

**PENGARUH PERUBAHAN BERAT ISI DAN KUAT TEKAN
BATUAN TERHADAP KESTABILAN LERENG TAMBANG
BATU HIJAU PT. AMMAN MINERAL NUSA TENGGARA**

SKRIPSI



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH PERUBAHAN BERAT ISI DAN KUAT TEKAN
BATUAN TERHADAP KESTABILAN LERENG TAMBANG
BATU HIJAU PT. AMMAN MINERAL NUSA TENGGARA**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
dalam bidang Fisika



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

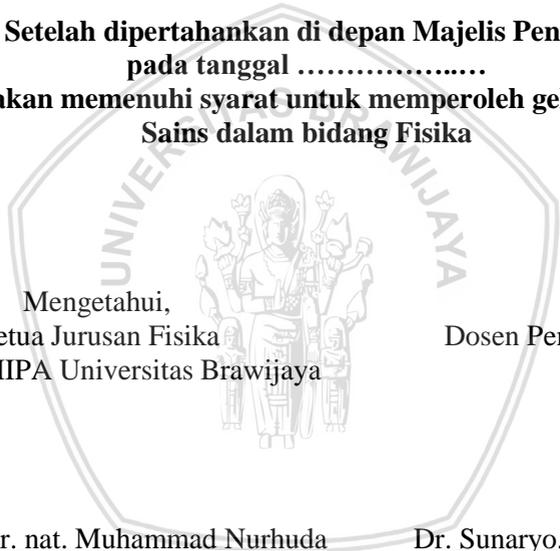


LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PENGARUH PERUBAHAN BERAT ISI DAN KUAT TEKAN
BATUAN TERHADAP KESTABILAN LERENG TAMBANG
BATU HIJAU PT. AMMAN MINERAL NUSA TENGGARA**

oleh:
WIRAWATI
135090701111004

**Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal
dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Sains dalam bidang Fisika**



Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. rer. nat. Muhammad Nurhuda
NIP 196409101990021001

Dr. Sunaryo, S.Si., M.Si.
NIP 196712281994121001



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Wirawati
NIM : 135090701111004
Jurusan : Fisika
Penulis Skripsi Berjudul:

Pengaruh Perubahan Berat Isi dan Kuat Tekan Batuan Terhadap Kestabilan Lereng Tambang Batu Hijau PT. Amman Mineral Nusa Tenggara

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Tugas akhir ini adalah benar-benar karya saya sendiri dan bukan hasil plagiat dari karya orang lain. Karya-karya yang tercantum dalam daftar pustaka Tugas Akhir ini, semata-mata digunakan sebagai acuan/referensi.
2. Apabila dikemudian hari diketahui bahwa isi Tugas Akhir saya merupakan hasil plagiat, maka saya bersedia menanggung akibat dari keadaan tersebut.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, Juni 2018
Yang menyatakan,

Wirawati
NIM. 135090701111004



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PERSEMBAHAN

Karya ini penulis persembahkan untuk keluarga tercinta, yakni kedua orang tua -Jabri dan Hasana- serta adik -Rizky Hidayat. Terima kasih untuk cinta dan kasih sayang yang tak terbatas, doa yang selalu dipanjatkan untuk kebaikan dan kesuksesan penulis, serta dukungan yang selalu ada setiap waktu.

Karya ini juga penulis persembahkan untuk orang-orang yang telah mengajarkan banyak hal tentang kehidupan, dan membuat penulis berusaha menjadi orang yang lebih baik setiap harinya. Terima kasih atas ilmu dan nasehat yang senantiasa diberikan kepada penulis.





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian dengan judul “Pengaruh Perubahan Berat Isi dan Kuat Tekan Batuan terhadap Kestabilan Lereng Tambang Batu Hijau PT. Amman Mineral Nusa Tenggara” dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan berat isi dan kuat tekan batuan terhadap kestabilan lereng tambang di lokasi tersebut. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis regresi linier ganda, dengan menggunakan data berat isi (*Unit Weight*) dan kuat tekan batuan (*Uniaxial Compressive Strength*) yang diperoleh dari hasil uji laboratorium pada beberapa sampel masing-masing litologi batuan yang ada di daerah penelitian sebagai variabel bebas, dan data faktor keamanan (FK) lereng yang diperoleh dari perhitungan FK berdasarkan perubahan data berat isi dan kuat tekan menggunakan metode kesetimbangan batas/Morgenstern-Price dengan bantuan software Slide v.6.0 sebagai variabel terikat. Dari hasil analisis regresi linier ganda diperoleh model regresi pada masing-masing litologi batuan. Pada litologi vulkanik diperoleh model regresi: $FK = -3,95 - 0,037UW + 0,66 \ln UCS$, pada litologi tonalit diperoleh model regresi: $FK = -3,69 - 0,006UW + 0,5 \ln UCS$, sedangkan pada litologi diorit diperoleh model regresi: $FK = -3,34 - 0,018UW + 0,49 \ln UCS$. Hasil analisis statistika yang diperoleh perlu dikombinasikan dengan pengujian secara geoteknik agar diperoleh prediksi nilai yang lebih tepat.

Kata Kunci: Berat Isi, Kuat Tekan, Kestabilan Lereng, Regresi Linier Ganda



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRACT

The research has been conducted with the aim of this study is to find out the effect of the unit weight and compressive strength of the rock to the slope stability at Batu Hijau Mine, PT. Amman Mineral Nusa Tenggara. The method used in this research is multiple linear regression analysis, using data of unit weight (UW) and uniaxial compressive strength (UCS) of rocks obtained from laboratory test results on some samples of each lithology of rocks in the research area as independent variables, and factor of safety (FoS) obtained from FoS calculations based on changes in unit weight and compressive strength using the Limit Equilibrium/Morgenstern-Price method on Slide v.6.0 software as dependent variable. The result showed the multiple linear regression model on each lithology of rocks. On volcanic lithology obtained regression model: $FK = -3,95 - 0,037UW + 0,66 \ln UCS$, on tonalit lithology obtained regression model: $FK = -3,69 - 0,006UW + 0,5 \ln UCS$, while the diorite lithology obtained by regression model: $FK = -3,34 - 0,018UW + 0,49 \ln UCS$. The result of statistical analysis needs to be combined with geotechnical in order to obtain more precision results.

Keywords: Unit Weight, Compressive Strength, Slope Stability, Multiple Linear Regression



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Pengaruh Perubahan Berat Isi dan Kuat Tekan Batuan terhadap Kestabilan Lereng Tambang Batu Hijau PT. Amman Mineral Nusa Tenggara**”.

Selama tugas akhir hingga penyusunan skripsi, penulis banyak mendapatkan ilmu, arahan, dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karenanya, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan adik yang senantiasa mendoakan dan memotivasi setiap waktu
2. Bapak Dr. Sunaryo, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing skripsi atas ilmu dan saran selama bimbingan skripsi
3. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Muhammad Nurhuda selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Brawijaya, serta Bapak Alamsyah M. Juwono selaku Ketua Program Studi Geofisika Universitas Brawijaya sekaligus dosen pembimbing akademik selama penulis menjadi mahasiswa
4. Bapak Ahdiat Amril selaku *sponsor* penulis, serta Bapak Khairudin selaku staff Departemen *Social Responsibility and Planning Development* yang membantu administrasi dan keperluan penulis selama melaksanakan penelitian tugas akhir skripsi
5. Keluarga besar Departemen Geoteknik dan Hidrogeologi PT. Amman Mineral Nusa Tenggara yang telah memberikan banyak ilmu baik secara teknis maupun non-teknis, diantaranya: Bapak Yan Adriansyah selaku *Superintendent*; Bapak Khatib Syarbini selaku *General Supervisor of Geotech Inpit and Monitoring* sekaligus pembimbing lapangan; Bapak Dedi Maryadi, Bapak Supardi, dan Bapak Azwar Satriawan yang mengajarkan tentang analisis dan pemodelan lereng tambang serta RMR Mapping di lapangan; serta Bapak Ali Rachman Hakim, Bapak Ida Bagus Donni Viriyatha, Bapak Hemiel Dayan Lelono, Bapak Fransiskus Cahya Kusnantaka, Bapak Aminollah, Bapak Adeni Muhadi, Ibu Sri Kustanti Pujiastuti, Bapak Faisal Mirza, Bapak Satra Giawan, Bapak Subhan, Bapak Armandho, Bapak Ilfan Rainuddin, Bapak Basran, Bapak Kardiansyah, Bapak Mahdi, Bapak Lalu Zarkasi, Bapak Abdul Halim, Bapak Syaffrudin Hamzah, dan teman-teman student Geotech atas

- ilmu, bantuan, dan kebersamaannya baik di lapangan maupun di kantor
6. Dosen dan Staff Jurusan Fisika Universitas Brawijaya atas ilmu dan pelayanan akademis selama penulis menjadi mahasiswa
 7. Teman-teman seperjuangan Geofisika Universitas Brawijaya angkatan 2013 atas kerjasama, berbagi ilmu dan kebersamaan selama di bangku perkuliahan, terutama kepada sahabat baik penulis Moh Inggil Taufani, Taufiqurrahman Nur Ashar, Kiki Suci Arumsari dan Liliya
 8. A. Rofiqi Maulana dan Alviana Arizka yang telah bersedia berbagi ilmu statistika
 9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas segala ilmu, bantuan, dukungan dan doa yang diberikan kepada penulis selama penelitian dan juga selama menuntut ilmu di Universitas Brawijaya Malang.

Penulis mohon maaf apabila dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan, baik dari segi isi maupun sistematika penulisan, sehingga diharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun demi perbaikan di masa yang akan datang. Akhir kata, semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca. Terima kasih.

Malang, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	v
LEMBAR PERNYATAAN	vii
LEMBAR PERSEMBAHAN.....	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kondisi Geologi Batu Hijau.....	5
2.1.1 Struktur Geologi Batu Hijau.....	6
2.1.2 Geomorfologi Batu Hijau	8
2.1.3 Litologi Batu Hijau	8
2.1.4 Alterasi Batu Hijau	10
2.2 Prinsip Dasar Kestabilan Lereng.....	11
2.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng.....	12
2.3.1 Geometri lereng	13
2.3.2 Struktur geologi	14
2.3.3 Kondisi air tanah.....	14
2.3.4 Sifat fisik dan mekanik batuan	14
2.3.5 Getaran pada tubuh lereng.....	15
2.4 Klasifikasi Massa Batuan.....	15
2.5 Geological Strength Index	19
2.6 Berat Isi (<i>Unit Weight</i>).....	20
2.7 Kuat Tekan Uniaksial (<i>Uniaxial Compressive Strength</i>).....	21
2.8 Kriteria Keruntuhan Generalized Hoek-Brown	24
2.9 Metode <i>General Limit Equilibrium/Morgenstern Price</i>	28
2.10 Uji Regresi Ganda.....	31
2.10.1 Persamaan Regresi Linier Ganda.....	32
2.10.2 Koefisien Determinasi (r^2).....	33
	xvii

2.10.3 Koefisien Korelasi Ganda (r)	33
2.10.4 Uji Signifikansi F.....	33
2.10.5 Uji Asumsi Klasik.....	36
2.10.6 Transformasi Logaritma Natural.....	40
BAB III METODE PENELITIAN	43
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	43
3.2 Rancangan Penelitian	44
3.3 Materi Penelitian	44
3.4 Langkah Penelitian.....	45
3.5 Pengolahan dan Pemodelan Data	46
3.6 Diagram Alir Penelitian	53
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	55
4.1 Kondisi Massa Batuan Daerah Penelitian	56
4.2 Faktor Keamanan Lereng di Daerah Penelitian	61
4.2.1 Titik Section A-A' (Litologi Vulkanik).....	62
4.2.2 Titik Section B-B' (Litologi Tonalit).....	64
4.2.3 Titik Section C-C' (Litologi Diorit).....	66
4.3 Pengaruh Perubahan Berat Isi dan Kuat Tekan Batuan terhadap Kestabilan Lereng Tambang di Daerah Penelitian.....	68
4.3.1 Litologi Vulkanik.....	68
4.3.2 Litologi Tonalit	72
4.3.3 Litologi Diorit.....	75
4.3.4 Pembahasan	78
BAB V PENUTUP.....	81
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran dan Rekomendasi	81
DAFTAR PUSTAKA.....	83
LAMPIRAN	85



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Peta geologi regional Sumbawa Barat (Garwin, 2002) .6
Gambar 2. 2	Update sebaran struktur mayor dan intermediet di Batu Hijau berdasarkan topografi penambangan Juli 2017 (Anonim, 2017c)..... 7
Gambar 2. 3	Sebaran litologi batuan di Batu Hijau berdasarkan topo penambangan 2012 (Anonim, 2012)..... 10
Gambar 2. 4	Ilustrasi kelongsoran dengan gaya mekanika 12
Gambar 2. 5	Geometri lereng pada tambang terbuka (Hoek & Bray, 1981)..... 13
Gambar 2. 6	Parameter GSI (Hoek & Brown, 1997 dalam Read & Stacey, 2009) 19
Gambar 2. 7	Alat mesin tekan (Laboratorium Geomekanika FIKTM-ITB, 2013)..... 23
Gambar 2. 8	Kurva tegangan-regangan pada uji kuat tekan uniaksial batuan (Hoek dan Brown, 1980 dalam Arif, 2016) 24
Gambar 2. 9	Model lereng dengan bidang longsor yang merupakan gabungan dari sebuah busur lingkaran dengan bidang planar (Krahn, 2004 dalam Arif, 2016) 28
Gambar 2. 10	Gaya yang bekerja pada irisan kelongsoran metode Morgenstern Price (Takwin dkk, 2017) 30
Gambar 3.1	Lokasi penelitian; Peta Sumbawa Barat NTB (atas) dan Tambang Batu Hijau (bawah) (Google Earth)..... 43
Gambar 3. 2	Penampang vertikal 2D section daerah penelitian berdasarkan data RMR, batas litologi batuan, dan struktur fault.....46
Gambar 3. 3	Tampilan section daerah penelitian di Autocad..... 47
Gambar 3. 4	Tampilan external dan material boundary daerah penelitian..... 47
Gambar 3. 5	Tampilan kotak dialog Define Material Properties 48
Gambar 3. 6	Tampilan kotak dialog GSI 49
Gambar 3. 7	Hasil pemodelan lereng serta data material properties 49
Gambar 3. 8	Pengisian properties fault 50
Gambar 3. 9	Tampilan proses perhitungan FK 51
Gambar 3. 10	Tampilan hasil perhitungan FK 51
Gambar 3. 11	Diagram alir penelitian 53
Gambar 4. 1	Section daerah penelitian berdasarkan surface phase 6 elevasi -268.24 mRL (Anonim, 2017b) 55



Gambar 4. 2 Kondisi massa batuan penyusun lereng Tambang Batu Hijau berdasarkan topografi penambangan September 2017 (Anonim, 2017a)57

Gambar 4. 3 Penampang kondisi RMR daerah penelitian berdasarkan surface phase 6 elevasi -268.24 mRL58

Gambar 4. 4 Kondisi batuan di lapangan - Dinding timur titik C' pada section penelitian59

Gambar 4. 5 Pemodelan lereng pada litologi vulkanik..... 62

Gambar 4. 6 Faktor keamanan lereng pada litologi vulkanik..... 63

Gambar 4. 7 Pemodelan lereng pada litologi tonalit 64

Gambar 4. 8 Faktor keamanan lereng pada litologi tonalit..... 65

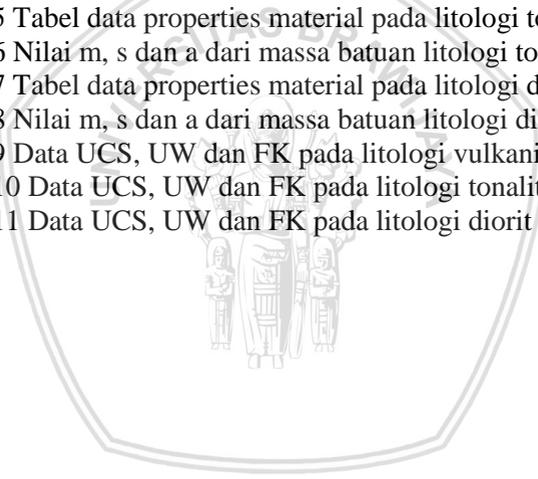
Gambar 4. 9 Pemodelan lereng pada litologi diorit 66

Gambar 4. 10 Faktor keamanan lereng pada litologi diorit 67



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Klasifikasi parameter RMR (Bieniawski, 1989)	17
Tabel 2. 2	Kelas massa batuan (Bieniawski, 1989).....	18
Tabel 2. 3	Nilai berat isi (γ) dari beberapa tipe batuan (Read dan Stacey, 2009)	20
Tabel 2. 4	Nilai konstanta m_i batuan beku (Wyllie dan Mah, 2004)	25
Tabel 2. 5	Pedoman penentuan nilai Faktor Disturbance (D) pada lereng tambang terbuka (Wyllie dan Mah, 2004).....	26
Tabel 2. 6	Uji statistik Durbin-Watson (Widarjono, 2007).....	40
Tabel 4. 1	Posisi koordinat untuk section daerah penelitian	56
Tabel 4. 2	Form RMR mapping	59
Tabel 4. 3	Tabel data properties material pada litologi vulkanik	62
Tabel 4. 4	Nilai m , s dan a dari massa batuan litologi vulkanik.....	63
Tabel 4. 5	Tabel data properties material pada litologi tonalit.....	64
Tabel 4. 6	Nilai m , s dan a dari massa batuan litologi tonalit	65
Tabel 4. 7	Tabel data properties material pada litologi diorit	66
Tabel 4. 8	Nilai m , s dan a dari massa batuan litologi diorit	67
Tabel 4. 9	Data UCS, UW dan FK pada litologi vulkanik	68
Tabel 4. 10	Data UCS, UW dan FK pada litologi tonalit.....	72
Tabel 4. 11	Data UCS, UW dan FK pada litologi diorit	75





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Summary properties batuan 2013	85
Lampiran 2 Summary of UCS and density, laboratory test 2004.....	86
Lampiran 3 Hasil perhitungan FK.....	88
Lampiran 4 Tabel Distribusi F	94
Lampiran 5 Tabel Distribusi t	96
Lampiran 6 Tabel Shapiro-Wilk	97
Lampiran 7 Tabel Durbin-Watson	98





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tambang Batu Hijau PT. Amman Mineral Nusa Tenggara (PT.AMNT) adalah perusahaan tambang emas dan tembaga di Indonesia yang beroperasi di daerah Batu Hijau, Sumbawa Barat. Tambang Batu Hijau dioperasikan dengan metode penambangan terbuka (*open pit*), yaitu dengan melakukan penggalian di tempat endapan-endapan bijih emas-tembaga tersebut berada hingga daerah berbentuk cekungan (mengerucut). Secara umum, beberapa tahapan umum yang dilakukan di tambang terbuka yaitu pembersihan lahan (*land clearing*), pengupasan lapisan penutup (*overburden*) yang dapat dilakukan dengan peledakan (*blasting*), pemuatan dan pengangkutan bahan galian ke pabrik pengolahan (*loading* dan *hauling*), selanjutnya bijih akan diolah untuk memisahkan mineral yang berharga dengan mineral yang tidak bernilai ekonomis.

Guna meningkatkan produksinya, tambang terbuka akan terus diperlebar dan diperdalam. Apabila tambang tersebut semakin lebar dan dalam, tentunya akan berdampak pada kestabilan lereng tersebut, dimana potensi terjadinya pergerakan material penyusun lereng akan semakin meningkat. Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya geometri lereng, struktur geologi, air tanah, serta sifat fisik dan mekanik batuan penyusun lereng itu sendiri dan juga adanya aktivitas penambangan yang menambah beban-beban baru di sekitar lereng.

Batuan yang ada di Batu Hijau terdiri dari beberapa batuan beku, yaitu batuan vulkanik andesit, diorit dan tonalit. Batuan yang berbeda umumnya akan memiliki sifat fisik dan mekanik yang berbeda akibat dari proses pembentukan yang dialami oleh masing-masing batuan. Selain itu, adanya pengaruh iklim seperti suhu, tekanan dan intensitas hujan dapat menyebabkan terjadinya pelapukan yang kemudian mempengaruhi sifat asli batuan. Sifat fisik dan mekanik batuan merupakan salah satu parameter yang berperan dalam menentukan kekuatan massa batuan lereng, sehingga ketika terjadi perubahan sifat fisik dan mekanik tentu akan mempengaruhi kekuatan batuan tersebut. Kekuatan massa batuan menunjukkan seberapa besar kekuatannya untuk menahan gaya penggerak longsor. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis ingin mengetahui bagaimana sifat fisik dan mekanik batuan berperan

dalam menentukan kondisi lereng tambang di Batu Hijau, dalam hal ini sifat fisik yang digunakan adalah berat isi batuan sedangkan sifat mekanik batuan yang digunakan adalah kuat tekan batuan.

1.2 Rumusan Masalah

Beberapa rumusan masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi massa batuan di daerah penelitian?
2. Berapa nilai faktor keamanan lereng di daerah penelitian?
3. Bagaimana pengaruh perubahan berat isi dan kuat tekan batuan terhadap kestabilan lereng di daerah penelitian?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan di Tambang Batu Hijau di sisi utara-timur untuk batuan diorit, dan barat-selatan untuk batuan vulkanik dan tonalit dengan skala inter-ramp.
2. Perhitungan faktor keamanan lereng dilakukan menggunakan bantuan *software Slide v.6.0* dengan menggunakan metode analisa kestabilan lereng *General Limit Equilibrium/Morgenstern Price* dan tipe kekuatan massa batuan *Generalized Hoek-Brown*.
3. Data properties batuan (berat isi dan kuat tekan batuan) dilakukan pengujian regresi linier ganda, dimana berat isi dan kuat tekan batuan sebagai variabel bebas sedangkan faktor keamanan lereng sebagai variabel terikat, dengan mengasumsikan properties yang lain memiliki nilai yang konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka diketahui bahwa tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kondisi massa batuan daerah penelitian.
2. Mengetahui nilai faktor keamanan lereng di daerah penelitian.
3. Mengetahui pengaruh perubahan berat isi dan kuat tekan batuan terhadap kestabilan lereng di daerah penelitian.

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Menambah pengetahuan mengenai pengaruh berat isi dan kuat tekan batuan terhadap kestabilan lereng tambang.
2. Dengan diketahuinya pengaruh perubahan nilai berat isi dan kuat tekan batuan terhadap kestabilan lereng, diharapkan dapat dijadikan sebagai salah satu acuan dan pertimbangan dalam melakukan desain lereng.
3. Menambah referensi dalam lingkup ilmu geoteknik, terutama bagi peneliti-peneliti berikutnya di Tambang Batu Hijau.





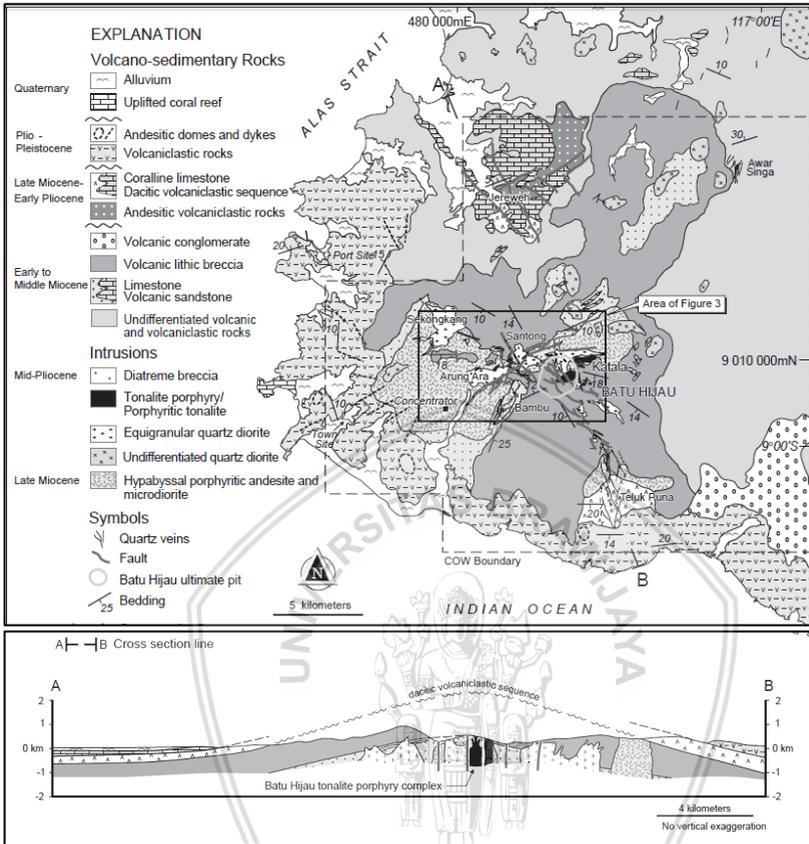
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Geologi Batu Hijau

Pulau Sumbawa bagian baratdaya memiliki tipe endapan porfiri Cu-Au (Tembaga-Emas), tepatnya berlokasi di Batu Hijau. Lokasi Batu Hijau berada pada zona tektonik aktif busur magmatik Sunda-Banda yang merupakan hasil dari pertemuan 3 lempeng besar, yakni Lempeng Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik. Pulau Sumbawa bagian selatan adalah lempeng samudera yang ditutupi oleh endapan berumur Tersier Awal yakni batuan vulkanik andesit *low-K calc-alkaline* sampai *weakly alkaline*, batuan vulkaniklastik berlapis yang berasosiasi dengan intrusi intermediet low-K dan sedikit terdapat endapan laut dangkal dan batugamping, sedangkan bagian baratdaya tersusun oleh perselingan andesit vulkanik (Clode et al, 1999).

Berdasarkan Garwin (2000), daerah Batu Hijau termasuk ke dalam busur magmatis dan merupakan deposit Cu-Au dalam Tonalit yang berumur kisaran pliosen. Singkatnya, secara umum batuan di Batu Hijau merupakan batuan beku teralterasi kuat yang kaya akan silika yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 yang menunjukkan peta geologi Sumbawa bagian barat daya, lokasi Tambang Batu Hijau, serta dapat dilihat hubungan antara batuan andesitik berumur miosen awal sampai pertengahan, batuan vulkaniklastik dasitik berumur miosen akhir sampai pliosen dan intrusi felsik berumur pliosen yang diilustrasikan oleh cross-section A-B.



Gambar 2. 1 Peta geologi regional Sumbawa Barat (Garwin, 2002)

2.1.1 Struktur Geologi Batu Hijau

Berdasarkan gambar 2.1 dapat dilihat bahwa secara garis besar, struktur geologi yang berkembang di Batu Hijau berupa sesar (*fault*). Sesar mayor terdiri atas struktur sesar Bambu-Santong yang berada di arah baratdaya – timurlaut, sesar Tongoloka dengan kecenderungan mengarah ke barat laut – tenggara terdiri atas sesar Tongoloka-Puna, dan sesar Katala. Untuk lebih jelasnya, peta struktur geologi Batu Hijau dapat lihat pada Gambar 2.2.

diduga terjadi ekspansi lempeng pada fore-arc dan intra-arc, serta keterdapatan lempeng benua di pegunungan bawah laut Banda. Periode tektonik ini dibagi menjadi dua, yaitu periode kompresi yang memiliki orientasi sesar mengarah ke barat laut – tenggara dan periode relaksasi yang memiliki orientasi sesar mengarah ke barat daya – timur laut.

2.1.2 Geomorfologi Batu Hijau

Berdasarkan hasil penelitian Garwin (2000), morfologi daerah Batu Hijau menunjukkan kenampakan satuan perbukitan vulkanik dan satuan perbukitan intrusi. Satuan perbukitan vulkanik tersusun oleh litologi berupa batuan andesit vulkaniklastik dan intrusi andesit porfiri, menunjukkan bukit-bukit yang sedikit curam dengan vegetasi hutan tropis. Sedangkan batuan perbukitan intrusi tersusun oleh batuan intrusi berupa diorit dan tonalit, dimana perbukitan yang intrusi yang curam merupakan hasil dari proses struktur.

Topografi daerah ini secara umum berupa perbukitan dengan kemiringan landai sampai terjal, ketinggian mencapai 1000 meter yakni sekitar 10 km dari pesisir selatan. Lembah-lembah pada daerah ini terpotong pada tingkat menengah sampai tajam, sehingga banyak ditemukan singkapan batuan pada alur-alur sungai (Garwin, 2002).

2.1.3 Litologi Batu Hijau

Clode et al. (1999) dan Garwin (2002) mengelompokkan satuan batuan yang terdapat di Batu Hijau terdiri dari satuan batuan *vulkanik*, *diorit*, dan *tonalit*. Berikut adalah batuan penyusun lereng Tambang Batu Hijau berdasarkan urutan kejadian atau proses pembentukannya.

1. Vulkanik (*Volcanic Lithic Breccia*, Vxl)

Deposit batuan di daerah Batu Hijau sebelum terjadinya intrusi terdiri atas andesit vulkanik, tuff andesit, breksi serta *fine-grained volcanoclastics* berupa *sandstone* dan *mudstone*. Batuan vulkanik adalah batuan tertua yang mendominasi daerah penambangan Batu Hijau. Batuan ini merupakan batuan tertua dan batuan induk dari batuan intrusi yang membawa mineralisasi. Intrusi pertama yang diidentifikasi di Batu Hijau adalah intrusi andesit porfiritik yang memotong satuan batuan vulkanik.

Batuan vulkanik didominasi oleh sebagian besar andesit vulkanik yang berstruktur masif dengan ukuran butir yang sangat halus (afanitik) hingga sedang (porfiritik). Pada umumnya, batuan andesit vulkanik berwarna abu-abu kehijauan, namun yang dijumpai di lapangan berwarna abu-abu. Mineral pembentuknya terdiri dari mineral felsik dan mafik berupa plagioklas feldspar (berwarna putih hingga abu-abu dengan tekstur yang sangat halus), kuarsa (berwarna putih dengan kilap kaca), dan keterdapatannya biotit yang ditandai dengan bintik-bintik berwarna gelap berbentuk pipih serta hornblende yang dengan bintik warna hijau gelap.

2. Diorit (*Quartz Diorite*)

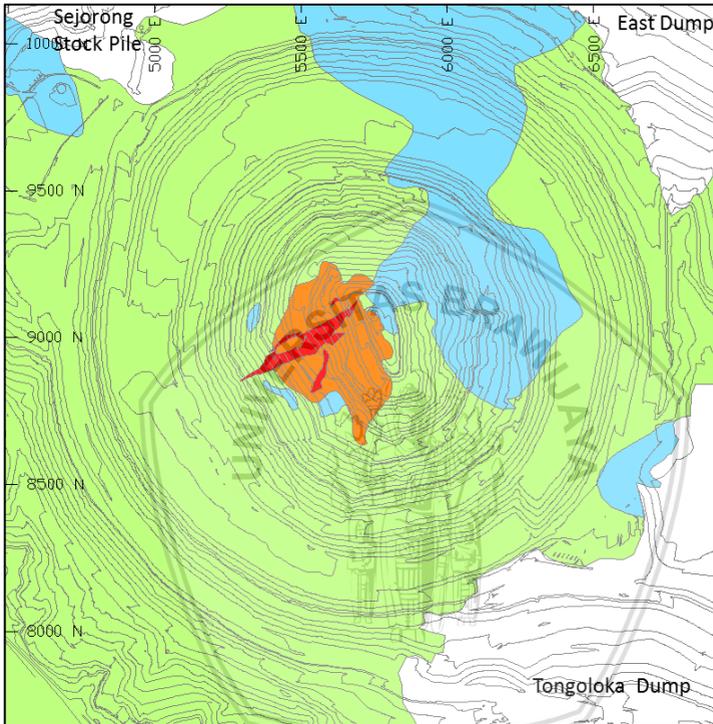
Batuan vulkanik kemudian diintrusi oleh diorit yang berada di bagian Utara - Timur daerah penambangan. Satuan batuan diorit terdiri dari dua batuan yaitu *porphyritic quartz diorite (Qdp)* dan *equigranular quartz diorite (Qde)*. Kedua satuan batuan diorit ini memiliki komposisi yang sama yaitu plagioklas, kuarsa dan sedikit hornblende. Namun, *Porphyritic Quartz Diorite (Qdp)* memiliki tekstur porfiritik dan penyebarannya hanya sebagian kecil daerah di timur laut dan barat laut, sedangkan *Equigranular Quartz Diorite (Qde)* memiliki tekstur fanerik dengan penyebaran yang lebih besar sekitar $\pm 25\%$ di bagian timur laut. Secara garis besar, cebakan diorit berupa laccolithic dengan batuan yang menyerupai lengan (*silk-silk arm*) mengarah ke bagian tengah cebakan. Diorit mengandung *plagioclase phenocryst* berukuran sedang dan *hornblende phenocryst* yang teralterasi serta biotit primer dalam bentuk butiran halus.

3. Tonalit

Satuan batuan tonalit umumnya berwarna abu-abu terang, dan terdiri dari *intermediate tonalite* dan *young tonalite*. *Intermediate Tonalite (It)* membawa mineralisasi utama di Batu Hijau yang ditandai dengan keberadaan urat-urat kuarsa. Penyebarannya berada pada bagian tengah penambangan Batu Hijau dengan cebakan dalam bentuk intrusi sub-vertikal yang menerobos pada zona kontak antara andesit vulkanik dan diorit. Satuan batuan ini mengandung fenokris kuarsa dan plagioklas. Kemudian intermediet ini diintrusi oleh *young tonalite (Yt)*. *Young Tonalite* adalah satuan batuan termuda di Batu Hijau dan tidak

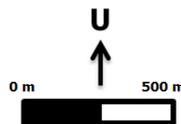
termineralisasi. Kandungan kuarsanya lebih banyak dan ukuran massa dasar serta fenokrisnya lebih besar dibandingkan dengan *Intermediate Tonalite*.

Sebaran litologi batuan di Tambang Batu Hijau dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Legenda:

-  *Volcanic*
-  *Diorite*
-  *Intermediet Tonalite*
-  *Young Tonalite*
-  *Waste Dump*



Gambar 2. 3 Sebaran litologi batuan di Batu Hijau berdasarkan topo penambangan 2012 (Anonim, 2012)

2.1.4 Alterasi Batu Hijau

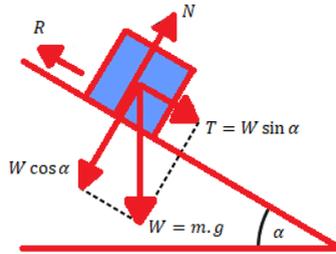
Berdasarkan Clode et al. (1999), ada 5 tahapan alterasi hidrotermal hipogen di Batu Hijau, diantaranya:

1. Tahap awal (*early alteration*) terdiri dari proses biotisasi fenokris dan massa dasar mineral mafik serta pembentukan biotit, magnetit, kuarsa dan anhidrit yang berasosiasi dengan biotit-kuarsa dan magnetit. Pada tahap ini, mineralisasi yang terjadi terdiri dari *digenite*, *bornite*, dan *chalcosite*.
2. Tahap transisi (*transitional alteration*), alterasi yang terjadi ditandai dengan perubahan biotit menjadi klorit, oligoklas menjadi albit, kemudian muncul serisit dan kalsit. Pada tahap ini, mineralisasi yang terjadi berupa kalkopirit dan bornit.
3. Tahap akhir (*late alteration*) ditandai dengan *feldspar destruction*, serisit dan pembentukan urat sulfide tipe D. Urat ini diisi oleh kuarsa, pirit dan kalkopirit, dan dikelilingi oleh urat-urat kecil terisi pirit, biotit dan feldspar yang berubah menjadi serisit.
4. Tahap sangat akhir (*very late alteration*), *feldspar destruction* yang digantikan oleh *smectite*, serisit dan klorit. Mineralisasi pada tahap sangat akhir ini berupa *sphalerite*, *galena*, pirit, kalkopirit dan sedikit bornit.
5. Alterasi zeolit (*zeolite alteration*) yang ditandai dengan keberadaan zeolite berupa stilbit dan laumontit, dan muncul bersamaan dengan kalsit, kristobalit dan kuarsa yang mengisi pori.

2.2 Prinsip Dasar Kestabilan Lereng

Suatu permukaan tanah yang miring yang membentuk sudut tertentu terhadap bidang horizontal disebut sebagai lereng (*slope*). Jika permukaan membentuk suatu kemiringan maka komponen massa tanah di atas bidang gelincir cenderung akan bergerak ke arah bawah akibat gravitasi. Jika komponen gaya berat yang terjadi cukup besar, dapat mengakibatkan longsor.

Kestabilan lereng dapat dinyatakan sebagai faktor keamanan (FK) yang secara teoritis merupakan perbandingan antara gaya penahan yang menjaga lereng tetap stabil dan gaya penggerak yang menyebabkan terjadinya longsor. Analisis kestabilan lereng dapat ditinjau sebagai mekanisme gerak suatu benda yang terletak pada bidang miring. Benda akan tetap pada posisinya jika gaya penahan (R) yang terbentuk oleh gaya geser antara benda dan permukaan lereng lebih besar dibandingkan dengan gaya penggerak (T) dari benda akibat gaya gravitasi. Lebih jelasnya, kelongsoran dapat diilustrasikan sebagai berikut.



Gambar 2. 4 Ilustrasi kelongsoran dengan gaya mekanika

Dari Gambar 2.4 di atas dapat dilihat bahwa gaya yang bekerja pada suatu lereng adalah gaya berat (W), kemudian menghasilkan gaya penggerak (T) dan gaya penahan (R). Secara mekanik sederhana, faktor kestabilan lereng dinyatakan dalam persamaan 2.1

$$FK = \frac{\text{gaya penahan } (R)}{\text{gaya penggerak } (T)} \text{ artinya lereng dalam kondisi kritis} \quad (2.1)$$

$$FK < \frac{\text{gaya penahan } (R)}{\text{gaya penggerak } (T)} \text{ artinya lereng tidak stabil (longsor)}$$

$$FK > \frac{\text{gaya penahan } (R)}{\text{gaya penggerak } (T)} \text{ artinya lereng stabil (aman)}$$

Dimana

$R = cA + W \cos \alpha \tan \phi$, sedangkan $T = W \sin \alpha$

Keterangan:

FK adalah faktor keamanan lereng

c adalah kohesi pada batuan

A adalah luas daerah yang terpengaruh gaya

W adalah berat massa batuan di atas bidang gelincir

α adalah besar sudut lereng

ϕ adalah sudut geser dalam batuan.

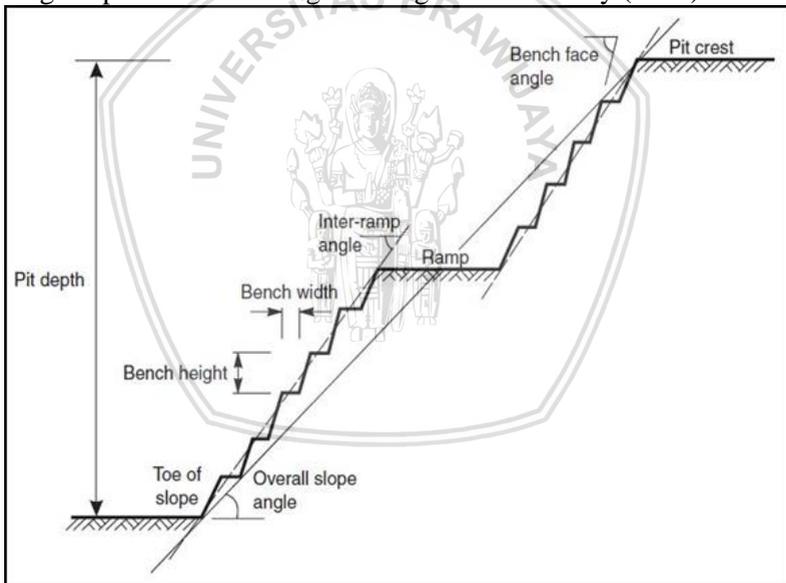
2.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

Kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa masalah ketidakstabilan lereng dapat diakibatkan oleh beberapa faktor, seperti faktor geometri lereng, karakteristik sifat fisik dan mekanik material pembentuk lereng, air (hidrologi dan hidrogeologi), struktur bidang lemah batuan, tegangan alamiah dalam massa batuan, konsentrasi tegangan lokal, getaran pada tubuh lereng, iklim, hasil perbuatan pekerja tambang, serta pengaruh termik (Moshab 1997 dalam Arif 2016).

2.3.1 Geometri lereng

Geometri lereng, terdiri dari ketinggian, lebar, dan sudut kemiringan lereng terhadap sumbu horizontal. Perubahan geometri lereng tersebut akan sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Semakin besar sudut kemiringan dan ketinggian suatu lereng, maka kestabilan lereng akan semakin menurun. Perancangan geometri lereng juga dipengaruhi oleh parameter kuat geser massa batuan penyusun lereng tersebut, yakni nilai kohesi dan sudut geser dalam batuan. Dalam aktivitas penambangan di Batu Hijau, hal yang menjadi pertimbangan dalam perencanaan geometri tambang adalah faktor keamanan lereng dan tingkat ekonomisnya, yakni pencapaian produktivitas yang maksimal dengan tetap menjaga tingkat keamanan lereng tambang.

Berikut adalah geometri lereng pada tambang terbuka dengan mengacu pada desain lereng tambang Hoek dan Bray (1981).



Gambar 2. 5 Geometri lereng pada tambang terbuka (Hoek & Bray, 1981)

Istilah yang dipakai pada geometri lereng tambang terbuka di Tambang Batu Hijau berdasarkan Hoek & Bray, 1981 terdiri atas *ramp* dengan *slope azimuth* yang memusat pada bagian tengah pit. Pada tiap *ramp*, didapati beberapa *bench* dengan masing-masing

ketinggian rata-rata 15 m, dimana antar *bench* dibatasi oleh *slope break* yang berfungsi untuk penempatan beberapa fasilitas tambang seperti pompa, *temporary sump*, instalasi listrik (*power pole*), pembuatan saluran untuk mengendalikan air permukaan (*surface water*) dan pipa *dewatering*. Desain pit mengatur sudut antar *ramp*, sudut *bench*, ketinggian *bench*, konfigurasi *bench*, dan lebar *catch bench* berdasarkan domain, *slope aspect*. Jarak antar *ramp* atau Inter-ramp mempunyai ketinggian 180-220m dengan slope $36^{\circ} - 47^{\circ}$, sudut lereng tunggal (BFA) $65^{\circ} - 70^{\circ}$. Kemudian lebar *catch bench* 10-15 m.

2.3.2 Struktur geologi

Struktur geologi yang berpengaruh terhadap kestabilan lereng antara lain sesar (*fault*), kekar (*joint*), lipatan (*fold*), rekahan (*crack*), dan bidang perlapisan (*bedding plane*). Sesar, kekar, dan rekahan umumnya dikenal sebagai bidang lemah. Untuk mengetahui karakteristik bidang lemah tersebut, perlu dilakukan pengukuran kemiringan (*dip*) dan arah (*dip direction*) dari bidang lemah tersebut. Keberadaan bidang lemah dapat mengurangi kekuatan massa batuan dan dapat pula berfungsi sebagai jalur rembesan air yang dapat mengakibatkan terjadinya rekahan tarik (*tensile crack*) pada massa batuan dimana hal tersebut dapat mengurangi faktor keamanan dari lereng.

2.3.3 Kondisi air tanah

Tekanan air yang bekerja pada bidang diskontinuitas batuan dapat mengurangi kuat geser pada batuan, sedangkan tekanan air pada rekahan batuan (*tension crack*) dapat mengurangi kestabilan karena menambah beban yang mengakibatkan tergelincirnya batuan. Selain itu, keberadaan air pada lereng tambang dapat memicu terjadinya pelapukan, sehingga mengubah beberapa batuan, seperti lanau.

2.3.4 Sifat fisik dan mekanik batuan

Dalam Read dan Stacey (2009), sifat fisik (disebut juga *index properties*) dan sifat mekanik adalah sifat keteknikan batuan yang akan menentukan kekuatan massa batuan. Sifat fisik batuan adalah sifat asli batuan yang disebabkan oleh proses pembentukannya. Meskipun sifat fisik ini tidak mendefinisikan perilaku mekanika

batuan, namun jika sifat fisik batuan diketahui akan memudahkan deskripsi kualitatif pada batuan tersebut. Dan pada beberapa kasus, sifat fisik juga dapat berhubungan dengan sifat mekanik, seperti kenaikan porositas dapat menurunkan kekuatan batuan. Pada lereng tambang terbuka, sifat fisik batuan yang paling sering digunakan adalah berat isi dan porositas batuan. Sedangkan sifat mekanik batuan adalah sifat batuan yang secara kuantitatif dapat mendeskripsikan kekuatan dan deformabilitas batuan. Sifat mekanik batuan terdiri dari kuat tekan, kuat tarik, kuat geser (kohesi dan sudut geser dalam), modulus elastisitas, dan nisbah poisson.

2.3.5 Getaran pada tubuh lereng

Getaran pada tubuh lereng yang mempengaruhi kestabilan lereng, diantaranya getaran gempa bumi, pengoperasian kendaraan besar dan alat berat, aktivitas penggalian lereng ataupun getaran akibat peledakan pada penambangan (*blasting*). Semakin besar getaran yang mengenai suatu lereng, maka semakin mengurangi tingkat kestabilan lereng tersebut.

2.4 Klasifikasi Massa Batuan

Bieniawski (1989) melakukan pengklasifikasian massa batuan yang disebut dengan *rock mass rating* (RMR) berdasarkan pada 6 parameter, diantaranya :

- Strength of Intact Rock Material* (biasanya dinyatakan dengan *Uniaxial Compressive Strength* atau UCS), menunjukkan kekuatan batuan utuh dalam menerima tekanan yang bekerja padanya.
- Rock Quality Designation* (RQD), menunjukkan kualitas massa batuan berdasarkan parameter bidang diskontinuitas pada batuan, seperti *fault*, *joint*, dan lain-lain. Untuk menghitung nilai RQD dapat menggunakan persamaan 2.2.

$$\text{RQD (\%)} = \frac{\text{panjang core} > 10 \text{ cm}}{\text{total panjang core}} \times 100\% \quad (2.2)$$

- Spacing of discontinuities*, merupakan jarak terdekat antara 2 bidang lemah (bidang diskontinuitas) yang berdekatan.
- Condition of discontinuities*, menunjukkan kondisi bidang lemah meliputi tingkat kekasaran permukaannya (*roughness*), tingkat kemenerusan bidang lemah (*continuity length*), ukuran bukaan (*aperture*) atau biasanya dinyatakan dengan lebar

- material pengisi (*fill width*), material pengisi (*infilling strength*) dan tingkat pelapukan (*weathering*).
- e. *Groundwater*, menunjukkan kondisi air tanah apakah kering, lembab, dan ada atau tidaknya aliran air.
 - f. *Orientation of discontinuities*, menunjukkan jumlah variasi orientasi bidang lemah.

Pada masing-masing parameter tersebut dilakukan pembobotan (ditunjukkan oleh Tabel 2.1). Jumlah dari pembobotan yang dilakukan tersebut adalah nilai RMR (Tabel 2.2).



Tabel 2. 1 Klasifikasi parameter RMR (Bieniawski, 1989)

No	Parameter		Rentang Nilai						
	1	Kekuatan batuan utuh	<i>Point load strength index</i>	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Untuk range yang rendah – disarankan uji kuat tekan uniaksial	
Kuat tekan uniaksial			>250 MPa	100 – 250 Mpa	50 – 100 Mpa	25 – 50 Mpa	5 – 25 Mpa	1 – 5 Mpa	<1 Mpa
<i>Rating</i>		15	12	7	4	2	1	0	
2	<i>Drill Core Quality</i>		90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50 %	<25%		
	<i>Rating</i>		20	17	13	8	3		
3	Spasi Diskontinuitas		>2m	0,6 – 2 m	200 – 600 mm	60 – 200 mm	< 60 mm		
	<i>Rating</i>		20	15	10	8	5		
4	Kondisi Diskontinuitas		Permukaan sangat kasar, tidak ada separasi, tidak terlapukkan	Permukaan kasar, separasi <1mm, <i>slightly weathered</i>	Permukaan kasar, separasi <1mm, <i>highly weathered</i>	Permukaan <i>Slickensided</i> , tebal material pengisi (<i>gouge</i>) < 5 mm, separasi 1-5 mm	<i>Soft gouge</i> >5mm, separasi >5mm		
	<i>Rating</i>		30	25	20	10	0		
5	<i>Ground water</i>	<i>Inflow per 10 m tunnel length (l/m)</i>	Tidak ada	<10	10 – 25	25 – 125	>125		
		<i>(Joint water)</i>	0	<0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	>0,5		

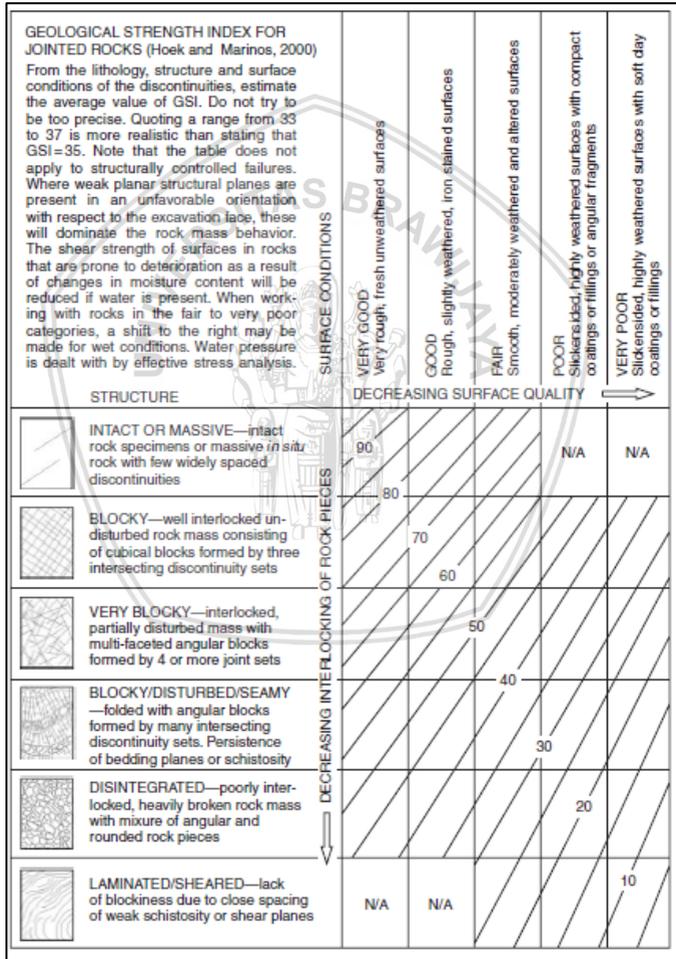
	<i>press)/(maj or principal σ)</i>						
	Kondisi umum	<i>Dry</i>	<i>Damp</i>	<i>Wet</i>	<i>Dripping</i>	<i>Flowing</i>	
Rating		15	10	7	4	0	

Tabel 2. 2 Kelas massa batuan (Bieniawski, 1989)

Kelas No.	RMR	Deskripsi
I	100 – 81	<i>Very good</i>
II	80 – 61	<i>Good</i>
III	60 – 41	<i>Fair</i>
IV	40 – 21	<i>Poor</i>
V	< 20	<i>Very poor</i>

2.5 Geological Strength Index

Salah satu klasifikasi massa batuan yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi massa batuan adalah *Geological strength index*. Klasifikasi ini dilakukan menyesuaikan dengan kenampakan asli di lapangan berdasarkan parameter struktur dan kondisi permukaan massa batuan. Jika permukaannya semakin kasar permukaannya dan struktur geologi yang ada semakin sedikit maka akan menunjukkan nilai GSI yang semakin tinggi. Klasifikasi GSI ditunjukkan oleh Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2. 6 Parameter GSI (Hoek & Brown, 1997 dalam Read & Stacey, 2009)

2.6 Berat Isi (*Unit Weight*)

Sifat fisik batuan yang digunakan dalam penelitian ini adalah berat isi. Berat isi merupakan perbandingan antara berat total material (W_T) dengan volume total material (V_T), dapat ditulis dengan persamaan 2.3 sebagai berikut :

$$\gamma = \frac{W_T}{V_T} \tag{2.3}$$

Berat isi tergantung pada berat material (batuan dan tanah) dan juga material non solid (bisa berupa air dan gas) yang mengisi rongga. Nilai berat isi dari berbagai jenis batuan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Nilai berat isi (γ) dari beberapa tipe batuan (Read dan Stacey, 2009)

Tipe Batuan	γ (kN/m³)	Tipe Batuan	γ (kN/m³)
<i>Amphibolite</i>	27,0 – 30,9	<i>Dolomite</i>	26,0 – 27,5
<i>Andesite</i>	21,6 – 27,5	<i>Limestone</i>	23,1 – 27,0
<i>Basalt</i>	21,6 – 27,4	<i>Marble</i>	24,5 – 28,0
<i>Chalk</i>	21,6 – 24,5	<i>Norite</i>	26,5 – 29,4
<i>Diabase</i>	27,5 – 30,4	<i>Peridotite</i>	30,9 – 32,4
<i>Diorite</i>	26,5 – 28,9	<i>Quartzite</i>	25,5 – 26,5
<i>Gabbro</i>	26,5 – 30,4	<i>Rock Salt</i>	20,6 – 21,6
<i>Gneiss</i>	25,5 – 30,9	<i>Rhyolite</i>	23,1 – 26,0
<i>Granite</i>	24,5 – 27,4	<i>Sandstone</i>	18,6 – 26,5
<i>Granodiorite</i>	26,0 – 27,5	<i>Shale</i>	19,6 – 26,0
<i>Greywacke</i>	26,0 – 26,5	<i>Schist</i>	25,5 – 29,9
<i>Gypsum</i>	22,1 – 23,1	<i>Slate</i>	26,5 – 28,0

Source: Data Selected from Krynine & Judd (1957), Lama & Vutukuri (1978), Jumikis (1983), Carmichael (1989), dan Goodman (1989)

Arif (2016) menjelaskan nilai sifat fisik batuan dapat diketahui dengan melakukan pengujian laboratorium pada sampel batuan yang diperoleh dari lapangan. Hasil uji sifat fisik digunakan sebagai data pendukung dari batuan yang diuji. Jika hasilnya menunjukkan ketidakseragaman, maka diindikasikan kekuatan batuan yang tidak merata (batuan yang diuji tersebut sangat bervariasi atau heterogen). Berikut adalah prosedur yang umumnya dilakukan untuk menguji sifat fisik batuan di laboratorium (Arif, 2016):

1. Menimbang sampel batuan yang belum diberi perlakuan apapun, sehingga diperoleh berat sampel asli (W_n).



2. Sampel batuan dijenuhkan di dalam desikator selama 24 jam, setelah itu dikeluarkan kemudian ditimbang sehingga diperoleh berat sampel jenuh (W_w).
3. Sampel batuan yang sudah jenuh tersebut digantung dalam air, kemudian ditimbang dan diperoleh berat jenuh tergantung dalam air (W_s).
4. Sampel batuan jenuh kemudian dikeringkan di dalam oven selama 24 jam pada suhu sekitar 90°C , kemudian ditimbang sehingga diperoleh berat sampel kering (W_o).

Selanjutnya volume sampel batuan dapat ditentukan dengan pendekatan Persamaan 2.4 dan 2.5 (Arif, 2016):

$$\text{Volume batuan keseluruhan } (V_{total}) \approx W_w - W_s \quad (2.4)$$

$$\text{Volume batuan tanpa pori-pori } (V_{tanpa\ pori}) \approx W_o - W_s \quad (2.5)$$

Sehingga sifat fisik batuan tersebut dapat dihitung dengan persamaan-persamaan berikut (Arif, 2016):

Berat isi asli (γ_{nat}) (2.6) $\gamma_{nat} = \frac{W_n}{V_{total}}$	Kadar air asli (w_{nat}) (2.11) $w_{nat} = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100\%$
Berat isi kering (γ_{dry}) (2.7) $\gamma_{dry} = \frac{W_o}{V_{total}}$	Kadar air jenuh (w_{sat}) (2.12) $w_{sat} = \frac{W_w - W_o}{W_o} \times 100\%$
Berat isi jenuh (γ_{sat}) (2.8) $\gamma_{sat} = \frac{W_w}{V_{total}}$	Derajat kejenuhan (S_r) (2.13) $S_r = \frac{W_n - W_o}{W_w - W_o} \times 100\%$
Berat jenis semu (2.9) $= \frac{\left[\frac{W_o}{V_{total}} \right]}{\text{berat isi air}}$	Porositas (n) (2.14) $n = \frac{V_{pori}}{V_{total}} \approx \frac{W_w - W_o}{W_w - W_s} \times 100\%$
Berat jenis sejati (2.10) $= \frac{\left[\frac{W_o}{V_{tanpa\ pori}} \right]}{\text{berat isi air}}$	Void ratio (e) (2.15) $e = \frac{n}{1-n}$

2.7 Kuat Tekan Uniaksial (*Uniaxial Compressive Strength*)

Menurut Read dan Stacey (2009), parameter yang paling sering digunakan dalam keteknikan batuan (*rock engineering*) adalah kuat tekan uniaksial. Untuk mengetahui nilai kuat tekan batuan dapat dilakukan dengan melakukan pengujian di laboratorium. Uji kuat tekan dilakukan dengan menggunakan mesin tekan (*compression*



machine) yang dilengkapi dengan *dial gauge* untuk mengetahui nilai regangan yang dihasilkan.

Menurut Read dan Stacey (2009), beberapa prosedur penting yang perlu diperhatikan dalam proses uji tekan, diantaranya:

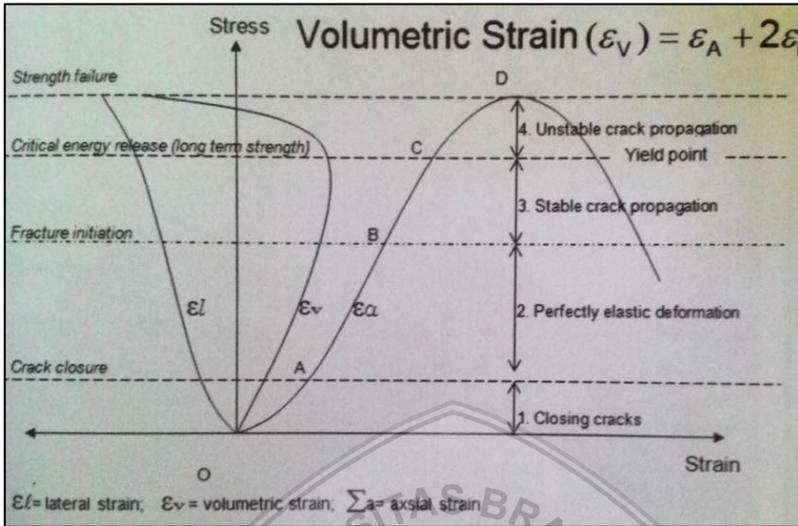
1. Sampel merupakan hasil pemboran *coring (drill core)* berbentuk silinder dengan diameter sekitar 51 mm (umumnya 50-70 mm). Perbandingan tinggi (L) terhadap diameter sampel (D) adalah 2,5-3,0. Namun, syarat pengujian yang biasanya dilakukan adalah tinggi sama dengan dua kali diameter ($L=2D$). Diameter sampel minimal 10 kali ukuran butir terbesar dari sampel batuan tersebut.
2. Ujung atau permukaan sampel batuan baik bagian bawah maupun atas harus rata dan halus, dengan nilai toleransi untuk ketidakrataan permukaan sampel batuan tidak lebih dari 0,02 mm.
3. Kedua permukaan sampel diletakkan pada posisi tegak lurus terhadap sumbu axis sampel batuan, atau tidak melenceng lebih dari 0,001 radian atau 0,05mm dalam 50mm agar nilai kuat tekan yang dihasilkan lebih valid.
4. Proses perataan dan penghalusan permukaan sampel batuan dilakukan menggunakan operasi mesin (*polishing machine*), tidak diijinkan melakukan perlakuan permukaan pada sampel atau pun penggunaan bahan capping guna mengurangi ketidakrataan pada permukaan sampel.
5. Sampel batuan sebaiknya disimpan tidak lebih dari 30 hari, agar kadar air alami (kelembaban pada sampel batuan) tidak rusak atau hilang selama proses transportasi dan penyimpanan.
6. Beban uniaksial yang diterapkan pada sampel batuan sebaiknya memiliki tingkat tegangan konstan (*constant stress rate*) sebesar 0,5 - 1,0 Mpa/sec.
7. Harus ada setidaknya lima replikasi dari setiap tes sampel batuan, agar nilai yang didapat lebih valid.

Contoh alat yang digunakan untuk menentukan nilai kuat tekan batuan ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Alat mesin tekan (Laboratorium Geomekanika FIKTM-ITB, 2013)

Pada setiap sampel batuan yang diuji diperoleh kurva tegangan-regangan yang digunakan untuk menentukan nilai kuat tekan, modulus elastisitas, dan nisbah poisson. Kurva tegangan-regangan pada uji kuat tekan uniaksial (UCS) ditunjukkan oleh Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Kurva tegangan-regangan pada uji kuat tekan uniaksial batuan (Hoek dan Brown, 1980 dalam Arif, 2016)

Berdasarkan kurva di atas, dapat diketahui karakteristik atau perilaku batuan yang dilakukan uji kuat tekan. Pada tahap awal dikenakan gaya kurva berbentuk landai dan tidak linier yang berarti bahwa gaya yang diterima oleh batuan digunakan untuk menutup rekahan awal (*closing cracks*) yang terdapat dalam batuan. Setelah itu, kurva menjadi linier sampai batas tegangan tertentu yang dikenal sebagai batas elastis, lalu terbentuk rekahan baru dengan perambatan stabil sehingga kurva tetap linier. Setelah batas elastis dilewati maka perambatan rekahan menjadi tidak stabil, kurva tidak linier lagi dan kemudian batuan menjadi hancur. Titik puncak saat batuan hancur inilah menyatakan kekuatan batuan (kuat tekan).

Secara umum, kuat tekan uniaksial adalah perbandingan beban yang diberikan pada sampel batuan terhadap luas permukaan yang menerima beban.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi D^2} \tag{2.16}$$

2.8 Kriteria Keruntuhan Generalized Hoek-Brown

Hubungan antara tegangan principal efektif saat suatu batuan runtuh diberikan oleh kuat tekan uniaksial batuan utuh (σ_{ci}) dan nilai

konstanta Hoek-Brown untuk batuan utuh (m). Kriteria keruntuhan Hoek-Brown digambarkan oleh persamaan berikut:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.17)$$

Keterangan:

σ'_1 adalah tegangan efektif maksimum saat batuan runtuh (MPa)

σ'_3 adalah tegangan efektif minimum saat batuan runtuh (MPa)

m_i adalah konstanta Hoek-Brown untuk massa batuan

s dan a adalah konstanta yang tergantung pada karakteristik massa batuan

σ_{ci} adalah kuat tekan uniaksial batuan utuh (UCS), dengan nilai $s = 1$ dan $a = 0,5$ untuk batuan utuh.

Hoek-Brown (1980) menggunakan kriteria $0 < \sigma'_3 < 0,5\sigma_{ci}$ dengan menggunakan lima titik data yang perlu dimasukkan dalam analisis. Kemudian persamaan 2.17 dikembangkan menjadi kriteria keruntuhan the Generalized Hoek-Brown sebagai berikut.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.18)$$

Dimana m_b adalah pengurangan nilai konstanta material untuk batuan utuh dengan persamaan 2.19.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2.19)$$

Nilai konstanta batuan utuh (m_i) pada beberapa batuan beku ditunjukkan oleh Tabel 2.4

Tabel 2. 4 Nilai konstanta m_i batuan beku (Wyllie dan Mah, 2004)

Jenis Batuan Beku	Nama Batuan	Nilai m_i
Plutonik	Diorit	25 ± 5
	Granodiorit	29 ± 3
	Gabbro	27 ± 3
	Granit	32 ± 3
Hipabisal	Porfirit	20 ± 5
	Diabas	15 ± 5
	Peridotit	25 ± 5
Vulkanik	Riolit	25 ± 5
	Andesit	25 ± 5
	Dasit	25 ± 3
	Basalt	25 ± 5
	Breksia	19 ± 5

Nilai GSI (*Geological Strength Index*) ditunjukkan oleh parameter konstanta massa batuan berupa m dan s . Semakin keras suatu batuan, maka konstanta m dan s akan semakin besar, sehingga nilai GSI nya juga akan semakin besar.

Nilai s dan a adalah konstanta massa batuan dengan persamaan 2.20 dan 2.21.

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \tag{2.20}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \tag{2.21}$$

Kuat tekan uniaksial dari massa batuan dapat dihitung dengan penyesuaian $\sigma'_3 = 0$ dengan persamaan 2.22.

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \tag{2.22}$$

Kuat tarik dengan persamaan 2.23.

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \tag{2.23}$$

Pada persamaan Hoek-Brown dimodifikasi dengan melakukan penambahan *factor disturbance* (D) untuk mengetahui pengaruh peledakan (*blasting*). Nilai D bervariasi mulai dari 0 sampai 1. Nilai 0 untuk gangguan yang sangat kecil sehingga tidak mempengaruhi kondisi massa batuan di dinding lereng dan 1 jika gangguan sangat mempengaruhi dinding lereng.

Tabel 2. 5 Pedoman penentuan nilai *Faktor Disturbance* (D) pada lereng tambang terbuka (Wyllie dan Mah, 2004)

Deskripsi Massa Batuan	Kenampakan dan Nilai D
Peledakan (<i>blasting</i>) berskala kecil pada lereng teknik sipil menghasilkan kerusakan massa batuan yang tidak terlalu parah (sederhana), terutama jika peledakan terkontrol dengan baik. Bagaimanapun, tekanan yang besar akan menghasilkan beberapa gangguan.	 <p> $D = 0,7$ <i>Good Blasting</i> $D = 1,0$ <i>Poor Blasting</i> </p>

Pada lereng tambang terbuka yang sangat besar akan mengalami gangguan yang signifikan akibat peledakan dan gaya atau tekanan yang menyebabkan pergerakan batuan penutup (overburden). Pada beberapa batuan yang lebih lunak, kegiatan penggalian yang dilakukan dengan *ripping* dan *dozing*, tingkat kerusakan lereng berkurang.



D=1 Production blasting
D=0,7 Mechanical Excavation

Tegangan normal dan tegangan geser berdasarkan tegangan-regangan principal dinyatakan dalam persamaan 2.24 dan 2.25 (Balmer, 1952 dalam Wyllie dan Mah, 2004).

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \left(\frac{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} - 1}{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} + 1} \right) \quad (2.24)$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3}}}{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} + 1} \quad (2.25)$$

Dimana

$$\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} = 1 + am_b(m_b\sigma'_{3n}/\sigma_{ci} + s)^{a-1}$$

Setelah diperoleh nilai tegangan normal dan tegangan geser, maka nilai kohesi dan sudut geser dalam dari massa batuan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Hoek dan Brown (2002) 2.26 dan 2.27 sebagai berikut:

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (2.26)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}/((1+a)(2+a)))}} \quad (2.27)$$

Dimana

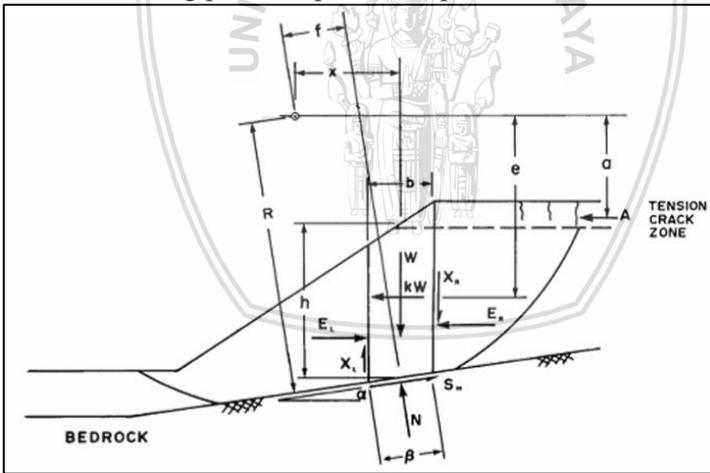
$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}}$$



berdasarkan pengamatan secara empiris, keruntuhan pada batuan dengan perilaku brittle terjadi pada saat nilai $\sigma_3 < 0,25 \sigma_c$ sehingga nilai σ_{3max} yang digunakan secara umum adalah $0,25\sigma_c$.

2.9 Metode *General Limit Equilibrium/Morgenstern Price*

Arif (2016) menjelaskan bahwa metode *Limit Equilibrium* (Kesetimbangan Batas) adalah metode yang sangat populer digunakan untuk menganalisa kestabilan lereng. Metode ini dapat digunakan untuk tipe longoran translasional dan rotasional. Pada metode ini dilakukan analisis dengan mempertimbangkan kondisi kesetimbangan statis, namun mengabaikan adanya hubungan tegangan-regangan pada lereng. Geometri dan posisi dari bidang runtuh tidak diketahui sehingga harus diasumsikan terlebih dahulu. Untuk menyederhanakan perhitungan, bidang runtuh biasanya dianggap berupa sebuah busur lingkaran, gabungan busur lingkaran dengan garis lurus, atau gabungan dari beberapa garis lurus. Sketsa model lereng untuk bidang runtuh yang berupa sebuah busur lingkaran dan bidang planar dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 2. 9 Model lereng dengan bidang longsor yang merupakan gabungan dari sebuah busur lingkaran dengan bidang planar (Krahn, 2004 dalam Arif, 2016)

Keterangan

W	Berat total irisan
N	Gaya normal total pada dasar irisan.
Sm	Gaya geser pada dasar setiap bidang irisan

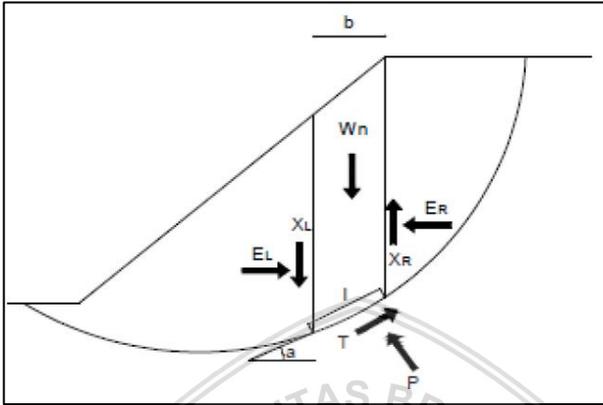
E	Gaya normal yang bekerja di antara bidang irisan
X	Gaya geser yang bekerja di antara bidang irisan
kW	Gaya seismik horisontal yang bekerja pada pusat massa irisan
R	Jari-jari bidang gelincir
F	Jarak tegak lurus dari gaya normal N terhadap pusat momen.
X	Jarak horisontal dari pusat massa irisan terhadap pusat momen
E	Jarak vertikal dari pusat massa irisan terhadap pusat momen.
H	Tinggi rata-rata irisan
B	Lebar irisan
B	Panjang dasar irisan [$\beta = b \sec \alpha$]
A	Jarak vertikal dari gaya hidrostatik terhadap pusat momen.
A	Gaya hidrostatik pada retakan tarik
A	Sudut kemiringan dari garis singgung pada titik di tengah dasar irisan terhadap bidang horisontal. Sudut kemiringan bernilai positif apabila searah dengan kemiringan lereng, dan bernilai negatif apabila berlawanan arah dengan kemiringan lereng.

Setelah geometri dari bidang runtuh ditentukan, massa diatas bidang runtuh dibagi menjadi sejumlah irisan tertentu dengan arah gaya yang diasumsikan. Tujuannya untuk mempertimbangkan adanya variasi kekuatan geser dan tekanan air pori sepanjang bidang runtuh. selanjutnya menghitung data-data untuk setiap irisan. Dengan menggunakan data-data pada setiap irisan, besarnya faktor keamanan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kesetimbangan yakni membandingkan besar gaya penahan (kuat geser) dengan besar gaya pendorong (gaya geser) yang bekerja di sepanjang bidang gelincir.

Pada tahun 1965, Morgenstern dan Price mengembangkan metode kesetimbangan batas, yang selanjutnya disebut sebagai metode Morgenstern Price. Proses analisisnya merupakan hasil dari kesetimbangan setiap gaya-gaya normal dan momen yang bekerja pada setiap irisan dari bidang longsor. Pada metode ini dilakukan asumsi penyederhanaan untuk menunjukkan hubungan antara gaya geser di sekitar irisan (X) dan gaya normal di sekitar irisan (E) dengan persamaan:

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (2.28)$$

Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan bidang kelongsoran ditunjukkan oleh gambar berikut.



Gambar 2. 10 Gaya yang bekerja pada irisan kelongsoran metode Morgenstern Price (Takwin dkk, 2017)

Persamaan yang digunakan adalah:

$$P = \frac{[w_n - (x_R - x_L) - \frac{1}{F} (c' (\sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha)]}{\cos \alpha (l + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{E})} \quad (2.29)$$

Keterangan:

P adalah total gaya normal yang bekerja pada dasar bidang irisan

c' adalah kohesi efektif

w_n adalah gaya akibat beban lereng ke-n

α adalah sudut antara titik tengah bidang irisan dengan titik pusat busur bidang longsor

ϕ' adalah sudut geser batuan

u adalah tekanan air pori

x_R, x_L adalah gaya geser yang bekerja di bidang irisan

Dalam metode ini analisa faktor keamanan dilakukan dengan dua prinsip yaitu kesetimbangan gaya (F_f) dan kesetimbangan momen (F_m). Faktor keamanan dari prinsip kesetimbangan momen adalah untuk bidang kelongsoran sirkular adalah:

$$F_m = \frac{\sum [c'l + (P - ul) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.30)$$

Sedangkan faktor keamanan dengan prinsip kesetimbangan gaya dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$F_f = \frac{\sum [c'l + (P - ul) \tan \phi'] \cos \alpha}{\sum P \sin \alpha} \quad (2.31)$$

Pada proses iterasi pertama, gaya geser disekitar irisan (x_R dan x_L) diasumsikan nol. Kemudian pada iterasi selanjutnya gaya tersebut diperoleh dari persamaan sebagai berikut.

$$(E_R - E_L) = P \sin \alpha - \frac{1}{F} [c' + (P - ul) \tan \phi'] \cos \alpha \quad (2.32)$$

Kemudian gaya tersebut dihitung dengan mengasumsikan nilai λ dan $f(x)$. Dalam perhitungan ini digunakan bantuan program Slide untuk menghitung faktor keamanan lereng. Hal ini disebabkan oleh banyaknya perhitungan yang berulang pada sejumlah bidang gelincir, dan bidang gelincir yang memberikan nilai faktor keamanan terkecil dinamakan sebagai bidang gelincir kritis.

Metode kesetimbangan batas umum mengasumsikan bahwa sudut gaya antar-irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan, dan metode Morgenstern-Price mengasumsikan bahwa kemiringan gaya geser antar-irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan (Krahn, 2004 dalam Arif, 2016).

2.10 Uji Regresi Ganda

Statistika adalah suatu ilmu yang mempelajari tentang metode pengumpulan dan penyajian data yang didapatkan dari suatu penelitian kemudian data tersebut dianalisis dan diinterpretasi agar diperoleh suatu informasi.

Regresi artinya peramalan, penaksiran atau pendugaan pertama kali diperkenalkan pada tahun 1877 oleh Sir Francis Galton (1822-1911). Uji regresi merupakan pengujian statistika yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh suatu variabel terhadap variabel lain. Dalam analisis regresi, variabel yang mempengaruhi variabel lain disebut *Independent Variabel* (variabel bebas) biasanya dinyatakan dengan variabel X, sedangkan variabel yang dipengaruhi oleh variabel lain disebut *Dependent Variabel* (variabel terikat) yang biasanya dinyatakan dengan variabel Y. Jika variabel terikat dipengaruhi oleh satu variabel bebas, maka disebut regresi linier sederhana. Jika variabel terikat dipengaruhi oleh lebih dari satu variabel bebas, disebut sebagai regresi linier ganda.

2.10.1 Persamaan Regresi Linier Ganda

Secara umum, data hasil pengamatan Y dapat terjadi akibat adanya variabel-variabel bebas $X_1, X_2,$ dan seterusnya. Kemudian akan ditentukan hubungan antara Y dan X_1, X_2, \dots, X_k sehingga diperoleh regresi Y atas $X_1, X_2, \dots, X_n,$ dengan model regresi sebagai berikut.

$$\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k \tag{2.33}$$

dengan a, b_1, b_2, \dots, b_k adalah koefisien-koefisien yang harus ditentukan berdasarkan data hasil pengamatan.

Misalkan ada 2 variabel bebas dan 1 variabel terikat yang diuji regresi linier ganda, maka koefisien $a, b_1,$ dan b_2 dapat diselesaikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\sum Y_i = an + b_1\sum X_{1i} + b_2\sum X_{2i} \tag{2.34}$$

$$\sum Y_i X_{1i} = a \sum X_{1i} + b_1\sum X_{1i}^2 + b_2\sum X_{1i} X_{2i}$$

$$\sum Y_i X_{2i} = a \sum X_{2i} + b_1\sum X_{1i} X_{2i} + b_2\sum X_{2i}^2$$

Sistem persamaan dalam rumus di atas dapat disederhanakan, jika $x_1 = X_1 - \bar{X}_1; x_2 = X_2 - \bar{X}_2;$ dan $y = Y - \bar{Y}$ menjadi:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 \tag{2.35}$$

$$\sum y_i x_{1i} = b_1\sum x_{1i}^2 + b_2\sum x_{1i} x_{2i}$$

$$\sum y_i x_{2i} = b_1\sum x_{1i} x_{2i} + b_2\sum x_{2i}^2$$

Rumus yang digunakan untuk menentukan nilai konstanta a dan koefisien regresi b_1 dan b_2 adalah:

$$a = \frac{(\sum Y) - (b_1 \times \sum x_1) - (b_2 \times \sum x_2)}{n} \tag{2.36}$$

$$b_1 = \frac{[(\sum x_2^2 \times \sum x_1 y) - \sum x_2 y \times \sum x_1 x_2]}{[(\sum x_1^2 \times \sum x_2^2) - (\sum x_1 \times x_2)^2]} \tag{2.37}$$

$$b_2 = \frac{[(\sum x_1^2 \times \sum x_2 y) - \sum x_1 y \times \sum x_1 x_2]}{[(\sum x_1^2 \times \sum x_2^2) - (\sum x_1 \times x_2)^2]} \tag{2.38}$$

dimana

$$\sum x_1^2 = \sum X_1^2 - \frac{(\sum X_1)^2}{n}$$

$$\sum x_2^2 = \sum X_2^2 - \frac{(\sum X_2)^2}{n}$$

$$\sum y^2 = \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}$$

$$\begin{aligned} \sum x_1y &= \sum X_1Y - \frac{\sum X_1 \times \sum Y}{n} \\ \sum x_2y &= \sum X_2Y - \frac{\sum X_2 \times \sum Y}{n} \\ \sum x_1x_2 &= \sum X_1X_2 - \frac{\sum X_1 \times \sum X_2}{n} \end{aligned}$$

2.10.2 Koefisien Determinasi (r^2)

Koefisien determinasi digunakan untuk mengetahui persentase sumbangan pengaruh variabel bebas (X_1 dan X_2) terhadap variabel terikat (Y). Semakin besar nilai r^2 , maka semakin besar pengaruh variabel bebas tersebut terhadap variabel terikat. Nilai r^2 bisa diketahui dengan menggunakan persamaan 2.39 sebagai berikut.

$$r^2 = \frac{(b_1 \times \sum x_1y) + (b_2 \times \sum x_2y)}{\sum y^2} \quad (2.39)$$

2.10.3 Koefisien Korelasi Ganda (r)

Koefisien korelasi ganda digunakan untuk mengetahui seberapa besar hubungan atau korelasi yang terjadi antara variabel bebas (X_1 dan X_2) secara bersama-sama terhadap variabel terikat (Y). Nilai r berkisar antara $-1 \leq r \leq +1$, jika nilai r semakin mendekati -1 atau $+1$, maka semakin kuat hubungan antara variabel bebas tersebut dengan variabel terikat. Dimana tanda $(-)$ dan $(+)$ menunjukkan arah hubungan. Nilai r bisa diketahui dengan menggunakan persamaan 2.40 sebagai berikut.

$$r = \sqrt{r^2} = \sqrt{\frac{(b_1 \times \sum x_1y) + (b_2 \times \sum x_2y)}{\sum y^2}} \quad (2.40)$$

2.10.4 Uji Signifikansi F

Menurut Irianto (2004), uji F dilakukan untuk mengetahui apakah variabel bebas (X_1, X_2, \dots, X_k) secara simultan (bersama-sama) berpengaruh signifikan terhadap variabel terikat (Y). Selain itu juga digunakan untuk mengetahui apakah model regresi dapat digunakan untuk memprediksi variabel terikat atau tidak.

Untuk mengetahui nilai F perlu diketahui jumlah kuadrat-kuadrat regresi (*sum of square regression*) yang dapat diketahui melalui persamaan berikut:

$$JK_{\text{reg}} = b_1 \sum x_{1i}y_i + b_2 \sum x_{2i}y_i + \dots + a_k \sum x_{ki}y_{ki} \quad (2.41)$$



dengan derajat kebebasan (*degree of freedom*, df) = $df_1 = k$, dimana k adalah jumlah variabel bebas, dan df_1 sebagai df pembilang. sedangkan jumlah kuadrat-kuadrat residu (*sum of square residual*) dapat dihitung dari persamaan:

$$JK_{res} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \tag{2.42}$$

dengan \hat{Y}_i didapat dari persamaan (2.33) untuk nilai-nilai sampel X_1, X_2, \dots, X_k sedangkan derajat kebebasannya $df_2 = n - k - 1$ untuk sampel berjumlah n , df_2 sebagai df penyebut. sehingga F hitung yang diperoleh adalah:

$$F \text{ hitung} = \frac{\frac{JK_{reg}}{df_1}}{\frac{JK_{res}}{df_2}} \tag{2.43}$$

$$F \text{ hitung} = \frac{\frac{k}{JK_{res}}}{\frac{n - k - 1}{k}}$$

Atau dapat pula dinyatakan dengan persamaan 2.44 sebagai berikut:

$$F_{hitung} = \frac{\frac{R^2}{k}}{\frac{1 - R^2}{n - k - 1}} \tag{2.44}$$

Tahap-tahap uji F sebagai berikut.

1. Rumuskan hipotesa

$H_0 : \beta = \beta_0$ menunjukkan bahwa X_1 dan X_2 tidak berpengaruh signifikan terhadap Y

$H_a : \beta \neq \beta_0$ menunjukkan bahwa X_1 dan X_2 berpengaruh signifikan terhadap Y

Keterangan:

Hipotesis nol (H_0) adalah hipotesis yang dirumuskan sebagai suatu pernyataan yang akan diuji. H_0 tidak memiliki perbedaan dengan hipotesis sebenarnya (perbedaannya nol).

Hipotesis alternatif (H_a) adalah hipotesis yang dirumuskan sebagai lawan atau tandingan dari H_0 . Dalam menyusun H_a , timbul 3 keadaan berikut.

- a) H_a menyatakan bahwa harga parameter lebih besar dari pada harga yang dihipotesiskan. Pengujian itu disebut pengujian satu sisi (pengujian sisi kanan).



- b) H_a menyatakan bahwa harga parameter lebih kecil dari pada harga yang dihipotesiskan. Pengujian itu disebut pengujian sisi kiri.
- c) H_a menyatakan bahwa harga parameter tidak sama dengan harga yang dihipotesiskan. Pengujian itu disebut pengujian dua sisi atau dua arah, yaitu pengujian sisi kanan dan kiri sekaligus.

2. Menentukan taraf nyata (α)

Taraf nyata adalah besarnya batas toleransi dalam menerima kesalahan hasil hipotesis terhadap nilai parameter populasinya atau disebut sebagai batas maksimal kesalahan yang dijadikan patokan oleh peneliti. Ukuran standar yang biasanya digunakan dalam penelitian untuk taraf nyata yaitu 5% atau dapat ditulis $\alpha_{0,05}$ yang artinya peneliti mengambil resiko salah dalam mengambil keputusan untuk menolak hipotesis yang benar sebanyak-banyaknya 5% dan benar dalam mengambil keputusan sedikitnya 95% (tingkat kepercayaan).

3. Menentukan F hitung menggunakan persamaan (2.43)

4. Menentukan F tabel

F tabel dapat dilihat pada tabel distribusi F (dapat dilihat pada lampiran 4), dengan melihat nilai df_1 dan df_2 . Misalnya, sebuah penelitian memiliki 2 jumlah variabel bebas dan jumlah data penelitian sebesar 12, maka pada taraf nyata 0,05 diketahui nilai F tabelnya sebesar 3,86.

5. Menentukan nilai signifikansi (p-value)

Nilai signifikansi atau p-value adalah nilai kesalahan yang diperoleh peneliti dari hasil perhitungan statistik pada data penelitian, kemudian dibandingkan dengan nilai taraf nyata, apakah nilai signifikansi lebih besar dari $\alpha_{0,05}$ atau lebih kecil dari $\alpha_{0,05}$.

6. Kriteria pengujian

H_0 diterima jika F hitung lebih kecil dari F tabel atau jika signifikansinya lebih besar dari 0,05.

H_a diterima jika F hitung lebih besar dari F tabel atau jika signifikansinya lebih kecil dari 0,05.

Irianto (2004) juga menjelaskan bahwa meskipun persamaan regresi linier ganda telah terbukti signifikan (melalui uji F), namun perlu diketahui kontribusi masing-masing variabel bebas terhadap variabel

terikat dengan melakukan uji t. Uji t disebut juga uji parsial, yang dilakukan untuk mengetahui apakah variabel bebas (X_1, X_2, \dots) secara parsial (individu) berpengaruh signifikan terhadap variabel terikat (Y). Nilai t hitung dapat diperoleh dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$t_k = \frac{b_k}{s_{bk}} = \frac{b_k}{\sqrt{\frac{s_{y.123\dots k}}{(\sum x_k^2) - (1 - R_i^2)}}} \quad (2.45)$$

Keterangan

b_k adalah koefisien regresi ke-k

s_{bk} adalah simpangan baku koefisien b yang ke-k

x_k^2 diperoleh dari $(X_k - \bar{X}_k)^2$

R_i adalah korelasi antara X_k dengan variabel bebas lainnya.

Atau dapat pula dinyatakan dengan rumus sebagai berikut.

$$t \text{ hitung} = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2.46)$$

Tahap-tahap uji t dilakukan pada masing-masing variabel bebas, dengan prosedur yang sama dengan uji F.

1. Merumuskan hipotesa
2. Menentukan taraf nyata
3. Menentukan t hitung
4. Menentukan t tabel

t tabel dapat dilihat pada tabel distribusi t (dapat dilihat pada lampiran), dengan melihat nilai taraf nyata (α) dan derajat kebebasan ($dk = n - k - 1$).

5. Menentukan nilai signifikansi
6. Jika t hitung lebih besar dari t tabel atau jika signifikansinya lebih kecil dari 0,05, maka variabel bebas tersebut berpengaruh terhadap variabel terikat.

2.10.5 Uji Asumsi Klasik

Uji asumsi klasik adalah persyaratan statistik yang harus dipenuhi pada analisis regresi linier ganda yang berbasis *ordinary least square* (OLS). OLS merupakan metode estimasi fungsi regresi yang paling sering digunakan. Kriteria OLS adalah line of best fit, yakni jumlah kuadrat dari deviasi antara titik-titik pengamatan dengan garis regresi adalah minimum.

1. Uji Normalitas

Uji normalitas bertujuan untuk melihat apakah nilai residual masing-masing variabel penelitian berdistribusi normal atau tidak. Model regresi yang baik memiliki nilai residual yang terdistribusi normal. Uji normalitas dapat dilakukan dengan uji histogram, uji normal P-Plot, uji Chi Square, uji Kolmogorov Smirnov, dan Shapiro-Wilk.

Dalam penelitian ini, uji normalitas yang digunakan adalah uji Shapiro-Wilk, karena sampel penelitian yang berjumlah kurang dari 50 sampel. Banyak pakar yang menganjurkan untuk menggunakan metode Shapiro-Wilk pada sampel penelitian yang berjumlah kecil (sedikit), karena lebih efektif dan valid.

Rumus perhitungan metode Shapiro-Wilk:

$$T_3 = \frac{1}{D} \left[\sum_{i=1}^k a_1 (X_{n-i+1} - X_i) \right]^2 \tag{2.47}$$

dimana

$$D = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Keterangan

a_1 adalah koefisien test Shapiro-Wilk (Lampiran)

X_{n-i+1} adalah angka ke $n-i+1$ pada data

X_i adalah angka ke- i pada data

\bar{X} adalah rata-rata data

2. Uji Multikolinearitas

Uji Multikolinearitas bertujuan untuk mengetahui ada atau tidaknya korelasi antara variabel-variabel bebas dalam suatu model regresi, baik yang terjadi dalam bentuk hubungan linier sempurna maupun bentuk linier kurang sempurna. Model regresi yang baik adalah jika antar variabel bebas tidak memiliki korelasi, karena jika antar variabel bebasnya saling memiliki hubungan dapat menyebabkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat menjadi terganggu. Uji multikolinearitas dapat dilakukan dengan melihat nilai korelasi (R^2) antarvariabel bebas, atau



dengan melihat nilai *variance inflation factor* (VIF), dan *tolerance*.

Nilai *tolerance* dapat dihitung dengan rumus $1 - R^2$ untuk setiap variabel bebas. Jika nilai *tolerance* sangat kecil (lebih kecil dari 0,1), maka menandakan korelasi berganda satu variabel bebas sangat tinggi dengan variabel bebas lainnya (R^2 sangat tinggi) dan itu mengindikasikan multikolinearitas. Sedangkan nilai VIF merupakan invers dari nilai *tolerance*, dapat dicari dengan persamaan:

$$VIF = \frac{1}{tolerance} \quad (2.48)$$

Jika nilai VIF lebih besar dari 10, mengindikasikan terjadinya multikolinearitas dalam model regresi.

3. Uji Heteroskedastisitas

Uji heteroskedastisitas dilakukan untuk melihat apakah terdapat ketidaksamaan varians dari residual satu pengamatan ke pengamatan yang lain. Model regresi yang baik adalah jika variansi dari residual model regresi bernilai konstan atau variansi antar residual yang satu dengan residual yang lain bernilai tetap (tidak berbeda) atau disebut sebagai homoskedastisitas. Uji heteroskedastisitas dapat dilakukan dengan metode *scatter plot* dengan memplotkan nilai prediksi dengan nilai residualnya, dapat juga dilakukan dengan uji *glejser*, uji *park*, uji *white* dan uji *studentized Breusch Pagan*.

Untuk merasionalkan uji heteroskedastisitas, pertama kita catat bahwa asumsi homoskedastisitas dalam regresi OLS menyatakan

$$Var(\epsilon|x_1, x_2, \dots, x_k) = \sigma^2$$

atau bisa juga dinyatakan dengan Hipotesa nol

$$H_0: E(\epsilon|x_1, x_2, \dots, x_k) = \sigma^2$$

Berikut adalah Lagrange Multiplier (LM) menghasilkan uji statistic untuk uji Breusch-Pagan:

$$LM = \left(\frac{\partial l}{\partial \theta}\right)^T \left(-E \left[\frac{\partial^2 l}{\partial \theta \partial \theta'} \right]\right)^{-1} \left(\frac{\partial l}{\partial \theta}\right) \quad (2.49)$$

Dalam Jurnal ECON 370 dijelaskan prosedur uji heteroskedastisitas menggunakan uji Breusch-Pagan, sebagai berikut.

Langkah 1: Estimasi model regresi

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.50)$$

dan menghasilkan penduga residualnya ($\hat{\epsilon}^2$)

Langkah 2: Estimasi *auxiliary regression* (regresi tambahan)

$$\hat{\epsilon}^2 = \delta_0 + \delta_1 x_1 + \delta_2 x_2 + \dots + \delta_k x_k + e \quad (2.51)$$

Variabel bebas yang digunakan adalah variabel yang mungkin mempengaruhi varians residual. Kemudian F hitung tergantung pada ukuran kelayakan model dari regresi di atas, dengan nilai $R_{\hat{\epsilon}^2}^2$ (jumlah kuadrat-kuadrat regresi) lalu perhitungannya adalah:

$$F = \frac{\frac{R_{\hat{\epsilon}^2}^2}{k}}{\frac{1 - R_{\hat{\epsilon}^2}^2}{n - k - 1}} \quad (2.52)$$

Langkah 3: Hitung statistik LM dengan persamaan berikut.

$$LM = nR_{\hat{\epsilon}^2}^2 \quad (2.53)$$

dimana n adalah jumlah pengamatan dan p -value menggunakan distribusi X_k^2 (karena uji statistic LM terdistribusi secara asimtotik sebagai X_k^2), misalnya p -value lebih kecil dari 0,05 maka H_0 (homoskedastisitas) ditolak atau dengan kata lain model regresi mengalami heteroskedastisitas (ECON E70, 2018).

4. Uji Autokorelasi

Autokorelasi adalah terjadi korelasi antara variabel error dengan variabel error yang lain. Autokorelasi seringkali terjadi pada data *time series*, namun jarang terjadi pada data *cross section* (Widarjono, 2007). Model regresi yang baik adaah jika tidak terjadi autokorelasi. Untuk mengetahui ada tidaknya masalah autokorelasi dapat diketahui dengan uji Durbin Watson (DW) dengan persamaan sebagai berikut.

$$d = \frac{\sum_{t=2}^{t=n} (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^{t=n} (e_t)^2} \quad (2.54)$$

Keterangan:

e_t adalah residual data pada saat t

e_{t-1} adalah residual data pada saat t sebelumnya

Banyaknya observasi dalam pembilang pada rumus di atas dimulai dari $t = 2$, karena observasi pertama tidak dapat



dihitung dalam mendapatkan perbedaan antara e_t dengan e_{t-1} .

Kemudian Durbin-Watson berhasil menurunkan nilai kritis batas bawah (d_L) dan batas atas (d_U), sehingga jika nilai d hitung dari persamaan di atas terletak di luar nilai kritis ini, maka ada atau tidaknya autokorelasi baik positif atau negatif dapat diketahui. Cara mendeteksi autokorelasi pada model regresi dengan metode Durbin-Watson dapat dilihat pada Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2. 6 Uji Statistik Durbin-Watson (Widarjono, 2007)

Nilai Statistik Durbin-Watson	Hasil
$0 < d < d_L$	Ada autokorelasi positif
$d_L \leq d \leq d_U$	Daerah keragu-raguan, tidak ada keputusan
$d_U \leq d \leq 4 - d_U$	Tidak ada autokorelasi positif/negatif
$4 - d_U \leq d \leq 4 - d_L$	Daerah keragu-raguan, tidak ada keputusan
$4 - d_L \leq d \leq 4$	Ada autokorelasi negatif

2.10.6 Transformasi Logaritma Natural

Pada uji regresi ganda, jika data memiliki masalah seperti tidak memenuhi asumsi klasik, maka dapat dilakukan transformasi data. Tujuan utama dari transformasi data ini adalah untuk mengubah skala pengukuran data asli menjadi bentuk lain sehingga data dapat memenuhi asumsi-asumsi yang mendasari analisis ragam. Salah satunya dengan transformasi logaritma natural. Penggunaan model logaritma natural (\ln) yaitu untuk menyamakan satuan dan meminimalkan kemungkinan terjadinya heteroskedastisitas karena transformasi yang menempatkan skala untuk pengukuran variabel dan koefisien kemiringan β langsung dapat menunjukkan elastisitas variabel terikat (Y) terhadap variabel bebas (X) yaitu persentase perubahan dalam Y akibat adanya persentase perubahan dalam X (Gujarati, 2003). Jika X adalah data asli, maka X' adalah data hasil transformasi logaritma natural, dimana $X' = \ln X$. Bentuk umum dari model logaritma natural (\ln) adalah sebagai berikut.

$$\ln Y = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \varepsilon \quad (2.55)$$

Berikut adalah model regresi yang menggunakan transformasi logaritma:

$$1. \text{Model Linier-Log : } Y_i = \beta_0 + \beta \log X_i + \varepsilon_i \quad (2.56)$$

$$2. \text{Model Log-Linier : } \log Y_i = \beta_0 + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (2.57)$$

$$3. \text{Model Log-Log : } \log Y_i = \beta_0 + \beta \log X_i + \varepsilon_i \quad (2.58)$$

Logaritma yang dimaksud pada persamaan di atas adalah logaritma natural, yang dinyatakan dengan ${}^e \log x$ atau $\ln x$.

e adalah basis atau pokok dari logaritma tersebut, dimana:

$$e = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{x} \right)^x \quad (2.59)$$
$$e = 2,7182818284 \dots$$



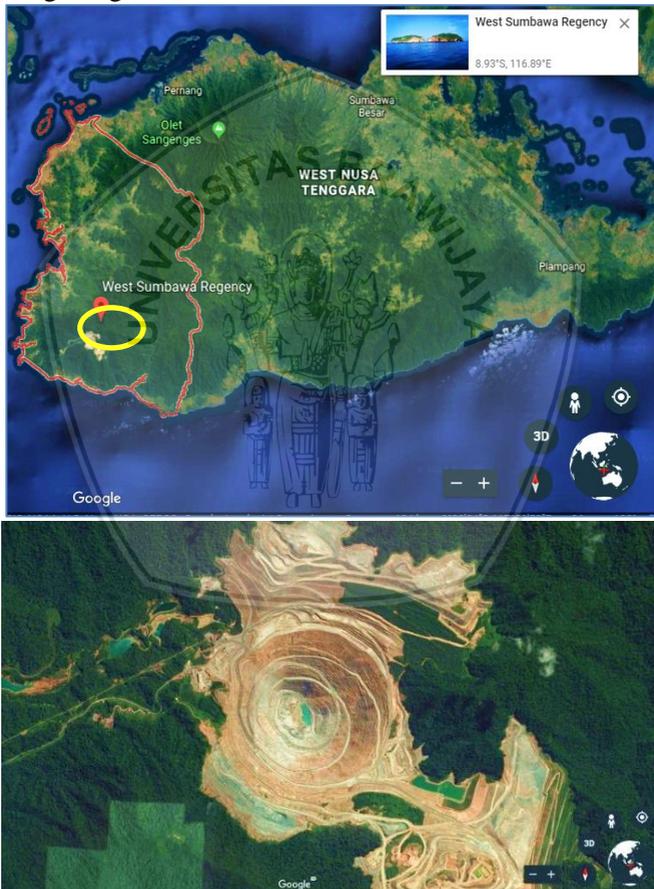


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Tambang Batu Hijau PT. Amman Mineral Nusa Tenggara (PT.AMNT), Sumbawa Barat, NTB yang terletak pada koordinat $08^{\circ} 57' 55''$ LS dan $116^{\circ} 52' 21''$ BT di bagian barat daya Pulau Sumbawa. Penelitian dilakukan dari tanggal 9 Agustus sampai dengan 8 Oktober 2017 di Departemen Geoteknik dan Hidrogeologi, *Mine Maintenance Area*, PT.AMNT.



Gambar 3.1 Lokasi penelitian; Peta Sumbawa Barat NTB (atas) dan Tambang Batu Hijau (bawah) (*Google Earth*)

3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengolah data properties batuan di Tambang Batu Hijau untuk mengetahui faktor keamanan lereng tambang di lokasi penelitian yang telah ditentukan. Secara umum, lokasi penelitian adalah Lereng Tambang Batu Hijau yang kemudian dibagi menjadi 3 lokasi sesuai dengan litologi yang ada di Batu Hijau, yaitu litologi vulkanik, diorit dan tonalit. Ketinggian lereng yang digunakan pada masing-masing litologi berdasarkan skala *inter-ramp* (lereng multi jenjang) yaitu berkisar antara 150 sampai 200 meter, dengan jumlah *bench* (lereng tunggal) berkisar antara 11 sampai 14 *bench*, dengan ketinggian *bench* ± 15 meter.

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Slide v.6.0* untuk mengetahui faktor keamanan lereng yang dihasilkan berdasarkan data masukan berupa properties batuan (berat isi dan kuat tekan batuan), pembobotan massa batuan (RMR), serta data pendukung lainnya. Selanjutnya dilakukan analisa statistika dengan menggunakan metode uji regresi ganda untuk mengetahui pengaruh properties batuan terhadap faktor keamanan lereng yang dihasilkan. Dari hasil uji regresi tersebut diperoleh model regresi yang kemudian diinterpretasi sehingga diketahui bagaimana hubungan dan seberapa besar pengaruh properties batuan tersebut terhadap faktor keamanan lereng.

3.3 Materi Penelitian

Materi penelitian yang digunakan mencakup data, peralatan yang digunakan dan *software* yang digunakan:

1. Data yang digunakan ialah berupa:
 - a. Data *crest* dan *toe* aktual (topografi penambangan), data litologi batuan, data RMR dan struktur geologi yang kemudian diolah sehingga menghasilkan peta penampang vertikal 2D daerah penelitian.
 - b. Data properties batuan, berupa data berat isi dan kuat tekan batuan yang merupakan hasil uji laboratorium pada beberapa sampel batuan masing-masing litologi batuan yang ada di Batu Hijau. Data ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari perusahaan.
 - c. Data properties material, yang terdiri dari berat isi (*Unit Weight*), kuat tekan (*Uniaxial Compressive Strength*), *Rock Mass Rating* atau *Geological Strength Index (GSI)*,

- konstanta batuan utuh (*Intack Rock Constant mi*) dan faktor gangguan (*Disturbance Factor*) yang kemudian diolah sehingga menghasilkan faktor keamanan lereng.
- d. Data berat isi, kuat tekan batuan dan faktor keamanan lereng merupakan data yang akan dilakukan uji regresi ganda sehingga menghasilkan model regresi linier yang diinterpretasi sebagai hasil penelitian.
2. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:
 - a. Laptop, untuk mengolah data penelitian serta menulis laporan hasil penelitian.
 - b. Printer, untuk mencetak laporan hasil penelitian sehingga menghasilkan naskah skripsi.
 3. Perangkat lunak (*software*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah:
 - a. *Minesight 3D*, digunakan untuk pemodelan lereng tambang serta untuk membuat *section* daerah penelitian.
 - b. *Autocad 2007*, digunakan untuk mengedit atau memotong *section* daerah penelitian yang telah dihasilkan oleh *software Minesight* sebelumnya.
 - c. *Slide v.6.0*, digunakan untuk melakukan analisa kestabilan lereng tambang (perhitungan faktor keamanan lereng).
 - d. *Microsoft Word 2010*, digunakan untuk menulis laporan hasil penelitian.
 - e. *Microsoft Excel 2010*, digunakan untuk menginput dan mengolah data penelitian.
 - f. *Software R*, digunakan untuk keperluan analisis statistika, yaitu uji regresi linier ganda.

3.4 Langkah Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan dijabarkan sebagai berikut:

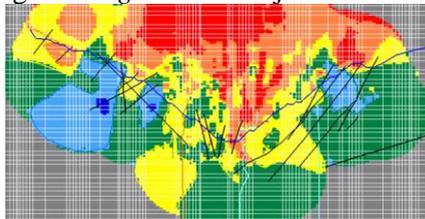
1. Studi pustaka, dilakukan dengan mencari referensi dan mengumpulkan materi atau informasi terkait permasalahan yang akan dikaji. Tinjauan pustaka dibuat dengan mengacu pada sumber berupa buku dan jurnal. Secara garis besar, materi yang digunakan sebagai pustaka, meliputi geologi Batu Hijau, prinsip dan faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng, sifat fisik dan mekanik batuan, metode analisa kestabilan lereng dan uji regresi linier ganda.

2. Survei lapangan, dilakukan untuk mengamati secara langsung kondisi lereng tambang yang ada di Tambang Batu Hijau, kemudian menentukan lokasi yang akan dijadikan sebagai daerah penelitian.
3. Pengambilan data dilakukan dengan cara mengambil data sekunder yang telah disediakan oleh PT. Amman Mineral Nusa Tenggara yang terkait dengan topik penelitian. Data sekunder tersebut kemudian diolah sehingga menghasilkan *output* berupa angka maupun gambar.
4. Pengolahan dan hasil analisis data, terdiri dari:
 - a. Pembuatan *section* dan pemodelan lereng daerah penelitian berdasarkan litologi batuan
 - b. Perhitungan FK pada masing-masing litologi batuan berdasarkan data *properties material* yang tersedia
 - c. Analisis pengaruh berat isi dan kuat tekan batuan terhadap FK dengan menggunakan metode statistika uji regresi ganda.
5. Kesimpulan dan saran
Menarik suatu kesimpulan dan memberikan saran atau rekomendasi terhadap permasalahan yang diteliti dari hasil pengolahan dan analisis data.

3.5 Pengolahan dan Pemodelan Data

Pengolahan data penelitian dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

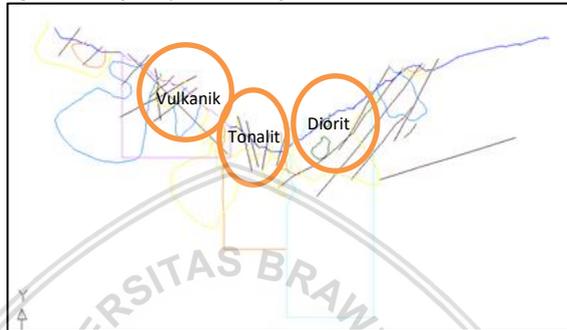
1. Pembuatan *section* daerah penelitian dengan menggunakan *software Minesight 3D*. Data yang digunakan untuk membuat *section* penelitian adalah data *crest* dan *toe actual* (topografi penambangan), data litologi batuan, data RMR dan data struktur geologi Batu Hijau. Hasil pembuatan *section* daerah penelitian dengan cara *grid set* ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Penampang vertikal 2D *section* daerah penelitian berdasarkan data RMR, batas litologi batuan, dan struktur *fault*

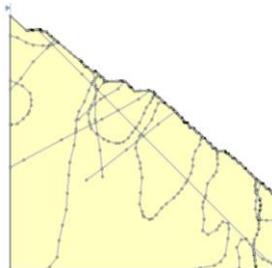
Selanjutnya *section* penelitian yang dihasilkan diekspor dengan format *.dxf* kemudian disimpan.

2. File *section* daerah penelitian dalam format *.dxf* kemudian dibuka di *Software Autocad 2007*, kemudian dipotong menjadi 3 bagian berdasarkan litologi batuan. Setelah selesai, kemudian file disimpan dengan format *.dxf* untuk masing-masing litologi batuan agar selanjutnya bisa dijalankan di *Slide v.6.0*.



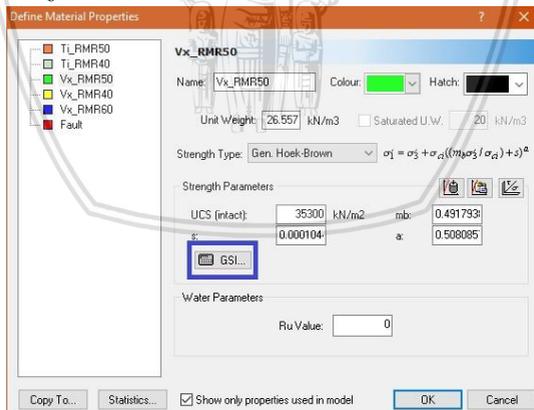
Gambar 3. 3 Tampilan *section* daerah penelitian di *Autocad*

3. Selanjutnya dilakukan pemodelan di *software Slide v.6.0* serta proses perhitungan kestabilan lereng dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Buka *software Slide v.6.0*
 - b. Buka file yang telah disimpan dalam format DXF, dengan cara klik *file – import – import DXF* –centang pada *external boundary* – pilih nama file yang ingin dimodelkan (dalam hal ini *section* litologi vulkanik). Lalu, dibuka file yang sama dengan mencentang pada *material boundary*. Maka akan muncul tampilan yang ditunjukkan oleh Gambar 3.4.



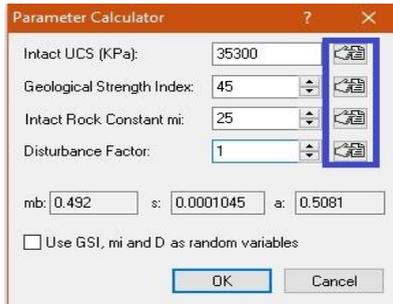
Gambar 3. 4 Tampilan *external* dan *material boundary* daerah penelitian

- c. Klik menu *analysis – project settings*, kemudian diatur sesuai dengan kondisi daerah penelitian dan metode yang ingin digunakan. Dalam pengolahan data ini diatur sebagai berikut.
 - *Failure direction* : *left to right* jika arah longsor dari kiri ke kanan (sesuai dengan pemodelan di atas).
 - *Methods* : *GLE/Morgenstern-price*
 - *Groundwater* : *Ru Coefficient*, dengan nilai *pore fluid unit weight* 9,8 kN/m³
- d. Klik menu *Surfaces – Surface Options*. Kemudian dipilih *surface type: non circular* dan *search method: path search* sesuai dengan kondisi daerah penelitian.
- e. Klik *properties – define materials* untuk mengisi material yang ada (ditunjukkan oleh Gambar 3.5), disesuaikan dengan penampang vertikal 2D *section* daerah penelitian (Gambar 3.2). Misalnya nama material Vx_RMR50, kemudian diisi nilai berat isi (*unit weight*), kuat tekan batuan (UCS) dan GSI. Sesuai dengan data yang tersedia tersebut, maka *strength type* (kriteria kekuatan massa batuan) yang digunakan adalah *Generalized Hoek-Brown*.



Gambar 3. 5 Tampilan kotak dialog *Define Material Properties*

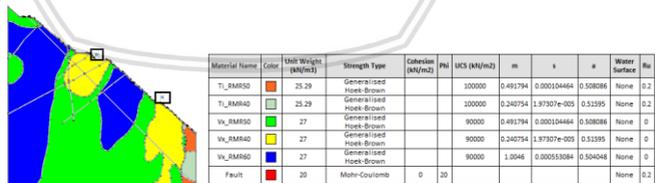
Untuk mengetahui nilai m_b , s dan a dilakukan dengan mengisi kolom GSI, yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Tampilan kotak dialog GSI

Jika RMR 50, maka nilai GSI sama dengan 45, kemudian *intact rock constant* m_i adalah 25 dan *disturbance factor* adalah 1. Panduan untuk mengetahui nilai UCS, GSI, m_i dan faktor D ini dapat diketahui dengan cara mengklik ikon yang dilingkarkan biru seperti gambar di atas, namun penentuan nilainya disesuaikan dengan hasil uji dan mendekati kondisi nyata di lapangan.

- f. *Material properties* massa batuan dibedakan dengan cara memberi warna yang berbeda, dilakukan dengan cara klik kanan pada daerah yang ingin diwarnai sesuai data *properties* yang diisi, pilih *assign properties*, dan klik *material properties* yang telah diisi, misalnya $V_x\text{-RMR}50$, sehingga menghasilkan tampilan seperti pada Gambar 3.7.

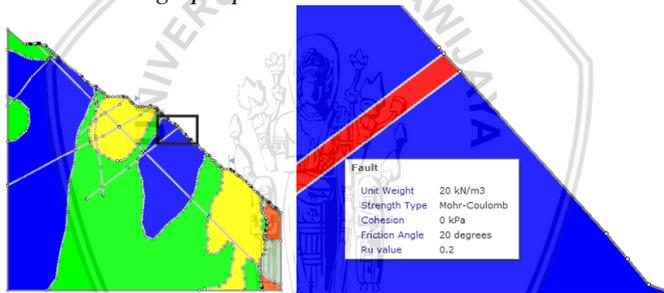


Gambar 3. 7 Hasil pemodelan lereng serta data *material properties*

Untuk menentukan batas lereng yang ingin diketahui nilai faktor keamanannya, maka dapat dilakukan dengan cara klik kanan pada *slope limit* (ditandai dengan kotak biru) – klik *move limit* – pindahkan ke batas yang

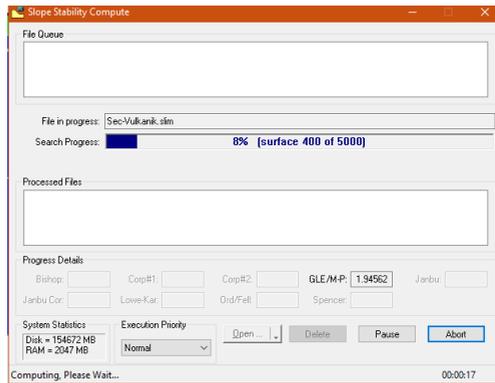
ditentukan (dalam hal ini menggunakan skala *inter-ramp*).

- g. Setelah *properties* batuan selesai diisi, selanjutnya isi *material fault* (sesar) yang ditunjukkan oleh garis yang memotong antar material dengan cara klik *measure* – klik pada ujung garis *fault*, lalu tarik dengan arah tegak lurus dari garis *fault*, hingga nilai $L=0,5$. Hal ini diasumsikan bahwa *fault* tersebut memiliki ketebalan 0,5 meter. Untuk membuat ketebalan *fault* dilakukan dengan klik kanan pada garis *fault*, klik *copy boundary*. Lalu, klik kiri ditarik hingga garis $L=0,5$. Ujung *fault* bagian yang masih terbuka, dapat ditutup dengan cara klik *boundaries - add material boundary*. Klik kiri pada ujung garis tarik sampai menutup. Klik *done* untuk selesai. Kemudian *material fault* dapat diwarnai dengan cara klik *assign properties*.



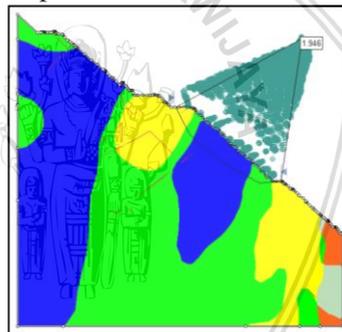
Gambar 3. 8 Pengisian *properties fault*

- h. Setelah menghasilkan pemodelan, klik *save* untuk menyimpan *file*.
- i. Klik *compute* untuk mulai menghitung kestabilan lereng, dengan tampilan proses *compute* ditunjukkan oleh Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Tampilan proses perhitungan FK

- j. Setelah proses menghitung selesai, klik *interpret* untuk menampilkan hasil perhitungan FK, sehingga muncul tampilan seperti pada Gambar 3.10



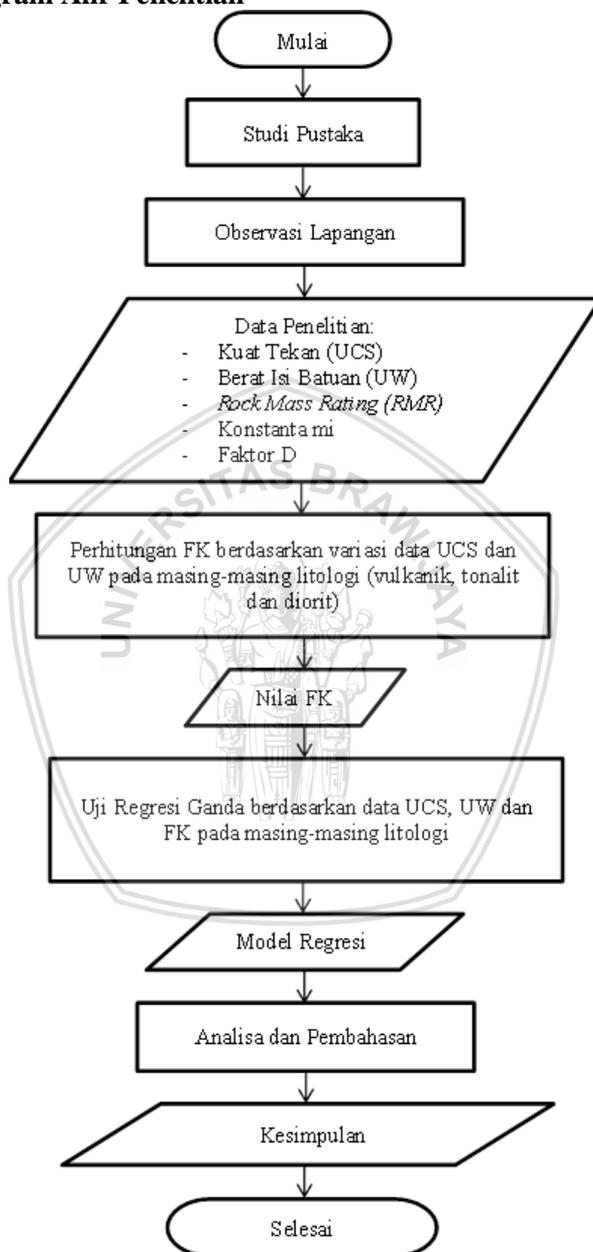
Gambar 3. 10 Tampilan hasil perhitungan FK

4. Tahap pengolahan data yang selanjutnya adalah uji regresi ganda, dengan menggunakan data berat isi dan kuat tekan sebagai variabel bebas dan data faktor keamanan lereng yang dihasilkan sebagai variabel terikat. Uji regresi linier ganda dilakukan dengan bantuan *software R*, dengan tahapan sebagai berikut.
- a. Cara memasukkan data ke *software R*.
 - 1) File data yang ada di *software Microsoft Excel* disimpan dalam format *.csv (comma delimited)*.
 - 2) Buka *software R*, kemudian tulis kode berikut:
Data1 <- read.csv(file.choose(), header=TRUE)
 pada jendela *console* dan tekan *enter*

- b. Uji asumsi klasik
- 1) Uji multikolinieritas dengan menggunakan perintah:
>**library(car)** lalu >**vif(model1)**
 - 2) Uji Normalitas menggunakan uji *Shapiro-Wilks* dapat menggunakan perintah:
>**library(stats)** lalu >**shapiro.test(residual1)**
 - 3) Uji autokorelasi dengan uji *Durbin-Watson* dapat menggunakan perintah:
>**library(lmtest)** lalu >**dwtest(model1)**
 - 4) Uji heterokedastisitas dengan menggunakan uji *Breusch Pagan* dengan perintah:
>**library(lmtest)** lalu >**bptest(model1, studentize=F)**.



3.6 Diagram Alir Penelitian



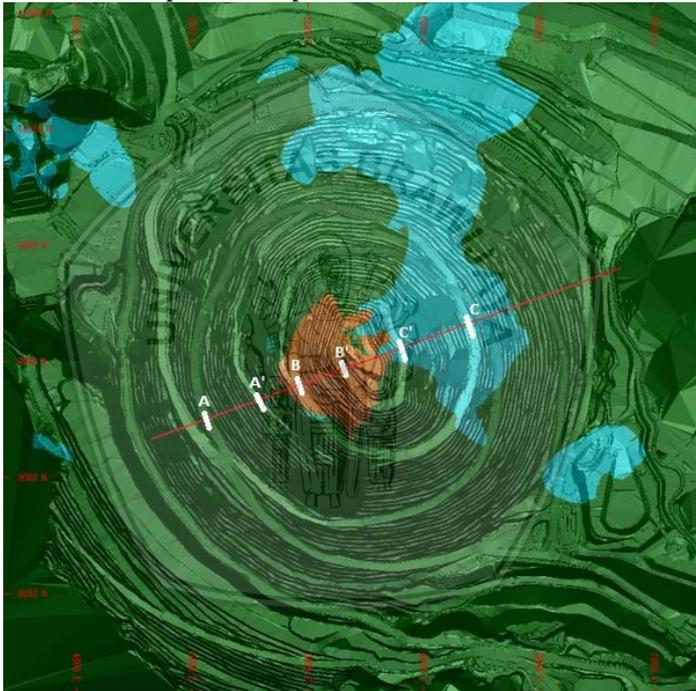
Gambar 3. 11 Diagram alir penelitian



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

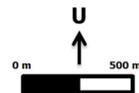
Secara umum, *section* daerah penelitian memiliki trend arah utara-timur dan selatan-barat dengan *azimuth* sebesar $N70^{\circ}$. *Section* dibagi menjadi 3 bagian, diantaranya: *Section A-A'* menggambarkan batuan vulkanik, *section B-B'* menggambarkan batuan tonalit dan *section C-C'* menggambarkan batuan diorit, dimana batas atas dan batas bawah ditentukan berdasarkan skala *inter-ramp* (multi jenjang). *Section* tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1 dibawah ini.



Legenda:

- Vulkanik
- Diorit
- Tonalit
- Section

PT. AMMAN MINERAL NUSA TENGGARA



Peta Litologi, September 2017
Departemen Geoteknik & Hidrogeologi - PT. AMNT

Gambar 4. 1 *Section* daerah penelitian berdasarkan *surface phase 6* elevasi -268.24 mRL (Anonim, 2017b)



Posisi titik *section* tiap litologi batuan daerah penelitian ditunjukkan oleh Tabel 4.1 di bawah ini.

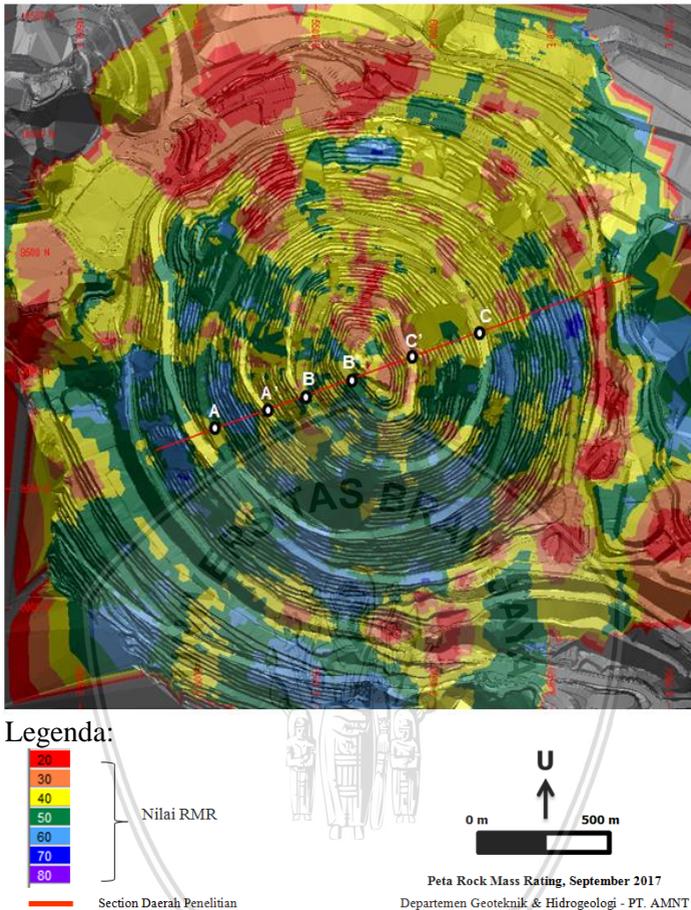
Tabel 4. 1 Posisi koordinat untuk *section* daerah penelitian

Batuan	Titik Section	Northing (N)	Easting (E)	Elevasi (z, mRL)	Slope Angle (degrees)
Vulkanik	A	8742.52	5048.78	183.16	42
	A'	8827.29	5279.06	5.23	
Tonalit	B	8885.9	5442.1	-120.63	43
	B'	8954.34	5635.25	-268.24	
Diorit	C	9167.06	6219.06	-2.94	38
	C'	9058.27	5919.04	-213.14	

4.1 Kondisi Massa Batuan Daerah Penelitian

Salah satu aspek penting dalam menganalisa kestabilan lereng adalah informasi mengenai kekuatan massa batuan yang digambarkan dengan pendekatan pembobotan massa batuan (*rock mass rating*, RMR). Massa batuan di lereng tambang terdiri dari batuan utuh dan struktur geologi yang saling berhubungan satu sama lain. Batuan utuh seperti batuan vulkanik, diorit dan tonalit yang ada di lereng tersebut dapat menjadi batuan diskontinu akibat dari keberadaan struktur geologi seperti sesar, kekar, dan struktur lainnya. Keberadaan struktur geologi yang berperan sebagai bidang diskontinu (bidang lemah) bagi lereng dapat menyebabkan penurunan nilai kekuatan massa batuan. Oleh karenanya, massa batuan cenderung memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan batuan utuh.

Tambang terbuka umumnya membuat model RMR lereng tambang untuk memudahkan dalam membuat profil kondisi lereng. Secara umum, kondisi massa batuan di Batu Hijau ditunjukkan oleh peta berikut.



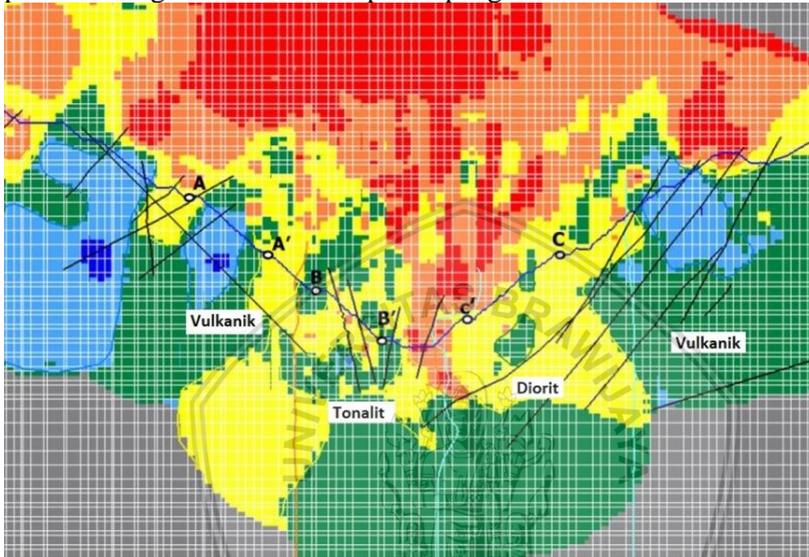
Gambar 4. 2 Kondisi massa batuan penyusun lereng Tambang Batu Hijau berdasarkan topografi penambangan September 2017 (Anonim, 2017a)

Berdasarkan gambar di atas, daerah dengan warna merah diinterpretasikan sebagai *poor rock mass* karena memiliki nilai RMR yang kecil, sedangkan daerah berwarna biru hingga ungu memiliki nilai RMR yang tinggi sehingga dapat disebut sebagai *good rock mass*.

Nilai RMR pada penampang diatas diperoleh dari analisis geomekanik yang telah dilakukan. Pada sampel *coring* hasil pengeboran yang diperoleh di lapangan dilakukan pengujian

laboratorium untuk mengetahui parameter fisik dan kekuatan batuan (*Unconfined Strength Rock*) dan *rock quality designation*, kemudian dilakukan identifikasi bidang diskontinuitas pada batuan, serta kondisi air tanah pada batuan (*sample coring*).

Untuk lebih jelasnya, kondisi massa batuan *section* daerah penelitian digambarkan dalam penampang massa batuan berikut.



Keterangan:

- Batas Batuan Diorit
- Batas Batuan Tonalit
- Struktur Fault
- Permukaan Tambang

Gambar 4. 3 Penampang kondisi RMR daerah penelitian berdasarkan *surface phase 6* elevasi -268.24 mRL

Berdasarkan gambar penampang diatas menunjukkan batas litologi batuan, nilai RMR serta keberadaan bidang diskontinuitas berupa struktur mayor (*fault*) yang ditandai oleh garis berwarna hitam. Pemberian batasan pada lereng (*slope limit*) dilakukan pada skala inter-ramp pada tiap-tiap litologi ditandai dengan titik A, A', B, B', C dan C'. Titik A-A' menunjukkan litologi vulkanik yang memiliki RMR 40, 50 dan dominan RMR 60, titik B-B' menunjukkan litologi tonalit dengan nilai RMR 40 dan 50 serta titik C-C' yang menunjukkan litologi diorit dengan nilai RMR 40 dan 50. Menurut Bieniaswki (1989), daerah penelitian dengan nilai RMR 40

Berdasarkan Tabel 4.2 di atas diketahui bahwa ada beberapa parameter yang diperhatikan dalam melakukan pembobotan massa batuan:

1. *Intact rock strength*, untuk mengetahui kekerasan/kekuatan batuan. Di lapangan, untuk mengetahui *rock strength* dapat dilakukan dengan menggunakan *hammer*, dengan ketentuan sebagai berikut.
R1, jika batuan bisa tergores dengan kuku/tangan.
R2, jika batuan tergores dengan menggunakan ujung *hammer*.
R3, jika batuan hancur dalam 1x pukulan *hammer*.
R4, jika batuan hancur dalam beberapa kali pukulan *hammer* (di atas 5)
R5, jika batuan hancur dalam beberapa kali pukulan *hammer* (di atas 10)
2. *Average fracture frequency* per meter, adalah jumlah rekahan (bidang lemah) yang ada dalam 1 meter.
3. *J roughness*, adalah tingkat kekasaran permukaan pada bidang lemah
4. *J continuity*, adalah tingkat kemenerusan bidang lemah dengan memprediksikan panjang bidang lemah
5. *Fill width* adalah ukuran bukaan atau lebar material pengisi pada bidang lemah
6. *Fill strength*, adalah tingkat kekuatan material pengisi pada bidang lemah
7. *Weathering*, adalah tingkat pelapukan (*weathering*) apakah terlapuk ringan, sedang, tinggi atau sudah mengalami dekomposisi.
8. *Groundwater*, adalah kondisi air tanah pada daerah penelitian, apakah kering, lembab, menetes atau mengalir.

Pada kedelapan parameter tersebut dilakukan pembobotan berupa angka untuk setiap hasil deskripsi parameter yang dilakukan di lapangan (semi-kualitatif), total dari pembobotan tersebut adalah nilai RMR, sedangkan nilai GSI diperoleh dari pengurangan 5 dari nilai RMR.

Meskipun nilai RMR telah diperoleh dari hasil uji laboratorium yang telah dilakukan, namun RMR mapping di lapangan tetap perlu dilakukan untuk memeriksa kembali apakah hasilnya tidak jauh berbeda dengan model RMR hasil uji

laboratorium, sehingga diharapkan kondisi massa batuan lereng tambang dapat dikontrol dengan lebih baik.

Berdasarkan hasil RMR *mapping* tersebut, dapat disimpulkan bahwa jika kekuatan batuan semakin besar, keberadaan bidang lemah semakin sedikit, semakin sedikit terjadi pelapukan dan semakin kering kondisi air, maka massa batumannya akan semakin baik (nilai RMR semakin tinggi). Begitu pula sebaliknya.

4.2 Faktor Keamanan Lereng di Daerah Penelitian

Sesuai dengan data properties material yang ada, maka dilakukan analisis kestabilan lereng dengan menggunakan kriteria kekuatan massa batuan (*strength type*) *Generalized Hoek-Brown* dengan bantuan *software Slide v.6.0*. Pada kriteria ini dimasukkan data properties batuan yang meliputi berat isi batuan atau *unit weight* (kN/m^3), kuat tekan batuan atau UCS (kPa), *Geological Strength Index* (GSI) untuk mengetahui nilai konstanta m_b , s dan a , *Intact Rock Constant* (m_i) yang mempengaruhi nilai m_b , *Disturbance Factor* (D) yang mempengaruhi nilai m_b dan s , sedangkan untuk koefisien gempa (*seismic load*) diasumsikan bernilai nol, karena di daerah yang dianalisis tidak terjadi gempa yang mempengaruhi kestabilan lereng secara signifikan. Dalam melakukan analisa kestabilan lereng pada daerah penelitian, bentuk bidang gelincir yang digunakan adalah *non-circular* karena daerah penelitian yang terdiri dari batuan beku dan kondisi massa batuan yang telah dipengaruhi oleh keterdapatan bidang diskontinuitas seperti sesar, kekar atau bidang lemah lainnya sehingga saat melakukan analisa kestabilan lereng akan memperhitungkan jalur-jalur yang diskontinu pada daerah tersebut.

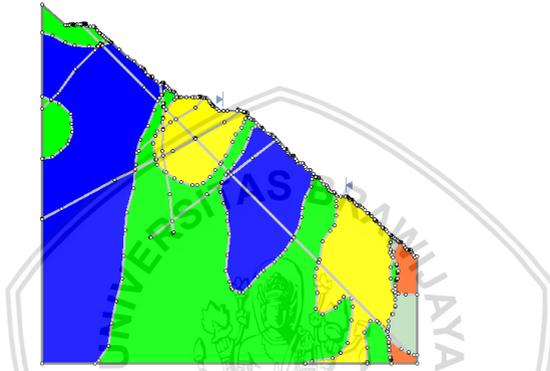
Secara garis besar, nilai GSI diperoleh dari hasil pengurangan 5 dari nilai RMR. Nilai *intact rock constant* (m_i) dan *disturbance factor* (faktor D) diketahui dari *list of m_i values* dan *D table* yang tersedia di kolom kotak dialog GSI pada *software Slide*, dimana nilai m_i dari batuan vulkanik, diorit dan tonalit berkisar antara 25 ± 5 (umumnya, besarnya nilai untuk setiap material tergantung pada granularitas dan interlocking dari struktur kristal batuan tersebut) sedangkan faktor D pada tambang terbuka bernilai 0,7 untuk aktivitas penggalan oleh alat-alat berat dan bernilai 1 untuk aktivitas peledakan.

Berikut adalah hasil perhitungan Faktor Keamanan lereng pada masing-masing litologi batuan di daerah penelitian yang

mengacu pada section daerah penelitian yang telah dibuat, dimana properties material yang digunakan diperoleh dari data *summary properties* batuan oleh Departemen Geologi dan Hidrogeologi (2017).

4.2.1 Titik Section A-A' (Litologi Vulkanik)

Berikut adalah pemodelan lereng daerah penelitian pada litologi vulkanik (titik section A-A' ditunjukkan oleh slope limit atas dan bawah) :



Gambar 4. 5 Pemodelan lereng pada litologi vulkanik

Dengan keterangan ditunjukkan oleh Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4. 3 Tabel data properties material pada litologi vulkanik

Litologi	RMR	Warna Material	Material Properties	Nilai
Vulkanik	40		Berat Isi	27 kN/m ³
			Kuat Tekan	90.000 kN/m ²
			GSI	35
			Mi	25
			Faktor D	1
Vulkanik	50		Berat Isi	27 kN/m ³
			Kuat Tekan	90.000 kN/m ²
			GSI	45
			Mi	25
			Faktor D	1
Vulkanik	60		Berat Isi	27 kN/m ³

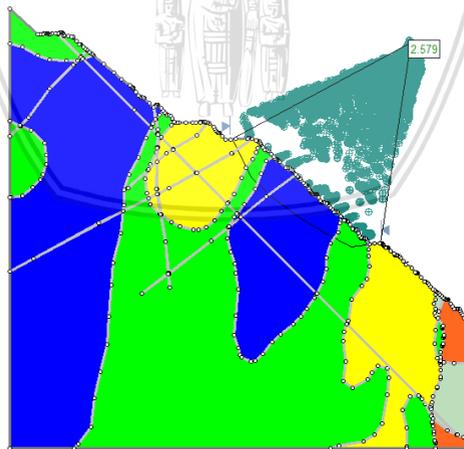
			Kuat Tekan	90.000 kN/m ²
			GSI	55
			Mi	25
			Faktor D	1
<i>Fault</i>	-		Berat Isi	20 kN/m ³
			Kohesi	0 kN/m ²
			Sudut Geser	20 ⁰

Dari parameter input yang ditunjukkan oleh Tabel 4.3 diperoleh nilai m , s dan a yang digunakan untuk menghitung nilai kohesi dan sudut geser dari massa batuan (ditunjukkan oleh Persamaan 2.26 dan 2.27).

Tabel 4. 4 Nilai m , s dan a dari massa batuan litologi vulkanik

Litologi	RMR	M	s	A
Vulkanik	40	0,240754	1,97307e-005	0,551595
	50	0,491794	0,000104464	0,508086
	60	1,0046	0,000553084	0,504048

Selanjutnya dilakukan perhitungan faktor keamanan (FK) lereng pada daerah penelitian, sehingga menghasilkan nilai FK yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 berikut.



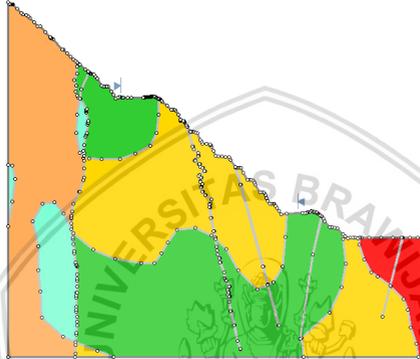
Gambar 4. 6 Faktor keamanan lereng pada litologi vulkanik

Berdasarkan Gambar 4.6 diketahui bahwa massa batuan vulkanik yang ada di atas bidang runtuh dengan nilai berat isi sebesar 27 kN/m³ dan kuat tekan sebesar 90.000 kN/m², terdiri dari RMR 40, 50

dan didominasi oleh RMR 60 dan melewati 2 *fault*, menghasilkan nilai FK minimum sebesar 2,579. Karena nilai FK lebih besar dari 1,2, maka kondisi lereng tersebut berada dalam keadaan aman atau stabil.

4.2.2 Titik Section B-B' (Litologi Tonalit)

Berikut adalah pemodelan lereng daerah penelitian pada litologi tonalit (titik section B-B' ditunjukkan oleh slope limit atas dan bawah) :



Gambar 4. 7 Pemodelan lereng pada litologi tonalit

Dengan keterangan ditunjukkan oleh Tabel 4.5 sebagai berikut.

Tabel 4. 5 Tabel data properties material pada litologi tonalit

Litologi	RMR	Warna Material	Material Properties	Nilai
Tonalit	30		Berat Isi	27 kN/m ³
			Kuat Tekan	100.000 kN/m ²
			GSI	25
			Mi	29
			Faktor D	1
Tonalit	40		Berat Isi	27 kN/m ³
			Kuat Tekan	100.000 kN/m ²
			GSI	35
			Mi	29
			Faktor D	1
Tonalit	50		Berat Isi	27 kN/m ³

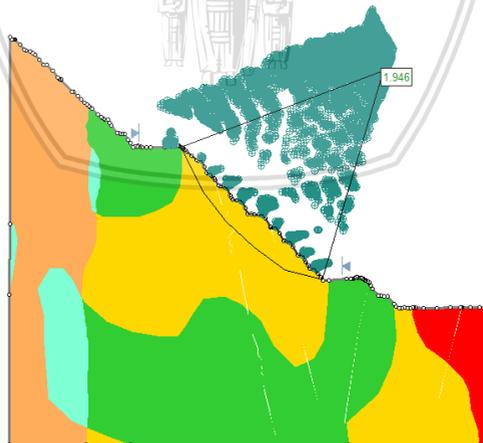
			Kuat Tekan	100.000 kN/m ²
			GSI	45
			Mi	29
			Faktor D	1
<i>Fault</i>	-		Berat Isi	20 kN/m ³
			Kohesi	0 kN/m ²
			Sudut Geser	20 ⁰

Dari parameter input yang ditunjukkan oleh Tabel 4.5 diperoleh nilai m, s dan a yang digunakan untuk menghitung nilai kohesi dan sudut geser dari massa batuan (ditunjukkan oleh Persamaan 2.26 dan 2.27).

Tabel 4. 6 Nilai m, s dan a dari massa batuan litologi tonalit

Litologi	RMR	m	s	a
Tonalit	30	0,136716	3,72665e-006	0,531267
	40	0,279274	1,97307e-005	0,51595
	50	0,570481	0,000104464	0,508086

Selanjutnya dilakukan perhitungan faktor keamanan (FK) lereng pada daerah penelitian, sehingga menghasilkan nilai FK yang ditunjukkan oleh Gambar 4.8 sebagai berikut.



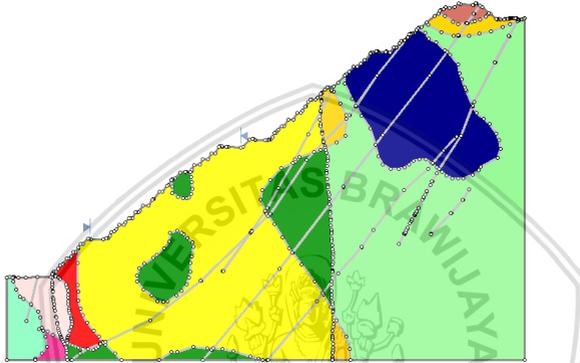
Gambar 4. 8 Faktor keamanan lereng pada litologi tonalit

Berdasarkan Gambar 4.8 diketahui bahwa massa batuan tonalit yang ada di atas bidang runtuh dengan nilai berat isi sebesar 27 kN/m³ dan

kuat tekan sebesar 100.000 kN/m^2 , terdiri dari RMR 40 dan melewati 2 *fault*, menghasilkan nilai FK minimum sebesar 1,946. Karena nilai FK lebih besar dari 1,2, maka kondisi lereng tersebut berada dalam keadaan aman atau stabil.

4.2.3 Titik Section C-C' (Litologi Diorit)

Berikut adalah pemodelan lereng daerah penelitian pada litologi diorit (titik section C-C' ditunjukkan oleh slope limit atas dan bawah) :



Gambar 4. 9 Pemodelan lereng pada litologi diorit

Dengan keterangan ditunjukkan oleh Tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4. 7 Tabel data properties material pada litologi diorit

Litologi	RMR	Warna Material	Material Properties	Nilai
Diorit	30	■	Berat Isi	27 kN/m^3
			Kuat Tekan	42.000 kN/m^2
			GSI	25
			Mi	15
			Faktor D	1
Diorit	40	■	Berat Isi	27 kN/m^3
			Kuat Tekan	42.000 kN/m^2
			GSI	35
			Mi	15
			Faktor D	1
Diorit	50	■	Berat Isi	27 kN/m^3

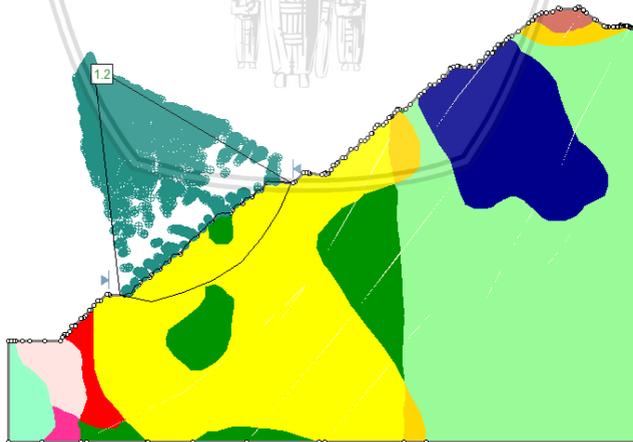
			Kuat Tekan	42.000 kN/m ²
			GSI	45
			Mi	15
			Faktor D	1
Fault	-		Berat Isi	20 kN/m ³
			Kohesi	0 kN/m ²
			Sudut Geser	20 ⁰

Dari parameter input yang ditunjukkan oleh Tabel 4.7 diperoleh nilai m, s dan a yang digunakan untuk menghitung nilai kohesi dan sudut geser dari massa batuan (ditunjukkan oleh Persamaan 2.26 dan 2.27).

Tabel 4. 8 Nilai m, s dan a dari massa batuan litologi diorit

Litologi	RMR	m	s	a
Diorit	30	0,0707153	3,72665e-006	0,531267
	40	0,144452	1,97307e-005	0,51595
	50	0,295076	0,000104464	0,508086

Selanjutnya dilakukan perhitungan faktor keamanan (FK) lereng pada daerah penelitian, sehingga menghasilkan nilai FK yang ditunjukkan oleh Gambar 4.10 sebagai berikut.



Gambar 4. 10 Faktor keamanan lereng pada litologi diorit

Berdasarkan Gambar 4.10 diketahui bahwa massa batuan diorit yang ada di atas bidang runtuh dengan nilai berat isi sebesar 27 kN/m³ dan

kuat tekan sebesar 42.000 kN/m^2 , didominasi oleh RMR 40 dan sedikit RMR 50, menghasilkan nilai FK minimum sebesar 1,2, yang artinya lereng tersebut berada dalam kondisi rawan longsor (kritis). Nilai FK yang diperoleh pada daerah penelitian litologi diorit lebih rendah dibandingkan dengan daerah penelitian litologi vulkanik dan tonalit. Hal ini disebabkan karena massa batuan dan kuat tekan batuan di daerah tersebut memiliki nilai yang rendah dibandingkan dengan daerah penelitian sebelumnya.

4.3 Pengaruh Perubahan Berat Isi dan Kuat Tekan Batuan terhadap Kestabilan Lereng Tambang di Daerah Penelitian

Untuk mengetahui hubungan dan pengaruh dari berat isi dan kuat tekan batuan terhadap faktor keamanan lereng, dilakukan dengan melakukan uji statistika yaitu uji regresi linier ganda, dimana berat isi dan kuat tekan batuan adalah variabel bebas, sedangkan faktor keamanan lereng adalah variabel terikat. Data variabel bebas diperoleh dari hasil uji laboratorium yang telah dilakukan pada beberapa sampel batuan masing-masing litologi yang ada di daerah penelitian, sedangkan data variabel terikat diperoleh dari hasil perhitungan faktor keamanan lereng berdasarkan beberapa masukan nilai material properties termasuk diantaranya dua variabel bebas di atas yang kemudian ingin diketahui seberapa besar pengaruhnya terhadap variabel terikat.

4.3.1 Litologi Vulkanik

Berikut adalah tabel data yang akan dilakukan pengujian regresi ganda, dimana berat isi batuan dinyatakan sebagai UW dan kuat tekan batuan dinyatakan sebagai UCS, sedangkan faktor keamanan lereng dinyatakan sebagai FK.

Tabel 4. 9 Data UCS, UW dan FK pada litologi vulkanik

No	UCS (kN/m^2)	Unit Weight (kN/m^3)	FK
1	35300	26,557	1,946
2	34900	27,122	1,926
3	58100	27,724	2,237
4	32600	27,187	1,885
5	33600	27,244	1,901
6	72900	26,712	2,425

7	16600	26,268	1,542
8	123400	27,393	2,829
9	45500	27,094	2,091
10	113900	26,62	2,784
11	35400	23,71	2,016
12	13100	23,489	1,48

4.3.1.1 Hasil Uji Regresi

```

> summary(fit1)

Call:
lm(formula = vulkanik$FK ~ vulkanik$UW + log(vulkanik$SUCS))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.06413 -0.02277 -0.01584  0.04201  0.06066

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -3.95925     0.27465  -14.415 1.59e-07 ***
vulkanik$UW   -0.03710     0.01151   -3.225 0.0104 *
log(vulkanik$SUCS)  0.66056     0.02356   28.036 4.54e-10 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.04484 on 9 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9908, Adjusted R-squared:  0.9887
F-statistic: 484.2 on 2 and 9 DF, p-value: 6.9e-10

> # Pengujian Heteroskedastisitas
> lmtest::bptest(fit1)

studentized Breusch-Pagan test

data: fit1
BP = 5.0148, df = 2, p-value = 0.08148

> # Pengujian Normalitas Sisaan
> shapiro.test(res)

Shapiro-Wilk normality test

data: res
W = 0.96116, p-value = 0.8002

> # Pengujian Multikolinieritas
> car::vif(fit)
vulkanik$UW vulkanik$SUCS
  1.183698    1.183698

> # Pengujian Autokorelasi
> lmtest::dwtest(fit)

Durbin-Watson test

data: fit
DW = 2.4238, p-value = 0.7383
alternative hypothesis: true autocorrelation is greater than 0
    
```

*Logaritma yang dimaksud pada persamaan di atas adalah logaritma natural atau logaritma berbasis e, yang dinyatakan dengan ${}^e\log x$



atau $\ln x$. Dimana pada data variabel bebas UCS dilakukan transformasi data logaritma natural karena data mengalami masalah (tidak memenuhi asumsi heteroskedastisitas). Transformasi data dapat dilakukan dengan bantuan Microsoft Excel dengan rumus: $x'=\ln(x)$, dimana x adalah data asli sedangkan x' adalah data hasil transformasi.

4.3.1.2 Analisis Hasil Regresi

1. Uji Asumsi Klasik

Model regresi linier ganda dapat dikatakan sebagai model regresi yang baik jika memenuhi uji asumsi klasik, diantaranya asumsi normalitas, multikolinearitas, heteroskedastisitas dan autokorelasi.

Berdasarkan hasil uji heteroskedastisitas dengan menggunakan metode Breusch-Pagan, diperoleh nilai signifikansi (p-value) pada data litologi vulkanik sebesar 0,081. Karena nilai signifikansi tersebut lebih besar dari α 0,05 maka data bebas dari gejala heteroskedastisitas.

Berdasarkan hasil uji normalitas residual dengan menggunakan metode Shapiro-Wilk diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,8002 yang dimana lebih besar dari α 0,05, sehingga diketahui bahwa residual data tersebut berdistribusi normal.

Berdasarkan hasil uji multikolinearitas diketahui bahwa masing-masing variabel bebas memiliki nilai VIF yang sama yaitu sebesar 1,1837. Karena nilai VIF lebih kecil dari 10, maka asumsi multikolinearitas terpenuhi.

Berdasarkan hasil uji autokorelasi menggunakan metode Durbin-Watson diketahui bahwa nilai signifikansinya sebesar 0,7383 yang dimana lebih besar dari α 0,05 sehingga dapat disimpulkan bahwa data tersebut tidak mengalami autokorelasi.

2. Uji F (Uji Simultan)

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui bahwa nilai F-hitung sebesar 484,2 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar $6,9e-10$. Karena nilai F-hitung (484,2) lebih besar dari F tabel ($df_1;df_2 = 2;9 = 4,26$), dan nilai signifikansi ($6,9e-10$) lebih kecil dari α 0,05, maka diketahui bahwa berat isi dan kuat tekan batuan secara

simultan (bersama-sama) berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

3. Uji t (Uji Parsial)

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui bahwa pada variabel bebas UCS memiliki nilai t-hitung sebesar 28,036 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar $4,54e-10$. Karena nilai t-hitung (28,036) lebih besar dari t tabel ($\alpha; df = 0,05; 9 = 2,262$), dan nilai signifikansi ($6,9e-10$) lebih kecil dari $\alpha 0,05$, maka diketahui bahwa UCS (kuat tekan batuan) secara parsial (individu) berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

Sedangkan pada variabel bebas UW memiliki nilai t-hitung sebesar 3,225 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar 0,0104. Karena nilai t-hitung (3,225) lebih besar dari t tabel ($\alpha; df = 0,05; 9 = 2,262$), dan nilai signifikansi (0,0104) lebih kecil dari $\alpha 0,05$, maka diketahui bahwa UW (berat isi batuan) secara parsial berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

4. Analisis Model Regresi Ganda

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui model regresi yang terbentuk untuk batuan vulkanik adalah:

$$FK = -3,95 - 0,037 UW ** + 0,66 \ln(UCS) **$$

Koefisien regresi variabel berat isi (UW) sebesar 0,037, sedangkan koefisien regresi variabel kuat tekan batuan (UCS) adalah sebesar 0,66. Tanda negatif (-) pada nilai koefisien regresi tersebut menandakan hubungan yang berbanding terbalik antara variabel terikat dan variabel terbalik, sedangkan tanda positif (+) pada nilai koefisien regresi menandakan hubungan yang searah antara variabel bebas dan variabel terikat. Tanda (**) menyatakan bahwa variabel tersebut berpengaruh signifikan terhadap FK pada taraf nyata 5%. Sehingga berdasarkan model regresi yang terbentuk dapat diinterpretasi sebagai berikut: Apabila berat isi batuan vulkanik meningkat sebesar 1 satuan yaitu 1 kN/m^3 sedangkan variabel lain bernilai tetap maka FK akan menurun sebesar 0,037; dan apabila kuat tekan batuan meningkat sebesar 1% sedangkan variabel lain bernilai tetap maka akan meningkatkan FK sebesar 0,66.

4.3.2 Litologi Tonalit

Berikut adalah tabel data yang akan dilakukan pengujian regresi ganda, dimana berat isi batuan dinyatakan sebagai UW dan kuat tekan batuan dinyatakan sebagai UCS, sedangkan faktor keamanan lereng dinyatakan sebagai FK.

Tabel 4. 10 Data UCS, UW dan FK pada litologi tonalit

No	UCS (kN/m ²)	Unit Weight (kN/m ³)	FK
1	117000	25,514	1,983
2	68200	25,232	1,693
3	120200	25,559	1,997
4	94200	25,389	1,866
5	33700	25,883	1,364
6	80300	25,394	1,779
7	123100	25,241	2,018
8	98400	25,109	1,896
9	130200	25,262	2,05
10	58400	24,596	1,628
11	112400	24,596	1,98
12	33800	25,054	1,379
13	37500	25,943	1,409

4.3.2.1 Hasil Uji Regresi

```

> summary(fit2)

Call:
lm(formula = tonalit$FK ~ tonalit$UW + log(tonalit$UCS))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0206654 -0.0084015  0.0008575  0.0085728  0.0157845

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(> |t|)
(Intercept)  -3.692938   0.269459  -13.705 8.30e-08 ***
tonalit$UW   -0.006689   0.009269  -0.722   0.487
log(tonalit$UCS)  0.500924   0.007425   67.461 1.25e-14 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01255 on 10 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.998,    Adjusted R-squared:  0.9976
F-statistic: 2473 on 2 and 10 DF,  p-value: 3.347e-14

> # Pengujian Heteroskedastisitas
> lmtest::bptest(fit2)

studentized Breusch-Pagan test

data: fit2
BP = 2.9017, df = 2, p-value = 0.2344

> # Pengujian Normalitas Sisaan
> shapiro.test(res2)

Shapiro-wilk normality test

data: res2
W = 0.9531, p-value = 0.6459

> # Pengujian Multikolinieritas
> car::vif(fit2)
      tonalit$UW log(tonalit$UCS)
      1.080213      1.080213

> # Pengujian Autokorelasi
> lmtest::dwtest(fit2)

Durbin-Watson test

data: fit2
DW = 2.6921, p-value = 0.8817
alternative hypothesis: true autocorrelation is greater than 0

```

*Logaritma yang dimaksud pada persamaan di atas adalah logaritma natural ($\ln x$). Dimana pada data variabel bebas UCS dilakukan transformasi data logaritma natural karena data mengalami masalah (tidak memenuhi asumsi heteroskedastisitas).

4.3.2.2 Analisis Hasil Regresi

1. Uji Asumsi Klasik

Berdasarkan hasil uji heteroskedastisitas dengan menggunakan metode Breusch-Pagan, diperoleh nilai signifikansi (p-value) pada data litologi tonalit sebesar



0,2344. Karena nilai signifikansi tersebut lebih besar dari α (0,05), maka data bebas dari gejala heteroskedastisitas.

Berdasarkan hasil uji normalitas residual dengan menggunakan metode Shapiro-Wilk diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,6459 yang dimana lebih besar dari α 0,05, sehingga diketahui bahwa residual data tersebut berdistribusi normal.

Berdasarkan hasil uji multikolinearitas diketahui bahwa nilai VIF sebesar 1,0802 yang dimana lebih kecil dari 10, sehingga diketahui data tersebut tidak mengalami gangguan multikolinearitas.

Berdasarkan hasil uji autokorelasi menggunakan metode Durbin-Watson diketahui bahwa nilai signifikansinya sebesar 0,8817 yang dimana lebih besar dari α 0,05 sehingga dapat disimpulkan bahwa data tersebut tidak mengalami autokorelasi.

2. Uji F (Uji Simultan)

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui bahwa nilai F-hitung sebesar 2473 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar $3,347e-14$. Karena nilai F-hitung (2473) lebih besar dari F tabel ($df_1; df_2 = 2; 10 = 4, 10$), dan nilai signifikansi ($3,347e-14$) lebih kecil dari α 0,05, maka diketahui bahwa berat isi dan kuat tekan batuan secara simultan (bersama-sama) berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

3. Uji t (Uji Parsial)

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui bahwa pada variabel bebas UCS memiliki nilai t-hitung sebesar 67,461 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar $1,25e-14$. Karena nilai t-hitung (67,461) lebih besar dari t tabel ($\alpha; df = 0,05; 10 = 2,228$), dan nilai signifikansi ($1,25e-14$) lebih kecil dari α 0,05, maka diketahui bahwa UCS (kuat tekan batuan) secara parsial (individu) berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

Sedangkan pada variabel bebas UW memiliki nilai t-hitung sebesar 0,722 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar 0,487. Karena nilai t-hitung (0,722) lebih kecil dari t tabel ($\alpha; df = 0,05; 10 = 2,228$), dan nilai signifikansi (0,487) lebih besar dari α 0,05, maka diketahui bahwa UW (berat isi

batuan) secara parsial tidak berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

4. Analisis Model Regresi Ganda

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui model regresi yang terbentuk untuk batuan tonalit adalah:

$$FK = -3,69 - 0,006 UW + 0,5 \ln (UCS) **$$

Koefisien regresi variabel berat isi (UW) adalah sebesar 0,006, sedangkan koefisien regresi variabel kuat tekan batuan (UCS) adalah sebesar 0,5. Tanda (**) menyatakan bahwa variabel tersebut berpengaruh signifikan terhadap FK pada taraf nyata 5%. Sehingga berdasarkan model regresi yang terbentuk dapat diinterpretasi sebagai berikut: Apabila kuat tekan batuan tonalit meningkat sebesar 1% sedangkan variabel lain bernilai tetap maka akan meningkatkan FK sebesar 0,5; sedangkan berat isi batuan tonalit dalam penelitian ini tidak berpengaruh signifikan terhadap FK. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh pada 14 sampel batuan yang digunakan tersebut memiliki kecenderungan nilai berat isi yang hampir sama (dapat dilihat pada Tabel 4.7).

4.3.3 Litologi Diorit

Berikut adalah tabel data yang akan dilakukan pengujian regresi ganda, dimana berat isi batuan dinyatakan sebagai UW dan kuat tekan batuan dinyatakan sebagai UCS, sedangkan faktor keamanan lereng dinyatakan sebagai FK.

Tabel 4. 11 Data UCS, UW dan FK pada litologi diorit

No	UCS (kN/m ²)	Unit Weight (kN/m ³)	FK
1	30000	26,352	1,269
2	38600	25,697	1,393
3	80800	25,255	1,772
4	78400	24,992	1,761
5	30800	25,184	1,301
6	30700	25,092	1,301
7	27400	24,357	1,264
8	25000	24,461	1,222

9	38400	24,979	1,403
10	25900	22,913	1,266
11	27100	24,082	1,264
12	31700	25,517	1,308
13	126200	27,098	1,984
14	53800	25,28	1,561

4.3.3.1 Hasil Uji Regresi

```

> summary(fit3)

Call:
lm(Formula = diorit$FK ~ diorit$UW + log(diorit$UCS))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0145960 -0.0057829 -0.0006841  0.0053169  0.0202772

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -3.345612   0.075305  -44.428  9.18e-14 ***
diorit$UW    -0.018332   0.003521   -5.207  0.000291 ***
log(diorit$UCS)  0.494320   0.006937   71.255  5.17e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01032 on 11 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9984, Adjusted R-squared:  0.9982
F-statistic: 3527 on 2 and 11 DF, p-value: 3.61e-16

> # Pengujian Heteroskedastisitas
> lmtest::bptest(fit3)

studentized Breusch-Pagan test

data: fit3
BP = 5.5828, df = 2, p-value = 0.06133

> # Pengujian Normalitas Sisaan
> shapiro.test(res3)

Shapiro-Wilk normality test

data: res3
W = 0.97543, p-value = 0.9396

> # Pengujian Multikolinieritas
> car::vif(fit3)
diorit$UW log(diorit$UCS)
1.509423 1.509423

> # Pengujian Autokorelasi
> lmtest::dwtest(fit3)

Durbin-Watson test

data: fit3
DW = 2.4819, p-value = 0.747
alternative hypothesis: true autocorrelation is greater than 0
    
```

*Logaritma yang digunakan adalah logaritma natural ($\ln x$). Dimana pada data UCS dilakukan transformasi logaritma natural karena data tidak memenuhi asumsi heteroskedastisitas.

4.3.3.2 Analisis Hasil Regresi

1. Uji Asumsi Klasik

Berdasarkan hasil uji heteroskedastisitas dengan menggunakan metode Breusch-Pagan, diperoleh nilai signifikansi (p-value) pada data litologi diorit sebesar 0,0613. Karena nilai signifikansi tersebut lebih besar dari α (0,05), maka data bebas dari gejala heteroskedastisitas.

Berdasarkan hasil uji normalitas residual dengan menggunakan metode Shapiro-Wilk diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,9396 yang dimana lebih besar dari α 0,05, sehingga diketahui bahwa residual data tersebut berdistribusi normal.

Berdasarkan hasil uji multikolinearitas diketahui bahwa nilai VIF sebesar 1,5094 yang dimana lebih kecil dari 10, sehingga diketahui data tersebut tidak mengalami gangguan multikolinearitas.

Berdasarkan hasil uji autokorelasi menggunakan metode Durbin-Watson diketahui bahwa nilai signifikansinya sebesar 0,747 yang dimana lebih besar dari α 0,05 sehingga dapat disimpulkan bahwa data tersebut tidak mengalami autokorelasi.

2. Uji F (Uji Simultan)

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui bahwa nilai F-hitung sebesar 3527 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar 3,61e-16. Karena nilai F-hitung (3527) lebih besar dari F tabel ($df_1;df_2 = 2;11 = 3,98$), dan nilai signifikansi (3,61e-16) lebih kecil dari α 0,05, maka diketahui bahwa berat isi dan kuat tekan batuan secara simultan (bersama-sama) berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

3. Uji t (Uji Parsial)

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui bahwa pada variabel bebas UCS memiliki nilai t-hitung sebesar 71,255 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar 5,17e-16. Karena nilai t-hitung (71,255) lebih besar dari t tabel ($\alpha;df = 0,05;11 = 2,201$), dan nilai signifikansi (5,17e-

16) lebih kecil dari α 0,05, maka diketahui bahwa UCS (kuat tekan batuan) secara parsial (individu) berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

Sedangkan pada variabel bebas UW memiliki nilai t-hitung sebesar 5,207 dengan nilai signifikansi (p-value) sebesar 0,000291. Karena nilai t-hitung (5,207) lebih besar dari t tabel (α ;df = 0,05;11 = 2,201), dan nilai signifikansi (0,000291) lebih kecil dari α 0,05, maka diketahui bahwa UW (berat isi batuan) secara parsial berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan lereng.

4. Analisis Model Regresi Ganda

Berdasarkan hasil uji regresi di atas, diketahui model regresi yang terbentuk untuk batuan diorit adalah:

$$FK = -3,34 - 0,018 UW ** + 0,49 \ln(UCS) **$$

Koefisien regresi variabel berat isi (UW) sebesar 0,018, sedangkan koefisien regresi variabel kuat tekan batuan (UCS) sebesar 0,49. Sehingga berdasarkan model regresi yang terbentuk dapat diinterpretasi sebagai berikut: Apabila berat isi batuan diorit meningkat sebesar 1 kN/m^3 sedangkan variabel lain bernilai tetap, maka FK akan menurun sebesar 0,018; dan apabila kuat tekan batuan diorit meningkat sebesar 1% sedangkan variabel lain bernilai tetap, maka akan meningkatkan FK sebesar 0,49.

4.3.4 Pembahasan

Hasil uji regresi ganda pada masing-masing data litologi batuan menunjukkan bahwa hubungan antara kuat tekan batuan dan faktor keamanan memiliki hubungan yang searah (berbanding lurus). Kuat tekan batuan merupakan salah satu parameter yang menunjukkan kekuatan massa batuan, sehingga semakin besar nilai kuat tekan akan menambah kekuatan batuan (gaya penahan longsor akan semakin meningkat) sehingga kestabilan lereng akan semakin meningkat. Sedangkan hubungan antara berat isi batuan dan faktor keamanan lereng pada masing-masing litologi batuan memiliki hubungan yang berbanding terbalik. Berat isi batuan berperan dalam pembebanan pada lereng, dimana besar berat isi massa batuan dapat diketahui dengan membagi beban atau berat total dengan volum total dari massa batuan tersebut. Pada lereng tambang terbuka, penyebab longsor itu disebabkan oleh gaya berat itu sendiri (beban lereng),

sehingga semakin besar berat isi, maka semakin besar beban lereng tersebut dan semakin meningkatkan potensi terjadinya kelongsoran akibat penambahan gayaberat atau gaya pendorong terjadinya longsoran. Selain itu juga berat isi memperhitungkan berat massa batuan yang sudah dipengaruhi porositas massa batuan (pori sekunder berupa bidang diskontinu atau rekahan) yang biasanya diisi oleh material nonsolid (seperti air) yang dapat menurunkan kestabilan lereng.





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa hal yang dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Massa batuan daerah penelitian berada dalam kondisi *poor* (buruk) hingga *fair* (cukup baik) dengan rentang nilai RMR 40-60.
2. Pada *section* A-A' (litologi vulkanik) memiliki nilai FK sebesar 2,579; *section* B-B' (litologi tonalit) memiliki nilai FK sebesar 1,946; dan *section* C-C' (litologi diorit) memiliki nilai FK sebesar 1,2.
3. Model regresi untuk litologi vulkanik, tonalit dan diorit secara berturut-turut adalah : $FK = -3,95 - 0,037UW + 0,66 \ln UCS$, $FK = -3,69 - 0,006UW + 0,50 \ln UCS$, dan $FK = -3,34 - 0,018UW + 0,49 \ln UCS$. Peningkatan berat isi batuan dapat menurunkan kestabilan lereng, sedangkan peningkatan kuat tekan batuan dapat meningkatkan kestabilan lereng, dengan perubahan nilai FK sebesar koefisien masing-masing variabel UW dan UCS jika terjadi perubahan nilai 1 satuan UW atau 1% UCS dengan kondisi variabel lain bernilai konstan.

5.2 Saran dan Rekomendasi

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, guna memperoleh prediksi yang lebih tepat terhadap nilai FK yang dihasilkan akibat perubahan berat isi dan kuat tekan batuan, sebaiknya hasil uji regresi ganda perlu dikombinasikan dengan perhitungan secara geoteknik, mengingat jumlah data observasi pada penelitian ini memiliki jumlah yang kecil, yaitu kurang dari 30 sampel pada masing-masing litologi batuan yang diteliti.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2012. *Peta Litologi Batuan Berdasarkan Topo Penambangan 2012*. Departemen Geologi, PT. Amman Mineral Nusa Tenggara. Tidak diterbitkan.
- Anonim. 2017a. *Peta Kondisi Massa Batuan Berdasarkan Topo Penambangan September 2017*. Departemen Geoteknik dan Hidrogeologi, PT. Amman Mineral Nusa Tenggara. Tidak diterbitkan.
- Anonim. 2017b. *Peta Section Penelitian Berdasarkan Topo Penambangan September 2017*. Departemen Geoteknik dan Hidrogeologi, PT. Amman Mineral Nusa Tenggara. Tidak diterbitkan.
- Anonim. 2017c. *Peta Update Struktur Geologi Berdasarkan Topo Penambangan Juli 2017*. Departemen Geoteknik dan Hidrogeologi, PT. Amman Mineral Nusa Tenggara. Tidak diterbitkan.
- Arif, Irwandy. 2016. *Geoteknik Tambang*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. New York: John Wiley & Sons.
- Clode, C., Proffett, J., Mitchell P., dan Munajat, I. 1999. Relationships of Intrusion, Wall-Rock Alteration and Mineralisation in the Batu Hijau Copper – Gold Porphyry Deposit. *Proceeding Pac-Rim Congress, 10-13 October 1997, Bali*, pp 485-498.
- ECON 370. 2018. *Violations of OLS Assumption Heteroscedasticity*. <http://people.stfx.ca/tleo/econ370term2lec1.pdf> diakses pada 12 Maret 2018
- Garwin, S. 2000. *The Setting, Geometry and Timing of Intrusion-related Hydrothermal Systems in the Vicinity of the Batu Hijau Porphyry Copper-gold Deposit, Sumbawa, Indonesia*. Nedland: University of Western Australia.
- Garwin, S. 2002. The Geologic Setting of Intrusion-Related Hydrothermal Systems Near The Batu Hijau Porphyry Copper-Gold Deposit, Sumbawa. *Indonesia: Society of Economic Geologists Special Publication, 9*, p. 333-336, Australia.
- Gujarati, N.D. 2003. *Basic Econometrics, 4th Edition*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.

- Hoek, E. dan Bray, J. 1981. *Rock Slope Engineering 3rd Ed.* London: Inst. Mining & Metallurgy.
- Hoek, E dan Brown, ET. 1980. Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of Geotechnical Engineering Div ASCE 106 (GT9), 1013-1035.*
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. dan Corkum, B. 2002. Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition. *Proc. North Am. Rock Mechanics. Soc. Meeting, Toronto, Canada, July, 267-273.*
- Irianto, Agus. 2004. *Statistik: Konsep Dasar dan Aplikasinya.* Jakarta: Kencana.
- Read, J. dan Stacey, P. 2009. *Guidelines for Open Pit Slope Design.* Australia: CSIRO Publishing.
- Takwin, G.A., Turangan, A.E., dan Rondonuwu, S.G. 2017. Analisis Kestabilan Lereng Metode Morgenstern-Price (Studi Kasus: Diamond Hill Citraland). *Jurnal Tekno Vol.15/No.67/April 2017.*
- Widarjono, A. 2007. *Ekonometrika: Teori dan Aplikasi untuk Ekonomi dan Bisnis, Edisi Kedua.* Yogyakarta: Ekonisia Fakultas Ekonomi Universitas Islam Indonesia.
- Wyllie, D.C. dan Mah, C.W. 2004. *Rock Slope Engineering: Civil and Mining 4th Edition (Based on the 3rd Edition by E. Hoek and J. Bray. The Institute of Mining and Metallurgy).* USA: Spon Press-Taylor & Francis Group.