 dalam Rizqi, 2019). *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 (Alejano, 2010 dalam 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.



Gambar 2.4 Diagram kontur dari data bidang diskontinu

Seperti yang dijelaskan dalam Priest (1993), dan ditunjukkan pada Gambar 2.4, yang mencerminkan distribusi aktual dari diskontinu, data bidang diskontinu dapat

terkonsentrasi pada zona tertentu sesuai dengan jumlah bidang yang diukur dan diplot pada *stereo net*. 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, 2007).

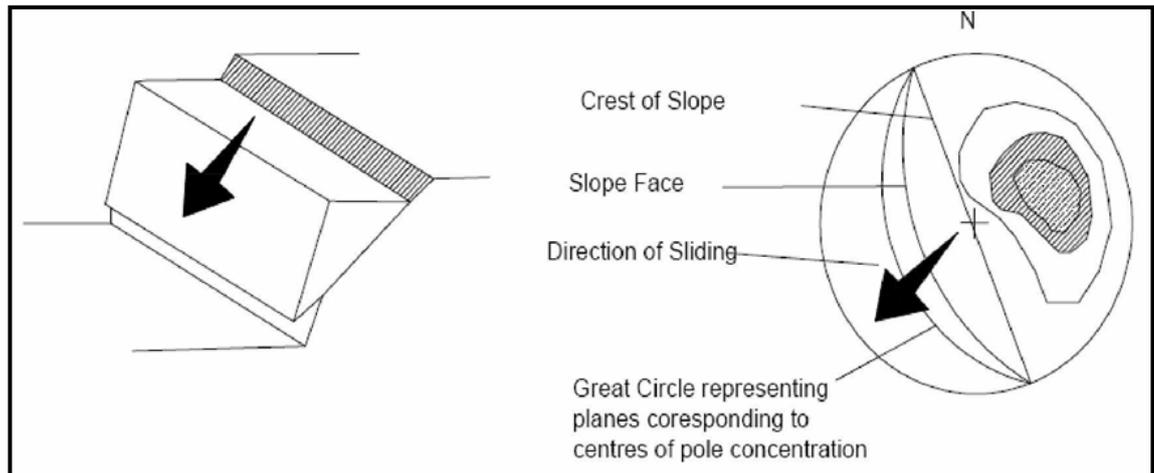
2.4.1 Jenis-jenis longsoran

Longsoran adalah pergerakan masa tanah atau batuan sepanjang bidang tergelincir atau suatu permukaan bidang geser. Masa batuan adalah kondisi material dan bidang-bidang diskontinu yang dimiliki batuan (bienawski, 1989). Berdasarkan proses longsornya, longsoran batuan dapat dibedakan menjadi empat macam, yaitu:

a. Longsoran Bidang

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

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



Gambar 2.5 Longsoran Bidang (Hoek and Bray, 1981)

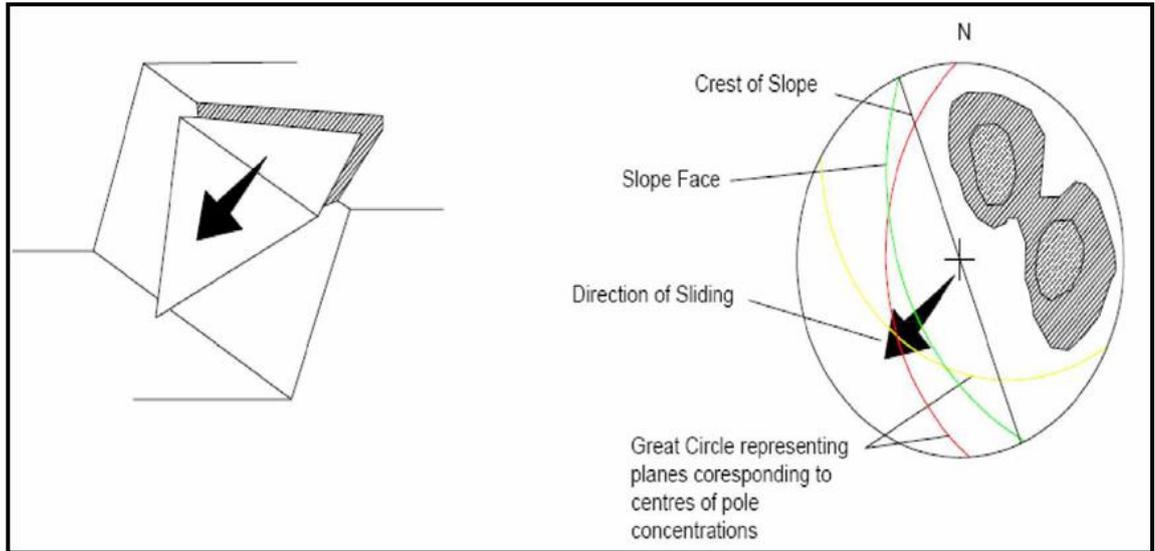
b. Longsoran baji

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

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

Longsoran baji dapat terjadi dengan syarat geometri sebagai berikut :

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



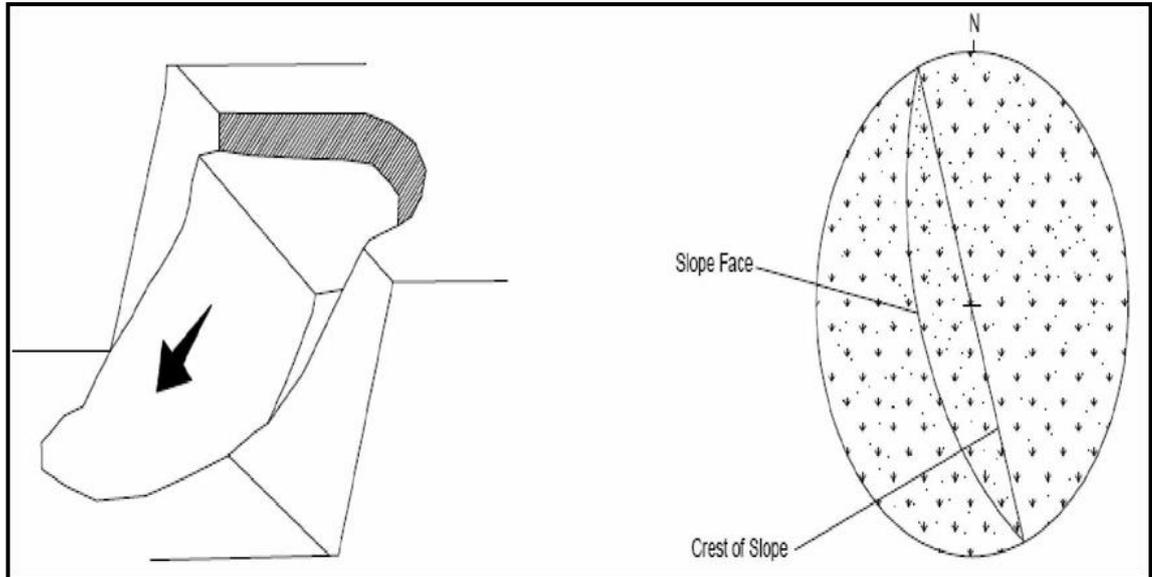
Gambar 2.6 Longsoran Baji (Hoek and Bray, 1981)

c. Longsoran busur

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

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

terjadi kelongsoran lereng, hanya dapat dilakukan apabila belum terjadi gerakan lereng tersebut .

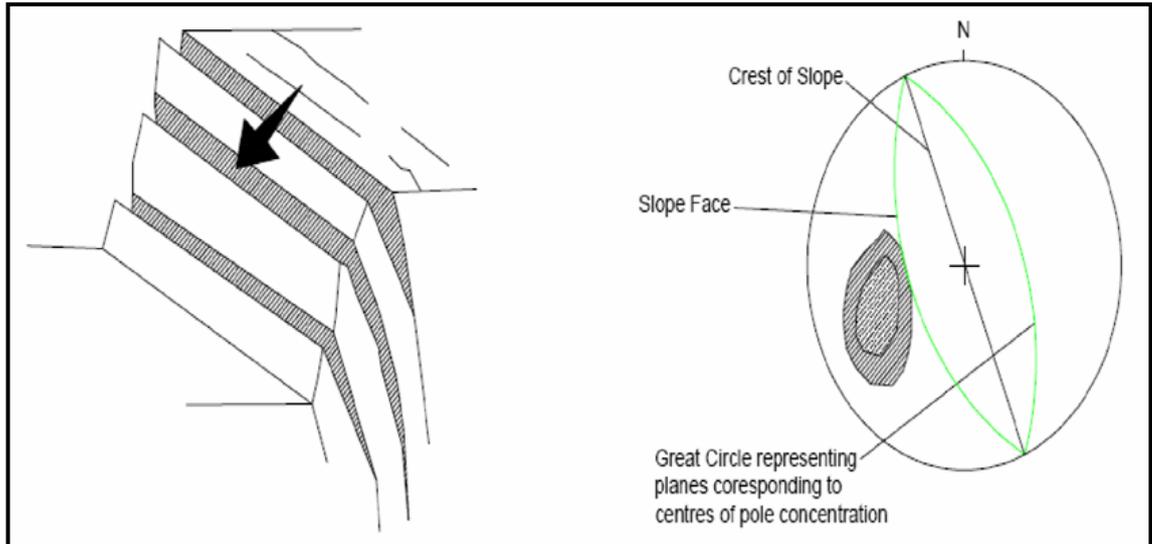


Gambar 2.7 Longsoran Busur (Hoek and Bray, 1981)

d. Longsoran guling

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

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



Gambar 2.8 Longsor Guling (Hoek and Bray, 1981)

2.5 Klasifikasi *Rock Mass Rating (RMR)* dan *Slope Mass Rating (SMR)*

Sistem klasifikasi massa batuan juga dikenal sebagai metode empiris untuk mengklasifikasikan massa batuan. Sistem ini dianggap sebagai bagian penting dalam pemodelan struktur bawah tanah, sistem penyanggahan, analisis stabilitas dan dalam penentuan parameter masukan untuk pemodelan numerik dalam cakupan massa batuan. Metode ini mengklasifikasikan massa batuan ke dalam beberapa kategori berbeda yang memiliki sifat geologi dan geoteknik yang kurang lebih sama berdasarkan hasil yang diperoleh dari karakterisasi massa batuan. Sejumlah besar sistem klasifikasi massa batuan dikembangkan berdasarkan pengalaman dan sejarah kasus yang berkaitan dengan bidang teknik sipil dan pertambangan oleh peneliti yang berbeda. Sistem klasifikasi massa batuan dianggap sangat bermanfaat untuk digunakan selama tahap awal penelitian ketika informasi yang tersedia terbatas mengenai perilaku massa batuan, tegangan dan karakteristik hidrologi (Wulandari et al, 2016).

Klasifikasi massa batuan digunakan sebagai alat dalam menganalisis kemantapan lereng yang menghubungkan antara pengalaman di bidang massa batuan dengan kebutuhan pemantapan di berbagai kondisi lapangan. Namun, penggunaan klasifikasi massa batuan

tidak digunakan sebagai pengganti perancangan rinci. Pada dasarnya pembuatan klasifikasi massa batuan (Bieniawski,1989) bertujuan:

1. Mengidentifikasi parameter-parameter penting yang mempengaruhi perilaku massa batuan.
2. Membagi formasi massa batuan ke dalam grup yang mempunyai perilaku sama menjadi kelas massa batuan. Memberikan dasar-dasar untuk pengertian karakteristik dari setiap kelas massa batuan.
3. Menghubungkan pengalaman dari kondisi massa batuan di satu lokasi dengan lokasi lainnya.
4. Memberikan dasar umum untuk kemudahan komunikasi diantara para insinyur dan geologiwan.

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

Klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR) merupakan suatu klasifikasi geomekanik dengan metode empiris dalam menentukan pembobotan dari massa batuan, yang digunakan untuk mengevaluasi ketahanan massa batuan, dengan memperhatikan enam (6) parameter yaitu *Unconfined Compressive Strength (UCS)*, *Rock Quality Designation(RQD)*, *spacing of discontinuities*, *condition of discontinuities*, *groundwater condition*, *orientation of discontinuities* (Bieniawski, 1989, dalam Swana, 2012). Sistem *Rock Mass Rating* (RMR) pada awalnya telah dikembangkan pada South African Council of Scientific and Industrial Research (CSIR) oleh Bieniawski (1973) berdasarkan pengalamannya di terowongan dangkal pada batuan sedimen (Kaiser et al., 1986; dalam Singh, 2006). Klasifikasi geomekanik didasarkan pada hasil penelitian 49 terowongan di Eropa dan Afrika, di mana klasifikasi ini menilai beberapa parameter yang kemudian diberi bobot (rating) dan digunakan untuk perencanaan terowongan (Bieniawski, 1973, 1976, 1984; dalam Nurfalah, 2010). Tujuan menggunakan klasifikasi ini adalah sebagai bentuk komunikasi para ahli untuk menyelesaikan permasalahan geoteknik. Seperti

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

1. *Kekuatan batuan (Rock strength)*

Bieniawski (1984), kekuatan suatu batuan secara utuh dapat diperoleh dari *Point Load Strength Index* atau Uniaksial Compressive Strength. Beliau menggunakan klasifikasi *Uniaksial Compressive Strength (UCS)* yang telah diusulkan oleh Deere & Miller, 1968 (Bieniawski, 1984) dan juga UCS yang telah ditentukan dengan menggunakan *Hammer Test*. Kekuatan batuan utuh adalah kekuatan suatu batuan untuk bertahan menahan suatu gaya hingga pecah. Kekuatan batuan dapat dibentuk oleh suatu ikatan partikel antar butir mineral atau tingkat sementasi pada batuan tersebut, serta kekerasan mineral yang membentuknya. Hal ini akan sangat berhubungan dengan genesa, komposisi, tekstur, dan struktur batuan yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Klasifikasi Kuat Massa Batuan (Hoek, 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 pau suaranya melenting.
25 - 50	Medium (<i>Medium</i>)	Mudah dibaret dengan pisai, dalam bentuk <i>core</i> (panjang 150 mm dan diameter 50 mm) bisa namun sangat sulit untuk dipatahkan dengan tangan.

UCS (MPa)	Kualitas Massa Batuan	Contoh Jenis Batuan
50 - 100	Kuat (<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 (RQD)*

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 juga dapat dihitung secara tidak langsung dengan melakukan pengukuran orientasi dan jarak antar diskontinu pada singkapan batuan. Perhitungan RQD biasa didapat dari perhitungan langsung dari singkapan batuan yang mengalami retakan-retakan (baik lapisan batuan maupun kekar atau sesar). Hubungan antara RQD dengan kualitas batuan dikemukakan oleh *Deere* (1967), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Hubungan RQD dengan Kualitas Batuan (*Deere*, 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 data*) untuk memperkirakan RQD, persamaan *Priest* dan *Hudson* (1976) dapat digunakan (*Rai*, 2013):

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangan:

λ = jumlah total kekar per panjang *scanline*.

3. Jarak Diskontinu

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

Menurut ISMR jarak (*spasi*) kekar adalah jarak tegak lurus antara bidang kekar yang berdekatan dalam satu kekar. Pada perhitungan nilai RMR parameter antara jarak (*spasi*) kekar.

4. Kondisi diskontinu (*Condition of discontinuities*)

Kondisi diskontinu merupakan suatu parameter yang terdiri dari beberapa 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*).

A. Kemenerusan Bidang Diskontinu (*Persistence*)

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

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

C. Kekasaran (*Roughness*)

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

D. Material Pengisi

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

E. Pelapukan Pada Batuan (*Weathering*)

Tabel 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 (*Ground water condition*)

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

Tabel 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

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

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

Tabel 2.9 Pembobotan klasifikasi RMR

No	Parameter	Pembobotan						
1	Kekuatan Massa Batuan	<i>Point-Load Strenght Index (MPa)</i>	> 10	4-10	2-4	1-2		
		<i>Uniaksial Compressive Strenght (MPa)</i>	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5
	Bobot		15	12	7	4	2	1
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25	
		Bobot	20	17	13	8	3	
3	Jarak Diskontinu		>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm	
		Bobot	20	15	10	8	5	
	Kondisi Diskontinu Kemenerusan Kekar		<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m	
		Bobot	6	4	2	1	0	
	Bukaan Kekar		Tidak Ada	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm	
		Bobot	6	5	4	1	0	
4	Kekerasan Kekar		Sangat Kasar	Kasar	Sedikit Kasar	Halus	Slickens Ided	
		Bobot	6	5	3	1	0	
	Material Pengisi		Tidak Ada	keras <5 mm	keras >5 mm	lunak <5 mm	lunak >5 mm	
		Bobot	6	4	2	2	0	
	Pelapukan		Tidak Lapuk	Sedikit Lapuk	Lapuk	Sangat Lapuk	Hancur	
		Bobot	6	5	3	1	0	
5	Kondisi Air Tanah		Kering	Lembab	Basah	Menetes	Mengalir	
		Bobot	15	10	7	4	0	

2.5.2 Slope Mass Rating (SMR)

Bieniawski (1989) pada saat membuat pembobotan RMR tidak bermaksud untuk mengevaluasi kemantapan lereng, dikarenakan tingginya bobot pengatur orientasi kekar, yaitu bervariasi dari 60 hingga 100. Untuk dapat menggunakan RMR, penentuan bobot pengatur orientasi kekar memerlukan pengertian sifat-sifat kekar yang ada pada massa batuan di mana lereng dibentuk. Sehingga dalam menggunakan klasifikasi massa batuan untuk evaluasi kemantapan lereng harus diperhatikan berbagai model longsor yang diatur oleh karakteristik kekar.

Untuk menyertakan bobot pengatur orientasi kekar, Romana (1980) telah memodifikasi RMR menjadi *Slope Mass Rating (SMR)*. 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 :

$$SMR = RMR_{(1989)} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \dots \dots \dots (2.5)$$

Di mana :

- F1= Menggambarkan kepararelisan antara *strike* lereng dengan *strike* kekar. (F1 = |aj – as|).
- F2= Menerangkan hubungan sudut *dip* kekar sesuai dengan model longsor. (F2 = βj).
- F3= Selisih dari besar kemiringan kekar dikurangi dengan besar kemiringan jenjang.
- F4= Faktor penyesuaian yang berkaitan dengan metode ekskavasi.

Parameter yang digunakan adalah :

1. Klasifikasi massa batuan atau besarnya bobot massa batuan (RMR) .
2. Kedudukan dari bidang lemah yaitu jurus dan kemiringan kekar.
3. Kedudukan dari jenjang gali yaitu *strike* dan kemiringan dari jenjang gali.
4. Melalui parameter ini dapat dilakukan pembobotan berdasarkan kualitasnya yang dapat dilihat pada (tabel 2.8). klasifikasi ini semua bobot dikalikan untuk memperoleh bobot massa jenjang.

Tabel 2.10 Pembobotan SMR Romana, 1985 (Riquelme, et.al, 2016)

Case	The Calculated value	Very Favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $					
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	$> 30^0$	$30^0 - 21^0$	$20^0 - 11^0$	$10^0 - 5^0$	$< 5^0$
W	$ \alpha_i - \alpha_s $					
P/W/T	F1	0.15	0.4	0.7	0.85	1.0
P	$ \beta_j $	$< 20^0$	$20^0 - 30^0$	$31^0 - 35^0$	$36^0 - 45^0$	$> 45^0$
W	$ \beta_i $					
P/W	F2	0.15	0.4	0.7	0.85	1.0
T	F2			1.0		
P	$ \beta_j - \beta_s $					
W	$ \beta_i - \beta_s $	$> 10^0$	$10^0 - 0^0$	0^0	$0^0 - (-10^0)$	$> -10^0$
T	$ \beta_j + \beta_s $	$< 110^0$	$110^0 - 120^0$	$> 120^0$		
P/W/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

α_j = Joint dip direction

β_j = Joint dip

P = Longsor Bidang

α_s = Slope dip direction

β_s = Slope dip

W = Longsor Baji

α_i = Arah Perpotongan Longsor Baji

β_i = Wedge dip

T = Longsor Guling

Tabel 2.11 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

Tabel 2.12 Nilai Pembobotan Massa Lereng SMR (Romana, 1985)

Klasifikasi	V	IV	III	II	I
Bobot Massa Lereng (SMR)	0-20	20-40	40-60	60-80	>80
Deskripsi	Sangat Tidak Stabil	Tidak Stabil	Sedang	Stabil	Sangat Stabil
Kestabilan Lereng	Sangat Tidak Stabil	Tidak Stabil	Sebagian Stabil	Stabil	Sangat Stabil
Kemungkinan Bentuk Longsor	Bidang Atau Seperti Keruntuhan Material Lepas	Bidang Atau Baji Besar	Dikontrol Oleh Adanya Kekar Atau Baji Kecil	Berupa Blok	-
Probability of failure	0.9	0.6	0.4	0.2	0

2.7 Pemodelan Numerik Menggunakan Metode Elemen hingga

Metode kesetimbangan batas sangat memudahkan dalam evaluasi kesetabilan karena perhitungan yang cepat. Namun, metode ini mempunyai prosedur yang sama

dalam pertimbangan analisis lereng alami maupun lereng galian. Berisavljevic (2015) menyatakan bahwa tegangan yang bekerja pada lereng sangat dipengaruhi oleh rasio atau perbandingan dari tegangan normal lateral dan aksial. Faktor ini dianalisis pada metode numerik dan tidak diperhitungkan oleh metode kesetimbangan batas (Abramson et al,2002).

Metode elemen hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi persamaan diferensial, baik persamaan diferensial biasa maupun persamaan diferensial parsial (Duncan,1996). Prinsip metode elemen hingga adalah membagi domain permasalahan, baik itu domain ruang (*spatial domain*) atau domain waktu (*time domain*), menjadi subdomain atau elemen yang lebih kecil (*node*) (Kosasih,2014).

Pendekatan konsep pergeseran, metode elemen hingga yang diterapkan pada analisis geotek memberikan hasil berupa bentuk pergeseran, tegangan yang bekerja serta regangan dalam lereng. Nilai ini berdasarkan perhitungan dari setiap *node* secara berkelanjutan (Abramson et al,2002). Konsep dasar dari elemen hingga adalah penerapan dari tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) yang bekerja pada batuan disetiap *node*. Konsep tegangan dan regangan berdasarkan gaya berikut:

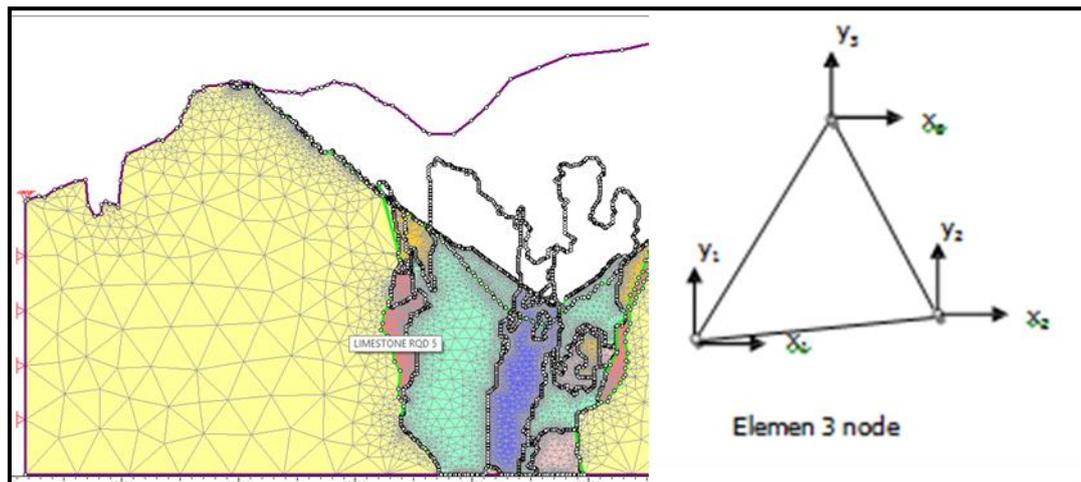
1. Tegangan dan regangan geser.
2. Tegangan dan regangan tarik.
3. Tegangan dan regangan tekan.
4. Tegangan dan regangan runtuh.

Secara umum, terdapat dua pendekatan dalam analisis stabilitas lereng menggunakan metode elemen hingga. Pendekatan pertama adalah peningkatan beban gravitasi dan pendekatan kedua adalah untuk mereduksi karakteristik kekuatan massa batuan (Rocscience Inc, 2004). Peningkatan beban gravitasi didasarkan pada besarnya percepatan gravitasi yang dapat memengaruhi besarnya pembebanan. Pada analisis stabilitas lereng dengan metode elemen hingga, tidak dilakukan asumsi bidang

longsor. Faktor keamanan dicari dengan mencari bidang lemah pada struktur batuan dengan pendekatan metode numerik (Liong et al, 2012). Dalam metode elemen hingga, harus dipenuhi tiga kondisi, yaitu:

1. Keseimbangan, yaitu keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada setiap elemen.
2. Kompatibilitas, yaitu hubungan regangan dan perpindahan yang berkaitan dengan geometri lereng dan materialnya.
3. Persamaan konstitutif, yaitu hubungan tegangan-regangan dari material.

Konsep penyelesaian metode elemen hingga adalah dengan menggunakan hubungan antara regangan, perpindahan, dan tegangan dari setiap titik serta faktor bentuk dari setiap elemen. Besarnya perpindahan pada setiap *node* dipengaruhi oleh besarnya gaya yang bekerja pada *node* tersebut, dalam hal ini gaya pada badan *node* (*body forces*) berupa gaya berat yang bekerja dalam arah vertikal maupun arah horizontal (Cheng dan Lau,2008).



Gambar 2.9 Titik *node* dan *mesh* pada elemen

Hubungan antara perpindahan dan gaya yang bekerja dapat dilihat pada persamaan:

$$[K] \{U\} = [F] \dots\dots\dots(2.16)$$

Di mana K merupakan matriks kekakuan yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$[K] = [B]^T [C] [B] \dots \dots \dots (2.17)$$

[B] adalah matriks elemen yang dapat dihitung dengan (Hutton, 2004):

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.18)$$

di mana:

A = luas elemen

$$\begin{aligned} \beta_1 &= y_2 - y_3, \beta_2 = y_3 - y_1, \beta_3 = y_1 - y_2, \gamma_1 = x_3 - x_2, \gamma_2 = x_1 - x_3, \\ \gamma_3 &= x_2 - x_1, \dots \dots \dots (2.19) \end{aligned}$$

Nilai x dan y merupakan kordinat *node*. [C] adalah matriks konstituif yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$[C] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.20)$$

Hubungan maktriks regangan dan perpindahan adalah

$$\{\epsilon\} = [B]\{U\} \dots \dots \dots (2.21)$$

{ε} adalah tegangan {(εx),(εy),(εxy)}, [B] adalah matriks elemen, dan {U} adalah perpindahan titik *node* arah x dan y . Hubungan antara tegangan dan regangan dapat dilihat pada persamaan perkalian matriks di bawah ini (Hutton, 2004):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2.22)$$

Di mana:

σ = Tegangan

ε = Regangan

E = *Modulus Young*

ν = Nisbah Poisson

Kriteria model dalam analisis nonlinear biasanya menggunakan kriteria keruntuhan mohr-coulomb. Parameter dalam mohr-coulomb seperti kohesi dan sudut geser dalam batuan mengalami penurunan nilai sepanjang keruntuhan dengan mengikuti persamaan sebagai berikut (Cheng dan Lau,2008):

$$C_f = \frac{c}{SRF} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$\phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{SRF} \right) \dots\dots\dots(2.24)$$