SKRIPSI

ANALISIS PERUBAHAN TEGANGAN TERINDUKSI TERHADAP DOF SPALLING DAN STRAINBURST AKIBAT PENGARUH PPV EVENT SEISMIC DENGAN MODEL FEM DI AREA ABUTMENT

(Studi Kasus: Grasberg Block Cave (GBC), PT Freeport Indonesia, Mimika, Papua)

Disusun dan diajukan oleh:

FAIDEL AFRIAN KEMONG D111 19 1015



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN GOWA 2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS PERUBAHAN TEGANGAN TERINDUKSI TERHADAP DOF SPALLING DAN STRAINBURST AKIBAT PENGARUH PPV EVENT SEISMIC DENGAN MODEL FEM DI AREA ABUTMENT

Disusun dan diajukan oleh

Faidel Afrian Kemong D111 19 1015

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 27 Maret 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T NIP 1971 12820050110002

Ketua Program Studi,

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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama

: Faidel Afrian Kemong

NIM

: D1111191015

Program Studi : Teknik Pertambangan

Jenjang

: S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Analisis Perubahan Tegangan Terinduksi Terhadap DOF Spalling dan Strainburst Akibat Pengaruh PPV Event Seismic dengan Model FEM di Area Abutment)

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

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 25 April 2024





ABSTRAK

Faidel Afrian Kemong. ANALISIS PERUBAHAN TEGANGAN TERINDUKSI TERHADAP DOF SPALLING DAN STRAINBURST AKIBAT PENGARUH PPV EVENT SEISMIC DENGAN MODEL FEM DI AREA ABUTMENT (dibimbing oleh Purwanto)

Grasberg Block Cave (GBC) yang menerapkan metode block caving dalam proses penambangannya tersusun atas batuan keras dan terletak di kedalaman yang relatif dalam dari permukaan tanah sehingga lubang bukaan berpotensi mengalami spalling dan sering menginduksi event seismic yang menyebabkan terjadinya strainburst. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan tegangan terinduksi lubang bukaan pada kerusakan spalling dan strainburst yang diakibatkan oleh pengaruh event seismic dengan parameter Peak Particle Velocity (PPV) menggunakan model numerik Finite Element Method (FEM) di area abutment. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan Depth of Failure (DOF) akibat pembebanan static yang ditambah pembebanan seismic akan mempengaruhi distribusi tegangan terinduksi dimana dengan rata-rata penambahan DOF 0,94 m akan memberikan 7,88 MPa untuk tegangan tangensial dan -5,8 MPa untuk tegangan radial. PPV berdasarkan metode scalling law terhadap Scaled Distance (SD) diperoleh rata-rata PPV sebesar 16,37 mm/s, sehingga hasil regresi diperoleh hubungan relatif berbanding lurus terhadap perubahan tegangan tangensial yakni $\Delta \sigma 1 = 0.29(PPV) + 3.1$ dan relatif berbanding terbalik terhadap perubahan tegangan radial yakni $\Delta \sigma 3 = -0.22(PPV) - 2.29$. Perhitungan DOF berdasarkan pengaruh PPV untuk keperluan perkiraan Factor of Safety (FS) diperoleh hubungan empiris yaitu Rf/a = $0.5(\sigma max/\sigma c) + 0.0038(PPV) + 0.51$. Oleh karena itu, area penelitian dalam kondisi static dengan FS 1,3 ketika dipengaruhi pembebanan event seismic maka terjadi penurunan FS menjadi 0,68 sehingga supaya dalam keadaan stabil direkomendasikan *support capacity* sebesar 4,54 ton/m².

Kata Kunci: tegangan terinduksi, spalling, strainburst, Depth of Failure (DOF), Peak Particle Velocity (PPV)



ABSTRACT

Faidel Afrian Kemong. ANALYSIS OF INDUCED STRESS CHANGES IN SPALLING AND STRAINBURST DOF DUE TO THE INFLUENCE OF PPV SEISMIC EVENTS WITH THE FEM MODEL IN THE ABUTMENT AREA (supervised by Purwanto)

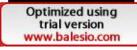
Grasberg Block Cave (GBC), which applies the block caving method in the mining process, is composed of hard rock and is located at a relatively deep depth from the ground surface so that the opening hole has the potential to experience spalling and often induces seismic events that cause strainburst. This study aims to analyze changes in the induced stress of the opening hole in spalling and strainburst damage caused by the influence of seismic events with the Peak Particle Velocity (PPV) parameter using the Finite Element Method (FEM) numerical model in the abutment area. The results of this study show that changes in Depth of Failure (DOF) due to static loading plus seismic loading will affect the distribution of induced stresses where the average addition of 0.94 m DOF will give 7.88 MPa for tangential stress and -5.8 MPa for radial stress. PPV based on the scaling law method against the Scaled Distance (SD) obtained an average PPV of 16.37 mm/s, so that the regression results obtained a relationship relatively directly proportional to changes in tangential stress, namely $\Delta \sigma I = 0.29(PPV) + 3.1$ and relatively inversely proportional to changes in radial stress, namely $\Delta \sigma 3 = -$ 0.22(PPV) - 2.99. The calculation of DOF based on the effect of PPV for the purpose of estimating Factor of Safety (FS) obtained an empirical relationship, namely $Rf/a = 0.5(\sigma max/\sigma c) + 0.0038(PPV) + 0.51$. Therefore, the research area in static conditions with FS 1.3 when affected by seismic event loading, there is a decrease in FS to 0.68 so that in order to be stable, a support capacity of 4.54 tons/m² is recommended.

Keywords: Induced stress, spalling, strainburst, Depth of Failure (DOF), Peak Particle Velocity (PPV)



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	
ABSTRAK	
ABSTRACT	iiv
DAFTAR ISI	
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	
DAFTAR SIMBOL DAN ARTI SINGKATAN	iix
DAFTAR LAMPIRAN	
KATA PENGANTAR	
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	
1.2 Rumusan Masalah	
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup	
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Metode <i>Block Caving</i>	5
2.2 Klasifikasi Massa Batuan	
2.3 Tegangan Terinduksi	20
2.4 Finite Element Method (FEM)	23
2.5 Event Seismic	
2.6 Scalling Law Method	
2.7 Depth of Failure (DOF)	37
2.8 Analisis Regresi Linear	46
BAB 3 METODE PENELITIAN	49
3.1 Lokasi Penelitian	49
3.2 Sumber Data	51
3.3 Pengolahan Data	
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Analisis Depth of Failure (DOF)	81
4.2 Hasil Analisis Scalling Law	81
4.3 Hasil Analisis Numerik FEM	
4.4 Hasil Analisis Regresi Linear	
4.5 Prediksi DOF Berdasarkan PPV	94
4.6 Penentuan Support Capacity	97
BAB 5 PENUTUP	100
5.1 Kesimpulan	100
5.2 Saran	101
DAFTAR PUSTAKA	
LAMDIDAN	105



DAFTAR GAMBAR

			Tampilan tambang bawah tanah PT Freeport Indonesia (PTFI)	
			Ilustrasi zona penambangan block caving (PTFI)	
			Model konseptual proses block caving (Duplancic, 2001)	
	Gambar	4	Redistribusi tegangan di abutment (Egana dkk., 2017)	9
	Gambar	5	Transisi dari batuan utuh ke massa batuan (Hoek dan Brown,	
			1997)	
	Gambar	6	Kurva tegangan regangan uji UCS (Rai dkk., 2014)	12
	Gambar	7	Rock Quality Designation (RQD) (Hoek, 2007)	14
	Gambar	8	Diagram GSI standar (Hoek dan Marinos, 2000)	19
			Penentuan perbandingan tegangan horizontal dan tegangan	
			vertikal (Wattimena, 2014)	21
	Gambar	10	Perbandingan distribusi tegangan <i>insitu</i> dan terinduksi (Rai dkk.,	
			2014)	22
	Gambar	11	Distribusi tegangan di sekitar terowongan keadaan umum (Rai	
			dkk., 2014)	23
	Gambar	12	Klasifikasi rock mass failure (Sandy dkk., 2010)	27
			Bagian-bagian terowongan (Mahabrata, 2023)	
			Skema pengukuran <i>convergence</i> (Mahabrata, 2023)	
			Perbedaan arah perambatan gelombang S dan P (Hasegawa et al.,	
			1989)	32
	Gambar	16	Kerusakan massa batuan akibat rockburst (Kaiser et al., 1996)	
			Radius zona keruntuhan dan faktor reduksi tegangan (SRF)	
			(Borton, 1994)	39
	Gambar	18	Kondisi pembebanan static dan seismic (Kaiser et al., 1996)	
			Geometri excavation baggage (Kaiser et al., 1996)	
			Perilaku batuan terhadap kondisi tegangan (Diederichs, 2007)	
			Prediksi spalling secara empiris (Diederichs et al., 2007)	
	Gambar	22	Model Deswik lokasi penelitian	49
	Gambar	23	Distribusi stress dari cave dan seismic di area abutment	50
	Gambar	24	Model Map3D lokasi penelitian	50
	Gambar	25	Karakteristik penambangan Grasberg Block Cave (GBC)	51
	Gambar	26	Inti bor GRS Phillic Undiff	52
	Gambar	27	Heading mapping: (a) UCUT PB3C DD16S; (b) UCUT PB3C	
			DD16S; (c) UCUT PB2N DD15S; (d) UCUT PB2N DD17S (e)	
			EXTN PB2N P14 DP46-47; (f) EXTN PB2N P15 DP45-46	54
	Gambar	28	Damage mapping level undercut: (a) UCUT PB3C DD16S; (b)	
			UCUT PB3C DD16S; (c) UCUT PB2N DD15S; (d) UCUT PB2N	
			DD17S	56
	Gambar	29	Damage mapping level extraction: (a) EXTN PB2N P14 DP46-	
			47; (b) EXTN PB2N P15 DP45-46	56
-	Camban	30	Stage kemajuan caving dari frame 69 sampai 150	57
707	DF		Sequence penambangan block caving di GBC	
	70		Excavation stress magnitudes di lokasi penelitian	
	7		Excavation stress ratios and orientation di lokasi penelitian	
			Kriteria keruntuhan massa batuan di lokasi penelitian	
- 100			1	



Gambar 35 Hubungan antara Bulking Factor (BF) dan cave distance	. 62
Gambar 36 Monitoring <i>convergence</i> : (a) Hasil pengukuran di area penelitian;	
(b) Alat convergence	. 63
Gambar 37 Model solid drift survey scan UCUT PB3C DD16S	. 65
Gambar 38 Model solid drift survey scan UCUT PB3C DD17N	
Gambar 39 Model solid drift survey scan UCUT PB2N DD17S	
Gambar 40 Model solid drift survey scan UCUT PB2N DD15S	
Gambar 41 Model solid drift survey scan EXTN PB2N P14 DP46-47	. 67
Gambar 42 Model solid drift survey scan EXTN PB2N P15 DP45-46	. 67
Gambar 43 Section model dan sistem drift survei scan	. 68
Gambar 44 Alat monitoring microseismic	. 68
Gambar 45 Hasil record microseismic	
Gambar 46 Pemantauan microseismic magnitudo 2,1	. 71
Gambar 47 Pemantauan microseismic magnitudo 1,9	
Gambar 48 Pemantauan microseismic magnitudo 0,8	. 72
Gambar 49 Pemantauan microseismic magnitudo 0,7	. 72
Gambar 50 Pemantauan microseismic magnitudo 1,1	. 73
Gambar 51 Tahapan analisis menggunakan RS2	
Gambar 52 Perbandingan skenario hasil numerical terhadap analytical	
Gambar 53 Diagram alir penelitian	. 80
Gambar 54 Perbandingan perubahan DOF spalling dan strainburst	
Gambar 55 Hasil scalling law method PPV dengan magnitudo signifikan	. 84
Gambar 56 Interpretasi FEM pada lokasi penelitian	. 86
Gambar 57 Perbandingan tegangan tangensial dan radial di lokasi penelitian	. 88
Gambar 58 Hubungan regresi antara PPV terhadap tegangan terinduksi	. 89
Gambar 59 Uji lineritas (Ramsey test) PPV terhadap tegangan tangensial	. 90
Gambar 60 Uji autokorelasi (LM test) PPV terhadap tegangan tangensial	. 91
Gambar 61 Uji normalitas (Jarque Bera) PPV terhadap tegangan tangensial	
Gambar 62 Uji heteroskedastisitas PPV terhadap tegangan tangensial	. 91
Gambar 63 Uji lineritas (Ramsey test) PPV terhadap tegangan radial	. 92
Gambar 64 Uji autokorelasi (LM test) PPV terhadap tegangan radial	. 93
Gambar 65 Uji normalitas (Jarque Bera) PPV terhadap tegangan radial	. 93
Gambar 66 Uji heteroskedastisitas (Glejser) PPV terhadap tegangan radial	
Gambar 67 Hubungan antara omax/oc dan Rf/a berdasarkan PPV	
Gambar 68 Hubungan antara PPV dan C2 untuk prediksi DOF	. 96



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Klasifikasi Rock Quality Designation (RQD)	15
Tabel 2 Parameter Rock Mass Rating (RMR)	
Tabel 3 Faktor A dan B tiap bukaan	23
Tabel 4 Nilai disturbance factor	26
Tabel 5 Skala kerusakan rockburst	33
Tabel 6 Depth of failure (DOF) dan Rock Damage Levels (RDL)	40
Tabel 7 Bulking factor massa batuan	43
Tabel 8 Nilai koefisien korelasi	47
Tabel 9 Karakteristik geologi domain Grasberg Block Cave (GBC)	52
Tabel 10 Sifat fisik dan mekanik area penelitian	53
Tabel 11 Pembobotan nilai RMR pada lokasi penelitian	54
Tabel 12 Hasil report damage mapping pada lokasi penelitian	57
Tabel 13 Koordinat lokasi penelitian yang digunakan	59
Tabel 14 Parameter standar pada operasi stress tensor dan GSST	59
Tabel 15 Data stress insitu lokasi penelitian	61
Tabel 16 Data cummulative displacement dan bulking factor lokasi penelitian	64
Tabel 17 Spesifikasi bolt type	73
Tabel 18 Spesifikasi surface support.	74
Tabel 19 Hasil analisis DOF spalling dan strainburst	81
Tabel 20 Hasil analisis scalling law untuk PPV lokasi penenlitian	84
Tabel 21 Hasil analisis model FEM pada lokasi penelitian	86
Tabel 22 Variabel regresi PPV terhadap perubahan tegangan terinduksi	88
Tabel 23 Perhitungan stress level dan radius failure berdasarkan PPV	94
Tabel 24 Perbandingan DOF aktual dan prediksi berdasarkan PPV	99
Tabel 25 Penentuan <i>support capacity</i> pada lokasi penelitian	99

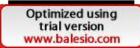


DAFTAR SIMBOL DAN ARTI SINGKATAN

Singkatan	Arti dan Keterangan
ASTM	American Society for Testing and Materials
BF	Bulking Factor
BG	Big Gossan
CI	Crack Initiation
CD	Capacity Displacement
DD	Drill Drift
DMLZ	Deep Mill Level Zone
DOD	Depth of Damage
DOF	Depth of Failure
DOZ	Deep Ore Zone
DP	Drawpoint
EXTN	Extraction
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
FS	Factor of Safety
GBC	Grasberg Block Cave
GBT	Gunung Bijih Timur
GSI	Geological Strength Index
GSST	Ground Support Scooping Tool
IOZ	Intermediate Ore Zone
ISRM	International Society for Rock Mechanics
KL	Kucing Liar
LHD	Load Haul Dump
N	North
P	Panel
PPV	Peak Particle Velocity
PB	Production Block
PTFI	PT Freeport Indonesia
Q	Quarter
Rf	Radius of Failure
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
S	South
SD	Scaled Distance
SL	Stress Level
V.	Stasiun
CUT	Undercut
SS 1	Uniaxial Compressive Strength
~~	The state of the s



3 Underground



DAFTAR SIMBOL DAN ARTI SINGKATAN

Lambang	Arti dan Keterangan
A	Konstanta untuk atap
A	Luas permukaan
a	Radius ekuivalen
a	Konstanta Hoek-Brown
В	Konstanta untuk dinding
BF	Bulking factor
C	Empirical Constan
C	Kohesi
ci	Crack initiation
Co	Kecepatan gelombang P atau S
Cs	Kecepatan gelombang geser
D	Disturbance factor
D	Diameter sampel
D_{eq}	Diameter ekuivalen bukaan
Df	Depth of failure
E	Modulus young
E	Energi seismic yang terpancarkan
e	Konstanta euler
E_i	Modulus young intact
E_{rm}	Modulus young rock mass
F	Gaya
f	Frekuensi gelombang seismic
g	Percepatan gravitasi
Н	Height
J	Integral spektrum velocity power
Jv	Volumetric joint
k	Rasio tergangan horisontal/vertikal
L	Panjang sampel
ln	Logaritma natural dengan basis e
m	Konstanta Hoek-Brown
m_b	Konstanta massa batuan Hoek-Brown
m_i	Konstanta intact batuan Hoek-Brown
n	Sudut yang dibentuk antara sigma 1 dan gelombang <i>seismic</i>
A <i>A</i> ,	Moment Magnitudo
	Jarak dari sumber event seismic
	Koefisien korelasi
•	Koefisien determinasi
	Pengaruh jarak dari event seismic



Rf Radius of failure

s Konstanta Hoek-Brown
SenN Koordinat North sensor
SenE Koordinat East sensor
SenD Koordinat Elevation sensor

SrcDist Jarak dari sumber

 U_{df} Displacement di batas galian U_{w} Displacement di radius of failure

W Width

X Koordinat tiga dimensi untuk posisi X
 Y Koordinat tiga dimensi untuk posisi Y
 Z Koordinat tiga dimensi untuk posisi Z

λ Jumlah rata-rata kekar per meter

nNisbah poisson ρDensitas σTegangan

Tegangan utama mayor σ_1 Tegangan utama minor σ_3 Kuat tekan uniaxial σ_c Kuat tekan uniaxial intact σ_{ci} Tegangan horizontal σ_H Tegangan maksimum σ_{max} Tegangan tangensial $\sigma_{ heta heta}$ Tegangan radial $\sigma_{\rm rr}$ Tegangan geser $\sigma_{
m heta r}$

 σ_d Tegangan dinamik (*seismic*) $\Delta \sigma_{max}$ Penambahan tegangan maksimum

 σ_n Tegangan normal σ_V Tegangan vertikal

 θ Sudut σ_I terhadap sumbu horisontal



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Peta Lokasi Penelitian	106
-	Peta Geologi	
-	Heading Inspection Sheet	
-	Data Stress Tensor	
-	Data Monitoring Convergence	
Lampiran 6	Data Estimasi Bulking Factor	131
-	Section Drift Survei Scan	
-	Data Trial and Error FEM	
	Data Record Seismic	
	O Hasil Analisis Model FEM	
•	1 Kartu Konsultasi Tugas Akhir	



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan judul "Analisis Perubahan Tegangan Terinduksi terhadap DOF Spalling dan Strainburst Akibat Pengaruh PPV Event Seismic dengan Model FEM di Area Abutment". Karya tulis ini merupakan salah satu syarat kelulusan mata kuliah Tugas Akhir (TA) Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, sekaligus juga menjadi salah satu syarat dalam pelaksanaan Internship Program 2023 PT Freeport Indonesia pada Tahun 2023. Secara umum, laporan ini membahas adanya perubahan tegangan terinduksi yang dihasilkan pada lubang bukaan di area abutment GBC PT Freeport Indonesia pada keadaan spalling ke strainburst yang ditinjau dari pengaruh pembebanan static ditambah dengan pembebanan seismic berdasarkan pemodelan numerik FEM yang telah dilakukan.

Tidak ada kata yang layak untuk menggambarkan besarnya rasa terimakasih penulis bagi semua pihak yang telah memberikan dukungan, tenaga, serta ilmunya dalam penyusunan laporan Tugas Akhir yang sederhana ini. Penulis berharap dengan selesainya laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan berkat bagi semua pihak yang terlibat dalam penyusunan laporan ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini tidak dapat diselesaikan dengan baik tanpa adanya dukungan dari beberapa pihak. Pada kesempatan kali ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada Kedua orang tua serta keluarga besar penulis yang selalu memberikan dukungan doa yang tiada hentinya kepada penulis. Terima kasih yang tiada hentinya kepada Bapak Emanuel Kemong dan Ibu Yohana Rasse Manda' atas segala doa yang senantiasa diberikan serta rasa cinta yang tiada henti diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini.

Terima kasih pula penulis sampaikan kepada Bapak Dr. Eng. Purwanto, ST. MT. selaku Pembimbing utama yang senantiasa meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan ilmu yang bermanfaat dan motivasi bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih juga kepada seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin atas bantuan yang telah diterima selama melakukan penyusunan skripsi ini.

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada PT Freeport Indonesia yang telah memfasilitasi penulis dalam membantu pelaksanaan penelitian ini. Divisi Geoengineering PTFI terutama Departemen UG Geotech GBC PTFI yang telah memberikan kesempatan dan dukungan sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik sampai pada pembuatan laporan ini. Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada Bapak Ir. Daulat Napitupulu, ST. MT. IPM. selaku manager UG Geotechnical Engineer GBC dan Bapak Bagea Kriska, ST. MT. selaku mentor internship pada penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih juga kepada seluruh rekan-rekan UG Geotechnical GBC yang telah memandu penulis dalam penelitian yang tidak bisa disebutkan satu per satu.



Perjalanan panjang penulis dalam dunia perkuliahan hingga penyusunan lak lepas dari bantuan, semangat, diskusi yang bermanfaat dan dinamika pertemanan oleh teman-teman di Teknik Pertambangan Universitas lin Angkatan 2019 tetap genggam tali persaudaraan diantara kita, Panjang uk hal-hal baik, terima kasih saudara-saudaraku.

Penulis mengakui bahwa penelitian ini masih memiliki banyak kekurangan. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak untuk membantu pengembangan dari penelitian ini demi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di masa depan serta agar dapat meminimalisir kekurangan dan keterbatasan penulis dalam penyusunan laporan penelitian ini. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun seluruh pembaca. Akhir kata, penulis mengucapkan sekian dan terima kasih.

Gowa, 25 April 2024

Faidel Afrian Kemong



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Grasberg Block Cave (GBC) dalam melakukan pencarian badan bijih akan menyebabkan proyek penambangannya akan mengeksploitasi jauh lebih dalam pada tambang bawah tanah. Penambangan pada kedalaman yang besar, dengan kekuatan tektonik regional yang tinggi dikombinasikan dengan geologi tertentu dan kondisi geoteknis sering menginduksi event seismic yang dapat menyebabkan terjadinya rockburst. Rockburst adalah kerusakan pada lubang bukaan yang terjadi secara tiba-tiba dan keras yang berasosiasi dengan event seismic seperti strainburst. Seismic adalah rambatan energi yang disebabkan karena adanya deformasi inelastic yang terjadi secara tiba-tiba dalam massa batuan. Event seismic biasanya terjadi pada massa batuan keras yang terletak pada kedalaman yang relatif dalam dan kondisi tegangan yang tinggi. Massa batuan dapat runtuh secara tiba-tiba karena tegangan yang diterima dan menghasilkan gelombang seismic yang diakibatkan oleh perekahan. Hal ini terjadi karena kedalaman yang semakin dalam akan menciptakan kondisi tegangan insitu maupun terinduksi yang besar, sedangkan batuan yang brittle dapat menyimpan sejumlah energi regangan sebelum massa batuan tersebut runtuh. Depth of Failure (DOF) merupakan kedalaman kerusakan massa batuan yang disebabkan oleh tegangan terinduksi baik secara *insitu* maupun akibat aktivitas penambangan seperti undercutting dan mucking yang dapat memicu terjadinya event seismic (Kaiser et al., 1996; Diederich et al., 2010).

Spallling dan strainburst merupakan kerusakan lubang bukaan yang pernah terjadi di area penambangan GBC dimana keadaan batuan mengalami ledakan akibat terjadinya pelepasan energi secara tiba-tiba di bawah pengaruh tegangan yang tinggi di sekitar cave. Strainburst terjadi karena adanya perubahan tegangan karena kedekatan dengan penambangan yang dipicu oleh gelombang seismic sehingga telah mencapai kekuatan puncak dari massa batuan tersebut.



eimbangan antara energi yang tersimpan dan energi yang dilepaskan dalam massa batuan akan membentuk kerusakan *spalling* pada massa belum terjadinya *strainburst*. Kerusakan ini dapat terjadi terutama di area

abutment, yaitu area dengan distribusi tegangan tinggi yang terjadi di pinggiran cave baik pada level undercut maupun level extraction. Hal ini karena lubang bukaan di area abutment, sudah mengalami tegangan vertikal tinggi akibat akumulasi tegangan secara insitu dan dari cave. Event seismic merupakan sumber energi yang dapat memberikan tambahan tegangan ke lubang bukaan yang berada pada jarak tertentu sehingga akumulasi tegangan vertikal tinggi tersebut ditambah tegangan dari event seismic akan berpotensi memberikan kerusakan lubang bukaan (Cai dan Kaiser, 2018; Bartlett dan Nesbitt, 2000; Hasegawa et al., 1989).

Sebagian besar kejadian *rockburst* di Grasberg Block Cave (GBC) digolongkan sebagai strainbust. Event seismic tersebut telah terekam pada tingkat penambangan GBC. Semua orang yang bekerja di tambang bawah tanah harus mengetahui dan menyadari bahaya yang berhubungan dengan seismic, dimana salah satu kontrol seismic yang dapat dilakukan yaitu memahami perilaku lubang bukaan akibat kejadian seismic. Kebutuhan untuk memastikan kondisi penambangan yang aman dengan menerapkan praktik desain yang memadai untuk memitigasi strainburst sangat diperlukan. Meskipun prosedur dan solusi untuk ground support telah diusulkan dan diterapkan dengan baik di GBC, akan tetapi penting untuk memverifikasi pendekatan yang telah dilakukan tersebut. Keperluan desain sistem pendukung bisa dilakukan dengan memodelkan lubang bukaan secara numerik baik dalam kondisi pembebanan static maupun seismic. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan untuk menunjukkan intensitas tegangan seismic secara relatif adalah *Peak Particle Velocity* (PPV) karena parameter ini merupakan parameter awal ketika seismic terekam dan memiliki pengaruh terhadap distribusi tegangan terinduksi. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perubahan tegangan terinduksi terhadap Depth of Failure (DOF) spalling dan strainburst yang diakibatkan oleh adanya pengaruh dari event seismic dengan nilai Peak Particle Velocity (PPV) tertentu menggunakan model Finite Element Method (FEM) di area abutment, Grasberg Block Cave (GBC) PT Freeport Indonesia.

Rumusan Masalah



ari latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu: erapa nilai perubahan tegangan terinduksi berdasarkan perubahan *Depth Failure* (DOF) dari keadaan *spalling* menjadi *strainburst*?



- 2. Bagaimana hubungan antara pembebanan dari *event seismic* terhadap perubahan tegangan terinduksi akibat perubahan DOF tersebut?
- 3. Bagaimana prediksi DOF yang telah mempertimbangkan pengaruh pembebanan *static* dan *seismic* berdasarkan hasil analisis *event seismic*?
- 4. Berapa nilai *capacity support* yang dibutuhkan pada lokasi penelitian berdasarkan analisis pembebanan *static* dan *seismic*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang dicapai dari penelitian ini yaitu:

- 1. Menganalisis perubahan tegangan terinduksi berdasarkan perubahan *Depth* of Failure (DOF) dari keadaan spalling menjadi strainburst dengan model numerik Finite Element Method (FEM).
- 2. Menganalisis hubungan antara *Peak Particle Velocity* (PPV) dari hasil monitoring *event seismic* terhadap perubahan tegangan terinduksi berdasarkan hasil pemodelan FEM tersebut.
- 3. Memprediksi persamaan DOF yang telah memperhitungankan pengaruh pembebanan *static* dan *seismic* berdasarkan hubungan regresi PPV terhadap perubahan tegangan terinduksi yang dihasilkan.
- 4. Menentukan nilai *support capacity displacement* yang dibutuhkan pada lokasi penelitian berdasarkan hasil analisis DOF prediksi di bawah pembebanan *static* dan *seismic*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini yaitu:

- Untuk Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, semoga hasil penelitian ini dapat memberikan tambahan ilmu pengetahuan khususnya berkaitan dengan kestabilan lubang bukaan dan menjadi salah-satu acuan referensi untuk dilakukan penelitian selanjutnya.
- 2. Untuk perusahaan PT Freeport Indonesia, semoga hasil penelitian ini dapat menjadi bahan masukan dalam menentukan faktor keamanan lubang bukaan engan memprediksi nilai DOF berdasarkan hasil monitoring yang lakukan serta juga sebagai pertimbangan dalam melakukan rancangan esain sistem penyanggaan dengan mempertimbangkan pengaruh embebanan *static* dan *seismic* terhadap nilai DOF yang dihasilkan.



1.5 Ruang Lingkup

Limitasi masalah pada penelitian ini yaitu:

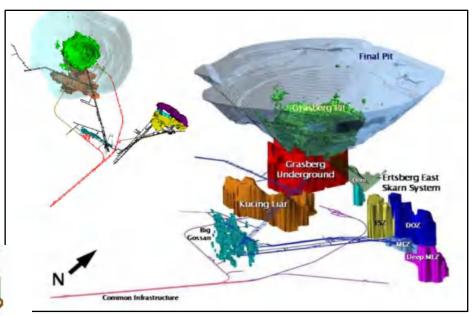
- 1. Penelitian ini dilakukan pada lubang bukaan yang telah mengalami *strainburst* di area *abutment* Grasberg Block Cave (GBC) PT Freeport Indonesia dan hanya mengkaji signifikan *event seismic* yang terjadi pada waktu tersebut berdasarkan data *historical* hasil *report* Departemen UG Geotech GBC PTFI 2021.
- Nilai properties batuan yang digunakan berdasarkan data perusahaan PT
 Freeport Indonesia. Hasil *field mapping* geologi menggunakan klasifikasi
 RMR (1989). Pemodelan dilakukan secara numerik dengan *Finite Element*Method (FEM) menggunakan software RS2 dan berdasarkan kriteria
 keruntuhan generalized hoek-brown.
- 3. Nilai tegangan terinduksi akibat *event seismic* dilakukan dengan cara *trial* and error pada software RS2 dengan melakukan penyesuaian perubahan DOF dengan beberapa skenario sampai didapatkan hasil yang mendekati kondisi aktual dan grafik hubungan berupa logaritma. Nilai Bulking Factor (BF) diperoleh dari hasil penelitian Departemen UG Geotech GBC PTFI dan nilai Peak Particle Velocity (PPV) pada area damage ditentukan dengan scaling law method berdasarkan nilai PPV yang diperoleh dari hasil monitoring sensor seismic yang terbaca pada area tersebut.
- 4. Asumsi yang digunakan pada penelitian ini yaitu pemodelan dilakukan dengan mengganggap material bersifat elastis pada keseluruhan model dan untuk keperluan analisis regresi lubang bukaan dalam keadaan *strainburst* hanya ditinjau berdasarkan *event seismic* yang signifikan pada waktu tersebut berdasarkan kondisi rata-rata dari masing-masing lubang bukaan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Metode Block Caving

PT Freeport Indonesia yang sering disebut sebagai PTFI merupakan salah-satu perusahaan Indonesia yang bergerak di bidang pertambangan mineral berupa tembaga, emas, dan perak yang terletak di dataran tinggi Pegunungan Sudirman, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua. Pada awalnya, sistem penambangan yang dilakukan oleh PTFI terbagi menjadi dua jenis, yaitu metode tambang terbuka (open pit mining) dan metode tambang bawah tanah (underground mining). Open pit mining dicirikan dengan bentuk tambang berupa kerucut terbalik di permukaan bumi, serta tanah penutup dikupas dan diangkut ke suatu daerah pembuangan yang tidak ada endapan mineral dibawahnya. Sistem penambangan bawah tanah (underground mining) terdiri dari beberapa area penambangan dimana tambang bawah tanah Deep Ore Zone (DOZ) yang saat ini telah memasuki fase penutupan tambang, sedangkan area kerja yang saat ini aktif atau sedang dipersiapkan adalah tambang Grasberg Block Cave (GBC), Deep Mill Level Zone (DMLZ), dan Kucing Liar (KL) dengan metode penambangan block caving serta Big Gossan (BG) dengan metode penambangan open stope dimana pembagian setiap area penambangan tersebut dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



rambar 1 Tampilan tambang bawah tanah PT Freeport Indonesia (PFTI)

Optimized using trial version www.balesio.com

PDF

Operasi penambangan bawah tanah yang dilakukan di Grasberg Block Cave (GBC) menggunakan metode ambrukan blok (block caving) yaitu metode penambangan bawah tanah yang dilakukan dengan membuat daerah ambrukan, sehingga terjadi perambatan ambrukan (cave propagation) akibat beban dari bijih yang telah hancur diatasnya dapat dilihat pada Gambar 2. Metode penambangan block caving atau peruntuhan secara gravitas dilakukan dengan meruntuhkan badan bijih secara masif dan berurutan dari level undercut di atasnya untuk kemudian dilakukan penarikan secara seimbang pada level extraction di bawahnya. Metode ini memungkinkan penambangan pada badan bijih yang dapat runtuh oleh beratnya sendiri kemudian masuk ke ruangan-ruangan pengambilan (drawbell atau drawpoint) yang telah di sediakan sebelumnya. Metode penambangan ini memungkinkan untuk dilakukannya produksi dalam jumlah yang besar dan dengan pengontrolan stabilitas bukaan secara lebih baik. Metode penambangan ini umumnya digunakan pada badan bijih ukuran besar dan memiliki nilai kandungan mineral dengan kadar angka yang relatif konstan. Penambangan block caving ini juga tepat di gunakan untuk melanjutkan produksi penambangan yang sebelumnya dilakukan dengan metode *open pit* dari lokasi terbuka (Toba, 2020).



Gambar 2 Ilustrasi zona penambangan block caving (PTFI)

enambangan *block caving* dimulai dengan membangun *undercut level* aknya berada di bawah badan bijih. *Level* ini terdiri dari beberapa an yang akan digunakan sebagai akses dalam menghancurkan badan bijih



di sekitarnya (undercutting). Level ini akan diledakkan secara progresif mengikuti tahap kemajuan dari level di bawahnya. Di bawah undercut level terdapat production level atau extraction level, level ini diperlukan sebagai tempat untuk mengekstraksi bijih yang telah hancur akibat proses undercutting. Di antara undercut level dan production level terdapat lubang vertikal yang dimanfaatkan untuk menyalurkan bijih yang disebut sebagai drawbell. Material yang sudah hancur ini akan dimuat dan diangkut (mucking) oleh alat Load Haul Dump (LHD), tempat penggalian material ini disebut dengan drawpoint. Penarikan material yang sudah hancur akan meninggalkan ruang sehingga tidak ada material yang menopang batuan di atasnya, kondisi ini akan menyebabkan terjadinya ambrukkan dari material yang menggantung. Proses ini berjalan secara terus menerus sampai keseluruhan badan bijih dapat diekstraksi. LHD hanya akan mengangkut material sampai ke lokasi grizzly dan menumpahkannya. Material tersebut akan mengalir melalui ore pass ke haulage level. Haulage level merupakan level yang terletak di bawah production level dan berfungsi sebagai jalan angkut untuk membawa material sampai ke crusher. Block caving dapat dikatakan sebagai metode penambangan yang dilakukan secara teratur dan berbiaya rendah (Brown, 2003).

Peledakan *undercutting* dilakukan sebagai tahap awal pembentukan ambrukan dan produksi bijih. Peledakan ini dilakukan dengan memotong badan bijih bagian bawah secara bertahap. Hal ini akan membentuk rongga kosong yang memicu terbentuknya ambrukan awal dan tegangan terinduksi. Semakin banyak bijih hancuran yang diledakkan maupun diambil, massa batuan bijih diatasnya akan ikut hancur akibat tegangan terinduksi dan gravitasi. Kegiatan *undercutting* ini juga menyebabkan timbulnya *zona seismogenik* yang mana *seismic* berasal dan terkonsentrasi sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar 3. Zona ini terletak di antara massa batuan yang terganggu akibat *undercutting* (*zone of loosening*) dan zona massa batuan yang utuh (*pseudo-continuous domain*). Model konseptual dari proses ambrukkan batuan melalui menggunakan *seismic monitoring system* terdiri atas 5 zona yakni (Duplancic dan Brady, 1999):



aved Zone

ona ini adalah tempat menumpuknya batuan yang telah hancur dan runtuh ari *cave*.



2. Air Gap

Zona ini merupakan tempat udara mengisi ruang kosong akibat material yang ambruk secara terus menerus.

3. Zone of loosening atau yield zone

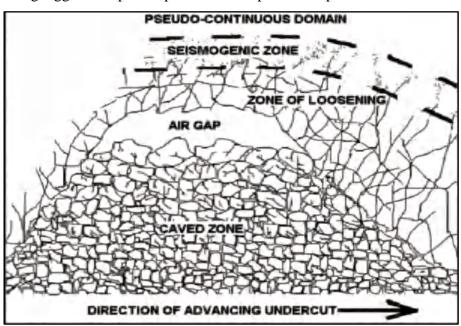
Zona ini merupakan tempat massa batuan mengalami deformasi plastik. Massa batuan sudah tidak mampu menahan tegangan tangensial yang terinduksi dan terbentuk rekahan-rekahan akibat bebannya sendiri.

4. Seismogenic Zone

Zona merupakan tempat dimana keterdapatan aktivitas *seismic* akibat terjadinya keruntuhan batuan secara getas. Zona ini masuk ke dalam zona yang sudah terganggu tegangan.

5. Pseudo-Continous Domain atau Elastic Zone

Zona ini merupakan tempat batuan masih utuh dan tidak mengalami deformasi plastik. Zona ini berada di sekitar *seismogenic zone* dan belum terganggu. Setiap zona pada model dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Model konseptual proses block caving (Duplancic, 2001)

Penambangan metode ambrukan yang telah mencapai jari-jari hidrolik atau *radius* (HR) akan mengakibatkan ambrukan secara otomatis terjadi, nerambat ke atas dan menyebar ke badan bijih tanpa diperlukan peledakan ara umum, ada tiga jenis *undercutting* yang biasa digunakan pada ngan metode ambrukan yaitu (Wattimena, 2003):



trial version www.balesio.com

1. Post-undercutting atau conventional undercutting

Strategi ini dilakukan dengan *undercutting* badan bijih setelah level ekstraksi dan *drawpoint* selesai dibangun. *Drawbell* dipersiapkan tepat di depan dari *face undercut* dan siap untuk menyalurkan bijih yang diledakkan ke level ekstraksi.

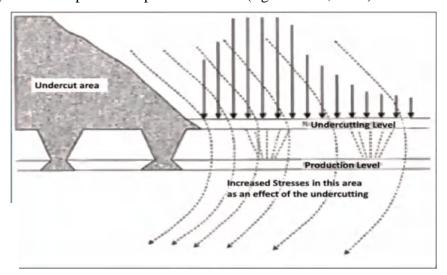
2. Pre-undercutting

Strategi ini dilakukan dengan *undercutting* badan bijih sampai mencapai jari-jari hidrolik sebelum pembangunan level ekstraksi dan *drawpoint* dibawahnya.

3. Advance Undercutting

Strategi ini dilakukan dengan *undercutting* muka tambang lebih maju sedikit dari level ekstraksi yang telah dibangun sebagian. Pembangunan penuh level ekstraksi selesai dilakukan setelah *undercutting* melewati *drawbell*, biasanya menggunakan pendekatan 45-*degree rule*.

Material yang runtuh dan ruang kosong yang ditinggalkan menyebabkan tegangan mengalami redistribusi atau konsentrasi tegangan pada tahap *undercutting* dikenal sebagai *abutment stress*. Peristiwa ini membuat batuan utuh yang berada di sekitar area ambrukkan mengalami tegangan terinduksi yang tinggi. Zona *abutment* ini berada di sekitar area runtuhan yang dapat mempengaruhi stabilitas terowongan hingga jarak rata-rata sekitar 20 meter dari batas ambrukkan. Perkembangan *cave* menyebabkan bukaan yang berada di bawah area runtuhan menerima perubahan tegangan *insitu* dapat dilihat pada Gambar 4 (Egana *et al.*, 2017).



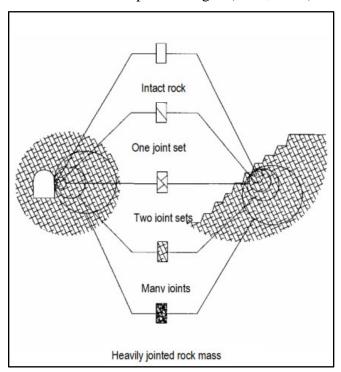


Gambar 4 Redistribusi tegangan di area *abutment* (Egana *et al.*, 2017)



2.2 Klasifikasi Massa Batuan

Klasifikasi massa batuan merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk merancang desain lubang bukaan bawah tanah. Klasifikasi massa batuan sudah dikembangkan lebih dari 100 tahun lalu sejak Ritter (1879) mencoba melakukan pendekatan empiris untuk perancangan terowongan, khususnya untuk kebutuhan penyanggaan (Hoek *et al.*, 1995). Pada perencanaan ambrukan untuk produksi formulasi massa batuan menjadi inputan penting dalam menentukan bagaimana tambang didesain demi mendapatkan hasil yang optimal. Dalam situasi ini kajian klasifikasi massa batuan memungkinkan ambrukan dilakukan dengan baik sehingga analisis stuktur geologi akan menjadi faktor utama dalam menentukan kestabilan akibat aktivitas penambangan (Toba, 2021).



Gambar 5 Transisi dari batuan utuh ke massa batuan (Hoek dan Brown, 1997)

Berdasarkan Gambar 5, kajian terhadap stuktur geologi batuan dilakukan melalui studi dan interpretasi pada deformasi yang terjadi pada kerak bumi. Deformasi batuan dapat menyebabkan terjadinya perubahan dan umumnya analisis

rencanaan pola operasi terhadap kebutuhan penyanggaan. Kebutuhan ngan perencanaan operasi berkenaan dengan stuktur geologi tersebut kayasa geoteknis dengan paramater massa batuan, yakni deskripsi secara

umum untuk rating geoteknis dan pengelompokan kelas batuan, penetapan zona berdasarkan kualitas dan kelas batuan serta stuktural domain (Toba, 2022).

2.2.1 Rock Mass Rating (RMR)

Rock Mass Rating (RMR) atau geomechanics classification system merupakan klasifikasi massa batuan yang pertama kali diusulkan oleh Bieniawski (1973) untuk menunjang penentuan kelas batuan dalam konstruksi terowongan. Pada tahun 1989, Bieniawski mempublikasikan rock mass rating yang sampai saat ini telah banyak digunakan dan diaplikasikan untuk keperluan rekayasa batuan, sistemini dikenal sebagai RMR89. Klasifikasi ini meninjau beberapa parameter yang kemudian direpresentasikan ke dalam sebuah nilai atau bobot tertentu (rating) sesuai dengan kriterianya masing-masing. Parameter yang digunakan dalam klasifikasi massa batuan menggunakan sistem rock mass rating terdiri dari 6 komponen yang dijelaskan sebagai berikut (Bieniawski, 1989)

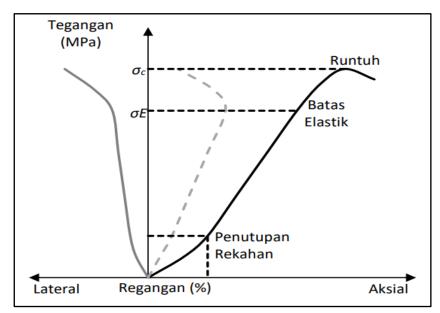
1. *Uniaxial Compressive Strength* (UCS)

Pengujian dapat dilakukan terhadap sampel yang diambil dari lapangan ke laboratorium untuk mengetahui kekuatan batuan, namun perilaku batuan yang terjadi di lapangan pada kondisi aslinya tetap perlu mendapatkan kajian dan evaluasi sehingga dapat memberikan justifikasi kombinasi antara metode formulasi empiris dan rekayasa mekanika (Toba, 2022). *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) adalah parameter yang menunjukkan nilai kuat tekan uniaksial dari sebuah sampelbatuan. Dalam klasifikasi massa batuan, nilai ini digunakan sebagai salah satu parameter dalam penentuan kelas batuan dan kekuatan massa batuan. Nilai kuat tekan batuan dapat diperoleh melalui uji UCS. Pada pengujian ini, sampel batuan yang umumnya berbentuk silinder akan ditekan pada satu arah (*uniaxial*) dalam kondisi tidak terkungkung (*unconfined*) sampai batuan tersebut pecah atau *failure*. Selain kuat tekan uniaksial, terdapat beberapa informasi yang bisa diperoleh dari pengujian ini, yaitu kurva tegangan-regangan, *modulus young*, dan *nisbah poisson*. Hasil uji kuat tekan uniaksial atau UCS yang meliputi pengukuran perpindahan aksial dan lateral,



ebanan vertikal, dan dengan memperhitungkan dimensi sampel batuan diperoleh kurva tegangan regangan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar agai berikut (Rai dkk., 2014).





Gambar 6 Kurva tegangan regangan uji UCS (Rai dkk., 2014)

Kuat tekan uniaksial (σc) adalah gambaran dari nilai tegangan maksimum yang dapat ditanggung sebuah sampel batuan sesaat sebelum sampel tersebut hancur atau runtuh (*failure*). Kuat tekan ini diperoleh ketika hanya tegangan pada arah aksial saja yang bekerja tanpa adanya tegangan pemampatan di sisi lateral. Kuat tekan uniaksial dapat diperoleh dari Persamaan 1 sebagai berikut (Rai dkk., 2014):

$$\sigma c = \frac{F}{A} \tag{1}$$

dimana,

 $\sigma c = Kuat tekan uniaksial (MPa)$

F = Beban saat sampel batuan pecah (N)

A = Luas permukaan kontak sampel (mm²)

Modulus young (E) atau modulus elastisitas adalah kemampuan batuan untuk mempertahankan kondisi elastisnya. Sampel batuan yang diberi pembebanan akan mengalami deformasi, yakni elastik dan plastik. Nilai modulus young didapatkan dari kemiringan kurva tegangan regangan dalam kondisi linier karena pada saat inilah sampel batuan mengalami deformasi astik. Kemiringan tersebut dapat ditentukan secara tangent, average aupun secant. Nilai modulus young dapat diperoleh melalui Persamaan 2 bagai berikut (Rai dkk., 2014):



$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon aksial} \tag{2}$$

dimana,

E = Modulus young (MPa)

 $\Delta \sigma$ = Beda tegangan (MPa)

 $\Delta \epsilon$ aksial = Beda regangan aksial

Nisbah poisson (v) atau *poisson's ratio* adalah nilai mutlak dari perbandingan antara regangan lateral dengan regangan aksial. Jika suatu material ditekan pada satu arah maka material tersebut cenderung meregang pada dua arah lainnya. Sebaliknya, jika suatu material meregang pada satu arah maka material tersebut akan mengerut pada dua arah lainnya. Dalam deformasi elastik mekanik, kecenderungan material untuk mengerut atau mengembang pada arah tegak lurus terhadap arah pembebanan dikenal sebagai efek poisson. Nisbah poisson pada uji kuat tekan uniaksial dapat dituliskan dengan Persamaan 3 sebagai berikut (Rai dkk., 2014):

$$v = \frac{\text{Elateral}}{\text{Eaksial}} \tag{3}$$

dimana,

v = Nisbah poisson

εlateral = Regangan lateral (%)

εaksial = Regangan aksial (%)

Regangan (ε) dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang terhadap panjang mula-mula. Regangan pada arah lateral maupun aksial dapat ditulis ke dalam Persamaan 4 sebagai berikut (Rai dkk., 2014):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \times 100\% \tag{4}$$

dimana,

 $\varepsilon = \text{Regangan}(\%)$

 $\Delta l = Perubahan panjang (mm)$

1 = Panjang mula-mula (mm)

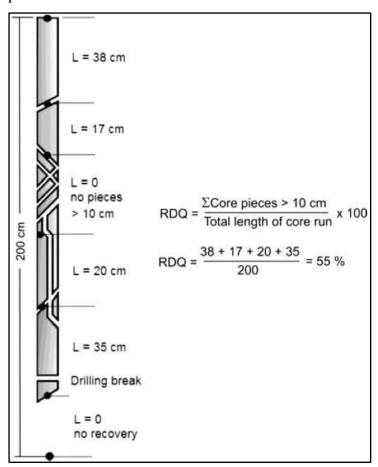
Rock Quality Designation (RQD)

Rock Quality Designation (RQD) pertama kali dikembangkan oleh eere (1964) pada tahun 1963 untuk memberikan perkiraan kuantitatif dari



kualitas massa batuan hasil pengeboran inti geoteknik. Indeks ini didefinisikan sebagai persentase jumlah kumulatif potongan inti bor yang memiliki panjang lebih dari 100 mm terhadap total panjang inti bor. Pengeboran inti harus berukuran NW (54,7 mm) dan menggunakan *doubletube core barrel*. Prosedur pengukuran panjang potongan inti dan perhitungan RQD dapat dilihat pada Gambar 7. Untuk estimasi RQD perlu dilakukan beberapa tahapan antara lain (Hoek, 2007):

- a. *Length* > 10 cm, pada tahap ini dimasukan panjang kumulatif *core* yang mempunyai panjang individual lebih dari 10 cm,
- b. % RQD, pada tahap ini dimasukkan angka RQD dalam persen,
- c. *Rating*, pada tahap ini dimasukkan angka *rating* RQD sesuai pada pembobotan klasifikasi massa batuan.



Gambar 7 Rock quality designation (Hoek, 2007)



QD mengindikasikan derajat kekuatan daya dukung batuan sehingga makin besar nilai RQD maka semakin tinggi kualitas massa batuan. lasifikasi RQD dapat dilihat pada Tabel 1 berikut (Deere *et al.*, 1989).

Tabel 1 Klasifikasi Rock	Quality Designation (RQD)
RQD (%)	Rock Mass Quality
0 – 25	Very poor
25 - 50	Poor
50 - 75	Fair
75 - 90	Good
90 - 100	Excellent
Sumbar: Doors at al. (1090)	

Sumber: Deere et al. (1989)

RQD telah dimanfaatkan secara luas dalam konteks rekayasa batuan, indeks ini digunakan sebagai salah satu komponen pada klasifikasi massa batuan yang lain seperti RMR (Bieniawski, 1973) dan Q-system (Barton, 1974). Ketika tidak tersedia inti bor tetapi diskontinuitas berupa kekar masih terlihat dari permukaan batuan, Priest dan Hudson (1976) menemukan bahwa nilai RQD dapat dihitung berdasarkan jarak rata-rata kekar yaitu:

$$RQD = 100 e^{0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$
 (5)

dimana,

 λ = Jumlah rata-rata kekar per meter (m⁻¹)

Selain itu, Palmstrom (1982) juga mengusulkan persamaan untuk memperkirakan nilai RQD dari jumlah kekar per satuan volume (*Jv*), yaitu:

$$RQD = 1,15 - 3,3Jv (6)$$

dimana,

Jv =Jumlah kekar volumetrik per satuan panjang (m⁻¹)

RQD adalah indeks yang bergantung pada arah pengeboran dan nilainya dapat berubah secara signifikan. Oleh karena itu, perhitungan menggunakan kekar volumetrik dapat berguna dalam mengurangi pengaruh orientasi.

3. Spacing of Discontinuities

Adanya kekar pada massa batuan cenderung akan memperburuk rakteristik mekanik massa batuan tergantung frekuensi atau jarak serta entasinya. Spasi bidang diskontinu adalah jarak tegak lurus antara bidang-dang diskontinuitas yang mempunyai kesamaan arah (Hoek, 2007).



4. Condition of Discontinuities

Ada beberapa parameter yang digunakan oleh Bieniawski (1989) dalam memperkirakan kondisi permukaan bidang diskontinu. Parameter yang mempengaruhi kondisi diskontinu tersebut antara lain:

- a. *Roughness*, atau kekasaran permukaan bidang diskontinu merupakan parameter yang penting untuk menentukan kondisi bidang diskontinu. Suatu permukaan yang kasar akan dapat mencegah terjadinya pergeseran antara kedua permukaan bidang diskontinu.
- b. Separation, merupakam jarak antara kedua kekar permukaan bidang diskontinu. Jarak ini biasanya diisi oleh material lainnya (filling material) dimana semakin besar jarak maka semakin lemah bidang diskontinu tersebut.
- c. Continuity, merupakan kemenerusan dari sebuah bidang diskontinu atau panjang dari suatu bidang diskontinu. Kemenerusan bidang diskontinu dapat diukur secara kasar dengan mengamati panjang kemenerusan bidang pada batuan yang tersingkap.
- d. *Weathering*, menjelaskan seberapa besar tingkat pelapukan yang dialami oleh batuan dapat ditentukan dengan melihat perubahan warna pada butir batuan dengan bantuan alat palu geologi.
- e. *Infilling (gouge)*, disebut juga sebagai material pengisi antara dua permukaan bidang diskontinu mempengaruhi stabilitas bidang diskontinu dikarenakan oleh faktor ketebalannya, konsisten atau tidaknya dan sifat mengembang bila terkena air dan berbutir sangat halus akan menyebabkan bidang diskontinu menjadi lemah.

5. Groundwater Conditions

Kondisi air tanah atau debit aliran air tanah akan mempengaruhi kekuatan massa batuan. Oleh sebab itu perlu diperhitungkan dimana untuk kondisi air tanah ditentukan dengan mengamati atap dan dinding lubang bukaan secara visual, kemudian dapat dinyatakan dengan keadaan umum seperti kering, mbab, air menetes atau air mengalir (Hoek, 2007).

rientation of Discontinuities

oreksi RMR dasar selanjutnya dilakukan berdasarkan arah penggalian





terowongan dan orentasi bidang diskontinu yang ada pada lokasi tersebut. Arah umum bidang diskontinu merupakan kedudukan relatif dari bidang diskontinu terhadap sumbu lintasan terowongan. disebut arah yang paling optimum ketika memberikan volume terkecil yang menyebabkan ketidakstabilan terowongan. Orentasi bidang diskontinu dianggap menguntungkan jika berarah tegak lurus terhadap sumbu terowongan dan akan merugikan jika searah sumbu terowongan. Data arah kekar didapatkan dari pengukuran kekar di lapangan dengan kompas geologi. Data yang didapat diolah dengan metode stereografis untuk menentukan arah umum kekar. Arah umum biasa dinyatakan dengan strike/dip atau dip/dip direction (ISRM, 1978).

Rekayasa penyanggah bukaan adalah di awali dengan melakukan kajian terhadap karakteristik massa batuan dan pengaruh dari kegiatan penggalian yang dilakukan pada lokasi setempat. Hal tersebut kemudian mendasari desain aplikasi penyanggah yang dilakukan melalui metode formulasi empiris (pengalaman dan kolaborasi riset dan uji coba melalui program *trial and error*) dan dengan kombinasi terhadap analisis mekanika, kajian perilaku batuan dan evaluasi stabilitas. Pertimbangan batuan yang sifatnya *non homogeneus* dengan berbagai macam bentuk stuktur geologi, diskontinu dan perlemahan, tentunya akan membuat perilaku deformasi batuan saat menerima pembebanan juga akan bervariasi. Nilai RMR digunakan untuk mengevaluasi kualitas dan derajat kekuatan batuab, mengidentifikasi area batuan rapuh dan pada kegiatan peledakan digunakan sebagai referensi untuk pemilihan bahan peledak dan geometri lubang ledak. Pada aktivitas pembuatan terowongan pembobotan nilai RMR digunakan sebagai aplikasi sistem penyangga yang tepat hingga rekayasa stuktur penopang (Toba, 2022)

Pembobotan keenam parameter RMR dapat dilihat berdasarkan Tabel 2 dimana bobot dari setiap parameter tersebut kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan nilai RMR yang selanjutnya digunakan untuk menetapkan kelas massa batuan yang representatif. Kelas massa batuan yang dinotasikan dengan



mawi dari I sampai V dapat dipakai dalam merekomendasikan metode in dan sistem penyanggaan terowongan dimana semakin besar nilai RMR nakin baik kualitas massa batuan (Warren, 2016).



Tabel 2 Parameter Rock Mass Rating (RMR)

A. (CLASSIFICAT	ION PARAMETERS	AND THEIR RATIN	NGS					
	Para	ameter			Range of values				
	Strength of intact rock	Point-load strength index (MPa)	> 10	4 – 10	2-4	1 – 2	_	s low i	is
1	material	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5	< 1
		Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core	quality RQD (%)	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 - 50		< 25	
2		Rating	20	17	13	8	3		
3	Spacing of Joints (m)		> 2	0.6 - 2	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	< 0.06		
3		Rating	20	15	10	8		5	
4	Condition of joints (See E)		Very rough surface, Not continuous, No separation, Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces, Separation < 1 mm, Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces, Separation < 1 mm, Highly weathered walls	Slickensided surface, Gouge 5 mm thick, Separation 1 - 5 mm, Continuous	Soft go mm thi Separa mm, Contin	ick, tion >	
		Rating	30	25	20	10		0	
		Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 – 25	25 – 125		> 125	
5	Groundwater	(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5		> 0.5	
		General Conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	F	lowing	ŗ
		Rating	15	10	7	4		0	_

B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)								
Strike and d	lip orientations	Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & Mines	0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60		

C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS							
Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20		
Class number	I	II	III	IV	V		
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		

D. MEANING OF ROCK CLASSES					
Class number	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 years for 15 m span	1 years for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m	30 minutes for 1 m span
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400	300 – 400	200 – 300	100 - 200	< 100
Friction angle of rock mass (deg)	> 45	35 – 45	25 - 35	15 – 25	< 15

E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY CONDITIONS										
Discontinuity length/persistence (m)	< 1	1 – 3	3 – 10	10 – 20	> 20					
Rating	6	4	2	1	0					
Separation/aperture (mm)	None	< 0.1	0.1 - 1.0	1 – 5	> 5					
Rating	6	5	4	1	0					
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided					
Rating	6	5	3	1	0					
Infilling/gouge (mm)	None	Hard filling < 5	Hard filling > 5	Soft filling < 5	Soft filling > 5					
Rating	6	4	2	2	0					
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed					
Rating	6	5	3	1	0					

F. E	F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING									
Strike perpendicular to tunnel axis			Strike parallel to tunnel axis							
Dı	Drive with dip (Dip $45 - 90^{\circ}$) Drive with dip (Dip $20 - 45^{\circ}$)		(Dip 45 – 90)	(Dip 20 – 45°)						
	avourable	Favourable	Very unfavourable	Fair						
PDF	dip (Dip 45-90°)	Drive against dip (Dip 20 – 45°)	Irrespective of strike (Dip 0 − 20°)							
00	Fair	Unfavourable	Fair							

niawski (1989)



2.2.2 Geological Strength Index (GSI)

Pada tahun 1997, Hoek dan Brown memperkenalkan *Geological Strength Index* (GSI). GSI merupakan salah satu klasifikasi massa batuan yang dikembangkan untuk membantu perancangan terowongan, lereng, atau fondasi dalam rekayasa batuan. GSI didasarkan atas 2 kriteria, yaitu struktur batuan dan kondisi permukaan pada Gambar 8. Parameter ini dinilai berdasarkan inspeksi kondisi geologi massa batuan yang dilakukan oleh geologi yang berpengalaman dan berkompeten secara visual. Indeks ini dapat digunakan dalam mengestimasi kekuatan dan modulus deformasi dari massa batuan. Selain itu, nilai GSI ini juga diperuntukkan sebagai parameter masukan pada analisis pemodelan numerik. Kelebihan dari GSI ialah metode ini mampu menggambarkan kondisi batuan yang kuat sampai batuan yang lemah. Hoek dan Brown (1997) memberikan persamaan empiris yang menunjukkan hubungan antara GSI dengan RMR89 sebagai berikut.

$$GSI = RMR_{89} - 5 \tag{7}$$

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.	SURFACE CONDITIONS	M VERY GOOD Solvey rough, fresh unweathered surfaces	6 GOOD B Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	구 > FAIR m Smooth, moderately weathered and altered surfaces 요	POOR Sickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	CES	90			N/A	N/A
BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	OF ROCK PIE		70			
VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	RECKING		//5			
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	DECKEASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES			///	30	
DISINTEGRATED - poorly inter- locked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	DEC.				20	//
LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	¥ -	N/A	N/A			10



Gambar 8 Diagram GSI standar (Hoek dan Marinos, 2000)

2.3 Tegangan Terinduksi

Menurut Kramadibrata (2012), tegangan dalam massa batuan dibagi menjadi tegangan alamiah (*insitu stress*) dan tegangan terinduksi (*induce stress*). Tegangan *insitu* merupakan tegangan dalam massa batuan sebelum penggalian dilakukan. Beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan insitu menurut Brady dan Brown (1985) adalah topografi permukaan, erosi, tegangan sisa, aktivitas tektonik dan bidang diskontinuitas. Salah satu tegangan *insitu* yaitu tegangan gravitasi yang terdiri dari tegangan vertikal dan tegangan horisontal. Secara teoritis tegangan vertikal dapat dinyatakan dengan rumus berikut (Rai dkk., 2014).

$$\sigma V = \rho g h \tag{8}$$

$$\sigma H = ko \, \sigma V \tag{9}$$

dimana,

 $\sigma V = Tegangan insitu vertikal (MPa)$

 $\sigma H = Tegangan insitu horisontal (MPa)$

 ρ = Densitas (Kg/m³)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

h = Kedalaman(m)

ko = Perbandingan tegangan horisontal dan vertikal

Pendekatan teoritis untuk menentukan tegangan horizontal lebih sulit dilakukan dibandingkan dengan menentukan tegangan vertikal. Untuk kedalaman (h) yang dalam sekali, keadaan tegangannya pada umumnya menjadi hidrostatik, yaitu k=1. Hal ini dengan hipotesis yang sederhana yaitu *isotropi*, *homogenitas* dan perilaku *geologi* dari massa batuan. Tegangan residual dan tektonik memungkinkan ada dalam massa batuan dan dapat merubah keadaan tegangan yang sudah ada. Sehingga keadaan tegangan yang sebenarnya dapat sangat berbeda dengan tegangan yang dihitung secara teoritis. Dimana teori ini digunakan untuk memperkirakan besaran intensitas tegangan yang ada. Sudah terdapat beberapa penelitian untuk mengukut tegangan insitu horizontal antara lain penelitian yang

ı oleh Sheorey (1994).

ada penelitian yang dilakukan oleh Terzaghi dan Richart (1952) tan bahwa beban gravitasi dimana tidak terjadi regangan dalam arah



lateral. Tetapi nilai k tidak bergantung pada kedalaman tetapi dinyatakan juga dengan persamaan sebagai berikut (Rai dkk., 2014).

$$k = \frac{v}{1 - v} \tag{10}$$

Dengan persamaan diatas, maka nilai tegangan horisontal akan selalu lebih kecil dibandingkan dengan tegangan vertikal. Pada tahun 1994, Sheorey mengusulkan persamaan sebagai berikut (Rai dkk., 2014):

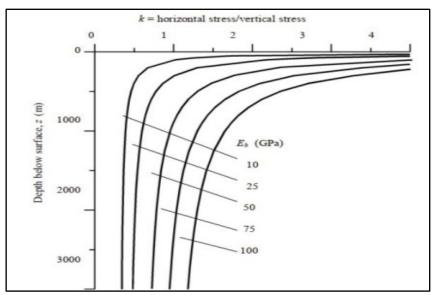
$$k = 0.25 + 7E_h \left(0.001 + \frac{1}{z} \right) \tag{11}$$

dimana,

Eh = Modulus deformasi sebagai atas dari kulit bumi yang diukur pada arah horizontal (GPa)

Z = Kedalaman (m)

Hasil perbandingan tegangan horisontal terhadap tegangan vertikal ditunjukkan pada Gambar 9 sebagai berikut (Rai dkk., 2014).

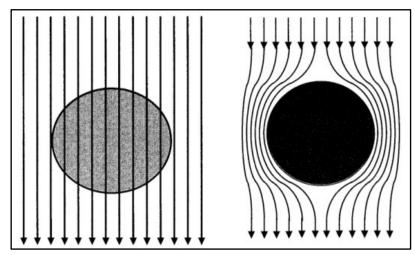


Gambar 9 Penentuan nilai k terhadap kedalaman (Rai dkk., 2014)

Jika sebuah lubang bukaan bawah tanah dibuat pada massa batuan, batuan yang tidak terkendali menerima beban yang lebih besar daripada saat sebelum digali

ngian yang harus menerima beban tersebut telah hilang kondisi, sehingga awal secara lokal akan berubah menjadi tegangan terinduksi. Distribusi di dinding terowongan akan berbeda dari tegangan sebelum batuan digali. npat dilihat pada Gambar 10 sebagai berikut.





Gambar 10 Distribusi tegangan insitu dan terinduksi (Rai dkk., 2014)

Ilustrasi tegangan *insitu* dan terinduksi akibat penggalian bawah tanah seperti yang terlihat pada Gambar 10 menjelaskan bahwa sebelum penggalian dilakukan, massa batuan berada pada kondisi setimbang dan setelah penggalian dilakukan, kesetimbangan tersebut menjadi terganggu dan dapat mengubah distribusi tegangan awal. Untuk mengetahui distribusi tegangan di sekitar terowongan dapat digunakan persamaan Kirsch (1898) dimana untuk keadaan umum didapatkan persamaan tegangan tangensial ($\sigma\theta$), tegangan radial (σ r) dan tegangan geser (σ r θ) di sekitar terowongan sebagai berikut (Rai dkk., 2014).

$$\sigma\theta = \left[\left(\frac{\sigma V + \sigma H}{2} \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \right] + \left[\left(\frac{\sigma V - \sigma H}{2} \right) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$
 (12)

$$\sigma \mathbf{r} = \left[\left(\frac{\sigma V + \sigma H}{2} \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \right] + \left[\left(\frac{\sigma V - \sigma H}{2} \right) \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$
(13)

$$\sigma r \theta = \left[-\left(\frac{\sigma V + \sigma H}{2}\right) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \right]$$
(14)

dimana,

 $\sigma\theta$ = Tegangan tangensial (MPa)

 $\sigma r = Tegangan radial (MPa)$

 $\sigma r\theta$ = Tegangan geser (MPa)

 $\sigma v = Tegangan vertikal (MPa)$

 σH = Tegangan horisontal (MPa)

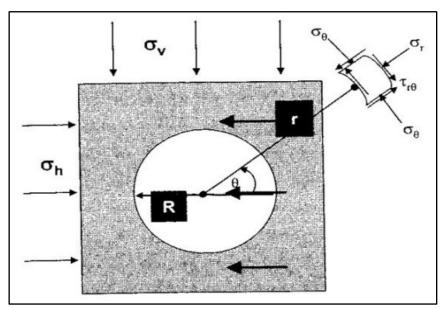
= Sudut yang dibentuk ke titik pengamat searah putaran jarum jam

= Jari-jari lubang bukaan (m)

= Jarak dari pusat lubang bukaan ke titik pengamat (m)



Optimized using trial version www.balesio.com



Gambar 11 Distribusi tegangan di sekitar terowongan keadaan umum (Rai dkk., 2014)

Shape merupakan bentuk penampang dari lubang bukaan yang akan dibuat. Bentuk lubang bukaan akan mempengaruhi arah aliran stress disamping lubang bukaan tersebut. Perbandingan antara tegangan sebelum dan sesudah penggalian bergantung pada penampang terowongan. Berikut ini faktor A yang ditinjau dari bagian atap (roof) dan faktor B yang ditinjau dari bagian dinding (wall) untuk masing-masing shape terowongan sebagai nilai koreksi dari persamaan Kirsch (1898) dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3 Faktor A dan B tiap bukaan

Shape Faktor	0		0			0	0		
A	5.0	4.0	3.9	3.2	3.1	3.0	2.0	1.9	1.8
В	2.0	1.5	1.8	2.3	2.7	3.0	5.0	1.9	3.9

Sumber: Hoek dan Brown (1980)

2.4 Finite Element Method (FEM)

Metode elemen hingga atau *Finite Element Method* (FEM) merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam perhitungan perpindahan (*displacement*), regangan, dan tegangan di dalam suatu material melalui pemodelan. Metode ini menyimulasikan suatu struktur ke dalam bentuk elemen-elemen kecil yang a berhingga (*finite element*) dengan geometri tertentu. Antar elemen ini

a berhingga (*finite element*) dengan geometri tertentu. Antar elemen ini ng terhubung dengan *node*. Konsep dasar Metode elemen hingga adalah suatu sistem struktur menjadi elemen-elemen kecil yang disebut elemen



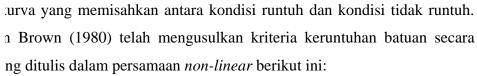
hingga (*finite element*) dalam bentuk geometri tertentu dimana masing-masing elemen tersebut dianalisis secara terpisah untuk selanjutnya diadakan penggabungan berdasarkan prinsip *continuity*, *compability*, *equilibrium*, *boundary condition*, dan *convergence* (Hutton, 2004).

Geometri pembagian sistem struktur menjadi sejumlah elemen yang berhingga dapat berupa segitiga, segiempat, dan sebagainya. Pertemuan antara elemen-elemen tersebut dinamakan garis nodal (nodal lines) atau bidang nodal (nodal plane), sedangkan titik potong antar sisi-sisi elemen dinamakan titik nodal. FEM termasuk ke dalam metode numerik yang memanfaatkan operasi matriks untuk menyelesaikan masalah-masalah fisik yang memiliki bentuk kompleks. Prinsip dari metode ini adalah menghitung perpindahan pada setiap node akibat gaya yang bekerja. Sama seperti kekakuan pegas pada Hukum Hooke, Tiap elemen dianggap memiliki kekakuan yang mampu menahan deformasi (Hutton, 2004).

Perhitungan matriks yang kompleks dapat diselesaikan dengan mudah oleh perangkat lunak. Salah satu yang menggunakan FEM dalam analisisnya adalah RS2. RS2 adalah program yang dikembangkan oleh Rocscience untuk analisis elemen hingga 2D pada struktur geoteknik di industri sipil maupun pertambangan. Perangkat lunak RS2 2019 adalah sebuah program elemen hingga dua dimensi (2D) untuk memperoleh respon dikarenakan gaya yang digunakan pada bidang tertentu seperti tegangan (*stress*) dan perpindahan (*displacement*). Pada umumnya program ini digunakan untuk solusi permasalahan lereng dan terowongan. Program RS2 ini juga mengakomodir analisa dinamik yang memungkinkan untuk memperoleh hasil analisa yang dinamik pula seperti kecepatan dan percepatan.

2.4.1 Kriteria keruntuhan Generalized Hoek-Brown

Batuan yang diberi pembebanan akan hancur atau runtuh ketika tegangan yang bekerja melewati batas kekuatannya. Tiap batuan memiliki kriteria keruntuhannya masing-masing yang didapat dari hasil eksperimen di laboratorium. Kriteria keruntuhan merupakan sebuah fungsi yang menunjukkan batas kekuatan batuan ketika hancur di bawah tegangan yang bekerja. Fungsi ini digambarkan





$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s)^{0.5} \tag{15}$$

dimana,

 σ_1 = Tegangan utama mayor (MPa)

 σ_3 = Tegangan utama minor (MPa)

 σ_c = Kuat tekan uniaksial (MPa)

m = Konstanta massa batuan Hoek-Brown

s = Konstanta massa batuan Hoek-Brown (batuan utuh = 1)

Estimasi ini didapat dari hasil regresi pengujian triaksial pada sampel batuan utuh dengan berbagai kondisi pengungkungan. Seiring berjalannya waktu, kriteria ini diperbarui untuk mengatasi keterbatasan penggunaan praktis dari pengalaman di lapangan. Hoek *et al.* (2002) mengembangkan kriteria keruntuhan Generalized Hoek-Brown untuk mengestimasi kekuatan massa batuan.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \tag{16}$$

dengan mb, s, dan a, adalah konstanta yang didapat dari rumus di bawah ini.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$
 (17)

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \tag{18}$$

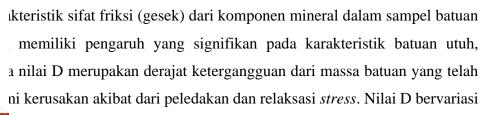
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \tag{19}$$

dimana,

mi = Konstanta batuan utuh Hoek-Brown

D = Disturbance factor yang bergantung pada metode penggalian

Hoek dan Brown (1997) mengusulkan sebuah metode untuk menduga kekuatan massa batuan terkekarkan terhadap GSI. Nilai m_b, a, dan s merupakan parameter tanpa dimensi dan bergantung pada massa batuan. Konstanta mi hanya dapat ditentukan oleh uji triaksial pada sampel inti (*core*) atau dengan deksripsi kualitatif dari material batuan seperti yang dijelaskan oleh. Parameter ini tergantung





dari 0 untuk massa batuan yang tidak terganggu, sampai ke 1 untuk massa batuan yang sangat terganggu. Pembobotan nilai D dapat dijelaskan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Nilai disturbance factor

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested D
	Excellent quality-controlled blasting or excavation by a road-header or tunnel boring machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or manual excavation in poor quality rock masses gives minimal disturbance to the surrounding rockmass. Where squeezing problems result in significant floorheave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0 $D = 0.5$ (With no invert)
A Production of the Control of the C	Poor control of drilling alignment, charge design and detonation sequencing results in very poor blasting in a hard rock tunnel with severe damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	<i>D</i> = 0,8
	Small-scale blasting in civil engineering slopes results inmodest rock mass damage when controlled blasting is used, as shown on the left-hand side of the photograph. Uncontrolled production blasting can result in significant damage to the rock face.	D = 0.7 (Good blasting) D = 1.0 (Poor blasting)
PDF	In some weak rock masses, excavation can be carried outby ripping and dozing. Damage to the slopes is due primarily to stress relief. Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and stressrelief from overburden removal.	D = 1,0 (Production blasting) D = 0,7 (Mechanical excavation)

Optimized using trial version www.balesio.com ek dan Brown (2018)

2.4.2 Rock Mass Failure

Keruntuhan lubang bukaan bawah tanah di batuan keras merupakan fungsi dari besarnya tegangan *insitu* dan karakteristik dari massa batuan seperti kekuatan batuan utuh dan kondisi kekar (Martin *et al.*, 1999). Klasifikasi keruntuhan batuan yang dibuat ulang oleh Sandy dkk., (2010) dapat dilihat pada Gambar 12. Pada tegangan *insitu* yang rendah, proses keruntuhan lubang bukaan umumnya dikontrol oleh persebaran dan kemenerusan rekahan di massa batuan. Namun, ketika tegangan *insitu*-nya meningkat, proses keruntuhan lubang bukaan akan didominasi oleh perkembangan rekahan di batas galian. Pembentukan rekahan pada kondisi yang demikian dikenal sebagai *brittle failure* atau *spalling*.

Spalling telah lama dikenal sebagai mekanisme failure di tambang bawah tanah yang dalam dengan kondisi massa batuan yang keras (Diederichs, 2007). Spalling adalah proses pengembangan rekahan pada massa batuan akibat pengaruh pembebanan. Mekanisme ini mendominasi kerusakan pada massa batuan di sekitar batas penggalian lubang bukaan di bawah tekanan tinggi. Meskipun pada batuan yang getas, spalling tidak menyebabkan batuan pecah secara keras. Klasifikasi keruntuhan massa batuan dapat dilihat pada Gambar 12 sebagai berikut.

	Massive (RMR > 75)	Moderately Fractured (50 > RMR < 75)	Highly Fractured (RMR < 50)
Low In-Situ Stress (σ ₁ / σ _c < 0.15)			
(a	Linear elastic response.	Falling or sliding of blocks and wedges.	Unravelling of blocks from the excavation surface.
Intermediate In-Situ Stress (0.15 < σ_1/σ_c < 0.4)	Brittle failure adjacent to excavation boundary.	Localized brittle failure of infact rock and movement of blocks.	Localized brittle failure of intact rock and unrawelling along discontinuities.
High In-Situ Stress ($\sigma_1/\sigma_c > 0.4$)	Brittle failure around the excavation	Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of block.	Squeezing and swelling nocks. Elastic/plastic



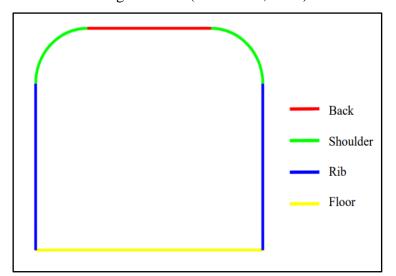


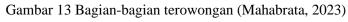
Gambar 12 Klasifikasi rock mass failure (Sandy dkk., 2010)

Monitoring atau pemantauan pada terowongan merupakan aktivitas mengamati perilaku massa batuan penyusun dinding lubang bukaan seperti perpindahan atau pergerakan. Kegiatan ini bertujuan untuk memantau kestabilan dari terowongan dan membantu proses identifikasi dalam mengambil tindakan pencegahan keruntuhan. Kalaupun tidak stabil dan berpotensi runtuh, waktu keruntuhan dapat diperkirakan dan tindakan keselamatan dapat dilakukan. Bagianbagian yang perlu diamati antara lain *floor*, *rib*, *shoulder*, dan *back*. Pelaksanaan pemantauan merupakan bagian dari metode observasi yang merupakan kunci pokok dari kegiatan geoteknik modern. Kegiatan ini berfungsi untuk memperoleh perilaku lubang bukaan akibat aktivitas penggalian. Selain itu, metode ini juga digunakan untuk menilai performa dari *ground support* yang telah dipasang. Secara sederhana, pemantauan dapat dilakukan melalui pengamatan visual dan audio. Namun, untuk mendapatkan hasil yang kuantitatif dan akurat, diperlukan pengukuran menggunakan alat bantu atau *instrument* (Peck, 1969).

2.4.3 Monitoring

Monitoring pada terowongan merupakan aktivitas mengamati perilaku massa batuan penyusun dinding lubang bukaan seperti perpindahan atau pergerakan. Kegiatan ini bertujuan untuk memantau kestabilan dari terowongan dan membantu proses identifikasi dalam mengambil tindakan pencegahan keruntuhan. Kalaupun tidak stabil dan berpotensi runtuh, waktu keruntuhan dapat diperkirakan dan tindakan keselamatan dapat dilakukan. Bagian-bagian yang perlu diamati dapat dilihat pada Gambar 13 sebagai berikut (Mahabrata, 2023).



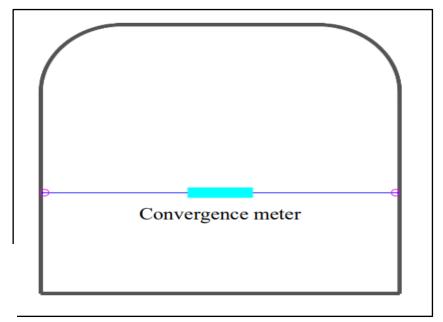


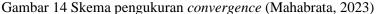


Optimized using trial version www.balesio.com

Pelaksanaan pemantauan merupakan bagian dari metode observasi yang merupakan kunci pokok dari kegiatan geoteknik modern. Kegiatan ini berfungsi untuk memperoleh perilaku lubang bukaan akibat aktivitas penggalian. Selain itu, metode ini juga digunakan untuk menilai performa dari *ground support* yang telah dipasang. Secara sederhana, pemantauan dapat dilakukan melalui pengamatan visual dan audio. Namun, untuk mendapatkan hasil yang kuantitatif dan akurat, diperlukan pengukuran menggunakan alat bantu atau instrumen (Peck, 1969).

Dalam kaitannya dengan perilaku lubang bukaan, istilah displacement atau perpindahan merupakan parameter yang menunjukkan nilai pergeseran suatu titik pengamatan di dinding terowongan dalam satuan mm. Parameter ini biasa digunakan dalam menilai kestabilan terowongan karena mudah untuk diamati dan diukur. Displacement antara dua titik pengamatan pada dinding terowongan dapat diukur dengan menggunakan convergence meter. Instrumen ini biasa digunakan untuk mengukur deformasi lubang bukaan. Pengukuran convergence dipilih karena sederhana, dapat dilakukan secara berulang, dan mudah pemasangannya. Pengukuran dilakukan dengan mengaitkan kait yang berada di ujung-ujung alat ke stasiun convergence yang terletak di dinding terowongan. Prinsip convergence adalah dengan membandingkan hasil pengukuran terbaru dengan hasil pengukuran sebelumnya pada Gambar 14 dan selisih nilai pengukuran digunakan sebagai indikasi adanya pergerakan dari massa batuan (Mahabrata, 2023).







2.5 Event Seismic

2.5.1 Mekanisme Penyebab Seismic

Tegangan terinduksi pada penambangan bawah tanah terjadi pada saat konstruksi lubang bukaan untuk infrastruktur penambangan maupun ekskavasi volume batuan untuk memproduksi bijih mineral. Tegangan terinduksi ini menyebabkan rekahan pada massa batuan dan slip pada bidang preexisting crack atau diskontinuitas lainnya. Proses ini biasanya diikuti dengan kemunculan gelombang seismic (mine induced seismicity) sebagai hasil deformasi inelastic yang terjadi tiba-tiba dalam volume massa batuan. Seismic biasanya terjadi pada massa batuan yang keras yang terletak pada kedalaman yang relatif dalam dengan kondisi tegangan tinggi. Dua penyebab utama seismic dalam pertambangan menurut Joughin dan Jager (1984) adalah tegangan terinduksi akibat penambangan (undercutting dan mucking) dan pergerakan sesar utama atau bidang diskontinuitas lainnya. Gibowicz (1990) telah menganalisis distribusi perilaku b-modal seismic dari dua tipe event dan menyimpulkan rockburst yang paling merusak biasanya diasosiakan dalam tipe kedua (pergerakan sesar utama atau bidang diskontinuitas). Enam model penyebab seismic dalam pertambangan yaitu cavity collapse, pillar burst, tensional fault, sesar naik, sesar anjak, dan shallow thrust faulting. Cavity collapse mewakili rockburst dalam mine ceiling karena gravitasi. Sedangkan, pillar burst terjadi karena gaya konvergen yang berhubungan dengan kemajuan stope dan efek perubahan tegangan terhadap waktu. Empat model terakhir berhubungan dengan pergerakan sepanjang sesar preexisting (fault-slip) (Hasegawa et al., 1989).

Tegangan *abutment* yang tinggi dapat menyebabkan *spalling, slabbing, squeezing,* maupun *rockburst* yang berasosiasi dengan kejadian *seismic.* Pertimbangan kompleksitas konstruksi area penambangan bawah tanah, maka keperluan untuk peringatan dini keruntuhan dan kebutuhan data pemantauan yang *real time* serta terkuantifikasi sangat diperlukan. Sistem pemantauan *microseismic* menjadi salah satu pilihan terbaik untuk mengetahui respon massa batuan akibat penambangan dan peringatan dini keruntuhan batuan. Intensitas *event seismic*

ngan magnitudo yang didasarkan pada *magnitude event* sepanjang rentang tertentu sehingga energi yang terpancar dapat dikuantifikasi. Ada skala magnitudo yang digunakan untuk memahami *seismic* seperti



Magnitude Richter, Magnitude Nuttli, dan Moment Magnitude (MM). Untuk berbagai penelitian, parameter yang digunakan untuk menunjukkan intensitas tegangan secara relatif adalah energi seismic karena parameter ini merupakan parameter awal ketika seismic terekam (parameter independen). Energi seismic biasanya dihasilkan ketika perekahan maupun slip pada bidang diskontinuitas yang mengakibatkan transformasi regangan elastik menjad regangan tidak elastik. Energi seismic dapat dirumuskan dengan menggunakan Persamaan 21 sebagai berikut (Mendecki et al., 1997).

$$E = 4 \pi \rho_o c_o J = 4 \pi \rho_o c_o (2 \int_0^\infty v^2(f) df) = 8 \pi \rho_o c_o \int_0^\infty v^2(f) df$$
 (21)

dimana,

E = Energi *seismic* yang terpancarkan

 ρ_o = Densitas material sumber

 c_o = Kecepatan gelombang P atau S pada sumber

J = Integral spectrum *velocity power*

f = Frekuensi gelombang *seismic*

v = Kecepatan gelombang *seismic* yang diterima

2.5.2 Sistem Pemantauan Seismic

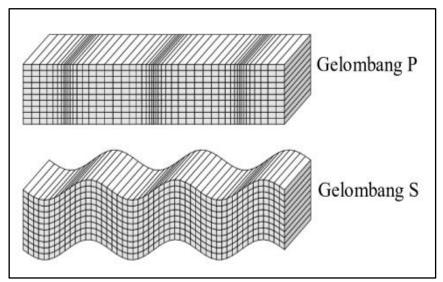
Gelombang *seismic* adalah gelombang elastik yang menjalar ke segala arah melalui material yang ada di dalam bumi. Gelombang ini dapat dibagi menjadi dua tipe utama yaitu:

- a. Gelombang badan (*body wave*), yang terdiri dari gelombang longitudinal (Gelombang P) dan gelombang transversal (gelombang S).
- b. Gelombang permukaan (*surface wave*), yang terdiri dari gelombang *rayleigh* dan *love*.

Gelombang P merupakan gelombang longitudinal yang merambat bolak balik dengan arah rambatnya tetapi gelombang S merupakan gelombang transversal yang memiliki gerak partikel tegak lurus terhadap arah rambatnya. Kedua arah perambatan gelombang ini dapat dilihat pada Gambar 15. Gelombang P dapat

t pada fluida sehingga gelombang ini tidak dapat terdeteksi dalam inti yang cair (Hasegawa, 1989).





Gambar 15 Perbedaan arah perambatan gelombang P dan S (Hasegawa, 1989)

Gelombang seismic yang direkam melalui jaringan stasiun seismic lokal digunakan untuk menentukan hiposenter mikroseismic. Semakin banyak geophone yang menerima sinyal seismic tersebut, semakin akurat lokasi hiposenter microseismic-nya. Stasiun ini diletakkan dalam posisi cukup berdekatan dan menggunakan sensor yang bersensitivitas tinggi. Data yang terekam pada setiap stasiun masuk melalui jaringan pusat untuk dikumpulkan dan dikirimkan ke stasiun pengamatan. Data yang diperoleh dari sistem jaringan ini berjumlah besar karena jumlah stasiun perekaman yang cukup banyak dan banyaknya kejadian mikroseismik yang terjadi. Sistem jaringan ini memudahkan untuk melakukan proses pemantauan yang mana setiap kejadian seismic yang terekam secara langsung dapat ditransmisikan pada stasiun pengamatan. Hal ini membuat banyak kejadian aktivitas microseismic dengan magnitudo tertentu di suatu lokasi dapat diketahui secara real time (Kaiser et al., 1996).

Data *seismic* yang banyak tersebut memiliki magnitudo yang bervariasi dengan *event* kecil (*seismic* bermagnitudo kecil) jauh lebih banyak dari *event* besar (*seismic* bermagnitudo besar). Untuk mengetahui mekanisme utama yang menyebabkan *seismic*, analisis b-*value* dapat digunakan dengan cara membuat magnitudo dan jumlah kejadian *seismic* dalam grafik semi-log. Nilai b-*value* 0,8

tan *seismic* berasosiasi dengan *fault-slip*, sedangkan nilai b-*value* yang ,2-1,5) menyatakan *seismic* berhubungan dengan perubahan tegangan nggalian (Legge dan Spottiswoode, 1987).



2.5.3 Rockburst

Rockburst adalah kerusakan pada lubang bukaan yang terjadi secara tibatiba dan keras yang berasosiasi dengan event seismic (Kaiser et al., 1996). Massa batuan dapat runtuh secara tiba-tiba karena tegangan yang diterima dan menghasilkan gelombang seismic yang diakibatkan oleh perekahan atau slip. Kemungkinan rockbrust terjadi semakin besar ketika penambangan semakin dalam dengan komposisi batuan yang keras serta getas. Hal ini terjadi karena kedalaman yang dalam akan menciptakan kondisi tegangan insitu maupun terinduksi yang besar, sedangkan batuan yang keras dan getas dapat menyimpan sejumlah energi regangan sebelum masa batuan tersebut runtuh. Keruntuhan oleh rockburst digolongkan berdasarkan skala kerusakan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Skala kerusakan rockburst

Damage	Rock mass	Damage	Rock support	Depth of
scale	damage	surface area	damage	damage
		<i>j</i>		(m)
R1	No damage, minor loose	0	No damage	0
R2	Minor damage, less then 1 t displaced	<1 m ²	Support system is loaded, loose in mesh, plates deformed	<0,25
R3	1 − 10 displaced	$<10 \text{ m}^2$	Some broken bolts	0,25 – 0,75
R4	10 - 100 displaced	10 to 50 m ²	Major damage to support system	0,75 – 1,5
R5	100 + t displaced	>50 m ²	Complete failure of support system	> 1,5

Sumber: Potvin (2009)

Secara umum, *rockburst* disebabkan oleh ketidakseimbangan antara energi yang tersimpan (*stored energy*) dan energi yang dilepaskan (*dissipated energy*)

nassa batuan. Ada beberapa parameter untuk memperkirakan ungan *rockburst*. Tiga macam *rockburst* yang biasa terjadi yaitu (Cai dan 018):

ault-slip burst



Tipe *rockburst* ini terjadi karena adanya struktur geologi seperti sesar atau bidang diskontinuitas yang mempengaruhi mekanisme pelepasan energi dan kerusakan. *Rockburst* ini mungkin berasal jauh dari ekskavasi, baik yang diakibatkan oleh *pre-existing fault*, zona sesar, maupun *shear rupture*.

b. Pillar burst

Tipe *rockburst* ini didefinisikan sebagai keruntuhan yang keras pada pilar batuan yang mana sumber *seismic* dan keruntuhan batuan berada pada pilar tersebut.

c. Strainburst

Tipe *rockburst* ini terjadi karena tegangan dekat penggalian yang mencapai kekuatan puncak dari massa batuan, baik dengan perkuatan maupun tanpa perkuatan dan massa batuan tiba-tiba runtuh karena kombinasi rekahan geser dan ekstension.

2.6 Scalling Law Method

Stuktur geologi sering menjadi pemicu untuk proses terjadinya suatu event seismic. Stuktur geologi tersebut akan menjadi sangat tertekan sehingga dapat menjadi sumber dari terjadinya event seismic. Selain itu, sumber seismic juga harus disesuaikan dengan aktivitas penambangan yang ada, meliputi faktor-faktor seperti perubahan tegangan insitu, tingkat produksi, kondisi geologis dan faktor lainnya. Pusat aktivitas seismic adalah distribusi volume batuan yang mengandung banyak peristiwa seismic dengan intensitas tertentu. Pusat seismic dapat ditentukan dengan baik apabila suatu tambang mengoperasikan sistem pemantauan seismic berkualitas tinggi. Intensitas pergerakan tanah pada target potensial disebabkan karena adanya gelombang tegangan yang diakibatkan oleh sumber seismic yang dapat memberikan kerusakan desain support sehingga diperlukan penilaian potensial terhadap sumber seismic tersebut. Desain teknik konvensional untuk beban dinamis didasarkan pada gerakan tanah berupa percepatan gravitas (g). Percepatan dianggap sekian persen dari percepatan gravitasi tersebut serta percepatan dan kecepatan berhubungan secara fungsional. Oleh karena itu kecepatan gerakan tanah dapat diwakili oleh



r *Peak Particle Velocity* (PPV) sebagai parameter yang paling atif untuk menentukan beban desain dinamis. Distribusi gerakan tanah di dapat disimulasikan secara deterministik dengan pemodelan numerik atau



diperkirakan dengan menggunakan hukum penskalaan. Hukum penskalaan ini berbeda dengan analisis regresi karena kondisi rata-rata kurang mendekati desain, sehingga hukum penskalaan (*scalling law method*) ini lebih relevan dan mendominasi desain (Cai dan Kaiser, 2018).

Hukum penskalaan memberikan hubungan antara PPV dengan jarak (R) dari sumber ke target dengan mempertimbangkan ukuran intensitas sumber peristiwa *seismic* (energi *seismic*, momen *seismic* atau magnitudo peristiwa *seismic*). *Scalling law method* dapat dituliskan secara umum sebagai berikut.

$$PPV = C SD^{-b} = C(\frac{R}{10^{aM}})^{-b}$$
 (22)

Atau dapat juga dituliskan sebagai berikut.

$$\log R^{b}PPV (m.m/s) = ab M (GN.m) + \log C (m^{2}/s)$$
 (23) dimana,

SD = Jarak yang diskalakan/scaled distance $(R/10^{aM})$

a, b, c = Konstanta empiris

m = Besarnya peristiwa *seismic* (magnitudo)

Dalam kasus tertentu, gerakan tanah (PPV) dapat diperoleh dengan mengalikan jarak R dari setiap sumber titik. Eksponen b sering diasumsikan sebagai satu kesatuan untuk memperhitungkan sebaran geometri dari gelombang *seismic* (PPV adalah fungsi dari R⁻¹). Tiga parameter penskalaan a, b, dan c dapat ditentukan dengan analisis regresi data yang diperoleh dari sensor yang ditempatkan di seluruh atau di sekitar tambang. Hal ini masih perlu dirasionalkan supaya prediksi yang dihasilkan tidak konservatif pada satu ekstrem jauh dari sumbernya atau lebih dekat ke sumbernya. Untuk kondisi standar dengan tingkat kepercayaan 50%, maka rekomendasi yang diberikan oleh Spottiswoode (1984) yaitu menentapkan bahwa kemiringan a berada diantara 0,5 dengan mengamsusikan nilai b sama dengan 1 (Kaiser *et al.*, 1996).

Hal ini juga diperkuat dengan penelitian dari villalobos (2022) dimana scalling law method kemudian di modifikasi oleh Potvin, Wesseloo, dan Heal (2010) untuk keperluan evaluasi kapasitas energi rockburst untuk desain sistem

ng batuan sehingga didapatkan Persamaan 24 sebagai berikut.

$$PV = C \frac{\sqrt{10^{(M+1,5)}}}{R+Ro} \tag{24}$$

Optimized using trial version www.balesio.com

 PDF

dimana,

R = Jarak ke fokus seismic (m)

C = Konstanta empiris

Ro = Radius pengaruh sumber (m),

yang dinyatakan sebagai,

$$Ro = a10^{\frac{1}{3}(M+1,5)}$$
 (25)

dimana,

M = Magnitudo event seismic

a = Konstanta empiris (0,5 sampai 1,14)

Berdasarkan Persamaan 22 dan Persamaan 24 tersebut maka dapat juga dituliskan persamaan untuk memperoleh nilai *Scaled Distance* (SD) sebagai berikut.

$$SD = \frac{\sqrt{10^{(M+1.5)}}}{R + Ro} \tag{26}$$

Kecepatan partikel puncak atau Peak Particle Velocity (PPV) yang masuk akal harus ditetapkan untuk estimasi energi kinetik yang disebabkan oleh kemungkinan strainburst yang diperlukan untuk desain pendukung. Untuk tujuan ini, scalling law method diusulkan oleh Kaiser et al. (1996) dan kemudian dimodifikasi oleh Potvin (2009). Keberadaan lubang bukaan tambang bawah tanah dapat menghasilkan fenomena amplification factor yang dapat meningkatkan nilai PPV di sekitar penggalian beberapa kali lipat dibandingkan dengan PPV dari getaran yang sama yang diukur dalam massa batuan. Amplification factor bergantung pada geometri terowongan, modulus elastisitas, dan frekuensi perambatan gelombang. Peristiwa rockburst telah menjadi masalah serius di tambang bawah tanah, dimana kapasitas *support* dinamis didasarkan pada geometri terowongan dan energi kinetik yang bekerja. Peristiwa strainburst dapat ditentukan melalui analisis tegangan di sekitar terowongan melalui metode elemen hingga atau Finite Element Method (FEM). Dalam praktiknya sumber seismic yang menyebabkan strainburst dapat diukur menggunakan magnitude moment (Mw) atau skala richter local (M_L) yang didasarkan pada amplitudo gelombang P dan S yang



kan, atau *magnitude Nuttli* (M_N) yang didasarkan pada *amplitude* dari gelombang geser yang dipantulkan dan dibiaskan. Morrisette *et al.* (2012) kan bahwa tidak ada ketergantungan signifikan pada kerusakan

penggalian untuk *strainburst* dengan magnitude di bawah 2,5 M_L. Namun, untuk kasus peristiwa dengan magnitudo yang lebih besar dari itu maka kerusakan telah terbukti bergantung pada peristiwa *seismic*. Untuk penerapan setiap model *Finite Element Method* (FEM) digunakan untuk memperkirakan zona tersebut pada kontur penggalian lubang bukaan sehingga dihasilkan *strainburst* yang dianggap sebagai energi kinetik yang merupakan fungsi deformasi lubang bukaan (Villalobos, 2022).

2.7 Depth of Failure (DOF)

Retakan yang disebabkan oleh tegangan terinduksi terjadi pada saat dilakukan penambangan pada kedalaman tertentu, dan dapat dikontrol dengan memberikan support standar supaya proses kegagalan stabil. Proses keruntuhan yang stabil terjadi ketika sebagian besar energi yang tersimpan dalam massa batuan dikonsumsi selama proses patahan dan deformasi, dalam praktiknya hal ini mengarah pada zona broken rock di sekitar penggalian. Untuk mekanisme rockburst dan rockbulking akibat rekahan, perlu menentukan tingkat kerusakan massa batuan dan menetapkan peningkatan volume atau bulking yang diharapkan dari batuan yang retak sehingga dapat memperkirakan intensitas kerusakan yang akan diantisipasi atau potensi ejection velocity. Desain pendukung terhadap rekahan batuan melibatkan tiga langkah yaitu menentukan kedalaman kerusakan massa batuan (depth of failure), menggunakan bulking terhadap peningkatan volume (bulking) di zona rekahan dan memperkirakan intensitas (ejection velocity) dari proses kerusakan (failure) sehingga selama rockburst maka support yang dapat digunakan untuk mengontrol Depth of Failure (DOF), bulking dan intensitas proses kerusakan (kaiser et al., 1996).

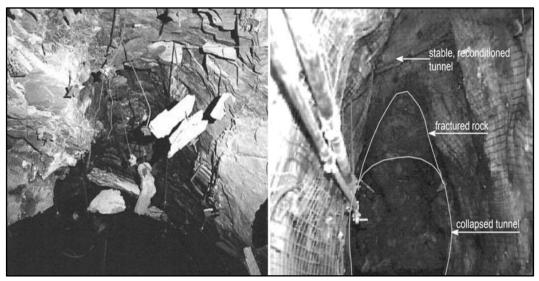
Kedalaman zona batuan runtuh (*depth of failure* atau DOF) didefenisikan sebagai kedalaman dimana massa batuan jika tidak ditopang (*unsupport*) akan hancur karena beban gravitasinya. Batuan di luar zona runtuh ini masih memiliki cadangan kekuatan dan mampu mempertahankan keseimbangan yang stabil. Dengan demikian lubang bukaan dengan batuan keras (*hard rock*) dapat distabilkan



erjadinya *rockburst* jika batuan yang hancur (*broken rock*) ditahan iya dan lubang bukaan tersebut tidak mengalami penambahan tegangan i akibat aktivitas penambangan (*mining-induced stresses*). Sebagai



contoh, Gambar 16 berikut yang akan menyajikan kerusakan massa batuan pada lubang bukaan selama terjadinya *rockburst*.



Gambar 16 Kerusakan massa batuan akibat rockburst (kaiser et al., 1996)

Ketebalan zona batuan runtuh dalam batuan yang masif dan rapuh (*brittle*) bergantung pada tingkat tegangan yaitu tegangan terinduksi maksimum (σ max) relative terhadap kuat tekan batuan (σ c), rasio tegangan σ 1/ σ 3, stuktur massa batuan, bentuk lubang bukaan, dan peningkatan tegangan dinamis $\Delta \sigma$ d yang disebabkan oleh peristiwa *seismic*. Berdasarkan pengalaman di lapangan dan pemodelan numerik, pedoman berikut telah dikembangkan untuk memperkirakan *depth of failure* (DOF) yang terjadi di sekitar lubang bukaan.

2.7.1 Tegangan Static

Bukti lapangan dari penggalian batuan keras yang masif menunjukkan bahwa jika tegangan maksimum atau tangensial (σmax) di sekitar lubang bukaan berada diantara 0,3 sampai 0,5 dari kuat tekan batuan (σc), batuan tersebut mengalami tegangan yang tinggi dan dapat runtuh dengan cara yang rapuh (stabil atau tidak stabil). Untuk zona lingkaran dari batuan retak (*circular zone of fractured rock*), tegangan maksimumya adalah tegangan tangensial pada bukaan lingkaran ekuivalen dengan Persamaan 27 sebagai berikut.

$$\sigma \max = 3\sigma 1 - \sigma 3 \tag{27}$$



can bukti empiris yang disajikan pada Gambar 17, tambahan *Depth of* DOF) pada batuan masif DOF = rf - a yang berada di luar bukaan ekuivalen dengan radius a dapat didekati untuk kondisi statik berikut.

Optimized using trial version www.balesio.com

$$\frac{\text{rf}}{a} = \frac{\text{DOF}}{a} + 1 = 1.34 \frac{\sigma \text{max}}{\sigma c} + 0.43$$
 (28)

dimana.

σmax = Tegangan tangensial maksimum (MPa)

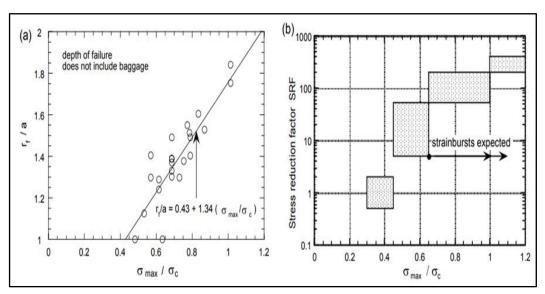
 $\sigma c = Kuat tekan batuan (MPa)$

a = Radius lubang bukaan (m)

rf = Radius of failure (m)

DOF = $Depth \ of failure \ (m)$

Persamaan ini mengacu pada *Depth of Failure* (DOF) di sekitar lubang bukaan lingkaran yang ekuivalen. Jika pengembangan dan rekahan *baggage* terjadi di lokasi yang sama di sekitar bukaan, maka ketebalan *baggage* harus ditambahkan dengan *Depth of Failure* (DOF) untuk mendapatkan total kedalaman zona batuan runtuh (*thickness of fractured rock*).



Gambar 17 Radius zona keruntuhan dan faktor reduksi tegangan (SRF) (Barton, 1994)

Persamaan pada Gambar 17 ditampilkan dengan persamaan garis yang digunakan terbatas pada rf/a > 1,6 sehingga persamaan tidak dapat digunakan untuk mengekstrapolasi lebih jauh dari persamaan ini. Pendekatan ini didasarkan pada *empirical constan* yang yang dihasilkan secara empiris dan merupakan konstanta

si persamaan garis yang dihasilkan. Berdasarkan analisis ini perkiraan of failed rock yang terletak diluar lingkaran dan dibatasi dengan radius an pada Tabel 6 untuk kondisi tegangan statik.



<i>отах/ос</i>	Description of fracturing	Thickness of failed rock rf	Rock damage level
≤ 0,35	No or little damage	none or $<< \Delta$	0 to 1
0,35 to 0,45	Minor	$\leq \Delta$	2
0,45 to 0,55	Moderate	$\Delta + (0 \ to \ 0,15) \ a$	3
0,55 to 0,7	Moderate to Major	$\Delta + (0.15 \ to \ 0.5)$	4 to 5
> 0,7	Major	$\Delta + (> 0.5)$ a	5

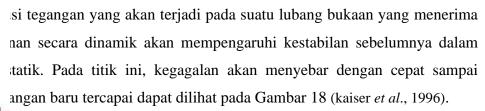
Tabel 6 Depth of Falure (DOF) dan Rock Damage Levels (RDL)

Sumber: Jesenak et al. (1993)

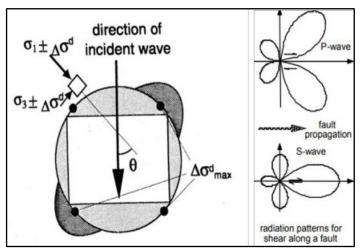
Tabel 6 ini konsisten dengan pendekatan yang dikemukakan oleh Wiseman (1979) yang diadopsi oleh oleh Chamber of Mines of South African Guide (1988) dan penelitian oleh Barton (1994) dimana indeks kualitas massa batuan efektif Q harus dikurangi secara drastis jika *Stress Level* (SL) melebihi 0,4 sampai 0,5 σc karena efek rekahan batuan. Untuk massa batuan *jointed* dengan perilaku kurang rapuh (*brittle*) dibandingkan batuan masif, *Depth of Failure* (DOF) dapat diperkirakan menggunakan model numerik dengan kriteria keruntuhan Mohr Coulomb atau Hoek-Brown.

2.7.2 Tegangan Dynamic

Menurut Jeager dan Cook (1969) batuan rapuh (*brittle*) dapat runtuh secara tiba-tiba dengan cara yang tidak stabil jika sistem pemuatan relatif lunak. Untuk mencapai keadaan seperti ini beberapa tegangan harus terakumulasi karena *event seismic*, ledakan, perubahan tegangan akibat penambangan, atau karena melemahnya batuan yang bergantung pada rentang waktu. Namun kegagalan yang tidak stabil tidak akan dimulai hingga rentang pasca-puncak tercapai. Oleh karena itu, lubang bukaan yang memiliki tegangan mendekati σ max/ σ c = 0,43 ± 0,1 dapat tiba-tiba menjadi tidak stabil jika regangan inelastis yang cukup terakumulasi. Tegangan dinamik dapat berupa tegangan dari gelombang *event sesmic* sehingga dapat mempengaruhi redistribusi tegangan yang terjadi di sekitar lubang bukaan.







Gambar 18 Kondisi pembebanan static dan seismic (kaiser et al., 1996)

Adapun pembebanan di bawah tegangan dinamik yakni penambahan tegangan *seismic* terhadap tegangan statik dirumuskan dalam bentuk Persamaan 29 sebagai berikut (kaiser *et al.*, 1996).

$$\sigma \max = \sigma \operatorname{static} + \sigma \operatorname{seismic} = 3\sigma 1 - \sigma 3 + \rho \operatorname{Cs} \operatorname{PPV}$$
 (29)

dimana.

σmax = Tegangan tangensial maksimum (MPa)

 $\sigma 1$ = Tegangan insitu mayor (MPa)

 σ 3 = Tegangan insitu minor (MPa)

 ρ = Densitas batuan (kg/m³)

Cs = Kecepatan gelombang geser (km/s)

PPV = Peak particle velocity (mm/s)

Kedalaman zona batuan runtuh (*thickness of failed rock*) maksimum sendiri selama *rockburst* atau *strainbursting* tidak boleh melebihi (Δ + 0,15(a)), kecuali stuktur geologi terlibat yang memungkinkan blok kunci jatuh atau massa batuan teruarai setelah *strainburst*. Oleh karena itu, penopang batuan terhadap *strainburst* harus menstabilkan *baggage* (Δ) yang bertantung pada bentuk lubang bukaan. Berdasarkan alasan inilah, ketika *strainburst* diharapkan maka *baggage* (Δ) tersebut harus diminimalkan misalnya dengan dinding yang melengkung. Kecepatan (*ejection velocitie*) dibawah 1,5 m/s dapat dengan mudah ditangani oleh

ş standar, tetapi penopang tambahan diperlukan untuk kecepatan yang şgi (3 sampai 5 m/s). Jika tingkat kerusakan (*damage*) moderate hingga maka diperlukan baut pelepas (*yielding bolts*) diperlukan untuk ngkan energi dalam batuan yang terlontarkan. Dengan menghubungkan



Depth of Failure (DOF) dengan energi seismic atau besaran sumber magnitudo lainnya, maka akan diperoleh gambaran kasar tentang berapa banyak batuan yang mungkin harus ditopang selama strainburst. Di bawah pembebanan dinamik (dynamic loading) dari gelombang seismic, beberapa tegangan yang dihasilkan dapat menyebabkan massa batuan tertekan di area terbatas disekitar lubang bukaan. Pengembangan zona rekahan pada penggalian bawah tanah akan dipicu oleh tegangan insitu (static loading) dan secara bertahap menyebar membentuk zona rekahan ketika gelombang geser (shear wave) melewati lubang bukaan tersebut berdasarkan Persamaan 30 berikut (kaiser et al., 1996).

$$a = \frac{h (atau w)}{\sqrt{2}} \tag{30}$$

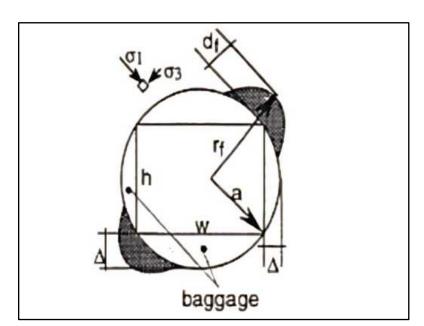
dimana,

a = Radius lubang bukaan (m)

w = Lebar lubang bukaan (m)

h = Tinggi lubang bukaan (m)

Batuan dalam lingkaran pada Gambar 19 disebut *baggage*, memiliki kedalaman dan harus ditopang segera setelah menunjukkan adanya rekahan. Kedalaman baggage (Δ) kira-kira 20% dari tinggi atau lebar bukaan sedangkan kedalaman zona elips rekahan geser didefenisikan sebagai *depth of failure* (DOF = rf - a) untuk terowongan melingkar dengan radius a (kaiser *et al.*, 1996).





Gambar 19 Geometri excavation baggage (kaiser et al., 1996)

Optimized using trial version www.balesio.com Penambahan volume (*bulking*) pada batuan penyusun dinding terowongan dapat dikontrol atau setidaknya ditahan dengan pemasangan sistem penyangga yang tepat. Untuk mengetahui kebutuhan kapasitas penyangga dalam mengalami *displacement*, perluditentukan besarnya pengembangan zona hancur yang berada di batas penggalian. Kaiser *et al.* (1996) mendefinisikan faktor pengembangan (*bulking factor*) berdasarkan Persamaan 38 dan ketentuan Tabel 7 sebagai berikut.

$$BF = \frac{u_W - udf}{DOF} \times 100\% \tag{38}$$

dimana,

uw = Displacement di batas galian (m)

udf = Displacement di radius failure (m)

 $DOF = Depth \ of failure \ (m)$

Tabel 7 Bulking factor pada massa batuan

Support Condition	Bulking Factor (%)	
No Support	30 ± 5	
Light Support (Bolting and Mesh)	10 ± 3	
Yielding Support (Light + Shotcrete)	5 ± 1	
Strong Support (Yield + Reinforcement)	$1{,}5\pm0{,}5$	

Sumber: Kaiser et al., (1996)

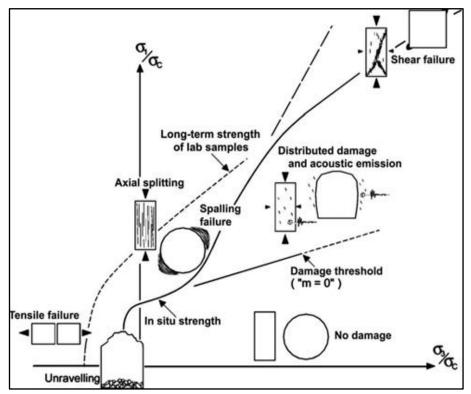
Diederichs (2007) merumuskan bahwa *displacement* yang terjadi pada batas galian massa batuan yang keras dapat diperoleh berdasarkan *Depth of Failure* (DOF) dan *Bulking Factor* (BF) berdasarkan Persamaan 32 berikut.

$$Displacement = DOF \times BF \tag{32}$$

Spalling telah lama dikenal sebagai mekanisme failure di tambang bawah tanah yang dalam dengan kondisi massa batuan yang keras (Diederichs, 2007). Spalling adalah proses pengembangan rekahan pada massa batuan akibat pengaruh pembebanan. Mekanisme ini mendominasi kerusakan pada massa batuan di sekitar batas penggalian lubang bukaan di bawah tekanan tinggi. Meskipun pada batuan

as, *spalling* tidak menyebabkan batuan pecah secara keras. Pemodelan untuk menentukan *spalling criteria* dapat dilakukan dengan pengurangan gangan minor terhadap tegangan mayor dibagi nilai kekuatan batuan.





Gambar 20 Perilaku batuan terhadap kondisi tegangan (Diederichs, 2007)

Diederich and Martin (2003) pada Gambar 20 telah memprediksi kedalaman kerusakan penggalian dengan tegangan terinduksi pada massa batuan getas untuk lubang bukaan *horsehoe*. Batas penggalian yang memiliki *overbreak* maksimum terletak pada permukaan yang paralel terhadap arah *insitu stress* maksimum. Perkiraan ini dihitung sebagai jarak radial (Rf) dari pusat terowongan dengan radius tertentu (a) dan dibandingkan terhadap tegangan tangensial maksimum (σmax) yang dinormalisasi dengan nilai *crack initiation* (ci) berikut.

$$\frac{rf}{a} = 0.5 \frac{\sigma \text{max}}{\sigma c \, ci} + 0.48 \tag{33}$$

dengan DOF dapat ditentukan sebagai berikut.

$$DOF = Rf - a \tag{34}$$

dimana,

PDF

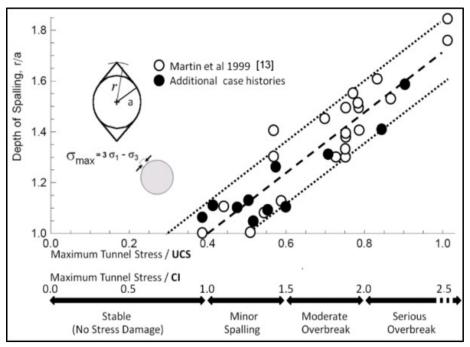
f = Radius spalling (m)

= Radius ekuivalen terowongan (m)

nax = Tegangan tangensial maksimum (MPa)

= Crack initiation

Optimized using trial version www.balesio.com Depth of Failure (DOF) merupakan kedalaman kerusakan massa batuan yang disebabkan oleh tegangan terinduksi akibat aktivitas penambangan seperti undercutting dan mucking yang dapat memicu terjadinya event seismic. DOF juga diartikan sebagai tebal zona spalling berdasarkan Gambar 21 sebagai berikut.



Gambar 21 Prediksi *spalling* secara empiris (Diederichs *et al.*, 2010)

Crack initiation merepresentasikan tingkat tegangan ketika rekahan skala fragmen pada batuan mulai terinisiasi. Sebelum mencapai kondisi ini, tidak ada kerusakan baru yang ditimbulkan dan kekuatan jangka panjang dari batuan tidak berubah. Setelah rekahan mulai terbentuk, rekahan tersebut dapat menjalar dan menyebabkan spalling. crack initiation dapat ditentukan dari pengujian uniaxial compressive strength (UCS) di Laboratorium. Kondisi ini biasanya terjadi ketika tegangan mencapai 35 – 50% nilai UCS dari sampel batuan (Diederichs et al., 2010).

Jika tegangan sudah melebihi batas terinisiasinya rekahan (*crack initiation limit*), rekahan dapat terbentuk dan berkembang seiring dengan penambahan tegangan. Ketika terkekarkan, batuan akan relatif mengembang. Rekahan pada massa batuandi sekitar penggalian dapat menyebabkan ekspansi volume yang tibatiba atau yangdisebut sebagai *bulking*. Fenomena ini sangat umum terjadi dan mirip

well factor, yaitu pengembangan volume aktual terhadap volume insitu. bulking pada zona batuan yang runtuh dipengaruhi oleh geometri bukaan, tuan, dan kinerja sistem penyangga (Eberhardt *et al.*, 1998).



2.8 Analisis Regresi Linear

Sebelum suatu keputusan diambil maka perlu dilakukan suatu peramalan (forecasting) mengenai kemungkinan yang terjadi atau harapan di masa depan yang berkaitan dengan keputusan tersebut. Hal tersebut dapat lebih mudah dilakukan bila suatu hubungan (relasi) dapat ditentukan antara variabel yang akan diramal dengan variabel lain yang telah diketahui ataupun sangat mudah untuk diantisipasi. Untuk keperluan tersebut, regresi dan korelasi sangat luas digunakan sebagai perangkat analisisnya. Analisis regresi digunakan untuk mempelajari dan mengukur hubungan statistik yang terjadi antara dua atau lebih variabel. Dalam regresi sederhana dikaji dua variabel, sedangkan dalam regresi majemuk dikaji lebih dari dua variabel. Dalam analisis regresi, suatu persamaan regresi hendak ditentukan dan digunakan untuk menggambarkan pola atau fungsi hubungan yang terdapat antara variabel. Variabel yang akan diestimasi nilainya disebut variabel terikat dan biasanya diplot pada sumbu tegak. Sedangkan variabel bebas adalah variabel yang diasumsikan memberikan pengaruh terhadap variasi variabel terikat dan biasanya diplot pada sumbu data. Persamaan umum yang digunakan dari regresi linier sederhana adalah sebagai berikut (Harinaldi, 2005).

$$y = a + bx (35)$$

dimana,

y = nilai estimasi variabel terikat

a = titik potong garis regresi pada sumbu tegak atau nilai estimasi y bila x sama dengan nol

b = gradien regresi (perubahan nilai estimasi y per satuan perubahan nilai x)

x = nilai variabel bebas

Analisis korelasi adalah parameter yang membahas seberapa kuat hubungan antara satu variabel dengan variabel lainnya. Dua variabel dikatakan berkolerasi apabila perubahan dalam satu variabel diikuti oleh perubahan variabel lain, baik yang searah maupun tidak. Koefisien determinasi (R2) merupakan kuadrat dari

korelasi yang menyatakan ukuran banyaknya total variasi variabel terikat lapat dijelaskan secara regresi oleh variabel bebas x atau koefisien asi dapat didefinisikan pula sebagai nilai yang menunjukkan seberapa *fit*



model regresi yang dibuat dengan sebaran data yang ada. Nilai koefisien determinasi berkisar antara $0 \le R^2 \le 1$ atau bila dinyatakan dalam persen berkisar $0\% \le R2 \le 100\%$. Contoh R^2 sebesar 0,98 maka dapat diartikan bahwa kontribusi variabel x terhadap variabel y adalah sebesar 98%, sedangkan 2% dipengaruhi oleh variabel lainnya dengan sebab-sebab yang belum diketahui.

Tabel 8 Nilai koefisien determinasi (R ²)				
Interval Koefisien	Tingkat Hubungan			
0,00 - 0,19	Sangat Rendah			
0,20-0,39	Rendah			
0,40 - 0,59	Sedang			
0,60-0,79	Kuat			
0,80 – 1,0	Sangat Kuat			

Sumber: Harinaldi (2005)

Uji asumsi klasik merupakan persyaratan statistik yang harus dipenuhi pada analisis regresi linear berganda yang berbasis *Ordinary Least Square* (OLS). Analisis regresi yang tidak didasarkan pada OLS, maka demikian itu tidak memerlukan persyaratan asumsi klasik, misalnya regresi logistik atau regresi ordinal. Demikian juga, tidak semua tes penerimaan klasik perlu dilakukan dalam analisis regresi linier misalnya uji multikolinieritas tidak dilakukan dalam analisis regresi linier sederhana dan uji autokorelasi tidak perlu diterapkan pada data *crosssectional*. Hal ini yang harus dipahami mengenai konsep dari uji asumsi klasik dan penggunaannya, sehingga dalam aplikasi statistik yang digunakan dalam penelitian akan menjadi tepat sasaran penggunaannya. Ada beberapa jenis uji asumsi klasik dalam ilmu statistika, namun yang umum digunakan dalam regresi linear sederhana adalah uji normalitas, uji heteroskedastisitas, uji linearitas dan uji autokorelasi yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Uji Normalitas

Uji normalitas adalah untuk melihat apakah nilai residu terdistribusi normal atau tidak. Model regresi yang baik adalah memiliki residu yang rdistribusi normal, oleh karena itu tidak dilakukan untuk setiap variabel tapi untuk nilai residual.

ji Heteroskedastisitas





Dalam uji heteroskedastisitas, diperiksa apakah ada perbedaan yang tidak sama antara satu residu dan pengamatan lain. Salah satu model regresi yang memenuhi persyaratan adalah bahwa ada kesamaan dalam varians antara residu dari satu pengamatan dan lainnya yang disebut *homoscedasticity*.

3. Uji Linearitas

Uji linearitas dipergunakan untuk melihat apakah model yang dibangun mempunyai hubungan linear atau tidak. Hubungan antar variabel yang secara teoritis tidak hubungan linear tidak dapat dianalisis dengan regresi linier, seperti masalah elastisitas.

4. Uji autokorelasi

Uji autokorelasi adalah untuk melihat apakah terjadi korelasi antara suatu variabel dengan variabel sebelumnya Secara sederhana, analisis regresi terdiri dari menguji pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen sehingga tidak boleh ada korelasi antara pengamatan dan data observasi sebelumnya.

