

**ANALISIS KARAKTERISTIK DAN PENENTUAN AMBANG
BATAS ALARM *VELOCITY* DAN *INVERSE-VELOCITY*
BERDASARKAN JENIS BATUAN DAN STRUKTUR
GEOLOGI PADA DATA *SLOPE STABILITY RADAR***

TESIS

Oleh :

**MUH. ARIF IDHAM
212130026**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI MINERAL
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
YOGYAKARTA
2017**

**ANALISIS KARAKTERISTIK DAN PENENTUAN AMBANG
BATAS ALARM *VELOCITY* DAN *INVERSE-VELOCITY*
BERDASARKAN JENIS BATUAN DAN STRUKTUR
GEOLOGI PADA DATA *SLOPE STABILITY RADAR***

TESIS

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik dari
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

Oleh

**MUH ARIF IDHAM
212130026**



**FAKULTAS TEKNOLOGI MINERAL
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN”
YOGYAKARTA
2017**

**ANALISIS KARAKTERISTIK DAN PENENTUAN AMBANG
BATAS ALARM *VELOCITY* DAN *INVERSE-VELOCITY*
BERDASARKAN JENIS BATUAN DAN STRUKTUR
GEOLOGI PADA DATA *SLOPE STABILITY RADAR***

Oleh

**Muh Arif Idham
212130026**



Disetujui untuk

Program Studi Magister Teknik Pertambangan

Fakultas Teknologi Mineral

Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

Tanggal 31 Januari 2017

Pembimbing I



(Dr.Ir. Barlian Dwinagara, MT)

Pembimbing II



(Dr. Edy Nursanto, ST., MT)

Dipersembahkan Untuk

Nurjannah Nahru, Idham Dg Tarru,Fitria Puspitasari Ely

RINGKASAN

Penelitian ini dilakukan di PT. Wahana Baratama Mining (PT. WBM) yang berlokasi di Satu Kabupaten Tanah Bumbu Provinsi Kalimantan Selatan.

Kestabilan lereng pada tambang terbuka menjadi perhatian dalam hubungan keselamatan maupun ekonomi dalam suatu lingkungan tambang. Banyak ketidakpastian dalam analisa kestabilan lereng, diantaranya sifat fisik, karakteristik massa batuan dan struktur geologi. Pemantauan perpindahan lereng (*displacement monitoring*) adalah salah satu metode analisis kestabilan berdasarkan data yang terukur secara riil di lapangan dan dapat membantu meminimalkan risiko terhadap keselamatan karyawan dan peralatan dalam lingkungan tambang.

Slope Stability Radar (SSR) adalah salah satu peralatan pemantauan yang saat ini mulai dipakai oleh tambang terbuka di Indonesia. Tingkat akurasi, realibilitas dan intensitas pemantauan oleh SSR sangat baik dalam menampilkan “*real deformation*” dari suatu lereng. Dalam analisis data SSR, *trend* dari grafik yang menjadi kunci pemantauan. Kombinasi dari *trend* deformasi, *trend* maksimum *velocity* dan minimum *invers-velocity* akan dihasilkan suatu nilai *threshold* dalam hubungannya dengan *early warning time* sebelum terjadinya longsor.

Struktur geologi yang berkembang berupa sesar naik dan lipatan banyak meningkatkan ketidakstabilan pada dinding tambang hingga beberapa kasus menjadi pemicu kejadian longsor. Dari data *velocity* dan *Inverse-velocity* menunjukkan waktu kejadian longsor pada area dengan struktur geologi sebagai pemicu (*triggers*) terjadi lebih cepat, berdasarkan *Velocity* kejadian longsor pada *Sandstone* terjadi lebih cepat dibanding *Mudstone*. Analisis hubungan terhadap *Warning Time*, nilai *Inverse-velocity* berbanding lurus terhadap perubahan waktu.

Penelitian dilakukan sebagai upaya membantu para *engineer* dalam meningkatkan kualitas pemantauan dengan melihat karakteristik berdasarkan *trend* data SSR, khususnya pada area dengan perbedaan jenis batuan dan adanya pengaruh struktur geologi terhadap longsor. Perbedaan karakteristik yang ada diharapkan membantu dalam menentukan *threshold* alarm sehingga dapat dijadikan acuan dalam SSR program dalam suatu manajemen risiko longsor, khususnya pada lingkungan tambang batubara.

Kata kunci : *Slope Stability Radar, Velocity, Inverse-velocity, Structural geology, Threshold Alarm,*

ABSTRACT

Slope stability at open pit mining system for safety and economics element is critical issue with employees and equipment damage due to danger of slope failure at the mining environment. Commonly uncertainty on slope stability analysis consist of physical properties, mass movement, and structural geology. Slope stability monitoring with mass movement (displacement) considered to determine the stability of slope wall. Measurable real-time data monitoring provided to reduce risk of unstable slope wall involved with employees, equipment, and economics at the mining environmental.

Slope Stability Radar as a monitoring instrument used in several of Indonesian open pit mining. Accuration, realibilitation, intensity of SSR monitoring considered very realible to represent "real deformation" of slope wall. On Slope stability Radar data analysis, trend of graphics behaviour is "the key" of monitoring. Combined of trend deformation, velocity and inverse-velocity provide threshold with early warning system prior to failure.

Geology structures fold and thrust fault deleterious stability of slope wall which a lot of case succeed as a "triggers" of failure occurs. By velocity and inverse-velocity rate represent the acceleration of the area with structural geology involved change rapidly and term acceleration of Sandstone by velocity rate faster than Mudstone. Analysis of warning time with Inverse-velocity directly proportional with linier equation varied.

The case study conducted as an effort to help engineer boost "confident" to determine characteristic of failure by the data of slope stability radar and trend particularly with structural geology involved. Variety of graphics characteristic from 15 analysis data purpose to determine "threshold alarm" and proposed as reference on SSR monitoring system for the risk management program at coal mining environmental.

Keyword : Slope Stability Radar, Velocity, Inverse-velocity, Structural geology, threshold alarm.

KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah S.W.T. atas rahmat dan hidayahNya sehingga Penyusunan Tesis dengan judul “Analisis Karakteristik Dan Penentuan Ambang Batas Alarm *Velocity* Dan *Inverse-Velocity* Berdasarkan Jenis Batuan dan Struktur Geologi Pada Data *Slope Stability Radar*” ini dapat diselesaikan. Penelitian dilaksanakan di Daerah Satui Kabupaten Tanah Bumbu Provinsi Sulawesi Selatan mulai bulan Maret 2015 sampai dengan Agustus 2015.

Atas selesainya penyusunan tesis ini, diucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Prof.Dr.Ir Sari Bahagia Kusuma, MSc, Rektor UPN “Veteran” Yogyakarta.
2. Bapak Dr.Ir. Barlian Dwinagara, MT sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Tambang (MTA), dan juga sebagai Pembimbing I,
3. Bapak Dr. Edy Nursanto, ST., MT. Sebagai Pembimbing II
4. Bapak Ir.Bagus Wiyono MT, dan Bapak Ir. R. Hariyanto MT sebagai Dosen Pembahas.
5. Terima kasih disampaikan kepada management site PT. Wahana Baratama Mining (Bayan Resources Group) yang telah memberikan kesempatan terhadap penulis dalam melakukan penelitian. danseluruh teman – teman Magister Teknik Tambang UPNV atas kerjasama dan diskusi-diskusinya selama penulisan Tesis ini.

Akhirnya, semoga Tesis ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pada umumnya, dan khususnya ilmu pertambangan.

Yogyakarta, Januari 2017

Penulis

(Muh. Arif Idham)

DAFTAR ISI

	Halaman
RINGKASAN	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	vii
BAB	
I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	3
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Hipotesis	5
1.6 Metode Penelitian	5
1.7 Sistematika Tesis	6
II Tinjauan Umum.....	7
2.1 Kesampaian dan Lokasi Penelitian	7
2.2 Geologi dan Stratigrafi Regional Daerah Penelitian ..	8
2.2.1 Geologi Regional	8
2.2.2 Stratigrafi Regional.....	10
2.2.3 Kondisi Geoteknik Daerah Penelitian	13
2.2.3.1 Analisis Kestabilan lereng berdasarkan data Bor	13
2.2.3.2 Metode Analisis	15
2.2.3.3 Analisis Lereng Penggalian	17
2.3 Kondisi Penambangan Daerah Penelitian.....	22
2.3.1 Sistem Penambangan Daerah Penelitian	22
2.3.2 Cadangan dan Kualitas Batubara.....	23
III Dasar Teori	24
3.1 Defenisi Prilaku Batuan.....	24
3.2 Model dan Mekanisme Longsor pada Tambang Batubara.....	24

3.2.1	Penelitian Perilaku Longsor Lereng di Tambang Batubara...	27
3.2.2	Penelitian Tentang Perilaku Batuan Lunak Di Indonesia.....	27
3.3	Deformasi pada Batuan.....	28
3.3.1	Perpindahan Total Bergantung Waktu.....	29
3.3.2	Perilaku deformasi Bergantung Waktu.....	30
3.3.3	Klasifikasi Kecepatan Perpindahan Lereng	34
3.3.4	Interpretasi Deformasi dan Mekanisme Longsor data MSR.....	34
3.4	Prediksi Waktu Longsor dengan Metode <i>Inverse-Velocity</i>	35
3.5	Instrument Pemantauan <i>Slope Stability Radar</i>	38
IV	Hasil Penelitian	40
4.1	Evaluasi Data Wall Folder.....	40
4.2	Karakteristik dan Waktu Longsor.....	41
4.3	<i>Velocity</i> dan <i>Inverse – Velocity</i>	44
4.4	Evaluasi Jenis Batuan	47
4.5	Evaluasi Pengaruh Struktur Geologi	50
V	Pembahasan	55
5.1	Karakteristik <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity</i>	55
5.1.1	Karakteristik <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity Low-wall</i>	55
5.1.2	Karakteristik <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity High-wall</i>	56
5.1.3	Karakteristik <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity Mudstone</i>	58
5.1.4	Karakteristik <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity Sandstone</i>	59
5.1.5	Karakteristik <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity Struktur Geologi</i>	60
5.2	Penentuan Ambang Batas (<i>Threshold</i>) sebagai pemicu alarm	62
5.2.1	Penentuan Ambang Batas (<i>threshold</i>) <i>Low-wall</i> dan <i>High-wall</i>	62
5.2.2	Penentuan Ambang Batas (<i>threshold</i>) <i>Mudstone</i> dan <i>Sandstone</i>	65
5.2.3	Penentuan Ambang Batas (<i>threshold</i>) Struktur Dominan dan <i>Non-Struktur Geologi</i>	68
5.3	Analisis Hubungan <i>Inverse-Velocity</i> Longsor dengan <i>Warning Time</i>	71
VI	Kesimpulan dan Saran.....	76
6.1	Kesimpulan	76

6.2	Saran	77
	DAFTAR PUSTAKA	78
	LAMPIRAN	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Peta kesampaian daerah penambangan PT. Wahana Baratama Mining, Propinsi Kalimantan Selatan.....	8
2.2 Peta Geologi Regional Lokasi Pertambangan PT. WBM.....	12
2.3 Stratigrafi Regional Daerah Kalimantan Selatan.....	12
2.4 Model Struktur Geologi PT.Wahana Baratama Mining.....	14
2.5 Model Longsor Busur	16
2.6 Model Skema Penambangan PT. WBM.....	16
3.1 Model Longsor Bidang di Tambang Batubara Terbuka.....	26
3.2 Hubungan Bidang Diskontinuitas dan jenis Loengsot (Hoek dan Bray, 1980)	26
3.3 Total perpindahan versus waktu (Broadbent and Zavodni, 1982)	30
3.4 Model deformasi massa batuan berdasarkan waktu dan kejadian (Mercer, 2006).....	32
3.5 Model deformasi massa batuan berdasarkan waktu dan kejadian setelah longsor dan perilaku penambangan (Mercer, 2006).....	32
3.6 Kumulatif rate dari displacement (mm/hr) ditentukan berdasarkan monitoring dari longsor di tambang batubara New Vaal (Osasan,2012).....	35
3.7 Kalkulasi <i>Velocity</i> dan <i>Inverse Velocity</i> dari perubahan deformasi dan Waktu.....	36
3.8 Metode <i>Inverse velocity</i> untuk prediksi waktu longsor, Fukuzono, (1985)	36
3.9 Pengukuran deformasi dengan interferometri (Noon, 2013).....	39
4.1 Waktu (jam) proses terjadinya Karakteristik longsor progresif, failure dan post failure pada area <i>Low-wal</i>	43

4.2	Waktu (jam) proses terjadinya Karakteristik longsor progresif, failure dan post failure pada area <i>High-wall</i>	44
4.3	Max <i>velocity</i> wall folder area <i>Low-wall</i> dan <i>High-wall</i> dalam <i>time window 1 jam (Over 60)</i>	45
4.4	Max <i>velocity</i> wall folder area <i>Low-wall</i> dan <i>High-wall</i> dalam <i>time window 1 hari (Over 1440)</i>	46
4.5	Minimum <i>Inverse-velocity</i> wall folder area <i>Low-wall</i> dan <i>High-wall</i> dalam <i>time window 1 jam (Over 60)</i>	46
4.6	Minimum <i>Inverse-velocity</i> wall folder area <i>Low-wall</i> dan <i>High-wall</i> dalam <i>time window 1 hari (Over 1440)</i>	47
4.7	Situasi Pit Jumbo PT. Wahana Baratama Mining	51
4.8	Intrepretasi Struktur geologi major pada area Low Wall PT.WBM yang berbatasan dengan PT. Arutmin Indonesia	51
4.9	Struktur Geologi Sesar naik diikuti oleh Lipatan Area Low Wall Western (vertical displacement > 10 meter)	52
4.10	Interpretasi struktur geologi sesar naik dari borehole drilling geologi Western Area, 50m <i>vertical displacement</i>	52
4.11	Mapping area Longsor pada area <i>Low-wall</i> dan <i>High-wall</i>	54
5.1	Karakteristik <i>velocity Low-wall</i> sebelum dan setelah longsor.....	56
5.2	Karakteristik <i>inverse-velocity Low-wall</i> sebelum dan setelah longsor	56
5.3	Karakteristik <i>Velocity High-wall</i> sebelum dan setelah longsor.....	57
5.4	Karakteristik <i>inverse-Velocity High-wall</i> sebelum dan setelah longsor	57
5.5	Karakteristik <i>Velocity Mudstone</i> sebelum dan setelah longsor	58
5.6	Karakteristik <i>inverse-Velocity Mudstone</i> sebelum dan setelah longsor	59
5.7	Karakteristik <i>Velocity Sandstone</i> sebelum dan setelah longsor.....	60
5.8	Karakteristik <i>inverse-Velocity Sandstone</i> sebelum dan setelah longsor	60

5.9	Karakteristik <i>Velocity Struktur Geologi</i> sebelum dan setelah longsor	62
5.10	Karakteristik <i>inverse-Velocity Struktur Geologi</i> sebelum dan setelah longsor	62
5.11	Ambang Batas <i>Velocity Low-wall</i>	63
5.12	Ambang Batas <i>Velocity High-wall</i>	64
5.13	Ambang Batas <i>InverseVelocity Low-wall</i>	64
5.14	Ambang Batas <i>InverseVelocity High-wall</i>	65
5.15	Ambang Batas <i>Velocity Mudstone</i>	66
5.16	Ambang Batas <i>Velocity Sandstone</i>	66
5.17	Ambang Batas <i>Inverse-Velocity Mudstone</i>	67
5.18	Ambang Batas <i>Inverse-Velocity Sandstone</i>	67
5.19	Ambang Batas <i>Velocity Struktur Geologi</i>	69
5.20	Ambang Batas <i>Velocity non-Struktur Geologi</i>	69
5.21	Ambang Batas <i>Velocity Struktur Geologi</i>	70
5.21	Ambang Batas <i>Inverse - Velocity non -Struktur Geologi</i>	70
5.23	Hubungan <i>Inverse-Velocity Warning Time Low-wall</i>	72
5.24	Trend persamaan <i>Inverse-Velocity Warning Time Low-wall</i>	72
5.25	Hubungan <i>Inverse-Velocity Warning Time High-wall</i>	73
5.26	Trend persamaan <i>Inverse-Velocity Warning Time High-wall</i>	73
5.27	Hubungan <i>Inverse-Velocity Warning Time Mudstone</i>	74
5.28	Hubungan <i>Inverse-Velocity Warning Time Sandstone</i>	74
5.29	Hubungan <i>Inverse-Velocity Warning Time Struktur Geologi</i>	75
5.30	Hubungan <i>Inverse-Velocity Warning Time Non-Struktur Geologi</i>	75

DAFTAR TABEL

Tabel	halaman
1.1 Faktor Keamanan Minimum Kemantapan Lereng (Pekerjaan Umum, 1987)	18
2.2 Data Material Yang Digunakan Untuk Analisis Kemantapan Lereng Tunggal.....	18
2.3 Hasil Analisis Kemantapan Lereng Tunggal Penambangan	19
2.4 Hasil Faktor Keamanan Lereng Keseluruhan.....	20
2.5 Karakteristik Material Yang Digunakan Untuk Analisis Kemantapan Lereng Timbunan	21
2.6 Hasil Perhitungan FK lereng timbunan sudut lereng 20	21
2.7 Hasil Perhitungan FK lereng timbunan sudut lereng 25	22
2.8 Hasil Perhitungan FK lereng timbunan sudut lereng 30	22
3.1 Klasifikasi Kekuatan Batuan berdasarkan nilai UCS Deere dan Miller (1966)	29
3.2 Klasifikasi Pergerakan lereng (Varnes, 1978).....	33
3.3 Klasifikasi berdasarkan perbedaan <i>Velocity</i> (Varnes 1978, Hungry et al. 2001, Hungry & Evans 2004).....	34
4.1 Wall Folder ID dan Waktu Monitoring	40
4.2 Karakteristik Longsor <i>Low-wall</i>	42
4.3 Karakteristik Longsor <i>High-wall</i>	42
4.4 Waktu Kejadian Berdasarkan Karakteristik Graphik	43
4.5 <i>Nilai Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity</i> untuk <i>1h time window</i> dan <i>24h time window</i>	45
4.6 Jenis Batuan Masing-Masing Wall Folder	48
4.7 Sifat Fisik Batuan dari Hasil Laboratorium.....	49
4.8 Dimensi Lereng dan Nilai Faktor Keamanan	49

4.9	Faktor Pemicu Longsor dan Pengaruh Struktur Geologi	53
5.1	Nilai Ambang Batas <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity</i> area <i>Low-wall</i> dan <i>High-wall</i>	63
5.2	Nilai Ambang Batas <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity</i> <i>Mudstone</i> dan <i>Sandstone</i>	65
5.3	Nilai Ambang Batas <i>Velocity</i> dan <i>Inverse-Velocity</i> Struktur <i>Geologi</i>	68
5.4	Interpretasi Koefisien Korelasi	74
5.5	Nilai <i>Inverse_velocity</i> minimum, Persamaan <i>Logarithmic</i> dan nilai Koefisien dan Tingkat Hubungan	75

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	halaman
A. Wall Folder <i>Slope Stabiliti Radar</i>	80
B. Data dan Analisis Wall Folder <i>Slope Stabiliti Radar</i>	87
C. Data dan Analisis Pengamatan Lapangan	88
D. Tabel Interpretasi Koefisien Korelasi	89
E. Histogram Data Velocity dan Inverse-Velocity	90
F. Keputusan Menteri Pertambangan Dan Energi Nomor : 555.K/26/M.Pe/1995	91

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam 2 tahun terakhir harga komoditas batubara secara global cenderung menurun dan sedikit banyak mempengaruhi kebijakan masing-masing perusahaan dalam menjaga produksi batubara dengan menurunkan nisbah rasio (*stripping ratio*) pengupasan tanah penutup. Membuat lereng lebih optimis adalah salah satu langkah dalam menjaga produksi batubara dengan nisbah rasio lebih kecil sehingga kestabilan lereng pada tambang batubara menjadi salah satu isu keselamatan dalam suatu lingkungan tambang. Disain yang optimis menimbulkan risiko yang lebih tinggi terhadap kestabilan lereng dan banyak dijumpai ketidakpastian dalam analisis kestabilan lereng mencakup sifat fisik, karakteristik massa batuan dan tentu saja struktur geologi yang ada.

Risiko sangat jarang untuk bisa dihilangkan, namun tingkat/ level dari suatu risiko dapat dikurangi hingga risiko tersebut dapat diterima secara operasional tambang (*acceptable risk*). Adanya program monitoring di area tambang oleh *Slope Stability Radar* adalah bentuk monitoring lereng dengan data aktual dan faktual diharapkan dapat menjadi nilai untuk mengurangi risiko pada operasional tambang. Monitoring dengan *Slope Stability Radar* dengan hasil analisis nilai *threshold* data adalah upaya tindakan pencegahan dan menjadi bagian besar pada standart operasional prosedur perusahaan agar risiko suatu kegagalan lereng dalam operasional tambang dapat diterima. Sistem monitoring lereng penambangan telah mengalami kemajuan teknologi yang cukup baik. Keberadaan *Slope Stability Radar* pada area penambangan yang menampilkan data deformasi secara *real time* dapat membantu pengawasan lereng tambang terutama pada area lereng tambang yang memiliki kecenderungan memiliki risiko ketidakstabilan seperti area dengan struktur geologi yang dominan dalam suatu lingkungan tambang.

Menyangkut kemantapan lereng, pemerintah telah membuat regulasi berdasarkan surat Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi Republik Indonesia No.555.K/26/M.PE/1995 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pertambangan Umum dalam Bab VI Pasal 240 sampai Pasal 242 yang berisi tentang peraturan mengenai tinggi jenjang, lebar jenjang dan sudut lereng suatu tambang terbuka yang diatur secara umum berdasarkan pada ukuran peralatan, jenis batuan, sistem penambangan serta kondisi geologi yang bekerja. Melalui Kep-Men Pertambangan dan Energi No.555.K/26/M.PE/1995, Negara mewajibkan suatu perusahaan tambang dalam hal keselamatan dan kesehatan kerja untuk melakukan kajian geoteknik sebelum dilakukan proses penambangan. Lereng yang semakin curam akan memaksimalkan perolehan penambangan, namun meningkatkan risiko kestabilan lereng. Sebaliknya lereng yang semakin landai akan menurunkan perolehan penambangan, namun merendahkan risiko kestabilan lereng (lereng cenderung lebih stabil). Sejumlah ketidakpastian yang menjadi faktor minimnya informasi atau data geoteknik yang dimiliki akan menyebabkan para ahli geoteknik selalu bekerja pada kondisi pesimis. Salah satu cara yang dilakukan dalam analisis dampak longsor lereng dapat dilakukan dengan cara memanfaatkan data monitoring pergerakan lereng. Observasi visual juga dilakukan guna mengkonfirmasi pergerakan lereng tersebut dan pada akhirnya waktu dan volume longsor dapat diprediksi, yang memungkinkan tindakan pencegahan dilakukan guna meminimalkan dampak fatalitas dan kerugian ekonomi dalam suatu lingkungan pertambangan.

Pemantauan lereng secara *real time* oleh *Slope Stability Radar* dilakukan untuk memberikan informasi terpercaya dan akurat dari pergerakan lereng kepada tim geoteknik dan operasional tambang. Belum ada metode yang umum digunakan dalam memprediksi longsor di lereng tambang, karena perbedaan dari karakteristik lereng penambangan. Beberapa penelitian sebelumnya tentang prediksi waktu longsor di tambang terbuka seperti Zavodni dan Broadbent (1982), Fukuzono (1985), Voight (1988), dan Mercer (2006) belum bersifat universal. Pengembangan grafik stabilitas lereng, dilakukan dengan cara

menghubungkan antara karakteristik grafik pada parameter tertentu hasil monitoring oleh *Slope Stability Radar*. Grafik stabilitas lereng dari hasil pemantauan ini diharapkan dapat memberikan solusi praktis di lapangan pada lereng tambang terbuka yang memiliki struktur yang berpengaruh terhadap kestabilan lereng dengan catatan memiliki kondisi batuan sedimen yang sama dan tentu saja dengan kondisi struktur geologi yang sama.

1.2 Permasalahan

Terdapat beberapa faktor ketidakpastian pada kekuatan massa batuan dalam analisis kestabilan lereng tambang. Data pemantauan lereng dengan menggunakan instrumen pemantauan adalah data yang dianggap paling mewakili kekuatan massa batuan itu sendiri. Salah satu faktor ketidakpastian adalah adanya bidang lemah termasuk struktur geologi yang tidak dapat teridentifikasi pada saat dilakukan analisis kestabilan lereng. PT. Wahana Baratama Mining (PT.WBM) telah melakukan pemantauan dengan instrumen *Slope Stability Radar* (SSR) yang dianggap dapat memberikan data dengan tingkat akurasi yang tinggi (*real deformation*). Pada area *Low-wall* dan sebagian *High-wall* terdapat struktur geologi (lipatan dan patahan) sehingga menjadi faktor ketidakpastian dan mempengaruhi kestabilan lereng tambang. Struktur geologi yang sudah ada bukan menjadi masalah utama penelitian namun melalui program monitoring lereng oleh SSR perlu dibuat suatu analisis karakteristik longsor berdasarkan parameter jenis batuan penyusun lereng tambang dengan struktur geologi yang ada dan menjadi pemicu kejadian longsor sehingga diharapkan dapat dijumpai suatu karakteristik khusus melalui kombinasi data deformasi *tren*, *Velocity*, dan *Inverse-velocity* sehingga membantu dalam penentuan *threshold alarm* untuk lereng dengan karakteristik tertentu sebagai *early warning sistem* dalam suatu manajemen risiko tanggap darurat longsor di lingkungan tambang.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi karakteristik longsor berdasarkan *velocity* dan *inverse-velocity* lereng pada longsor yang terpantau oleh *SSR* pada area *Low-wall* dan *High-wall*, pada *Mudstone* dan *Sandstone* sebagai batuan utama dan pada area Struktur Geologi dan non struktur geologi yang bekerja.
2. Menentukan ambang batas (*Threshold-alarm*) berdasarkan *velocity* dan *inverse-velocity* lereng pada longsor yang terpantau oleh *SSR* pada area *Low-wall* dan *High-wall*, pada *Mudstone* dan *Sandstone* sebagai batuan utama dan pada area Struktur Geologi dan non struktur geologi yang bekerja.
3. Menganalisis hubungan antara *inverse-velocity* dengan *warning time* dari longsor yang terpantau oleh *Slope Stability Radar*.

I.3.2 Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat antara lain :

1. Membantu *engineer* dalam memahami perilaku karakteristik grafik longsor berdasarkan parameter untuk area *Low-wall* dan *High-wall*, Berdasarkan jenis batuan dan kehadiran struktur geologi sehingga dapat meningkatkan kepercayaan diri dalam penentuan *threshold* (ambang batas) *alarm* pada parameter tersebut.
2. Memberikan data *early warning sistem* sebelum terjadinya longsor berdasarkan perubahan karakteristik perilaku lereng berdasarkan parameter *Low-wall* dan *High-wall*, berdasarkan batuan penyusun lereng, struktur geologi yang ada hingga dapat digunakan sebagai acuan pembuatan manajemen risiko tanggap darurat longsor.
3. Membantu *engineer* dalam memahami pengaruh struktur geologi dalam perubahan karakteristik lereng dalam suatu program pemantauan lereng.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini, antara lain :

1. Analisis data dilakukan di area konsesi PT. Wahana Baratama Mining.
2. Data yang dianalisis adalah data *Slope Stability Radar* dari tahun 2011 hingga tahun 2015 dan menggunakan *SSR Viewer 8.1*.

3. Data yang dianalisis adalah data *wall folder Slope Stability Radar* yang terpantau mengalami longsor.
4. Karakteristik yang dianalisis adalah data monitoring dimulai dari pra-longsor, longsor dan pasca longsor dan termasuk luas area yang terpantau longsor.
5. Pengambilan data di lapangan secara visual pada lereng yang terpantau longsor oleh *Slope stability Radar* termasuk jenis batuan yang ada dan struktur geologi yang bekerja.
6. Analisis berupa penentuan batas *threshold alarm* dari data *Velocity* dan *Inverse-Velocity Slope Stability Radar*.

1.5 Hipotesis

Struktur geologi sebagai faktor ketidakpastian akan sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Pada area dengan struktur geologi berpengaruh dominan, deformasi massa-batuan cenderung memiliki pergerakan yang lebih cepat. PT. Wahana Baratama Mining yang berbatasan dengan PT. Arutmin Indonesia memiliki struktur geologi yang kompleks namun sudah menggunakan *Slope Stability Radar* sebagai instrumen monitoring tambang. Data *wall folder slope stability* diharapkan akan didapat suatu *trend* dari graphic pergerakan berdasarkan parameter area *Low-wall* dan *High-wall*, jenis batuan penyusun dan struktur geologi yang dominan sehingga dapat membantu dalam penentuan ambang batas *threshold alarm* sebagai acuan dalam suatu manajemen risiko tanggap darurat longsor.

1.6 Metode Penelitian

Metode dalam penelitian ini terdiri dari studi literature, penelitian lapangan, analisis data, pembahasan dan kesimpulan.

1. Studi literatur yakni penelitian yang pernah di lakukan pada daerah penelitian, karakteristik batuan, dan informasi mengenai area struktur geologi yang ada.
2. Evaluasi data *wall folder* dari tahun 2011 hingga 2015.
3. Membagi area yang terpantau longsor berdasarkan parameter tertentu.

4. Melakukan analisis data monitoring oleh *Slope Stability Radar* pada area yang terpantu longsor dengan parameter tertentu.
5. Membuat kesimpulan tentang hasil analisis data daerah penelitian.

1.7 Sistematika Tesis

Sistematika tesis dibagi menjadi lima kelompok, pertama yaitu tinjauan umum mengenai daerah penelitian. Kedua, tinjauan pustaka mengenai deformasi lereng, penelitian terdahulu mengenai deformasi batuan dengan pemantauan *Slope Stability Radar* dan studi mengenai manajemen risiko geoteknik. Ketiga, pengumpulan database *wall folder* dari daerah penelitian. dilanjutkan dengan analisis *wall folder*, apakah terjadi longsor atau tidak. Longsor yang didapatkan kemudian dianalisis pada area *Low-wall* dan *High-wall*. pembahasan perilaku longsor, karakteristik kecepatan perpindahan (*velocity*), *inverse velocity* dan hubungan dari masing-masing parameter dari longsor lereng. Kelima, kesimpulan dari hasil penelitian dan saran penulis yang terkait dengan hasil penelitian.

BAB II

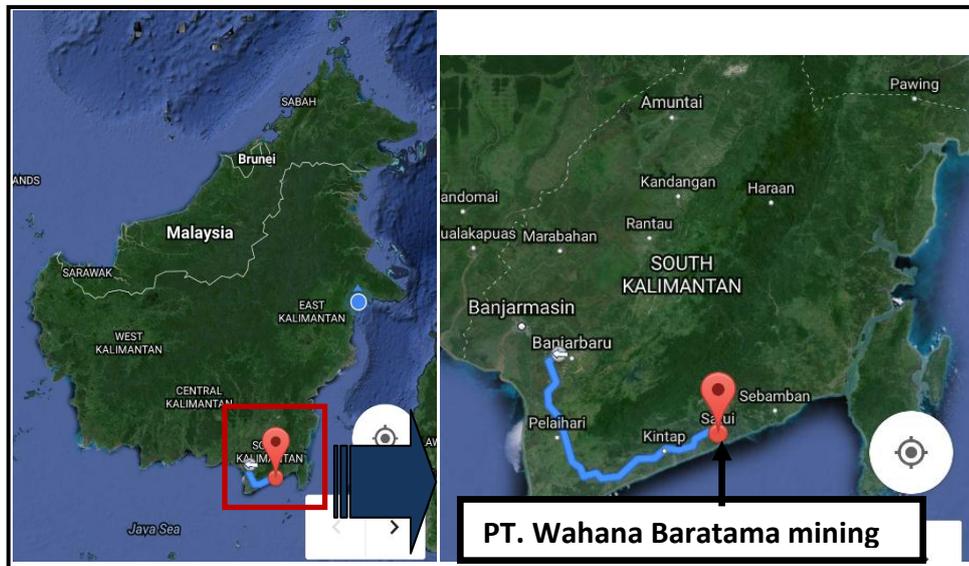
TINJAUAN UMUM

2.1 Kesampaian dan Lokasi Penelitian

Kegiatan penambangan PT. Wahana Baratama Mining dilaksanakan di daerah Perjanjian Karya Pengusaha Pertambangan Batubara (PKP2B) KW/04/PB/02/10 seluas 7811 hektar. Sebaran endapan batubara di wilayah PKP2B PT. Wahana Baratama Mining dikelompokkan menjadi 3 Blok, yaitu Blok I di bagian timur, Blok II di bagian tengah dan Blok III di bagian barat. Daerah PKP2B PT. Wahana Baratama Mining secara administratif terletak di Kecamatan Satui Kabupaten Tanah Bumbu Provinsi Kalimantan Selatan, dan Kecamatan Kintap Kabupaten Tanah Laut, Provinsi Kalimantan Selatan. Kedua Kecamatan tersebut terletak di bagian selatan Pulau Kalimantan yang berbatasan dengan Laut Jawa di sebelah selatan, Gunung Aurbunak di sebelah Utara, Kecamatan Jorong di sebelah Barat, dan Kecamatan Sebampan di sebelah Timur. Kecamatan Kintap terletak ± 120 km dan Kecamatan Satui terletak ± 170 km dari Kota Banjarmasin ke arah Tenggara menuju Kotabaru. Dengan koordinat pada posisi $115^{\circ}11'57,6''$ BT – $115^{\circ}21'10,0$ BT dan $3^{\circ}41'22,2''$ LS – $3^{\circ}47'33,9''$ LS.

Lokasi PKP2B PT. Wahana Baratama Mining terletak di sebelah Utara kota Satui. Untuk menuju daerah tersebut dapat dicapai dengan menggunakan sarana transportasi darat, udara, dan laut. Rute perjalanan untuk menuju daerah PKP2B PT. Wahana Baratama Mining apabila ditempuh dari Yogyakarta adalah sebagai berikut :

1. Dari Bandara Adi Sucipto di Yogyakarta menuju Bandara Samsedin Noer di Banjarmasin dengan menggunakan pesawat udara ditempuh dalam waktu sekitar 1,5 jam.
2. Dari Banjarmasin menuju Satui melalui Pleihari dan Kintap dengan menggunakan kendaraan roda empat sejauh ± 200 km selama sekitar 3 jam. Peta kesampaian daerah dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1

Peta kesampaian daerah penambangan PT. Wahana Baratama Mining, Propinsi Kalimantan Selatan (Google Map, 2015)

Topografi daerah PKP2B PT. Wahana Baratama Mining adalah berupa dataran rendah dengan ketinggian yang bervariasi dari ketinggian ± 60 m hingga ± 120 m dari permukaan laut, bagian terendah terletak di bagian Barat Daya daerah Penambangan, sedangkan yang tertinggi terletak di Timur Laut daerah penambangan. Sungai yang mengalir di daerah ini berpola dendritik dengan sungai yang terbesar adalah Sungai Kintap dan Sungai Pabilahan. Sungai Kintap bermuara di Laut Jawa. Sungai Pabilahan berasal dari daerah pegunungan sekitar ± 5 km arah Barat Laut daerah tersebut.

2.2 Geologi Regional Daerah Penelitian

2.2.1 Fisiografi Regional

Kalimantan Timur, merupakan margin dari epikontinental Asia atau lebih dikenal dengan sebutan Dangkanan Sunda / Paparan Sunda atau "*Sunda Platform*". Wilayah ini stabil sejak Pra-Tersier. Cekungan-cekungan yang berada di wilayah ini merupakan lahan berbagai endapan dari bahan bersifat anorganik dan organik yang diendapkan secara normal tanpa banyak mengalami gangguan tektonik. Bahan-bahan organik yang diendapkan setelah mengalami berbagai proses kimia

dan fisika menghasilkan batubara, minyak dan gas bumi. Cekungan-cekungan yang mengandung bahan energi ini yaitu Cekungan Tarakan, Cekungan Kutai, dan Cekungan Barito.

Proses sedimentasi tersier terjadi di Dataran Sunda yang memiliki susunan batuan berumur Pra-Tersier. Proses pengendapan tersebut dimulai pada awal Eosen dalam suasana transgresi. Pada awal transgresi ini, dataran berangsur-angsur berubah menjadi delta dan rawa-rawa, mengendapkan sedimen dalam bentuk batu pasir kuarsitik, *red beds*, konglomerat alas, batu pasir halus, batuan klastik halus lainnya, tufa dan batubara. Kelompok batuan ini dikenal dengan sebutan Formasi Tanjung atau *Eocene Coal Measures*. Keadaan regresif seperti itu tampaknya berlangsung hingga sekarang, pola pengendapan sedimen berlangsung di daratan membentuk Formasi Dahor dan endapan aluvial. Batuan yang dihasilkan pada umumnya terdiri dari batuan yang belum terpadatkan dengan baik dan lapisan tipis lignit serta gambut. Pengendapan awal terjadi pada daerah cekungan pada zaman Eosen. Tahapan evolusi lingkungan pengendapan adalah sebagai berikut ; lapisan batubara endapan delta diendapkan di atas endapan laut dangkal yang bersifat karbonan. Formasi lapisan batubara terbentuk dibawah lingkungan dataran delta selama perjalanan lempeng dari Lempeng Benua ke Lempeng Samudera. Peta Geologi Regional dapat dilihat di Gambar 2.2.

Daerah Satui merupakan bagian paling selatan dari Cekungan Kutai, Sub-Cekungan Asam-asam, yang terbentuk pada zaman Eosen. Dari Utara ke Barat, cekungan sedimen ini dibatasi oleh tinggian batuan dasar pegunungan Meratus, ke Timur oleh Paparan Paternoster, dan ke Selatan oleh tinggian Bawean di Pulau Bawean Laut Jawa. Di PKP2B PT. Wahana Baratama Mining, satuan batuan yang diketahui berkembang baik mengandung batubara Formasi Tanjung (Grup T-1, Grup T-2, dan Grup T-3). Formasi pembawa batubara terdapat pada grup T-2 yang berumur Eosen dengan ketebalan 145-171 meter. Ketebalan rata-rata formasi pembawa batubara mencapai 155 meter dan terdapat 35 lapisan batubara yang layak ditambang pada daerah rencana tambang dan terletak pada Grup T-2. Proses

sedimentasi, pembentukan satuan batubara serta lingkungan pengendapannya seperti diuraikan dibawah ini

2.2.2 Stratigrafi Regional

Secara regional, formasi batuan yang menyusun daerah PKP2B PT. Wahana Baratama Mining terdiri dari zaman tersier, yaitu Formasi Tanjung, Formasi Berai Formasi Warukin, Formasi Dahor dan endapan Aluvial. Stratigrafi Regional dapat dilihat pada Gambar 2.3.

a. Formasi Tanjung

Formasi Tanjung diperkirakan berumur Eosen dan merupakan batuan dasar yang mengandung kapur yang sifatnya tidak selaras. Pada lapisan bawah terdiri dari konglomerat basal, batupasir, lapisan batubara dan basal intrusif, sedangkan sedimen bagian atas terdiri dari marlite, lempung dan lapisan tipis batugamping. Ketebalan formasi ini bervariasi dari 150 m sampai 250 m. Formasi ini dapat dibagi menjadi tiga kelompok:

1. Grup Satu (T-1)

Terdiri dari batupasir dan konglomerat pada bagian dasar dengan ketebalan lebih dari 10 m, berwarna merah, blocky clay, dan lumpur di bagian tengah, serta batupasir kuarsa di bagian atas. Total ketebalan grup ini sekitar 50 m.

2. Grup Dua (T-2)

Terdiri dari batupasir, lapisan batubara Senakin, tufa, batuan vulkanik dengan ketebalan antara 70-100 m.

3. Grup Tiga (T-3)

Terdiri dari marlite, lumpur dan batuan berlumpur dengan total ketebalan antara 100-200m.

b. Formasi Berai

Formasi ini terdiri dari batugamping, serpih, batuhijau (greenstone) dan sedikit glaukonit. Formasi ini dibagi dalam dua grup sebagai berikut:

1. Grup Satu (T-4)

Batuan yang terbanyak adalah batugamping ketebalan antara 350-500 m

2. Grup Dua (T-5)

Terdiri dari marlite dan serpih yang banyak mengandung fosil siput dengan ketebalan lebih dari 200 meter.

c. Formasi Warukin

Formasi ini berumur Miosen Tengah, terdiri dari batugamping, batulumpur (Mudstone), lapisan batubara tebal, dan batugamping tipis pada dasarnya. Formasi ini disebut juga Grup T-6 dengan ketebalan total lebih dari 600 meter.

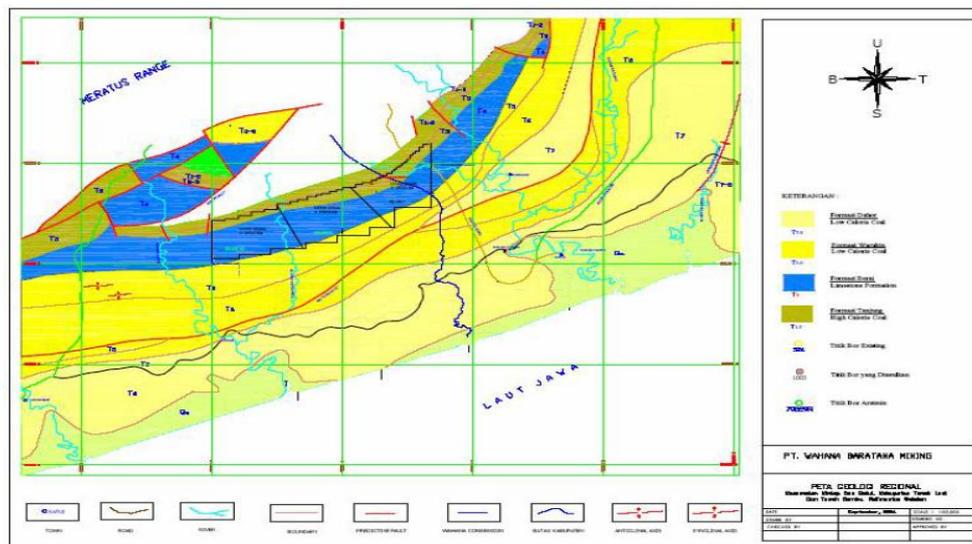
d. Formasi Dahor

Formasi Dahor berumur Miosen Awal sampai Pliosen, terdiri dari batulempung, serpih, batupasir, konglomerat, dan beberapa lapisan batubara. Ketebalan total lapisan ini kira-kira 400 meter. Formasi ini dapat dibagi menjadi tiga grup, yaitu:

1. Grup Satu (T-7) Tersusun oleh batuan klastik kasar.
2. Grup Dua (T-8) Menutupi T-7, terdiri dari batupasir dan batulempung
3. Grup Tiga (T-9) Tersusun oleh batupasir kasar.

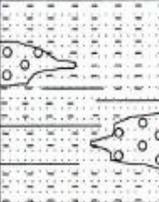
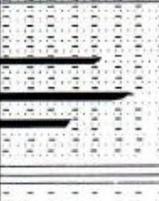
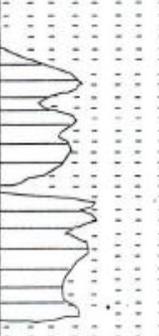
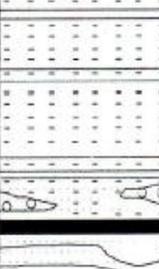
e. Endapan Aluvial

Lapisan ini berumur Kuartar, tersusun oleh endapan aluvial, kerikil, lempung, dan batupasir. Ketebalan lapisan ini bervariasi, relatif menebal ke arah sungai dan semakin menipis ke arah yang lebih tinggi.



Gambar 2.2

Peta Geologi Regional Lokasi Pertambangan PT. WBM

UMUR	TEBAL	FORMASI	LITOLOGI	DESKRIPSI
PLIO SEN	+400 m	DAHUR		batulempung, batulanau, batupasir, konglomerat, banyak sisipan batubara tipis
	lebih dari 600 m	WARUKIN		batulempung, lumpur, dengan tebal > 25 m, batubara sedikit muncul batugamping pada bagian bawah
OLIGOSEN	lebih dari 2000 m	BERAI		batugamping, napal, batulempung, batupasir kehijauan, dijumpai galucinite dalam jumlah kecil (jarang)
EUSEN	lebih dari 1000 m	TANJUNG		unit bagian atas: napal, batulempung, dan batugamping tipis-tipis
				unit bagian bawah: konglomerat basalt, batupasir, batubara (tebal) < 7 m, intrusi basalt
PRATERSIER		Pra Tersier		serpentinit dan metasedimen

Gambar 2.3.

Stratigrafi Regional Daerah Kalimantan Selatan

2.2.3 Struktur Geologi Regional

Tektonik Cekungan Barito merupakan bagian dari konfigurasi tektonik Kalimantan yang terdiri dari gaya regangan pada akhir Kapur – awal Miosen (fase syn and post-rifting) dan gaya tekanan pada Plio – Plistosen yang menghasilkan struktur sesar dan lipatan. Struktur yang berkembang dalam pembentukan Cekungan Barito ada 2 jenis :

1. Tensional, sinistral shear, dengan arah relatif barat laut- tenggara (NW – SE).
2. Transpesional, merupakan konvergen sehingga mengalami uplift, dan lalu mengalami reaktifasi dan mengalami invert struktur yang tua, sehingga menghasilkan wrenching, pensesaran, dan perlipatan.

Setting tektonik secara umum terjadi pada arah timur laut (NNE) Cekungan Barito, dengan struktur yang intensif berarah sejajar Barat Daya – Timur Laut (SSW-NNE) membentuk struktur lipatan mengelilingi pegunungan Meratus dan dipengaruhi oleh Sesar naik dengan *dip* yang curam. Adanya sesar *wrench* utama, menunjukkan adanya indikasi *drag* atau sesar pada lipatan dan bekas sesar naik. Pada bagian Barat dan Selatan Cekungan Barito umumnya sedikit dikontrol oleh tektonik sehingga tidak menunjukkan bentuk deformasi struktur (Darman dan Sidi, 2000).

Dengan demikian struktur geologi regional secara umum yang terdapat di Cekungan Barito adalah lipatan dan sesar yang terjadi pada batuan Tersier. Lipatan pada umumnya berarah Timur Laut – Barat Daya. Sesar yang terdapat di daerah ini berarah Barat Laut – Tenggara dan Timur Laut – Barat Daya. Sesar yang ada berupa sesar naik dan sesar geser.

2.3 Kondisi Geoteknik Daerah Penelitian

Kekuatan massa batuan pada Daerah penelitian berada pada tingkat kekuatan batuan *very weak rock* (Deere dan Miller , 1966) dengan nilai UCS antara 1 - 22Mpa. Pada daerah penelitian, Stabilitas lereng tambang sangat bergantung terhadap struktur dan orientasi perlapisan batuan, beberapa kesimpulan dari penelitian sebelumnya antara lain :

1. Massa batuan yang dinilai terdiri sekitar 60% *Mudstone* dan 40% *Sandstone*. Dalam hal kekuatan massa batuan *Sandstone* dianggap lebih tinggi dari *Mudstone* secara umum.
2. *Mudstones* dan *Sandstone* dianggap sangat stabil dalam hal potensi ketidakstabilan. Kenampakan secara fisik Inti hasil pengeboran tetap utuh setelah jangka waktu yang lama namun secara umum *Mudstone* dan *Sandstone*

sangat stabil dan termasuk dalam kategori *Low Strength* untuk tingkat kekuatan batuan.

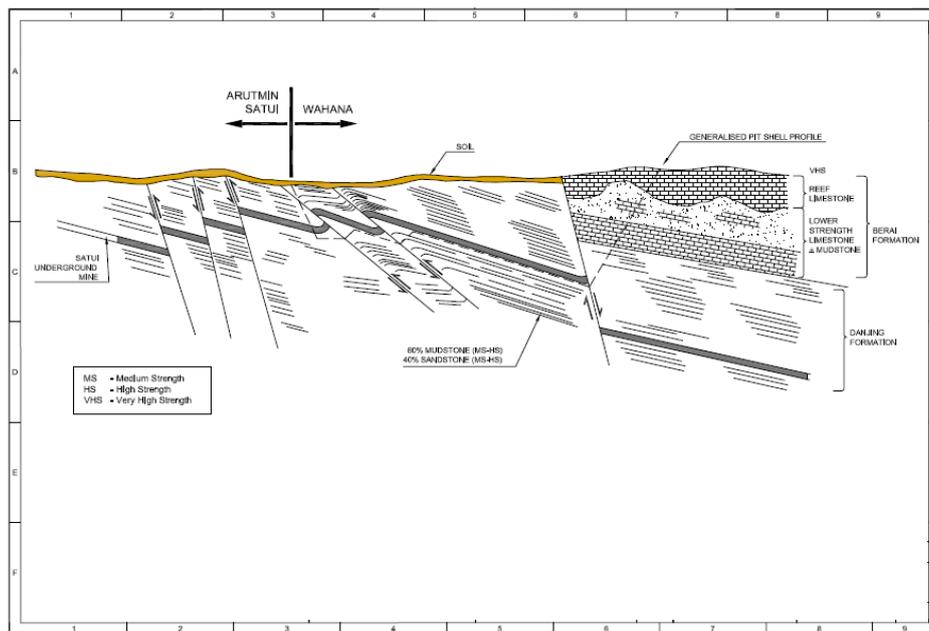
3. Struktur geologi yang berkembang di *Low-wall* dan beberapa patahan di dinding *High-wall* (Model Struktur Geologi dapat dilihat pada Gambar 2.4.). Potensi ketidakstabilan geoteknik batubara dan sebagian besar batuan adalah rangkaian dari patahan dan lipatan utama antara lain:
 - Sesar utama dengan arah orientasi Timur Laut – Barat Daya (sejajar dengan panjang pit) dengan kedalaman 40 sampai 120 meter. Secara umum adalah sesar naik dengan orientasi dip 16 hingga 23 derajat.
 - Sesar sekunder dengan arah orientasi Utara – Selatan dan Timur – Barat dengan kedalaman 5 sampai 30 meter dan sering di jumpai tersemenkan.
 - Sesar tersier dengan arah orientasi Timur Laut – Barat Daya dan Timur – Barat dengan ketebalan 0.5 sampai 3 meter dan sering dijumpai tersemenkan.

2.3.1. Analisis Kestabilan Lereng berdasarkan Data Bor Geoteknik

Longsor suatu lereng umumnya bergerak pada suatu bidang tertentu yang disebut bidang gelincir (*slip surface*). Berdasarkan konsep kesetimbangan batas (*limit equilibrium concept*), kemantapan lereng tergantung pada gaya penggerak dan gaya penahan yang ada pada bidang gelincir tersebut. Gaya penggerak adalah gaya yang menyebabkan longsor, sedangkan gaya penahan adalah gaya yang melawan longsor. Perbandingan antara total gaya penahan dengan total gaya penggerak disebut faktor keamanan (FK).

Menurut Hoek & Bray (1981), kemantapan lereng dapat dianalisis sesuai dengan jenis longsor yang direpresentasikan dalam bentuk bidang gelincir. Beberapa bentuk bidang gelincir yang dapat terjadi adalah bentuk busur, bidang, baji, dan guling. Tujuan dilakukan analisis kemantapan lereng penambangan adalah untuk menentukan geometri lereng yang mantap dalam bentuk tinggi dan sudut kemiringan lereng. Data masukan yang diperlukan untuk analisis ini adalah keadaan topografi, struktur geologi berupa peralasan batuan, serta sifat fisik dan mekanik material pembentuk lereng. Dari hasil uji laboratorium terhadap sampel

yang diambil dari 4 (empat) lubang bor geoteknik, material pembentuk lereng pada lokasi penambangan PT. Wahana Baratama Mining (PT.WBM) mempunyai nilai kuat tekan uniaksial berkisar antara 0,301 MPa - 22,423 MPa. Tanah dapat dianggap sebagai batuan yang mempunyai bidang lemah berupa rekahan rekahan yang arahnya tidak menentu tetapi merata pada seluruh permukaan, oleh karena itu pengaruh struktur bidang lemah tersebut tidak akan tampak pada tanah. Karena lapisan penutup endapan batubara berupa material lunak dan bersifat seperti tanah maka masalah struktur tidak berpengaruh dalam analisis kemandapan lereng. Melihat kenyataan ini maka kemungkinan longsoran yang dapat terjadi pada lapisan penutup tersebut mempunyai bentuk bidang gelincir berupa busur lingkaran (longsoran busur).



Gambar 2.4

Model Struktur Geologi PT.Wahana Baratama Mining

2.3.2. Metode Analisis

Dalam analisis kemandapan lereng rencana penambangan batubara PT. WBM digunakan konsep kesetimbangan batas. Secara prinsip, gaya geser yang diperlukan untuk mempertahankan kemandapan akan dibandingkan dengan gaya

yang menyebabkan longsor. Metode yang digunakan dalam perhitungan kemantapan lereng adalah metode keseimbangan batas. Secara prinsip, kekuatan geser yang diperlukan untuk mempertahankan kemantapan akan dibandingkan dengan kekuatan geser yang tersedia. Rasio antara kedua kekuatan tersebut diungkapkan sebagai factor keamanan (FK). FK minimum kemantapan lereng berdasarkan kriteria Pekerjaan Umum (PU) adalah 1,3 untuk lereng tunggal dan 1,5 untuk lereng keseluruhan (lihat pada Tabel 2.1).

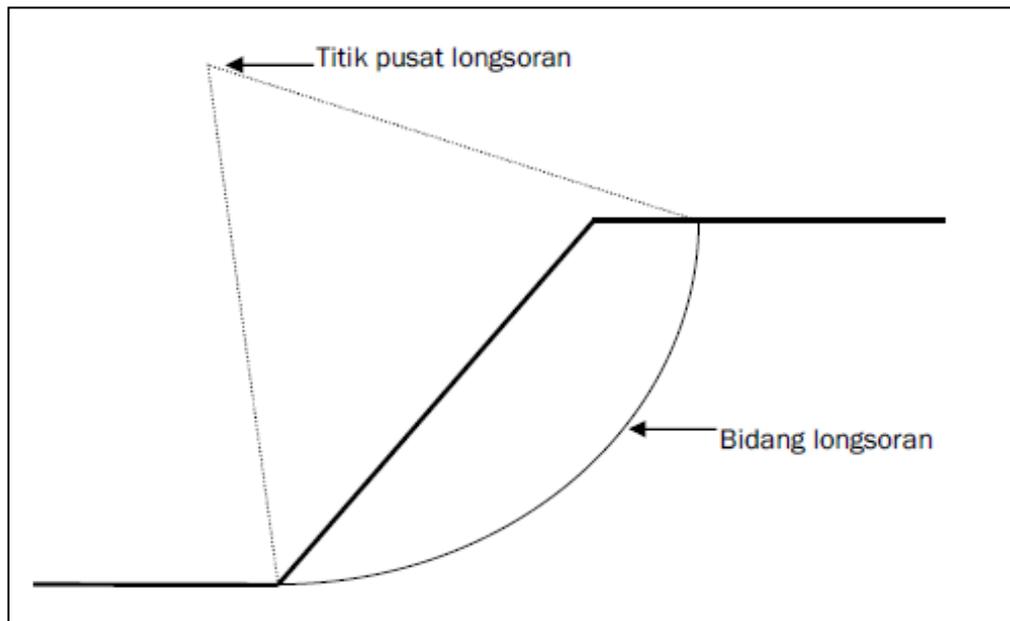
Tabel 2.1.

Faktor Keamanan Minimum Kemantapan Lereng, (Pekerjaan Umum, 1987)

Risiko	Kondisi Beban	Parameter kuat geser			
		Maksimum		Sisa	
		Teliti	Kurang teliti	Teliti	Kurang teliti
Tinggi	Dengan Gempa	1.50	1.75	1.35	1.50
	tanpa Gempa	1.80	2.00	1.60	1.80
Menengah	Dengan Gempa	1.30	1.60	1.20	1.40
	tanpa Gempa	1.50	1.80	1.35	1.50
Rendah	Dengan Gempa	1.10	1.25	1.00	1.10
	tanpa Gempa	1.25	1.40	1.10	1.20

Sumber : Petunjuk Perencanaan Penanggulangan longsor, SKBI .3.06.1987 UDC 624.13 (083.7), Departemen Pekerjaan Umum, Yayasan Badan Penerbit PU.

Pada longsor berbentuk busur, gaya-gaya tersebut di atas diperhitungkan pada bidang gelincir yang berbentuk busur. Gaya penyebab longsor yang selanjutnya disebut sebagai gaya penggerak berasal dari berat tanah dan berat air yang berada di atas bidang gelincir. Sedangkan gaya penahan longsor berasal dari kekuatan geser sepanjang bidang gelincir. Kedua gaya ini dibandingkan sehingga didapatkan faktor keamanan pada bidang yang berbentuk busur tersebut. Dengan cara perhitungan berulang-ulang (*iterative*) di berbagai busur yang diperkirakan sebagai bidang gelincirnya, akan diperoleh faktor keamanan terkecil yang menyatakan bidang gelincir yang paling berbahaya. Model longsor berbentuk busur dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5
Model LongSORAN Busur

Beberapa metode yang dapat diterapkan pada konsep kesetimbangan batas, diantaranya adalah metode Bishop, Fellenius, dan Hoek & Bray. Dari beberapa metode tersebut dipilih metode Bishop dengan beberapa pertimbangan, yaitu :

- lapisan penutup terdiri dari beberapa material yang berbeda-beda sifatnya,
- menghasilkan angka faktor keamanan yang lebih teliti karena memperhitungkan harga kuat geser dari tiap lapisan tanah yang ada.

Perhitungan analisis kemandapan lereng dilakukan dengan menggunakan program Galena Versi 1.0 dari BHP Engineering Pty Ltd. Perhitungan dilakukan untuk lereng tunggal (*individual slope*) dan lereng keseluruhan (*overall slope*) baik untuk lereng penggalian maupun lereng penimbunan tanah penutup. Sebagai pedoman lereng dalam keadaan mantap diambil angka faktor keamanan 1,30 untuk lereng tunggal dan 1,50 untuk lereng keseluruhan.

2.3.3. Analisis Lereng Penggalian

Untuk mengupas lapisan tanah penutup pada penambangan batubara, akan terbentuk lereng *highwall* di sisi timur, yang terdiri dari lereng tunggal (*individual slope*) dan lereng keseluruhan (*overall slope*).

1. Lereng Tunggal

Pendekatan-pendekatan analisis yang digunakan dalam perhitungan lereng tunggal adalah:

- a. Variasi material dianggap homogen dan mempunyai kekuatan geser sisa. Hal ini dikarenakan kondisi material pada lereng tunggal dianggap sudah terganggu oleh kegiatan penambangan.
 - b. Kondisi batuan jenuh (α sat).
 - c. Tinggi muka air tanah dianggap mengikuti tinggi lereng.
2. Parameter Batuan Parameter batuan yang digunakan untuk menganalisis kemantapan lereng tunggal pada PT. WBM adalah seperti terlihat pada Tabel .2.
3. Perhitungan kemantapan lereng tunggal dilakukan untuk tiap jenis material pembentuk lereng, yaitu untuk batulempung, batulempung karbonan, batulanau, batupasir, dan batubara. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan dua parameter, yaitu :
- a. Tinggi lereng tunggal : 6, 10, 15 dan 20 meter.
 - b. Sudut lereng : 50° , 60° , 70° .
4. Hasil Analisis kemantapan lereng tunggal dilakukan pada Blok I dengan batasan FK lereng tunggal yang masih diijinkan adalah Iebih besar atau sama dengan 1.30 Dari hasil perhitungan angka FK menggunakan program Galena dari BHP Engineering Pty Ltd maka dimensi lereng tunggal aman dengan FK minimum dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2

Data Material Yang Digunakan Untuk Analisis Kemantapan Lereng Tunggal

No	Jenis Material	Kohesi (C) sisa (MPa)	Sudut Geser Dalam (ϕ) sisa	Density Jenuh γ sat (gr/cm ³)
1	Claystone	50	14	26
2	Sandstone	610	25.1	24
3	Siltstone	120	21.4	25
4	Batubara	182	42.7	12.9

Berdasarkan Tabel .3. maka dimensi lereng tunggal maksimum yang masih dapat diterapkan pada setiap daerah penambangan bervariasi sesuai dengan karakteristik material pembentuk lereng yang berbeda-beda antara daerah yang satu dengan yang lainnya. Namun secara keseluruhan dengan tinggi lereng 10 meter dan kemiringan 70^0 kondisi lereng masih cukup aman.

5. Lereng Keseluruhan (*Overall Slope*)

Lereng keseluruhan dianalisis berdasarkan lubang bor geoteknik yang ada. Gambar 2.2 menunjukkan posisi lubang bor geoteknik di lokasi. Pendekatan-pendekatan yang digunakan dalam analisis kemantapan lereng keseluruhan adalah

- a. Karakteristik batuan yang digunakan adalah karakteristik hasil uji laboratorium dari batuan yang dijumpai pada lubang bor tersebut.
- b. Variasi material dianggap homogen dan mempunyai kekuatan geser puncak (C_{puncak} dan ϕ_{puncak}).
- c. Parameter batubara menggunakan data pengujian sebelumnya.
- d. Tinggi muka air tanah dianggap mengikuti tinggi permukaan lereng (lereng dalam keadaan jenuh).

Tabel 2.3.

Hasil Analisis Kemantapan Lereng Tunggal Penambangan

No	Batuan	Tinggi (m)	Sudut (o)	FK
1	Claystone	10	50	5.88
			60	4.94
			70	4.46
		15	50	5.61
			60	4.22
			70	3.30
		20	50	4.13
			60	1.25
			70	1.12
2	Sandstone	10	50	17.36
			60	15.15
			70	15.03
		15	50	10.55
			60	8.52
			70	7.48

		20	50	8.09
			60	7.60
			70	4.89
3	Siltstone	10	50	11.83
			60	9.96
			70	9.20
		15	50	6.79
			60	5.21
			70	4.20
		20	50	5.06
			60	1.26
			70	1.02
4	Batubara	10	50	4.39
			60	3.39
			70	2.69
		15	50	2.28
			60	1.55
			70	0.95
		20	50	1.56
			60	1.33
			70	1.03

Perhitungan yang dilakukan antara lain :

- a. Penentuan tinggi serta sudut lereng keseluruhan dilakukan dengan menggunakan data lubang bor geoteknik yang ada.
- b. Memvariasikan sudut lereng.

Hasil analisis lereng keseluruhan dianggap mantap jika mempunyai $FK \geq 1.50$. Faktor keamanan yang didapat dari hasil analisis untuk 5 buah penampang dengan kombinasi sudut lereng dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4.

Faktor Keamanan Lereng Keseluruhan

Penampang	Tinggi	Sudut	FK
GT 03	80	35	1.69
		40	1.61
		45	1.59
	100	35	1.31
		40	1.07
		45	1.01
	150	35	0.69
		40	0.65
		45	0.41
GT 04	80	35	1.21

		40	0.94
		45	0.62
		100	0.64
	40	0.42	
	45	0.23	
	150	0.18	
	40	0.02	
	45	0.01	

6. Lereng Timbunan

Pendekatan-pendekatan yang digunakan dalam analisis lereng timbunan adalah sebagai berikut :

- a. Material timbunan berasal dan kegiatan penambangan sehingga data karakteristik materialnya sama dengan material pada lereng penambangan.
- b. Dengan anggapan bahwa material telah terganggu selama proses penambangan, maka karakteristik batuan yang digunakan untuk analisis kemantapan lereng timbunan adalah 50 % dan nilai kohesi semu dan sudut geser dalam semu serta 75 % dari nilai density jenuh.
- c. Lereng timbunan dianggap berada dalam keadaan jenuh.

7. Parameter batuan pembentuk lereng timbunan

Perhitungan tinggi dan sudut lereng dari material timbunan dilakukan seperti melakukan perhitungan lereng penambangan. Parameter material yang digunakan tercantum pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5

Karakteristik Material Yang Digunakan Untuk Analisis Kemantapan Lereng Timbunan

No	Jenis Material	Kohesi (MPa) C sisa	Sudut Geser Dalam ϕ sisa	Density Jenuh γ sat (gr/cm ³)
1	Claystone	50	14	26
2	Sandstone	610	25.1	24
3	siltstone	120	21.4	25
4	batubara	182	42.7	12.9

8. Hasil analisis

Seperti terlihat pada Tabel 2.6 sampai Tabel 2.8, maka geometri lereng timbunan yang memenuhi syarat adalah sebagai berikut.

Tabel 2.6

Hasil Perhitungan FK lereng timbunan sudut lereng 20

No	Jenis Material	Tinggi lereng			
		10	20	30	40
1	Claystone	5.64	2.77	1.97	1.6
2	Sandstone	15.4	8.58	5.44	3.72
3	siltstone	9.92	4.34	2.48	1.81

Tabel 2.7

Hasil Perhitungan FK lereng timbunan sudut lereng 25

No	Jenis Material	Tinggi lereng			
		10	20	30	40
1	Claystone	6.77	3.69	2.28	4.11
2	Sandstone	15.26	8.46	5.81	4.11
3	siltstone	6.89	3.75	2.58	1.78

Tabel 2.8

Hasil Perhitungan FK lereng timbunan sudut lereng 30

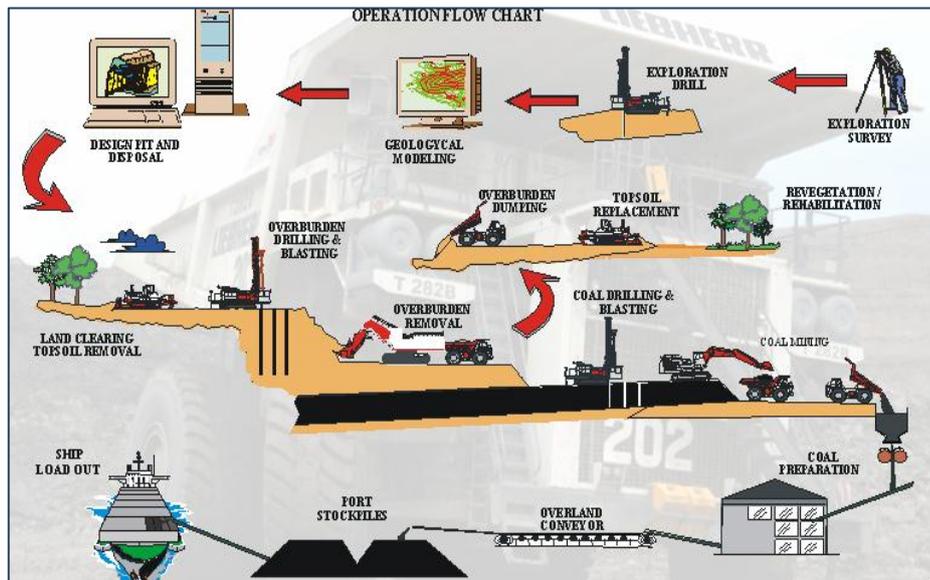
No	Jenis Material	Tinggi lereng			
		10	20	30	40
1	Claystone	6.18	2.67	1.86	1.59
2	Sandstone	11.1	6.37	4.16	3.05
3	siltstone	6.85	4.13	2.47	1.64

2.4 Kondisi Penambangan Daerah Penelitian.

2.4.1 Sistem Penambangan di Daerah Penelitian.

Sistem penambangan yang umum diterapkan di daerah penelitian adalah sistem tambang terbuka (*open pit*) yang dilakukan secara konvensional dengan menggunakan kombinasi alat gali muat, dan angkut berupa *excavator* dan *dump truck*. Kegiatan penambangan yang dilakukan secara umum adalah: pembersihan

lahan (*land clearing*), pengupasan lapisan penutup (*stripping overburden*), dan penggalian batubara. Pengambilan batubara ini harus dilakukan dengan cara hati-hati dan cermat agar kualitas batubara tetap terjaga. Proses ini kemudian dilanjutkan dengan pengolahan batubara yang dihasilkan dari kegiatan penambangan menjadi produk yang siap untuk dipasarkan. Proses pengolahan ini meliputi peremukan dan pencucian batubara. Kegiatan selanjutnya adalah pemuatan batubara ke atas tongkang (*barging*) adalah proses pemuatan produk batubara yang telah siap dijual ke atas tongkang (barge), baik yang sudah diolah dengan cara peremukan biasa maupun dengan cara peremukan dan pencucian yang kemudian diangkut menuju tempat yang telah ditentukan.



Gambar 2.6

Model skema penambangan PT. WBM (Open cut coal minging)

2.4.2 Cadangan dan Kualitas Batubara

Berdasarkan hasil studi kelayakan tahun 2005 di daerah PKP2B PT. Wahana Baratama Mining dengan cadangdan tertimbang sebesar 42 juta ton, cadangan terukur sebesar 64,9 juta ton, cadangan terkira sebesar 67,6 dan cadangan tereka sekitar 70,1 juta tonm dengan nisbah pengupasan (*Stripping Ratio*) 10,2:1. Kualitas batubara yang dalam rank subbituminous A sampai high-volatile bituminous B, dengan kalori berkisar 5772 – 7394 kcal/kg.

BAB III

TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Definisi Perilaku Batuan

Secara mekanik, batuan memiliki perilaku yang berbeda pada saat menerima beban dan dapat diketahui melalui kurva tegangan regangan yang diperoleh melalui pengujian laboratorium seperti uji kuat tekan, kuat geser, uji triaksial dan uji kuat tarik. Jika pengujian laboratorium dilakukan dengan tegangan konstan terhadap fungsi waktu maka akan diperoleh kurva rayapan (*creep*). Sedangkan kurva relaksasi akan diperoleh jika pengujiannya dilakukan pada regangan konstan terhadap waktu. Untuk mengetahui dasar perilaku batuan terhadap beban dapat diperoleh dari uji kuat tekan oleh Bieniawski (1976). Pada tahap awal batuan dikenakan gaya, kurva berbentuk landai dan tidak linear yang berarti bahwa gaya yang diterima oleh batuan dipergunakan untuk menutup rekahan awal (*pre-existing crack*) yang terdapat dalam batuan. Sesudah itu kurva menjadi linear sampai batas tegangan tertentu yang dikenal dengan batas elastik lalu terbentuk rekahan baru dengan perambatan stabil sehingga kurva tetap linear. Setelah batas elastik dilewati maka perambatan rekahan menjadi tidak stabil, kurva tidak linear lagi dan tidak berapa lama kemudian batuan akan hancur dan titik runtuh itu menyatakan kekuatan batuan. Rayapan pada massa batuan dapat dianggap sebagai perambatan rekahan. Pada tahap rayapan primer, batuan beradaptasi dengan tegangan yang diaplikasikan dan perambatan rekahan berjalan lambat hingga mencapai stabil hampir mendekati konstan. Di tahap rayapan sekunder kerusakan batuan bertambah hingga mencapai titik tersier terjadi percepatan perambatan rekahan yang tidak terkontrol dan batuan mengalami keruntuhan (Rai,dkk, 2013).

3.2 Model dan Mekanisme Longsor Pada Tambang Batubara

Pada tambang batubara yang mempunyai karakteristik kemiringan perlapisan, dengan semakin dalamnya galian penambangan, perhatian akan kestabilan lereng akan dibutuhkan pada semua sisi lereng penambangan. Pada lereng *High-wall*,

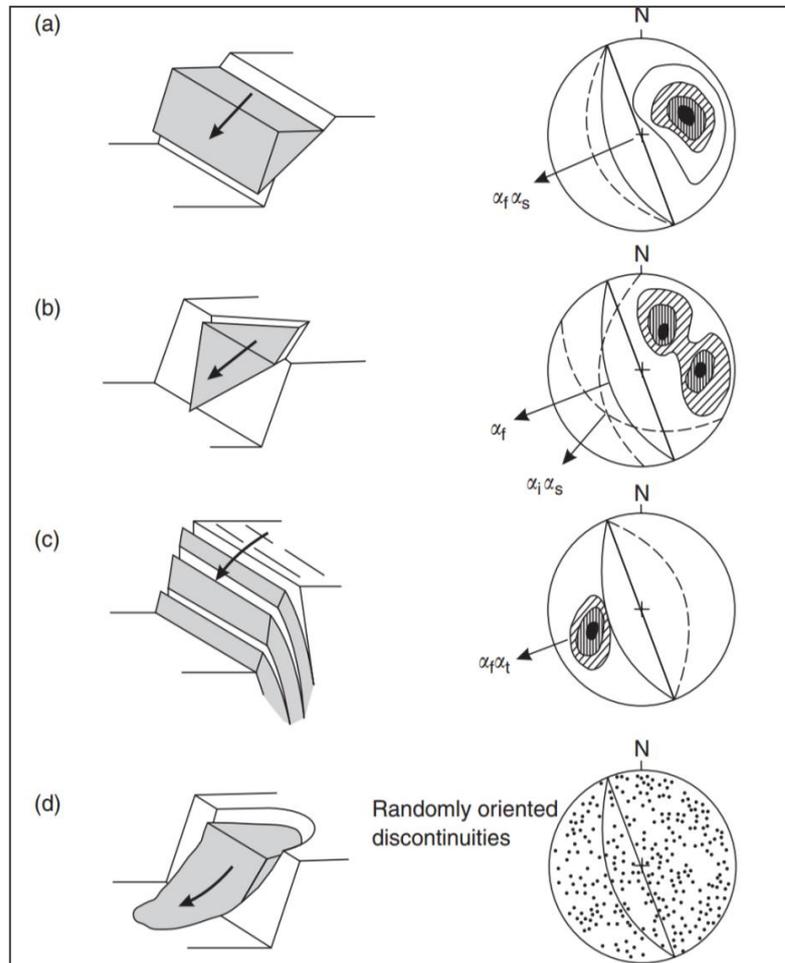
karena bidang perlapisan mempunyai arah kemiringan yang berlawanan dengan lereng, maka tipe longsohnya akan dipengaruhi oleh hadirnya struktur geologi selain bidang perlapisan dan tingkat pelapukan batuan (*slake*), sehingga mungkin berbentuk guling, baji, bidang maupun busur (Hoek and Bray, 1981). Sedangkan pada bagian lereng *Low-wall*, longsor yang terjadi lebih diakibatkan oleh bidang perlapisan yang ada pada lereng tersebut. Apabila perlapisan batuan penyusun lereng *Low-wall* mempunyai ketebalan yang relatif kecil, maka kemungkinan longsor yang terjadi adalah longsor jenis *buckling* (Giani, 1992). seperti terlihat pada Gambar 3.1. Sedangkan bila perlapisan material tersebut mempunyai ketebalan yang relatif besar, maka longsor yang mungkin terjadi adalah longsor semi busur dengan bidang gelincir di sepanjang bidang perlapisan batuan kemudian berbelok memotong batuan sampai muka lereng atau melewati bidang lemah yang lain. Terzaghi dan Peck (1967) menyatakan bahwa longsooran dapat terjadi pada hampir setiap kemungkinan, perlahan-lahan ataupun secara tiba-tiba dan dengan atau tanpa adanya suatu peringatan yang nyata. Berdasarkan kedudukan bidang lemah pada batuan, longsooran yang sering terjadi adalah longsooran busur (*circular failure*) yaitu longsooran yang berbentuk busur biasanya terbentuk pada material yang umumnya homogen sedangkan pada material dengan heterogenitas kompleks sering terjadi longsooran bidang (*plane failure*), longsooran baji (*wedge failure*) dan juga longsooran guling (*toppling*). Hubungan bidang dikontinuitas dan jenis longsooran dapat di lihat pada Gambar 3.2.

Longsooran pada tanah diasumsikan terjadi pada suatu massa tanah yang homogen dan kontiniu, sehingga bentuk/geometri dari longsooran tersebut berupa busur lingkaran atau paling tidak mendekati/dapat dianggap sebagai busur lingkaran. Dalam hal ini parameter-parameter sifat fisik maupun sifat mekanik tanah dianggap sama dan merata di semua bagian tubuh tanah tersebut. Sedangkan pada batuan keras, untuk batuan yang utuh (*intact*) sifatnya juga homogen dan kontiniu seperti pada tanah, tetapi karena batuan utuh tersebut sangat kuat maka umumnya tidak ada masalah mengenai kemandapan lerengnya. Masalah kemandapan lereng kan muncul apabila batuan keras tersebut mempunyai bidang-bidang lemah.



Gambar 3.1

Contoh Longsor Bidang yang terjadi di tambang terbuka batubara



Gambar 3.2

Hubungan Bidang Diskontinuitas dan Jenis Longsor
(Hoek dan Bray, 1981)

3.2.1 Penelitian Perilaku Longsor Lereng di Tambang Batubara

Tambang Batubara di Australia telah banyak menjadi proyek percontohan dalam hal analisis longsor. Salah satunya adalah penelitian deformasi dan perilaku longsor pada lereng. Penelitian perilaku lereng bertujuan untuk meningkatkan pengetahuan tentang perilaku lereng batuan di tambang batubara Australia sebagai perbandingan untuk kondisi tambang Batubara di Indonesia. Salah satu penelitian pada 762 folder data deformasi termasuk 73 longsor dianalisis untuk mengetahui parameter yang terkait dengan deformasi dan kecepatan. Penelitian ini membuktikan bahwa metode *inverse-velocity* oleh Fukuzono (1985), sangat berguna dalam banyak kasus longsor di industri tambang, namun, penerapannya memerlukan ketelitian dan pemahaman yang lengkap dari variabel-variabel yang digunakan. Periode perhitungan kecepatan (VCP) memainkan peran yang sangat penting dalam perhitungan kecepatan, kecepatan terbalik dan perkiraan longsor. lebih dari satu set VCP berbeda harus digunakan dalam perangkat lunak untuk mendeteksi berbagai proses deformasi berkelanjutan yang mungkin tidak jelas terlihat secara pasti. Cabrejo and Harris (2012), menyatakan bahwa longsor tidak akan pernah mencapai titik 0 pada *inverse-velocity*, longsor selalu terjadi pada waktu tertentu sebelum perpotongan linear dengan sumbu waktu. Semakin pendek skala waktu semakin akurat perkiraan longsor; semakin lama skala waktu maka kurang akurat untuk perkiraan waktu longsor. Hasil penelitian di Tambang Batubara Australia menunjukkan bila menggunakan *inverse velocity* dengan *time window* 1jam di *Low-wall* evakuasi harus dilakukan sekitar 2 jam sebelum perkiraan waktu longsor untuk *High-wall*. Jika menggunakan *inverse velocity* dengan *time window* 24 jam, pada *High-wall* harus dievakuasi 12 jam sebelum perkiraan waktu longsor dan *Low-wall* 10:20 jam sebelum longsor.

3.2.2 Penelitian Tentang Perilaku Batuan Lunak Di Indonesia

Batuan lunak memiliki sifat diantara tanah dan batuan dan dapat dengan mudah ditemukan di Indonesia. Batuan lunak dapat didefinisikan dengan batuan yang memiliki sifat peka terhadap pelapukan fisika dan kimia yang menghasilkan pengaruh dalam penurunan pada kekuatan, ketahanan, penyusutan dan

pengembangan. Perilaku massa batuan yang tersusun sebagian batuan lunak dan batuan lemah tergantung pada sifat fisik dan mekanik dari elemen batuan. Menurut Bieniawski (1973) dan Barton dkk (1974) bahwa batuan utuh yang dianggap lunak jika $UCS < 25$ MPa dan $RQD < 25\%$. Sedangkan menurut Francis (1994) batuan lunak jika $UCS < 5$ MPa, $E < 1.5$ GPa dan Nisbah poisson > 0.25 . Menurut Johnston (1991) dan Vutukari & Katsuyama (1994) UCS batuan lunak bervariasi dari 0.25 – 25 MPa dan < 20 MPa. Menurut ISSMFE, 1994, perilaku mekanik batuan lunak sedimenter adalah *elasto plastic, dilatant, strain hardening, strain softening*, dan *time dependant*.

Penelitian tentang perilaku batuan lunak di Indonesia telah dilakukan oleh Kramadibrata dkk. (2002, 2007), Wattimena dkk. (2009), Kramadibrata dkk. (2009), Sulistianto dkk. (2010) dan Saptono (2012). Menurut (Kramadibrata dkk, 2007), batuan penyusun di tambang batubara di Indonesia dikenal sebagai *coal bearing strata*, yang dipengaruhi oleh proses tektonik lempeng, yang secara umum tidak tersementasi dengan baik dan memiliki bobot isi kecil serta porositas tinggi, faktor lain yang mempengaruhi perubahan karakteristik kekuatan batuan. *coal bearing strata* yang berada di equator adalah cuaca dan air hujan yang akan sangat berperan saat batubara sudah tersingkap atau pada saat proses penambangan sudah mulai menjadi batuan lunak. Validasi data dari pemantauan radar telah dilakukan oleh Saptono (2012) pada batupasir berbutir kasar yang terjadi di Formasi Warukin. Perilaku batuan yang awalnya regresif kemudian meningkat menjadi progresif dan longsor. Pergerakan lereng pada saat trend kurva meningkat dengan nilai regangan lebih dari 2%.

3.3 Deformasi Pada Batuan

Deformasi batuan dalam banyak istilah adalah besaran perpindahan yang berbeda yang dipengaruhi oleh kombinasi berbagai faktor. Deformasi batuan dari perbedaan tipe kekuatan batuan tersebut dapat berbeda dari satu tambang ke tambang yang lain dan kadang-kadang dari lereng dalam tambang yang sama. Deere dan Miller (1966) mengklasifikasikan kekuatan batuan berdasarkan nilai UCS (lihat Tabel 3.3). Pavlovic (1998) menegaskan bahwa massa batuan yang

sama dalam situasi yang berbeda mungkin menunjukkan reaksi yang berbeda dalam deformasi batuan tersebut. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengetahui pengaruh yang mungkin dari faktor-faktor alam dan manusia pada massa batuan dan menempatkan faktor-faktor tersebut ke dalam pertimbangan analisis deformasi pada batuan. Evolusi perpindahan lereng dalam hal ini deformasi pada batuan dengan waktu telah cukup luas dibahas oleh banyak peneliti termasuk Broadbent dan Zavodni (1982); Varnes (1982); Martin (1993), Sullivan (1993), Mercer (2006), Osasan (2012) dan Cabrejo dan Harries (2012) sedangkan penelitian tentang perilaku batuan lunak di Indonesia telah dilakukan oleh Kramadibrata dkk. (2002, 2007), Wattimena dkk. (2009), Kramadibrata dkk. (2009), Sulistianto dkk. (2010) dan Saptono (2012).

Tabel 3.1
Klasifikasi Kekuatan Batuan berdasarkan nilai UCS
(Deere dan Miller (1966))

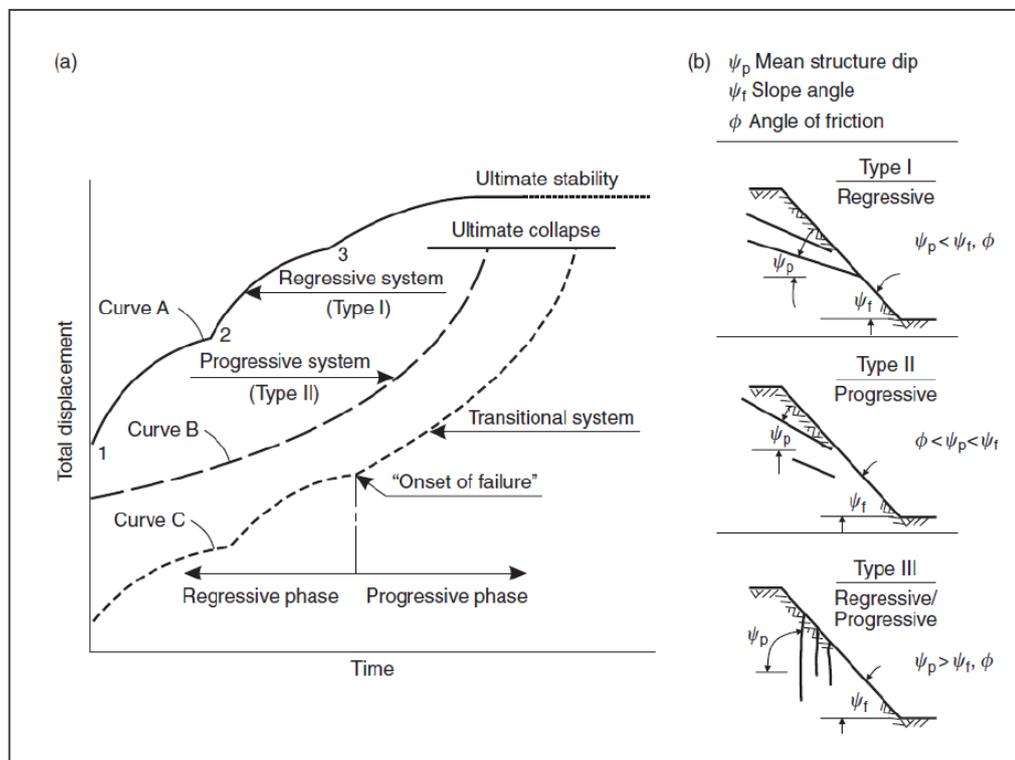
Rock Classification	UCS (Mpa)	Volcanic	Metamorphic	Sedimentary
Very weak rock	1 - 25	-	-	-
Weak Rock	25 - 50	2	-	-
Moderately hard Rock	50 - 100	14	4	3
Hard Rock	100 - 200	8	4	2
Very Hard Rock	> 200	-	-	-

3.3.1 Perpindahan Total Bergantung Waktu

Broadbent dan Zavodni (1982) menyimpulkan bahwa ada tiga jenis perilaku deformasi utama pada batuan yang ditunjukkan pada Gambar 3.3:

1. Perilaku regresif – umumnya ditandai dengan perlambatan deformasi menuju lereng yang stabil. Tingkat deformasi atau kecepatan lereng berkurang seiring dengan waktu dari titik awal terjadi pergerakan mungkin telah terjadi peledakan, penggalian atau tekanan pori yang berlebihan.

2. Perilaku Progresif – Peningkatan deformasi menuju ke lereng yang longsor. Tingkat deformasi atau kecepatan lereng meningkat dengan waktu.
3. Perilaku Transisi - lereng yang awalnya ditandai regresif (fase perlambatan) dan kemudian karakteristiknya berubah menjadi progresif yang mengarah ke longsor. Titik yang lereng berubah dari karakteristik regresif ke progresif ini dikenal sebagai "timbulnya longsor - *onset of failure*". Hal ini menunjukkan bahwa terjadinya longsor disebabkan oleh perubahan dalam sifat gesek massa batuan di lereng.



Gambar 3.3.

Total perpindahan versus waktu (Broadbent and Zavodni, 1982)

3.3.2 Perilaku Deformasi Bergantung Waktu

Setelah peninjauan ekstensif dari berbagai longsor lereng di tambang yang berbeda di seluruh dunia, Mercer (2006) dalam penelitiannya mengklasifikasikan tahapan dalam deformasi lereng tambang (lihat pada Gambar 3.4) menjadi:

1. Tahap 1 – Sebelum longsor, mode rayapan massa batuan primer;

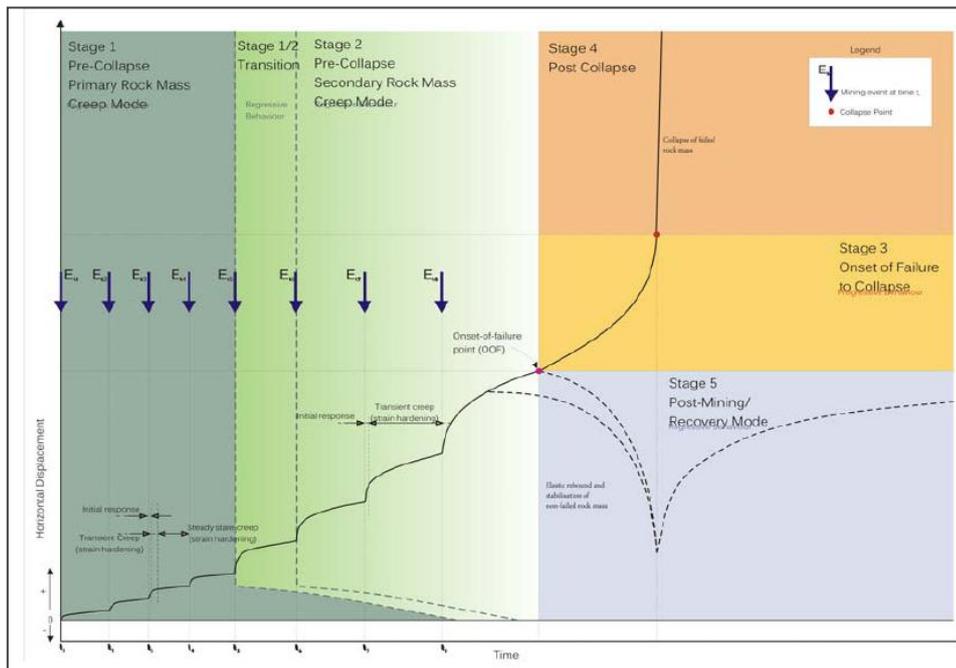
2. Tahap 2 – Sebelum longsor, mode rayapan massa batuan sekunder;
3. Tahap 3 - Timbulnya longsor (*onset of failure*), mode perilaku longsor;
4. Tahap 4 - Mode perilaku setelah longsor; dan
5. Tahap 5 - Mode perilaku setelah penambangan/pemulihan

Mode rayapan massa batuan primer yaitu tahap 1 dari model Mercer, merupakan tahap regresif (tipe I) di Model Zavodni. Mode rayapan massa batuan sekunder, tahap 2, setara dengan sistem progresif (tipe II). Mode perilaku terjadinya longsor, tahap 3, adalah sama dengan sistem transisi, di mana lereng mengalami transisi dari perpindahan progresif menuju longsor.

Perbedaan yang paling signifikan dalam dua model adalah dimasukkannya perilaku setelah longsor di tambang lereng yang diklasifikasikan sebagai tahap 4 dan 5 di model Mercer, yang digambarkan dalam Gambar 3.5. Tahap 4 merupakan perilaku perpindahan progresif lereng segera setelah longsor sementara tahap 5 adalah perilaku pasca tambang. Mercer (2006) mengidentifikasi enam mode utama deformasi setelah longsor, sebagai berikut:

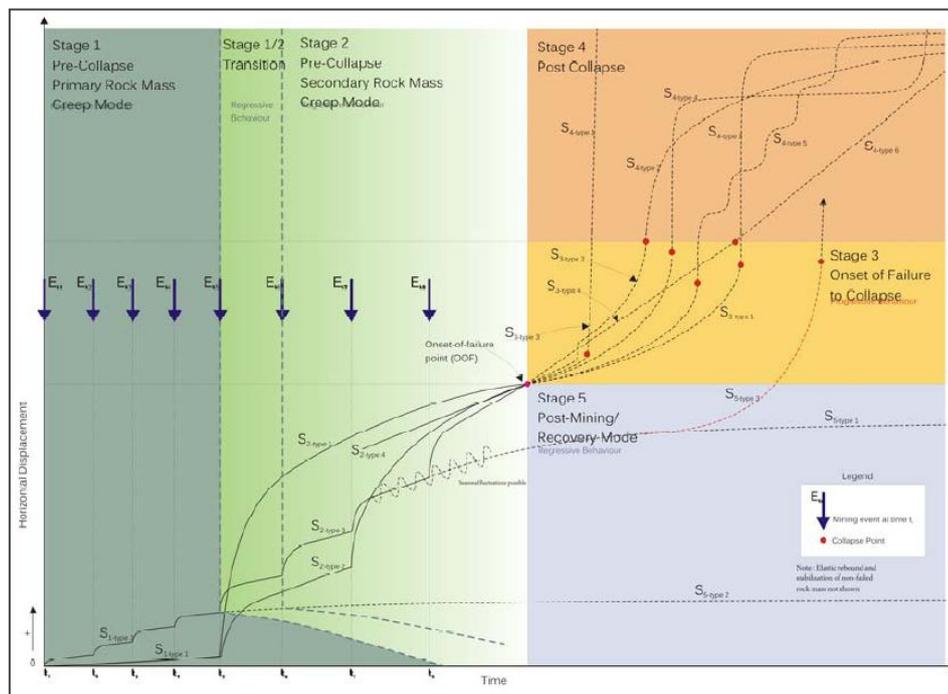
1. S4 tipe 1: Disintegrasi;
2. S4-tipe 2: Pemulihan sebagian dan perlambatan bertahap untuk merayap;
3. S4-tipe 3: Pemulihan penuh, kecepatan hampir sepenuhnya berhenti;
4. S4-tipe 4: Pemulihan parsial diikuti oleh keruntuhan akhir lainnya;
5. S4-tipe 5: Mekanisme Ratchet; dan
6. S4 tipe 6: Tingkat rayapan tinggi dan kemungkinan mengalami akselerasi.

Mercer menyatakan bahwa deformasi yang kompleks dapat terjadi jika lereng bergantian longsor antara tipe 2 sampai 6, dan bisa terjadi dalam hitungan menit sampai tahun. Perilaku deformasi juga dapat berubah dari perilaku progresif ke perilaku regresif tergantung pada faktor-faktor yang tidak tetap seperti perubahan permukaan, kegempaan dan perubahan geometri. Kondisi setelah tambang akhir melibatkan stabilisasi jangka panjang pada massa batuan, meskipun transisi dari tahap 5 kembali ke tahap 3 dan 4 dapat terjadi berdasarkan teori rayapan jangka panjang, dan kembali pada tahap 5, lereng dalam keadaan pemulihan regresif.



Gambar 3.4.

Model deformasi massa batuan berdasarkan waktu dan kejadian (Mercer, 2006).



Gambar 3.5.

Model deformasi massa batuan berdasarkan waktu dan kejadian setelah longsor dan perilaku setelah penambangan (Mercer, 2006).

3.3.3 Klasifikasi Kecepatan Perpindahan Lereng (*Velocity*)

Longsor di batuan yang keras biasanya sangat dikontrol oleh struktur geologi, kecepatan longsor juga sangat cepat karena kehilangan kohesi secara cepat. Sebaliknya, longsor pada batuan yang lemah memiliki kecepatan yang relative lambat. Varnes (1978) membuat klasifikasi pergerakan atau kecepatan dari lereng alami seperti yang terlihat pada Tabel 3.5. Akan tetapi klasifikasi lereng alamiah ini tidak dapat secara umum diterapkan pada tambang terbuka karena setiap lereng memiliki perbedaan karakteristik geologi yang berbeda. Setiap batuan memiliki karakteristik kecepatan longsor yang berbeda Tentu saja, generalisasi tersebut harus dilakukan dengan hati-hati. Cara terbaik menilai longsor adalah dengan membandingkannya dengan sejarah kasus longsor serupa yang sudah terjadi (Hungur & Evans 2004).

Tabel 3.2

Klasifikasi Longsor berdasarkan perbedaan *Velocity* (Varnes 1978, Hungur et al. 2001, Hungur & Evans 2004).

Type	Velocity Class*							Comment
	ES	VS	S	M	R	VR	ER	
<i>Slides in Rock</i>								
Translational (or wedge) Rock slide								May be slow in very weak rocks
Rotational Rock Slide (slump)								very weak rock mass
Compound Rock Slide								various types of mechanisms
Rock Collapse								Strong rock, Joints, rock bridges
<i>Falls and Topples</i>								
Rock (debris) fall								Fragmental fall, small scale
Rock block topple								Single or Multiple blocks
Rock Flexural topple								Very weak rock mass
<i>Slides in Soil</i>								
Clay Slump (Rotational)								Non - Sensitive
Clay Slide (compound)								Non - Sensitive
Sand (Gravel, Talus, Debris) Slide								Usually shallow
<i>Flow-Like Landslides</i>								
Dry sand (silt, Gravel, Talus, Debris) Flow								No cohesion
Sand (silt, Debris, Peat) Flow Slides								Liquefaction involved
Sensitive Clay Flow Slide								Quick clay
Debris Avalanche								Non - channelized
Debris (Mud) Flow								Channelized
Debris Flood								High water content
Earth Flow								Plastic clay
Rock Avalanche								Begins in bedrock
Rock Slide - Debris Avalanche								Entrains debris

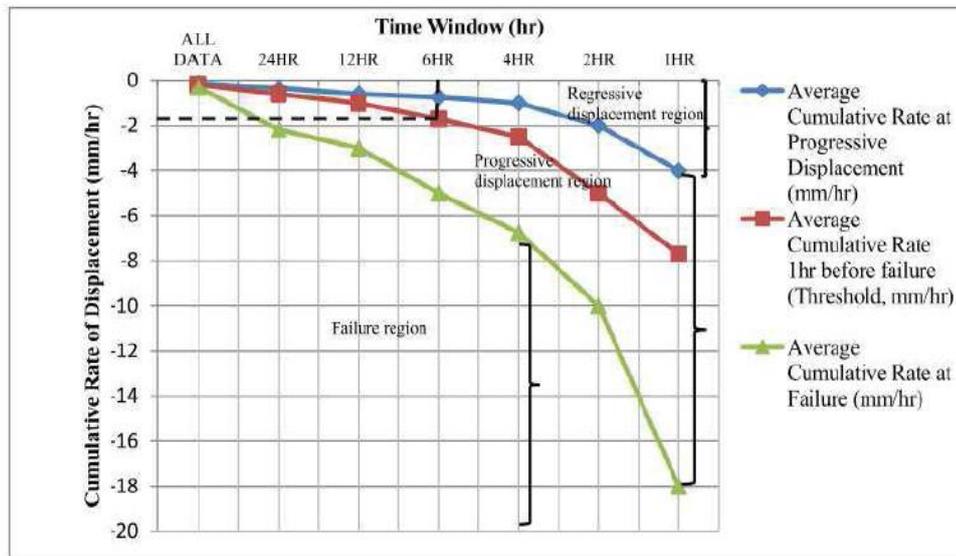
Tabel 3.3
Klasifikasi Pergerakan lereng (Varnes, 1978)

No	Rate	Definition of movement
1	>3 m/s	Extremely rapid
2	> 3 m/minute	Very rapid
3	> 1.5 m/day	Rapid
4	>1.5 m/month	Moderate
5	>1.5 m/year	Slow
6	>0.006 m/year	Very slow
7	<0.006 m/year	Extremely slow

3.3.4 Interpretasi Deformasi dan Mekanisme Longsor Dari Data Pergerakan Dengan *Movement And Surveying Radar* (MSR)

Osasan (2012) melakukan analisis balik pada lima kasus longsor di tambang batubara di Afrika Selatan (Gambar 3.6) dengan melakukan interpretasi dari deformasi dan mekanisme longsor dari data pergerakan dengan *Movement and Surveying Radar* (MSR). Interpretasi dari deformasi digunakan untuk mengklasifikasikan perilaku deformasi lereng di tambang terbuka batubara menjadi lima tahap utama, yang terdiri dari tiga tahap sebelum longsor (Broadbent dan Zavodni, 1982; Sijing, 1981, Varnes, 1982; Mercer, 2006) dan dua tahap setelah longsor (Mercer, 2006). Dari data perpindahan, dua jenis perilaku deformasi lereng stabil juga diidentifikasi.

Tahap sebelum longsor terdiri dari tahap perilaku perpindahan regresif, tahap perilaku perpindahan progresif dan timbulnya longsor kemudian menjadi longsor. Tahap setelah longsor terdiri dari tahap rebound dan tahap stabilisasi. Perilaku tipe I deformasi membutuhkan pemicu yang kuat untuk menjadi longsor sementara perilaku tipe II deformasi membutuhkan pemicu kecil untuk berkembang menjadi longsor. Kedua jenis perilaku deformasi akan tetap regresif,



Gambar 3.6

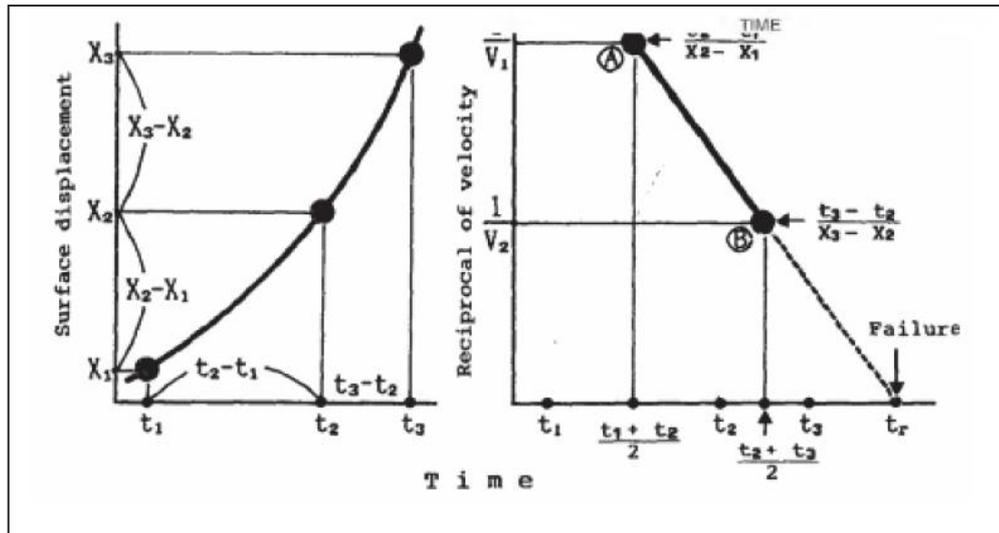
Kumulatif rate dari displacement (mm/hr) ditentukan berdasarkan monitoring dari longsor di tambang batubara New Vaal (Osasan, 2012)

3.4 Prediksi Waktu Longsor Dengan Metode Inverse Velocity

Konsep *inverse velocity* dikembangkan oleh Fukuzono (1985) dengan melakukan pengujian laboratorium simulasi induksi hujan pada potensi longsor di massa tanah dengan variasi sudut kemiringan lereng. Kondisi simulasi di laboratorium dianggap merupakan karakteristik dari akselerasi rayapan di bawah pengaruh gravitasi. Ketika kebalikan dari tingkat perpindahan yang diamati (*inverse velocity*) diplot terhadap waktu, maka nilai-nilainya mendekati nol ketika kecepatan meningkat menuju longsor. Garis tren melalui nilai-nilai inverse velocity terhadap waktu dapat diproyeksikan ke nilai nol pada absis (x-axis) untuk memprediksi waktu perkiraan longsor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Fukuzono mendapatkan tiga jenis plot diperoleh dari data laboratorium (yaitu, cekung, cembung atau linear), yang didefinisikan oleh persamaan berikut:

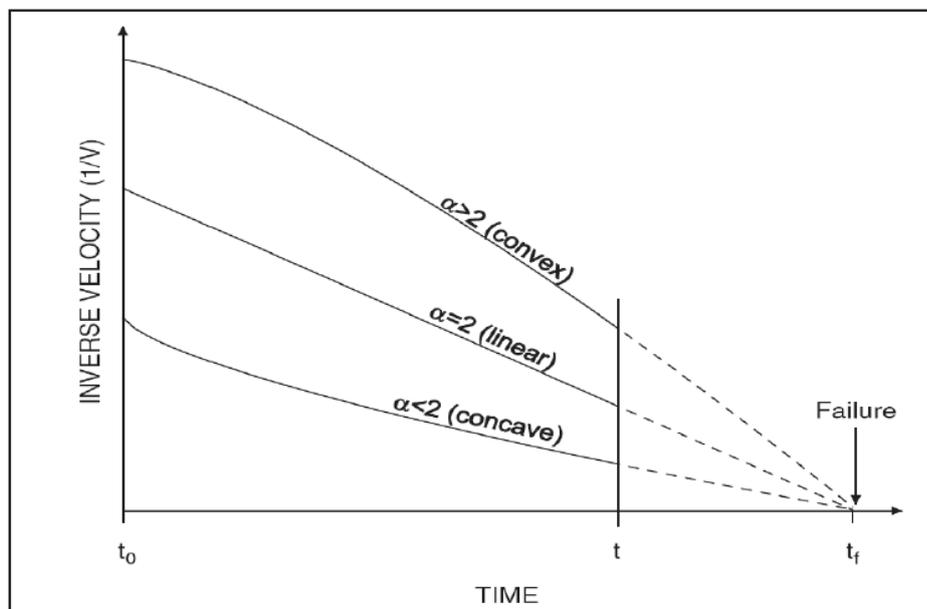
- (1) Keterangan: A dan α = konstanta, t = waktu, t_f = waktu terjadinya longsor dan $1/v = \textit{inverse velocity}$. Pada pengukuran laboratorium yang dilakukan Fukuzono konstanta α memiliki nilai antara 1.5 – 2.2, seperti terlihat pada Gambar 3.8 untuk grafik linear ketika $\alpha = 2$, cekung < 2 dan cembung > 2 .

Fukuzono menyimpulkan bahwa linear trend dari data inverse velocity biasanya memberikan hasil yang lebih akurat dalam melakukan estimasi waktu longsor sebelum longsor terjadi.



Gambar 3.7

Velocity dan Inverse Velocity dan Waktu
(Fukuzono, 1985)



Gambar 3.8

Inverse velocity untuk prediksi waktu longsor
(Fukuzono, 1985)

Metode ini pertama kali digunakan secara nyata dalam memprediksi tiga longsor di tambang terbuka oleh Rose and Hungr (2006). Aplikasi dari metode ini dapat memprediksi secara akurat waktu longsor dengan menggunakan alat pemantauan lereng yaitu manual dan robotik total station serta wireline ekstensometer. Kecepatan perpindahan didapatkan dari perubahan deformasi berbanding dengan perubahan waktu.

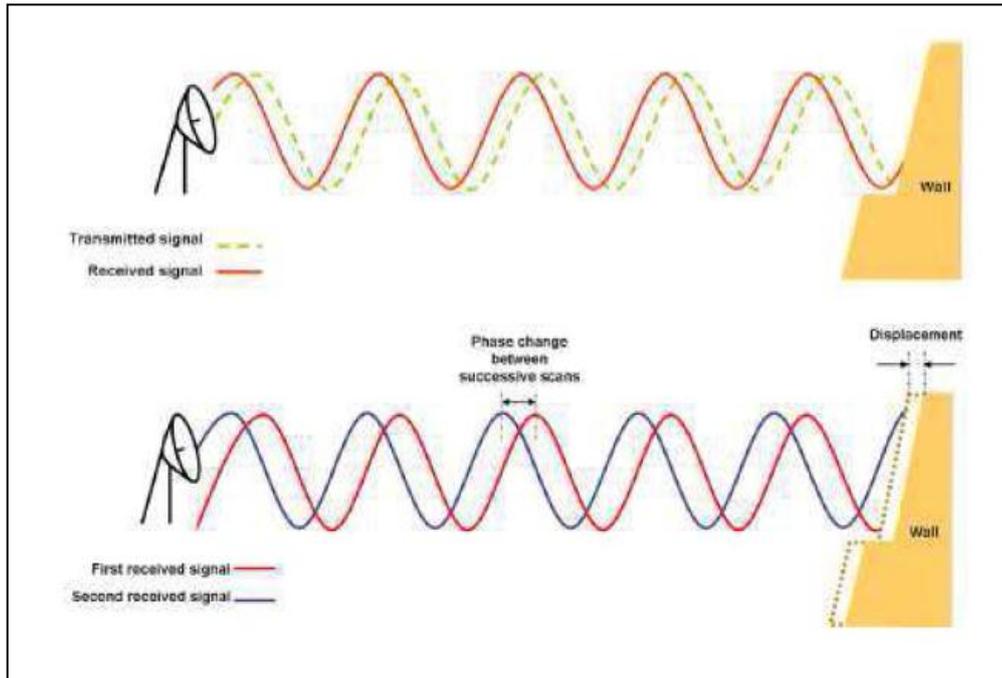
Prediksi Waktu Longsor Dengan Metode *Inverse Velocity* Pada Tambang Betze (Rose dan Hungr, 2006). Rose dan Hungr (2006) yang melakukan implementasi metode inverse velocity secara langsung dengan memprediksi waktu longsor pada tambang terbuka dengan memberikan beberapa rekomendasi untuk menggunakan metode ini yaitu sebagai berikut:

1. Metode tidak dapat digunakan tanpa disertai dengan pengamatan kualitatif dari perilaku lereng, pengumpulan data dan analisis dari struktur lereng yang sedang terjadi, kondisi massa batuan, stres dan kondisi air tanah. Pemantauan deformasi hanya salah satu komponen dari sebuah proses kompleks manajemen stabilitas lereng.
2. Metode tidak dapat digunakan untuk longsor yang didominasi oleh longsor *brittle*. Perhatian khusus harus diberikan ketika berhadapan dengan longsor yang relatif kecil di batuan yang kuat.
3. Data pemantauan harus diproses untuk menghilangkan efek kesalahan pada instrumen monitoring. Estimasi longsor bergantung pada identifikasi tren yang konsisten. Kemungkinan perubahan tren, didorong oleh faktor faktor yang dapat diamati atau tidak dikenal, harus selalu diingat. Pemantauan harus dilanjutkan selama mungkin sebelum longsor. Hasil pemantauan harus terus dievaluasi kembali dan setiap data terbaru didapatkan fungsi harus direvisi mengikuti data terbaru. Jika perubahan tren terjadi, prediksi harus segera direvisi. Ini harus diterima bahwa alarm palsu kadang-kadang dapat terjadi.
4. Penggunaan tren linear yang diperbarui secara berkelanjutan lebih direkomendasikan untuk mengidentifikasi tren kelengkungan atau untuk mengetahui tanda timbulnya perubahan tren dari deformasi lereng.

3.5 Instrumen Pemantauan *Slope Stability Radar*

Slope Stability Radar (SSR) adalah suatu sistem/metode monitoring ketidakstabilan permukaan dinding/lereng berteknologi tinggi yang terintegrasi untuk mengidentifikasi deformasi lereng berdasarkan perubahan fase gelombang secara real-time. Radar dapat memantau permukaan lereng pada area yang luas dengan presisi sub milimeter dari perpindahan lereng, tanpa perlu memasang reflektor pada permukaan lereng, serta tidak terhalang oleh cuaca (hujan, kabut, debu, asap). Konsep ini didasarkan pada diferensial radar interferometri (Noon, 2003), yaitu memindai wilayah dinding dan membandingkan pengukuran fase di setiap pixel antara scan pertama dan scan kedua (Gambar 3.9). Area pindai diatur menggunakan Gambar visual yang terintegrasi dengan sistem camera digital resolusi tinggi. Data dari *Slope Stability Radar* disajikan dalam dua format. Pertama, Gambar ‘deformasi’ adalah plotting lereng yang mewakili total deformasi sehingga memungkinkan pengguna untuk menentukan sejauh mana, kapan dan daerah mana yang mengalami pergerakan.

Kedua, ‘grafik waktu perpindahan (deformasi)’, yang dapat ditentukan pada setiap lokasi untuk mengevaluasi tingkat perpindahan. Pengukuran deformasi dengan interferometri (Noon, 2013) dapat dilihat pada Gambar 3.9. Waktu *scan* biasanya setiap 1 – 10 menit dan data dikirim ke kantor melalui link radio khusus atau melalui WLAN tambang. *Slope Stability Radar* dilengkapi software SSRViewer untuk mengetahui deformasi dengan Gambar visual dan untuk mengatur alarm guna memperingatkan kondisi lereng yang tidak stabil dan aktif bergerak. Grafik deformasi memberikan definisi spasial yang jelas tentang lokasi, jumlah, kecepatan, waktu dan estimasi kapan dinding akan longsor terhadap volume massa batuan yang bergerak. Dengan identifikasi komprehensif dan mekanisme yang terintegrasi, serta waktu yang terukur, maka ”batas risiko yang dapat diterima” untuk menjamin keselamatan operasi tambang dengan risiko ekonomi seminimal mungkin terhadap lereng yang tidak stabil dan kritis dapat dirumuskan lebih akurat untuk memastikan operasional tambang memiliki waktu yang cukup guna memaksimalkan produksi.



Gambar 3.9

Pengukuran deformasi radar dengan interferometri (Noon, 2013)

BAB IV HASIL PENELITIAN

4.1 Evaluasi Data Wall Folder

Analisis data wall folder yang ada baik longsor maupun tidak di keseluruhan lereng tambang adalah 127 data wall folder dari tahun 2011-2015, Data yang kemudian dilakukan analisis untuk penelitian yang berkaitan dengan longsor, jenis batuan dan pemicu (*triggering*) dari longsor itu sendiri sebanyak 15 data wall folder (lihat Tabel 4.1). Dari 15 data wall folder ini disesuaikan dengan target penelitian antara lain pada area *Low-wall* dan *High-wall*, pemicu kejadian longsor terutama pengaruh struktur geologi. Data yang dihasilkan oleh *Slope stability Radar* cukup baik dengan grafik yang mengindikasikan terjadi pergerakan. Kejadian longsor yang terekam oleh *Slope Stability Radar* kemudian dilakukan pemetaan dan analisis di lapangan berupa jenis batuan, dimensi lereng yang longsor dan pemicu terjadinya longsor termasuk data stuktur geologi dari *mine geologist* daerah penelitian dan dikonfirmasi langsung oleh geotech engineer untuk memvalidasi data tersebut. Evaluasi dari 15 data wall folder dari tahun 2011 hingga tahun 2015 yang dianalisis sebagian besar memiliki karakter deformasi yang kurang lebih sama dengan tingkatan waktu dari linier, progresif, regressif hingga benar benar terjadi longsor dan kemudian stabil kembali.

Tabel 4.1.
Wall folder ID dan waktu monitoring *Low-wall* dan *High-wall*

No	Date	Wall Folder	Wall ID	(jam)
1	26-Feb-11	SSR107_110226_wahana_broto_Low_Wall_Monitoring__72__73	A	192
2	29-Apr-12	SSR107_120507_Wahana Baratama_Middle_Lowwall_Monitoring	B	288

3	21-Sep-12	SSR107_120921_Wahana_East Pit_lowwall_monitoring_20120921	C	216
4	20-Apr-13	SSR107_130420_Wahana_WBM_lowwa ll_monitoring_20130420	D	200
5	2-Sep-13	SSR107_130423_Wahana_WBM_lowwa ll_monitoring_20130423	E	102
6	16-Nov-13	SSR107_130902_Wahana_Wahana_LW _monitoring_bndry	F	94
7	21-Nov-13	SSR107_131116_Wahana_Wahana_Mon itoring_Lowwall_B84b87_Bdy_Farwest	G	96
8	21-Nov-13	SSR107_131121_Wahana_Wahana_Inst ability_Block_85-87	H	1536
9	22-Feb-14	SSR107_140222_Wahana_wahana_Mon itoring_Lowwall_West_Pit	I	504
10	12-Apr-14	SSR107_140412_Wahana_wahana_TES T_MTM_APR14	J	144
11	11-Mar-15	SSR107_150311_WAHANA_Low Wall_Monitoring_East_Boundary	K	72
12	1-Sep-12	SSR107_120901_Wahana Baratama_Middle_Hauling_Road_Failur e_20120901	A1	288
13	14-Feb-13	SSR107_130214_Wahana_WBM_HW_ Monitoring_GT	B1	120
14	11-Mar-13	SSR107_130311_Wahana_WBM_HW_ Monitoring_Western_Pit	C1	240
15	13-Jul-13	SSR107_130713_Wahana Mine Project_WBM_cutback_monitoring_inst ability_62_HW	D1	264

4.2 Karakteristik dan Waktu Longsor

Karakteristik longsor pada daerah penelitian di klasifikasikan menjadi 4 tahap utama yaitu, linier, regresif, progresif dan longsor (Broadbent dan Zavodni, 1982), dan tahapan pasca longsor atau post failure (mercer, 2006). Dari karakteristik 15 data wall folder dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan 4.3. Untuk waktu dari karakteristik longsor pada area *Low-wall* jenis karakteristik kondisi *failure* cenderung lebih cepat dibanding area *High-wall* yang kondisi *failure* cukup lama, hal ini mengindikasikan bahwa *failure* pada area *High-wall* cenderung

dalam posisi rayapan material dan *Low-wall* cenderung memiliki bidang longsor yang lemah sehingga proses *failure* cenderung lebih cepat. Waktu karakteristik *failure Low-wall* dan *High-wall* ditunjukkan Tabel 4.4 dan Gambar 4.1- 4.2.

Table 4.2.

Karakteristik longsor *Low-wall*

No	Date	Wall ID	Karakteristik
1	26-Feb-11	A	Linear - progresif - failure – regresif - post failure
2	29-Apr-12	B	Linear - progresif - failure – regresif - post failure
3	21-Sep-12	C	Regresif – linear - progresif - failure – regresif (post failure)
4	20-Apr-13	D	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)
5	2-Sep-13	E	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)
6	16-Nov-13	F	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)
7	21-Nov-13	G	Regresif - linear - progresif - failure – regresif (post failure)
8	21-Nov-13	H	Regresif - progresif - collapse – regresif - linear – progresif
9	22-Feb-14	I	Regresif - progresif - failure – regresif – linear (post failure)
10	12-Apr-14	J	Regresif – linear - progresif - failure – regresif (post failure)
11	11-Mar-15	K	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)

Tabel 4.3.

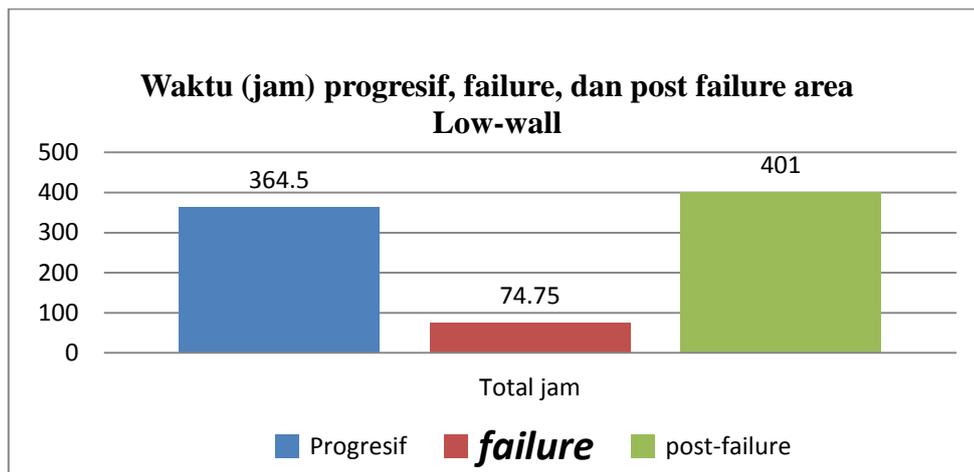
Karakteristik longsor *High-wall*

No	Date	Wall ID	Karakteristik
1	1-Sep-12	A1	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)
2	14-Feb-13	B1	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)
3	11-Mar-13	C1	Linear - progresif - failure – regresif – failure-regresif
4	13-Jul-13	D1	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)

Table 4.4.

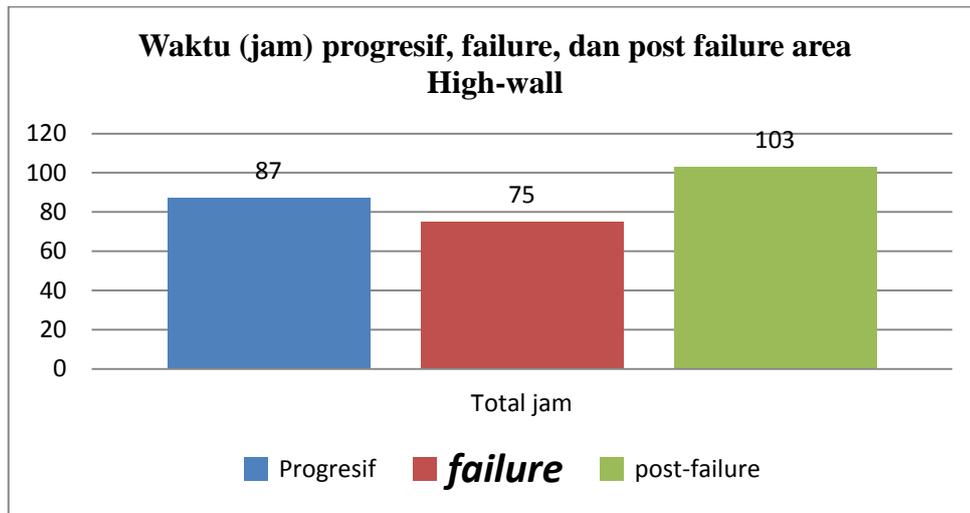
Waktu kejadian (jam) dari berdasarkan graphik
Progresife, failure, dan post-failure

No	Wall Folder	Waktu (jam) Graphic)		
		<i>Progresife</i>	<i>Failure</i>	<i>Post-failure</i>
1	A	8	3	13
2	B	48	5	24
3	C	2.5	0.5	11
4	D	1.5	0.5	36
5	E	24	10	45
6	F	12	5	36
7	G	40	5	52
8	H	72	14	36
9	I	22	6	32
10	J	25	2	32
11	K	96	18	84
12	A1	40	15	46
13	B1	5	4	5
14	C1	6	8	12
15	D1	36	18	40



Gambar 4.1.

Waktu (jam) proses terjadinya Karakteristik longsor progresif,
 failure dan post failure pada area *Low-wall*



Gambar 4.2.

Waktu (jam) proses terjadinya Karakteristik longsor progresif, failure dan post failure pada area *High-wall*

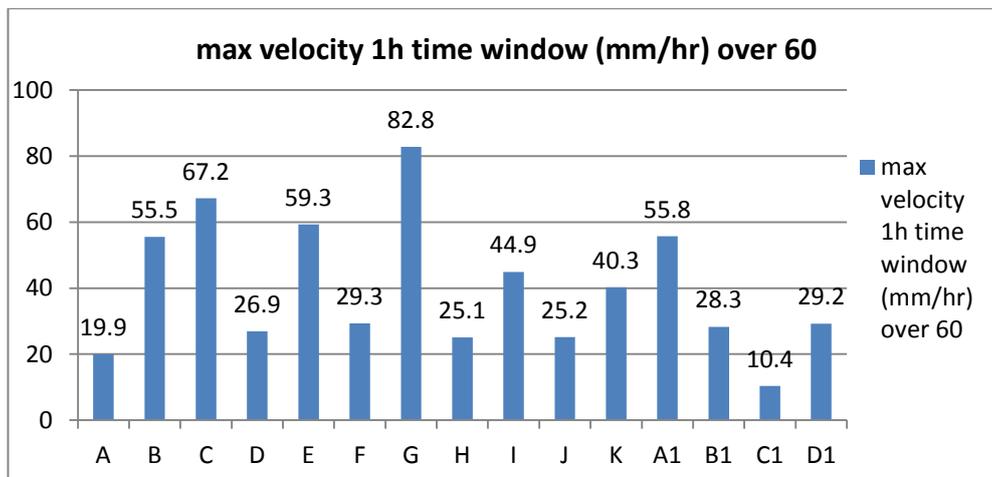
4.3 *Velocity dan Inverse-velocity*

Velocity atau kecepatan material longsor dihitung dari perubahan deformasi berbanding dengan perubahan waktu, semakin tinggi nilai *velocity* dalam waktu tertentu maka lereng menunjukkan suatu ketidakstabilan. *Inverse – velocity* adalah kebalikan dari *Velocity* itu sendiri, Jika nilai semakin rendah atau mendekati angka nol pada *inverse_velocity* maka lereng akan semakin tidak stabil atau longsor. Perbedaan kecepatan perlu diamati untuk mengetahui perubahan perilaku batuan menuju longsor. Kecepatan maksimum dari longsor yang terjadi di *Low-wall* dan *High-wall* PT. Wahana memiliki karakteristik yang berbeda. Pada area *Low-wall* kecepatan maksimum longsor dalam *time window 1h* berkisar antara 20 mm/jam sampai 82 mm/jam dan *time window 24h* adalah 2.30 mm/jam hingga 87.40 mm/jam. Area *High-wall* kecepatan maksimum longsor *time window 1h* berkisar antara 11 mm/jam sampai 56 mm/jam pada dan *time window 24h* adalah 1.5 mm/jam sampai 9.15 mm/jam. Nilai *inverse Velocity* pada area *Low-wall* berkisar antara 0.002 hingga 0.05 jam/mm, sedangkan untuk area *High-wall inverse velocity* minimum berkisar antara 0.02 hingga 0.1 jam/mm. Nilai *Velocity* dan *inverse-velocity* dapat dilihat pada Tabel 4.5. Grafik nilai maximum *Velocity* dan *Inverse-velocity* dapat pada Gambar 4.3 – 4.6.

Table 4.5.

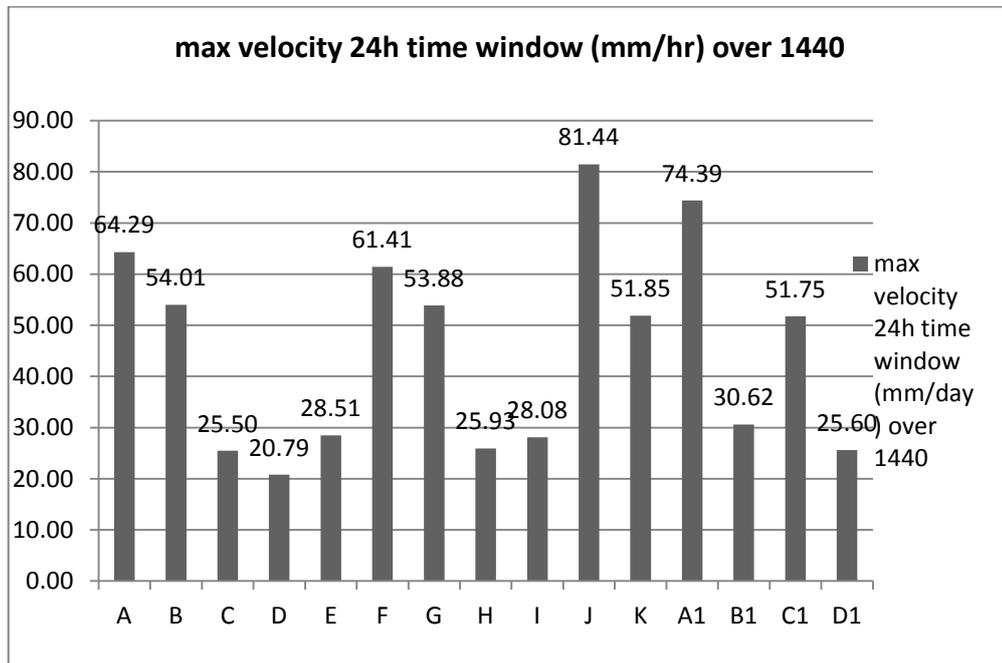
Nilai *Velocity* dan *Inverse-velocity* untuk *1h time window* dan *24h time window*

No	Wall Folder	max velocity 1h time window (mm/hr) over 60	max velocity 24h time window (mm/hr) over 1440	min inverse velocity 1h time window (mm/hr) over 60	min Inverse velocity 24h time window (mm/hr) over 1440
1	A	19.91	64.29	0.05	0.02
2	B	55.48	54.01	0.02	0.02
3	C	67.18	25.50	0.02	0.04
4	D	26.87	20.79	0.01	0.05
5	E	59.28	28.51	0.01	0.04
6	F	29.3	61.41	0.03	0.02
7	G	82.8	53.88	0.01	0.02
8	H	25.05	25.93	0.04	0.04
9	I	44.9	28.08	0.02	0.04
10	J	25.2	81.44	0.02	0.01
11	K	40.26	51.85	0.03	0.02
12	A1	55.75	74.39	0.02	0.01
13	B1	28.3	30.62	0.04	0.03
14	C1	10.4	51.75	0.1	0.02
15	D1	29.2	25.60	0.03	0.04



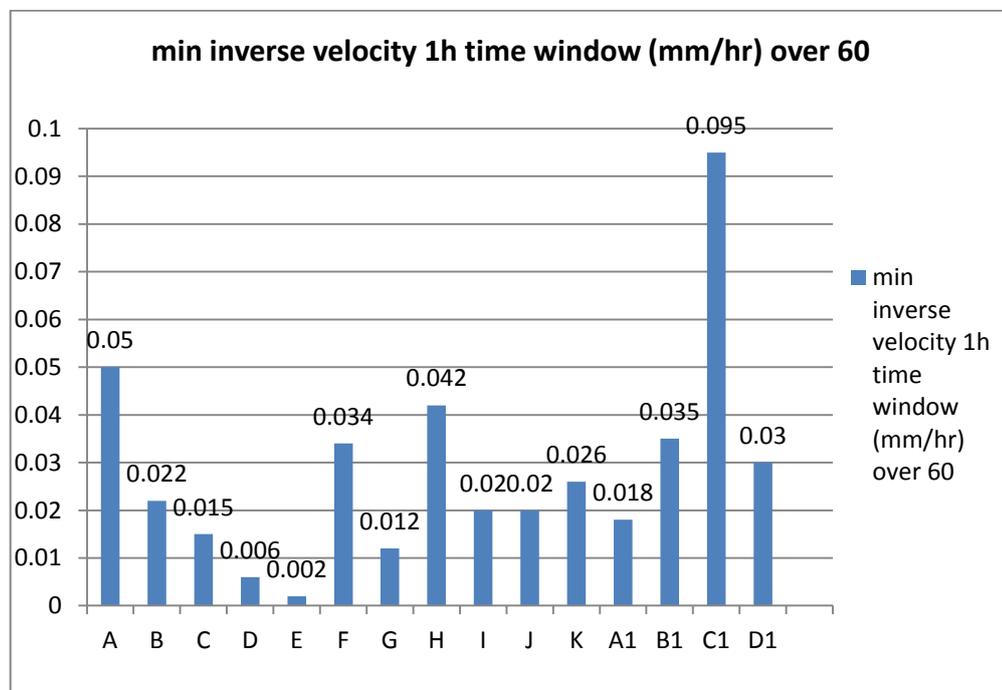
Gambar 4.3.

Max *velocity* wall folder area *Low-wall* dan *High-wall* dalam *time window 1 jam*



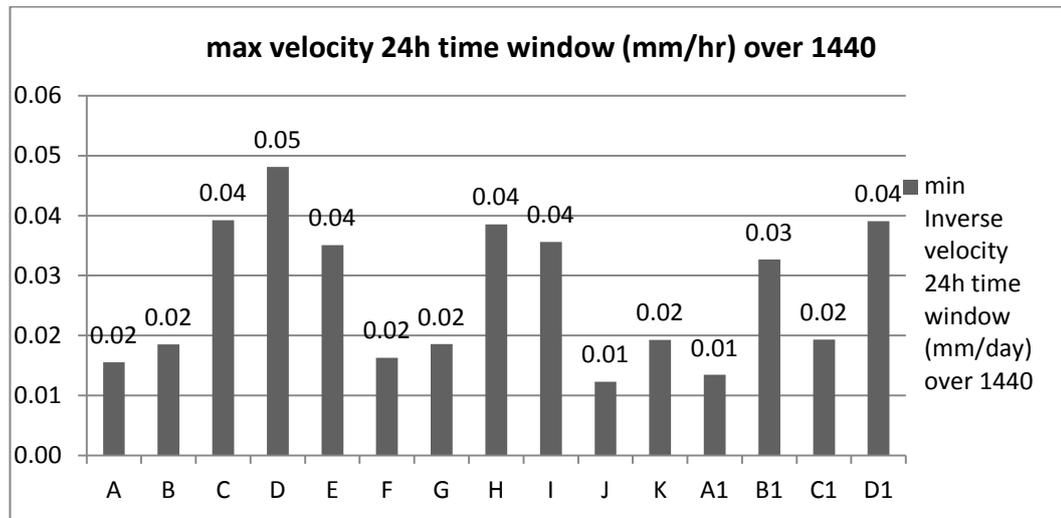
Gambar 4.4.

Maximum *velocity* wall folder area *Low-wall* dan *High-wall* dalam *time window 1 Hari (over 1440)*



Gambar 4.5

Minimum *Inverse-velocity* wall folder area *Low-wall* dan *High-wall* dalam *time window 1 jam (Over 60)*



Gambar 4.6

Minimum *Inverse-velocity* wall folder area *Low-wall* dan *High-wall* dalam *time window 1 jam (Over 1440)*

4.4 Evaluasi Jenis Batuan

Evaluasi jenis batuan dari material longsor didapatkan dari hasil pengamatan dilapangan dan untuk sifat fisik batuan diambil dari hasil pengeboran geoteknik sebelumnya. Untuk hasil laboratorium yang disesuaikan dengan material longsor dilapangan berdasarkan jenis batuan terdapat pada Tabel 4.6. Secara umum dari hasil pemetaan geologi permukaan, *Rockmass* dan *insitu rock strength* dari dinding yang telah antara lain ;

- *Mudstone/claystone* : secara umum *insitu strength very low – low*, beberapa area medium strength, joint slickensided.
- *Sandstone* : secara umum *insitu strength Low- Medium*, beberapa *Medium to High* sangat stabil ukuran butiran fine – medium grained, joint planar to wavy.
- *Laminated shaley siltstone/Mudstone* : *insitu strength very low – low*, terdapat inklusi karbon
- Seam batubara. Hitam pecahan medium - widely, *insitu strength low – medium*.

- *Mudstones* dan *Sandstone* dianggap sangat stabil dalam hal potensi ketidakstabilan jika pada area tersebut tidak terdapat struktur geologi. Berdasarkan jenis batuan kemudian dilakukan analisis pada lereng tunggal.
- Dari kekuatan massa batuan hasil pengujian laboratorium. *Sandstone* lebih tinggi dibanding dengan *Mudstone*. (sifat fisik batuan lihat Tabel 4.7.)

Pendekatan-pendekatan yang digunakan dalam analisis lereng tunggal adalah :

- a. Variasi material dianggap homogen dan mempunyai kekuatan geser, kohesi dan sudut gesek dalam.
- b. Berdasarkan data longsor yang terjadi di lereng tunggal bahwa model longsor berbentuk busur yang bermula dari puncak lereng hingga kaki lereng.
- c. Semua perhitungan FK menggunakan metode Janbu.
- d. Nilai faktor keamanan (FK) untuk lereng tunggal yang diijinkan lebih besar atau sama dengan 1,30 (Petunjuk Perencanaan Penanggulangan Longsoran, SKBI 2.3.06.1987). (Dimensi lereng dan nilai FK lihat Tabel 4.8)

Tabel 4.6.

Jenis Batuan Masing masing Wall Folder

No	Wall Folder	Rock Type
1	SSR107_110226_wahana_broto_Low_Wall_Monitoring_72_73	<i>Mudstone</i> and Coal
2	SSR107_120507_Wahana Baratama_Middle_Lowwall_Monitoring	<i>Sandstone</i> and Siltstone
3	SSR107_120921_Wahana_East Pit_lowwall_monitoring_20120921	<i>Sandstone</i>
4	SSR107_130420_Wahana_WBM_lowwall_monitoring_20130420	<i>Sandstone</i>
5	SSR107_130423_Wahana_WBM_lowwall_monitoring_20130423	<i>Sandstone</i>
6	SSR107_130902_Wahana_Wahana_LW_monitoring_bndry	<i>Sandstone</i> and Siltstone

7	SSR107_131116_Wahana_Wahana_Monitoring_Lowwall_B84b87_Bdy_Farwest	<i>Mudstone</i>
8	SSR107_131121_Wahana_Wahana_Instability_Block_85-87	<i>Mudstone</i>
9	SSR107_140222_Wahana_wahana_Monitoring_Lowwall_West_Pit	<i>Mudstone</i>
10	SSR107_140412_Wahana_wahana_TEST_MTM_APR14	<i>Sandstone</i>
11	SSR107_150311_WAHANA_LowWall_Monitoring_East_Boundary	<i>Mudstone</i>
12	SSR107_120901_Wahana Baratama_Middle_Hauling_Road_Failure_20120901	<i>Mudstone</i>
13	SSR107_130214_Wahana_WBM_HW_Monitoring_GT	<i>Sandstone</i>
14	SSR107_130311_Wahana_WBM_HW_Monitoring_Western_Pit	<i>Mudstone</i>
15	SSR107_130713_Wahana Mine Project_WBM_cutback_monitoring_instability_62_HW	<i>Sandstone</i>

Tabel 4.7.

Sifat fisik batuan dari hasil Laboratorium

No	Jenis Material	Density Jenuh γ (gr/cm ³)	UCS (MPa)	Kohesi (MPa) sisa	Sudut Geser Dalam ϕ sisa
1	<i>Mudstone</i>	26	6.83	50	14
2	<i>Sandstone</i>	24	17.07	610	25.1
3	Siltstone	25	14.09	120	21.4
4	Batubara	12.9	10.56	182	42.7

Tabel 4.8.

Dimensi Lereng dan Nilai Faktor Keamanan

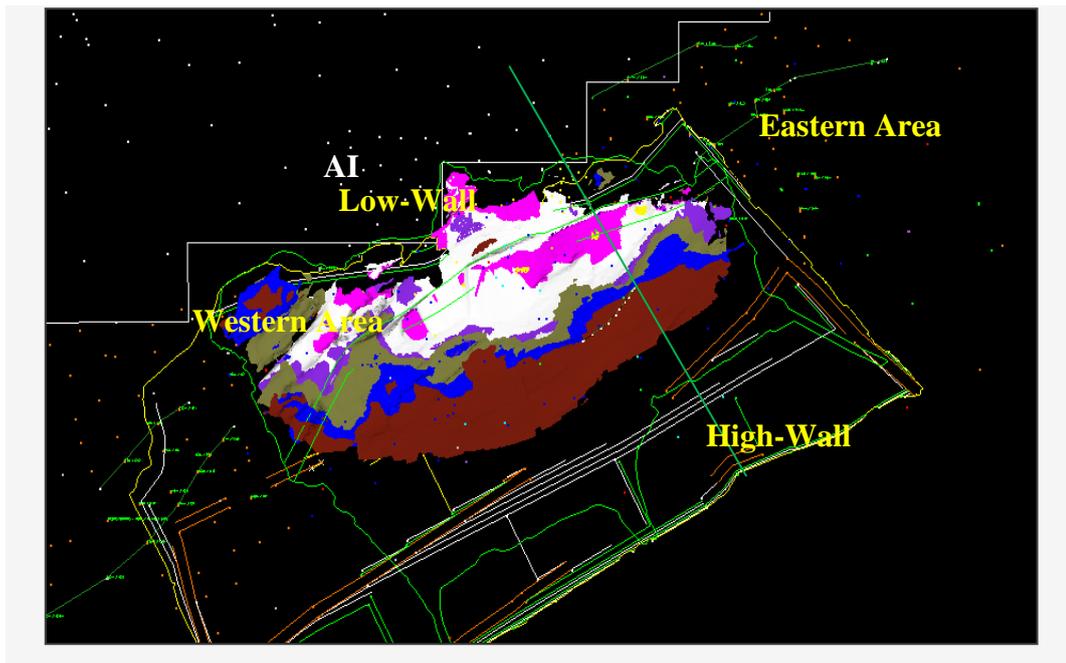
No	Wall Folder	Jenis Batuan	Dimensi Lereng lereng		FK
			Tinggi lereng (m)	Sudut	
1	A	<i>Mudstone</i>	18	50	2.87
2	B	<i>Sandstone and Siltstone</i>	25	50	4.08

3	C	<i>Sandstone</i>	20	50	4.09
4	D	<i>Sandstone</i>	18	50	4.32
5	E	<i>Sandstone</i>	25	50	5.17
6	F	<i>Sandstone and Siltstone</i>	15	50	5.55
7	G	<i>Mudstone</i>	22	50	2.03
8	H	<i>Mudstone</i>	15	50	2.61
9	I	<i>Mudstone</i>	14	50	2.12
10	J	<i>Sandstone</i>	20	50	4.09
11	K	<i>Mudstone</i>	25	50	2.25
12	A1	<i>Mudstone</i>	20	35	2.12
13	B1	<i>Sandstone</i>	25	35	3.75
14	C1	<i>Mudstone</i>	20	35	2.13
15	D1	<i>Sandstone</i>	15	35	4.55

4.5 Evaluasi Pengaruh Struktur Geologi

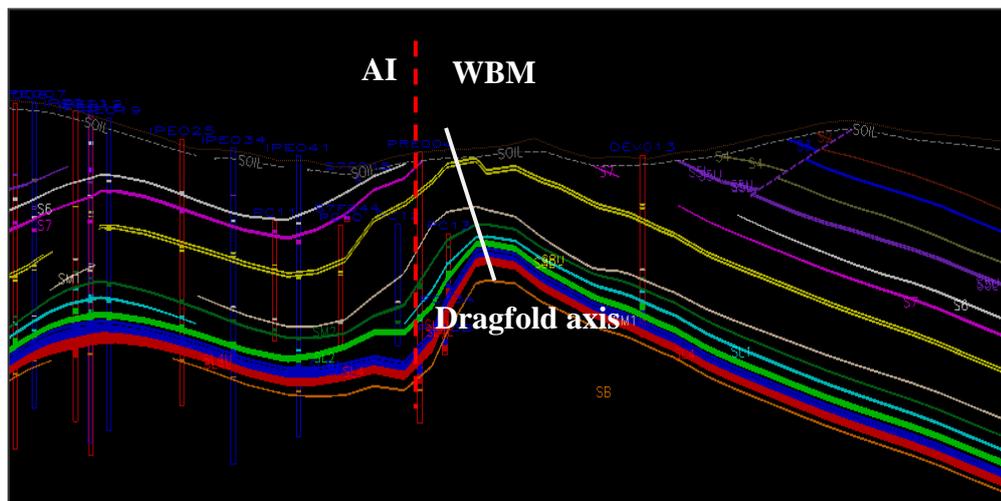
Sebagian besar struktur geologi kompleks tidak dapat didefinisikan sebelum tersingkap dari kegiatan suatu proses penambangan, karena keterbatasan dan jarak bor geologi yang cukup jauh terkhusus melalui daerah struktur geologi yang kompleks. Dalam kejadian longsor yang diamati dari *slope stability Radar* terdapat beberapa struktur geologi yang tersingkap berupa patahan dan lipatan skala kecil dan tidak dapat diamati secara detail untuk digambarkan dan dimodelkan. (Faktor pemicu dan Struktur Geologi dapat dilihat pada Tabel 4.9.) Model Struktur geologi pada area Low-Wall terdiri dari serangkaian patahan dan lipatan yang sejajar dengan bidang arah perlapisan batubara. (Situasi Pit Jumbo PT.WBM lihat Gambar 4.7) Kebanyakan struktur yang diukur menunjukkan *dip* patahan lebih curam menuju ke arah Tenggara dan berdampak besar terhadap ketidak stabilan lereng baik di *Low-wall* maupun di *High-wall*. Dampak dari patahan pada area *High-wall* relatif lebih kecil karena itu secara umum perlapisan batubara menuju ke *High-wall* relative linier dan bergantung dari tingkat kekuatan batuan *Rockmass* penyusun *High-wall* itu sendiri. Mekanisme longsor *slacking* dari *bedding layers* pada perlapisan batuan akan sangat beresiko terhadap kegagalan lereng. Bidang struktur geologi sesar naik pada area *Low-wall* tidak linier (variatif). Dapat lebih curam ataupun hilang pada area yang belum terbuka di kedalaman tertentu. Risiko struktur geologi yang ada area *Low-wall* lebih

variatif dan akan sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng dan berpotensi bahaya terhadap karyawan dan peralatan kehilangan dan atau kontaminasi batubara dan bahkan terjadi penundaan aktivitas penambangan. (Model Struktur Geologi dapat dilihat pada Gambar 4.8. – 4.11.)



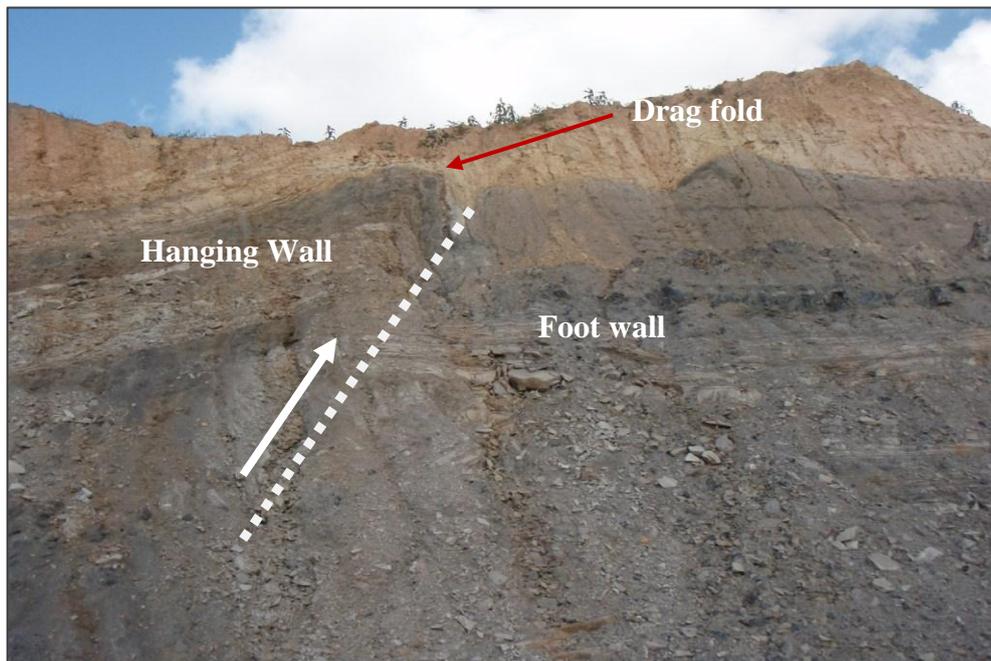
Gambar 4.7

Situasi Pit Jumbo PT. Wahana Baratama Mining



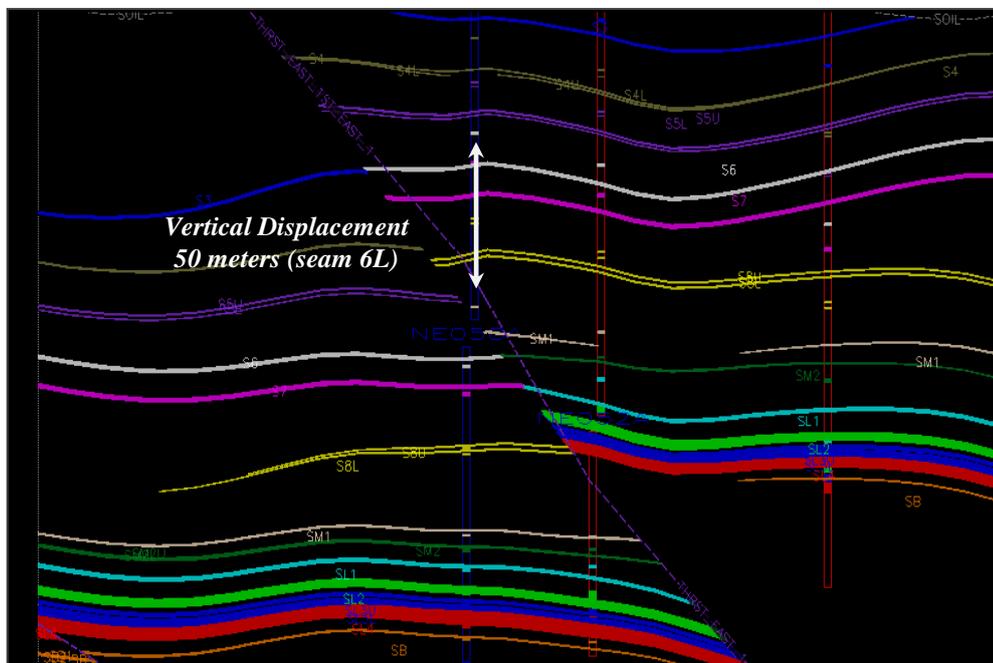
Gambar 4.8.

Intrepretasi Struktur geologi major pada area Low Wall PT.WBM berbatasan dengan PT. Arutmin Indonesia



Gambar 4.9

Struktur Geologi Sesar naik diikuti oleh Lipatan Area Low Wall Western (vertical displacement > 10 meter)



Gambar 4.10

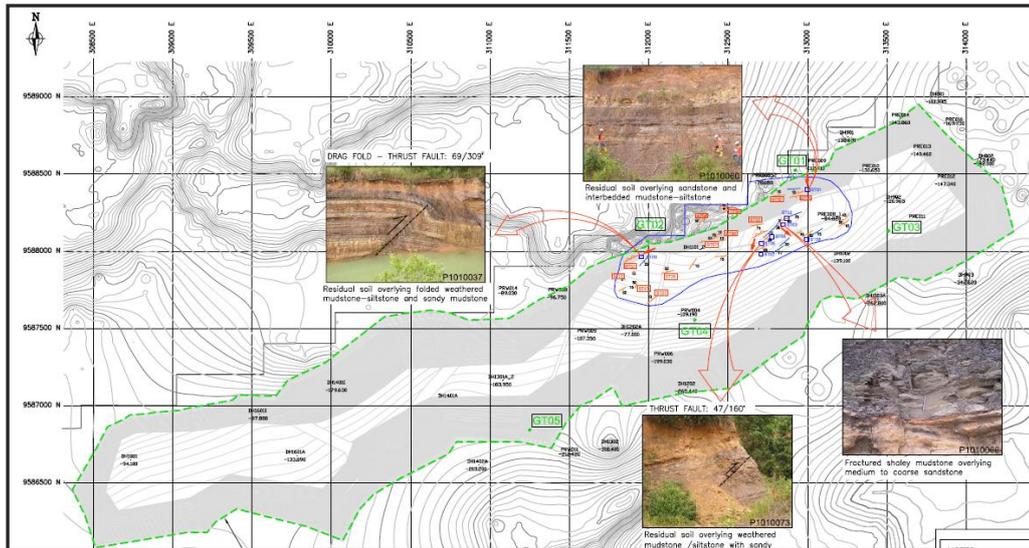
Interpretasi struktur geologi sesar naik dari borehole drilling geologi Western Area, 50m vertical displacement

Tabel 4.9.

Faktor Pemicu Longsor dan Pengaruh Struktur Geologi

No	Wall Folder	Triggers	Pengaruh Struktur Geologi	Tinggi Lereng (m)
1	SSR107_110226_wahana_broto_Low_Wall_Monitoring_72_73	Rain, spontaneous combustion	Tidak	18
2	SSR107_120507_Wahana Baratama_Middle_Lowwall_Monitoring	Rain and structural geology	Ya	20
3	SSR107_120921_Wahana_East Pit_lowwall_monitoring_20120921	Structural geology	Ya	20
4	SSR107_130420_Wahana_WB M_lowwall_monitoring_20130420	Rain and bedding shear, structural geology	Ya	18
5	SSR107_130423_Wahana_WB M_lowwall_monitoring_20130423	Rainy event and Structural geology	Ya	25
6	SSR107_130902_Wahana_Wahana_LW_monitoring_bndry	mining activity	Tidak	20
7	SSR107_131116_Wahana_Wahana_Monitoring_Lowwall_B84b87_Bdy_Farwest	Mining Activity	Tidak	18
8	SSR107_131121_Wahana_Wahana_Instability_Block_85-87	Rainy	Ya	15
9	SSR107_140222_Wahana_wahana_Monitoring_Lowwall_West_Pit	Rainy	Ya	14
10	SSR107_140412_Wahana_wahana_TEST_MTM_APR14	Rainy event and Structural geology	Ya	20
11	SSR107_150311_WAHANA_Low Wall_Monitoring_East_Boundary	Rain events	Tidak	16

12	SSR107_120901_Wahana Baratama Middle Hauling Road Failure_20120901	Rain events and structural geology	Ya	20
13	SSR107_130214_Wahana_WBM_HW_Monitoring_GT	Rain events and structural geology	Ya	25
14	SSR107_130311_Wahana_WBM_HW_Monitoring_Western_Pit	Rain events and structural geology	Ya	20
15	SSR107_130713_Wahana Mine Project_WBM_cutback_monitoring_instability_62_HW	Mining activity	Tidak	15



Gambar 4.11
Mapping area Longsor terdeteksi SSR

BAB V

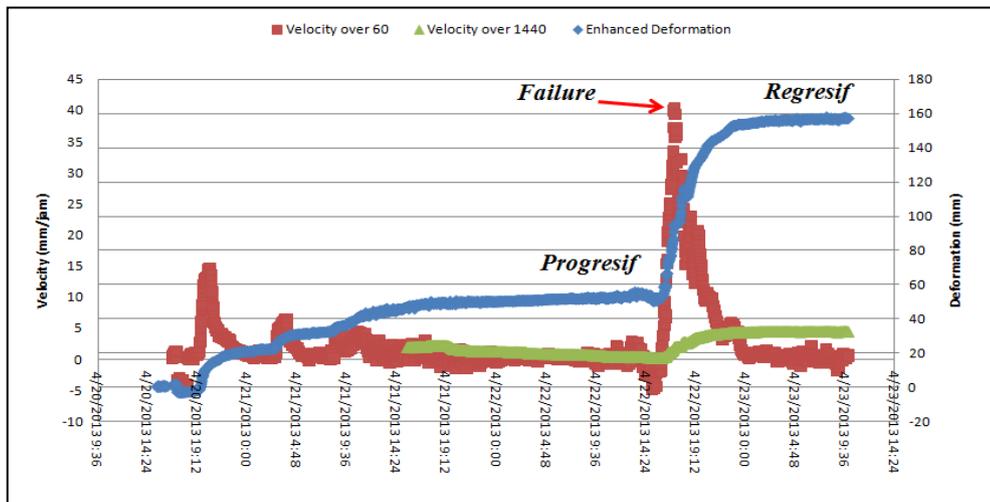
PEMBAHASAN

5.1 Karakteristik *Velocity* dan *Inverse-velocity*

5.1.1 Karakteristik *Velocity* dan *Inverse-velocity Low-wall*

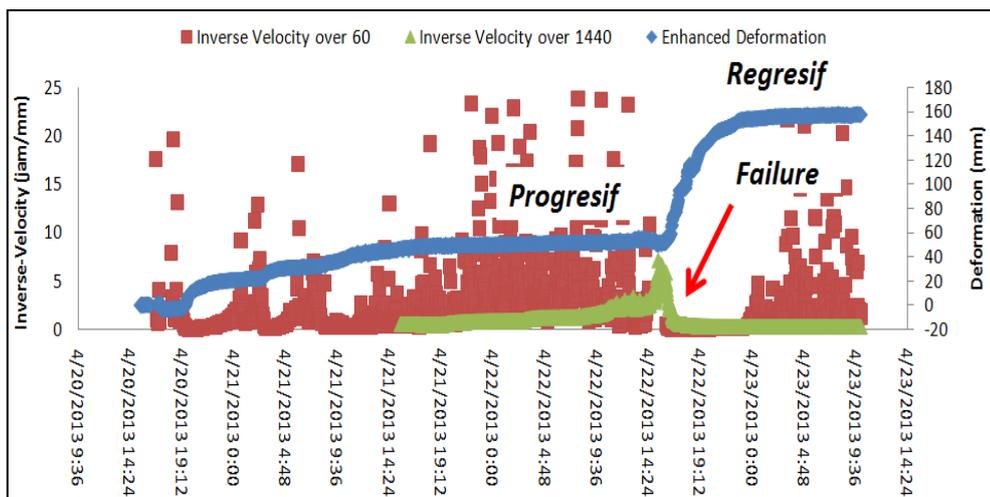
Berdasarkan hasil analisis perilaku material sebelum dan pada saat mengalami longsor, perilaku longsor lereng massa batuan pada *Low-wall* dapat diklasifikasikan menjadi empat tahap utama, yang terdiri dari tiga tahap sebelum longsor (Broadbent dan Zavodni, 1982), dan satu tahap setelah longsor (Mercer, 2006), satu tahapan lain setelah longsor dijumpai pada satu kasus longsor yang ditunjukkan pada Gambar 5.1 & 5.2 : Tahapan pada karakteristik *Velocity* dan *Inverse-velocity Low-wall* terdiri atas :

1. Tahap sebelum longsor. Tahap ini terdiri dari tahap perilaku perpindahan linear dan juga regresif. Perilaku ini berlangsung cukup lama dan karakteristik perpindahan linier lebih dominan.
2. Tahap perilaku perpindahan progresif dan timbulnya longsor untuk menjadi longsor. Perilaku perpindahan progresif sebelum longsor umumnya dipicu oleh hujan kemudian air permukaan akan mengisi bidang lemah pada batuan dan struktur geologi hingga menurunkan kuat geser pada perlapisan batuan. Pemicu lain yang dianalisis adalah kegiatan penggalian pada kaki lereng yang berkontribusi menghilangkan gaya penahan.
3. Tahap timbulnya longsor, mode perilaku longsor.
4. Tahapan setelah longsor tipe dua (Mercer, 2006) pada saat lereng mengalami pemulihan sebagian dan perlambatan bertahap untuk merayap.
5. Tahap setelah longsor tipe empat (Mercer, 2006) pada saat lereng mengalami pemulihan sebagian yang kemudian diikuti oleh keruntuhan akhir lainnya. Fase ini dapat berulang beberapa kali jika akumulasi material longsor belum sepenuhnya jatuh.



Gambar 5.1

Karakteristik *velocity* sebelum dan setelah longsor *Low-wall*



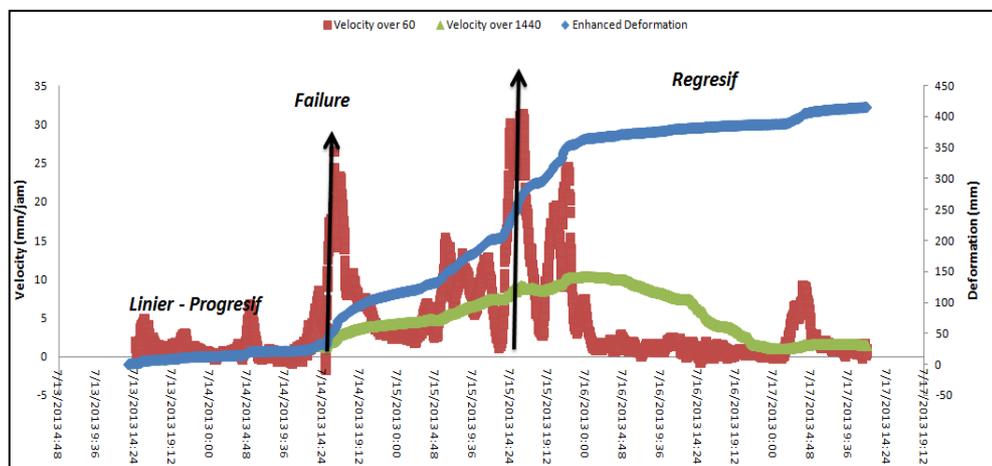
Gambar 5.2

Karakteristik *Inverse-velocity* sebelum dan setelah longsor *Low-wall*

5.1.2 Karakteristik *Velocity* dan *Inverse-velocity High-wall*

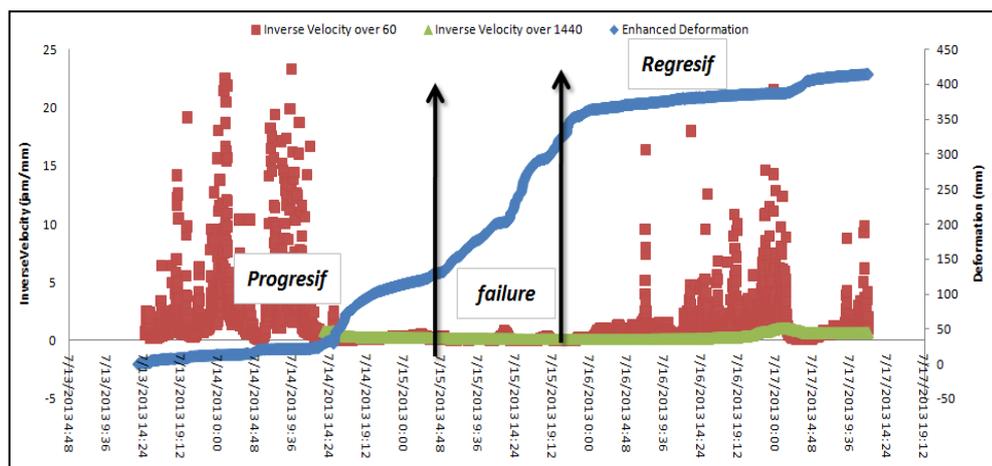
Perilaku longsor lereng massa batuan pada *High-wall* PT. Wahana dapat diklasifikasikan menjadi empat tahap utama, yang terdiri dari tiga tahap sebelum longsor (Broadbent dan Zavodni, 1982), dan satu tahap setelah longsor (Mercer, 2006) yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 & 5.4 : Tahapan *High-wall* terdiri atas :

1. Tahap sebelum longsor terdiri dari tahap perilaku perpindahan linear.
2. Tahap perilaku perpindahan progresif dan menuju longsor.
3. Tahap timbulnya longsor, mode perilaku longsor.
4. Tahap setelah longsor terdiri dari tahap perilaku material menjadi regresif mendekati stabil. Tahap ini merupakan tahap tipe 2 setelah longsor seperti yang digambarkan oleh Mercer (2006) pada saat material mengalami pemulihan sebagian dan perlambatan bertahap untuk merayap



Gambar 5.3

Karakteristik *Velocity* lereng sebelum dan setelah longsor *High-wall*



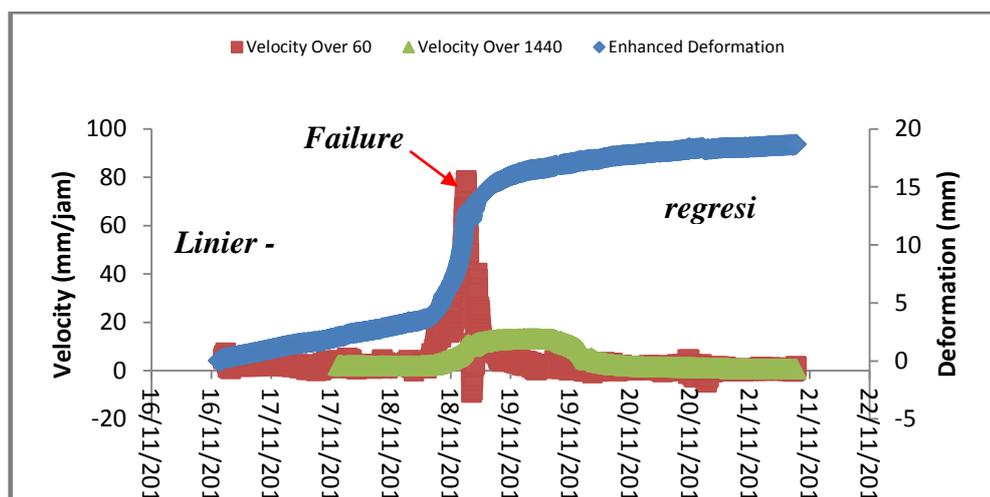
Gambar 5.4

Karakteristik *inverse-Velocity* lereng sebelum dan setelah longsor *High-wall*

5.1.3 Karakteristik *Velocity* dan *Inverse-velocity Mudstone*

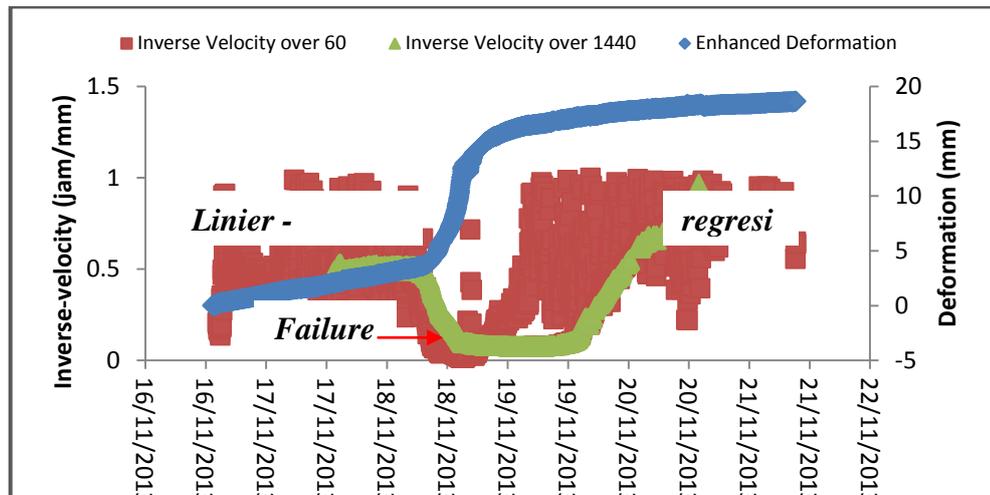
Perilaku longsor lereng massa batuan pada Jenis batuan *Mudstone* dapat diklasifikasikan menjadi empat tahap utama, yang terdiri dari tiga tahap sebelum longsor (Broadbent dan Zavodni, 1982, Mercer, 2006) dan satu tahap setelah longsor (Mercer, 2006) yang ditunjukkan pada Gambar 5.5 & Gambar 5.6:

1. Tahap sebelum longsor terdiri dari tahap perilaku perpindahan linear. Perpindahan Linier sangat dominan dan berlangsung cukup lama sebelum grafik berubah ke perilaku progresif.
2. Tahap perilaku perpindahan progresif yaitu tahap terjadinya peningkatan grafik yang significant perpindahan setelah tahap regresif linier yang cukup lama kemudian menjadi fase timbulnya titik kritis menuju terjadinya longsor.
3. Tahap timbulnya longsor, mode perilaku longsor.
4. Tahap setelah longsor terdiri dari tahap tipe 2 (Mercer, 2006) : pada saat perilaku material menjadi regresif dan bertahap untuk merayap. Tahap rayapan ini akan berlangsung cukup lama untuk berlanjut ke Tipe tiga yaitu tahap rayapan akan sepenuhnya berhenti.



Gambar 5.5

Karakteristik *Velocity* lereng sebelum dan setelah longsor *Mudstone*



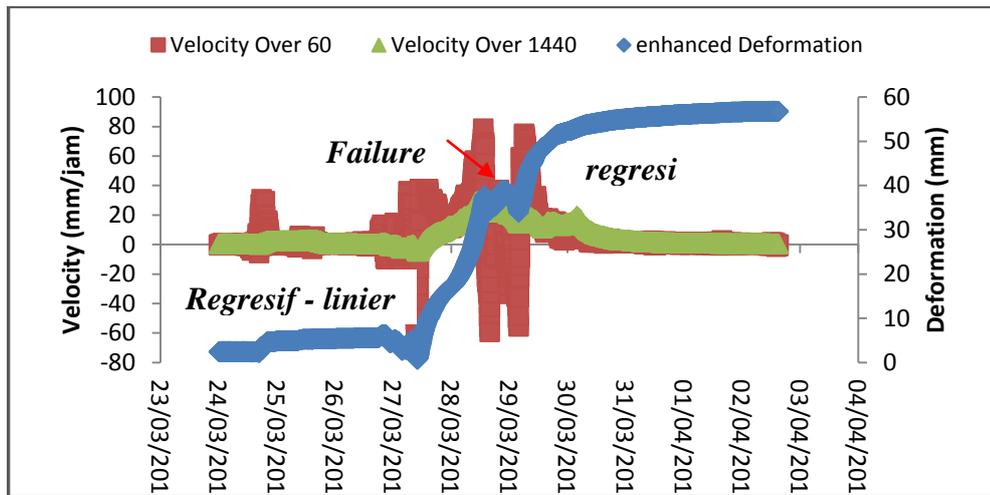
Gambar 5.6

Karakteristik *Inverse-Velocity* lereng sebelum dan setelah longsor *Mudstone*

5.1.4 Karakteristik *Velocity* dan *Inverse-velocity Sandstone*

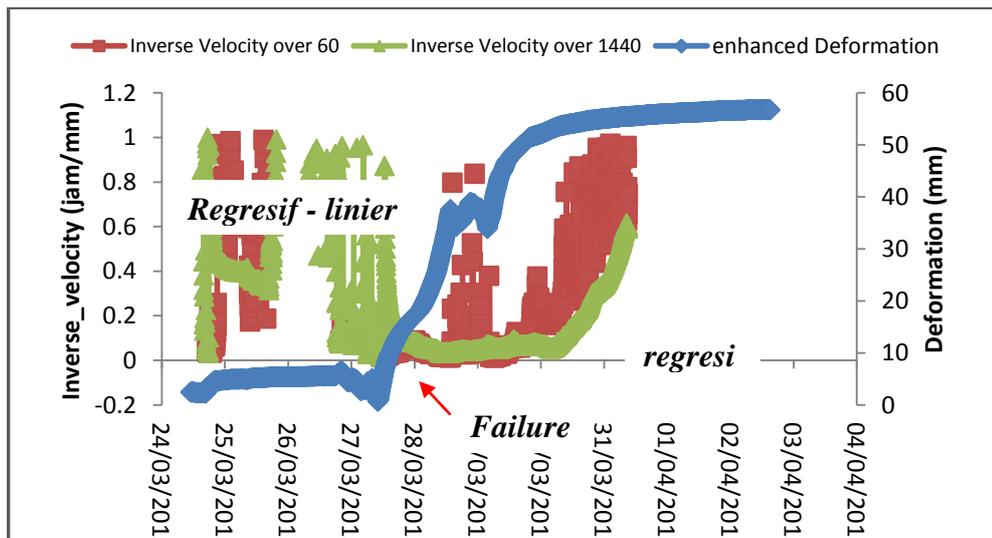
Perilaku longsor lereng massa batuan jenis batuan Sandstone dapat diklasifikasikan menjadi empat tahap utama, yang terdiri dari tiga tahap sebelum longsor (Broadbent dan Zavodni, 1982, Mercer, 2006) dan satu tahap setelah longsor (Mercer, 2006) pada Gambar 5.9, satu tahapan lain setelah longsor dijumpai pada satu kasus longsor yang ditunjukkan pada Gambar 5.7 & 5.8 :

1. Tahap sebelum longsor terdiri dari tahap perilaku perpindahan regresif menuju linier.
2. Tahap perilaku perpindahan progresif dan timbulnya longsor untuk menjadi longsor. Perilaku sebelum longsor umumnya dipicu oleh hujan dan tingkat porositas batuan tinggi.
3. Tahapan setelah longsor tipe dua (Mercer, 2006) pada saat lereng mengalami pemulihan sebagian dan perlambatan bertahap untuk merayap.
4. Tahap setelah longsor tipe empat (Mercer, 2006) pada saat lereng mengalami pemulihan sebagian yang kemudian diikuti oleh keruntuhan akhir lainnya. Fase ini dapat berulang beberapa kali jika akumulasi material longsor belum sepenuhnya jatuh dan terdapat pemicu yang kuat oleh hujan karena sifat *sandstone* yang memiliki porositas tinggi.



Gambar 5.7

Karakteristik *Velocity* lereng sebelum dan setelah longsor *Sandstone*



Gambar 5.8

Karakteristik *Inverse-Velocity* lereng sebelum dan setelah longsor *Sandstone*

5.1.5 Karakteristik *Velocity* dan *Inverse-velocity* Struktur Geologi

Perilaku longsor lereng massa batuan pada area struktur geologi dominan pada suatu area dapat diklasifikasikan menjadi empat tahap utama, yang terdiri dari tiga tahap sebelum longsor (Broadbent dan Zavodni, 1982, Mercer, 2006) dan satu

tahap setelah longsor (Mercer, 2006), satu tahapan lain setelah longsor dijumpai pada satu kasus longsor yang ditunjukkan pada Gambar 5.11 & 5.12 :

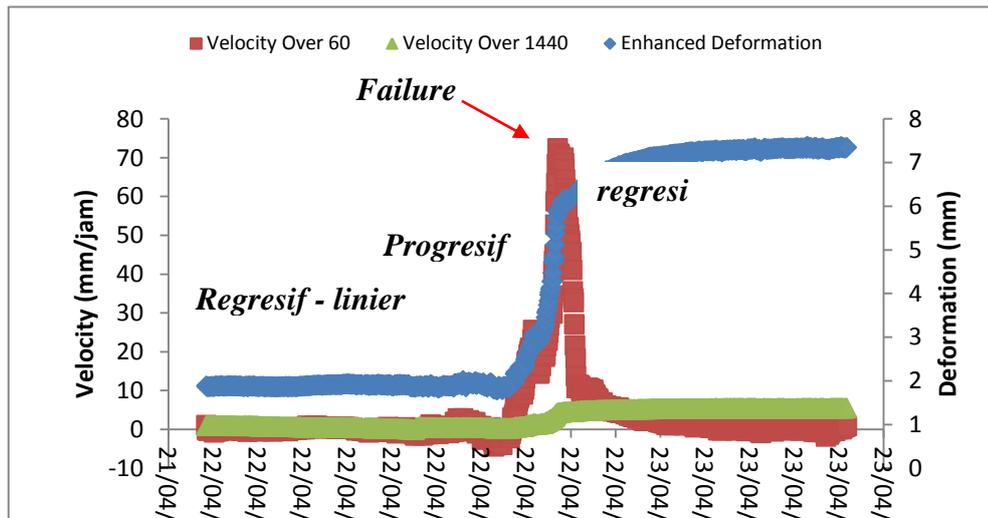
1. Tahap Regresif, sebelum longsor batuan terdiri dari tahap perilaku perpindahan linear-regresif menuju stabil dan secara umum tidak ada perpindahan (*Flat movement*).
2. Tahap perilaku perpindahan progresif dan timbulnya longsor untuk menjadi longsor. Perilaku progresif ini umumnya terjadi lebih cepat dan tiba-tiba. Perilaku lereng sebelum longsor umumnya dipicu oleh kegiatan penggalian pada kaki lereng yang menjadi faktor utama atau hujan yang mengisi bidang lemah pada batuan.
3. Tahap timbulnya longsor, mode perilaku longsor.
4. Tahapan setelah longsor tipe dua (Mercer, 2006) pada saat lereng mengalami pemulihan sebagian dan perlambatan bertahap untuk merayap. Jika tidak ada pemicu maka kondisi merayap ini terjadi lebih cepat dan menuju tahapan tipe tiga (mercer, 2006).
5. Tahap setelah longsor tipe tiga (mercer, 2006) pada saat mengalami pemulihan penuh dan hampir sepenuhnya berhenti.
6. Tahap setelah longsor tipe empat (Mercer, 2006) pada saat lereng mengalami pemulihan sebagian yang kemudian diikuti oleh keruntuhan akhir lainnya. Fase ini dapat berulang jika akumulasi material longsor belum sepenuhnya jatuh dan terdapat pemicu yang kuat seperti hujan, dan peledakan yang dapat mengubah perilaku dari regresif menjadi progresif.

5.2 Penentuan Ambang Batas (*threshold*) sebagai pemicu alarm.

5.2.1 Penentuan Ambang Batas (*threshold*) *Low-wall* dan *High-wall*

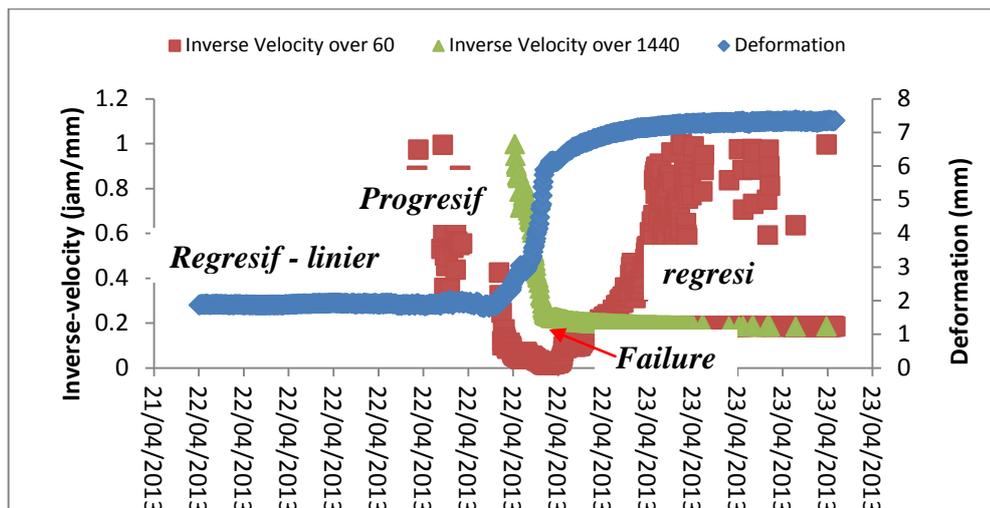
Nilai minimum *velocity* dan maximum *inverse-velocity* yang terdeteksi dari longsor *Low-wall* dan *High-wall* diperlihatkan pada Gambar 5.11 - 5.14. Setiap longsor memperlihatkan nilai minimum *velocity* dan *inverse-velocity* yang berbeda pada parameter *Low-wall* dan *High-wall*. Dari frekuensi data terlihat bahwa nilai minimum *velocity* di *Low-wall* adalah 20 mm/jam dan di *High-wall* 25 mm/jam. Nilai frekuensi terbesar dari *inverse velocity* di *Low-wall* adalah

0.05 dan di *High-wall* 0.04. Waktu sebelum longsor (*onset failure*) pada *Low-wall* adalah 3.34 jam dan untuk *High-wall* 2.88 jam, hal ini menunjukkan waktu yang dibutuhkan sebelum terjadinya longsor pada *High-wall* lebih cepat dibanding *Low-wall*. Nilai Ambang batas dan *Onset of Failure* pada parameter *Low-wall* dan *High-wall* dapat dilihat pada Tabel 5.1.



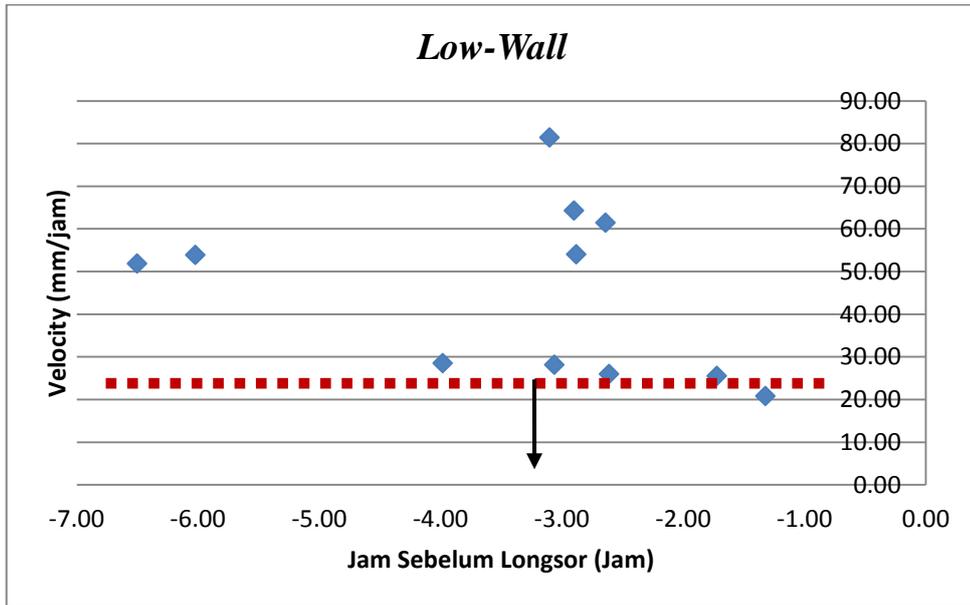
Gambar 5.9

Karakteristik *Velocity* lereng sebelum dan setelah longsor Struktur Geologi



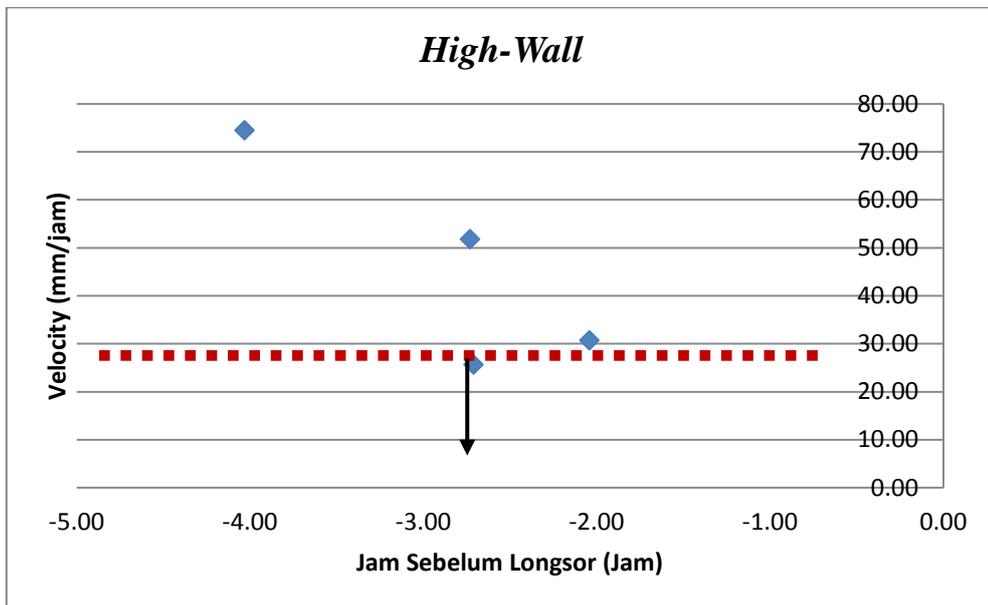
Gambar 5.10

Karakteristik *Inverse - Velocity* lereng sebelum dan setelah longsor *non* Struktur Geologi



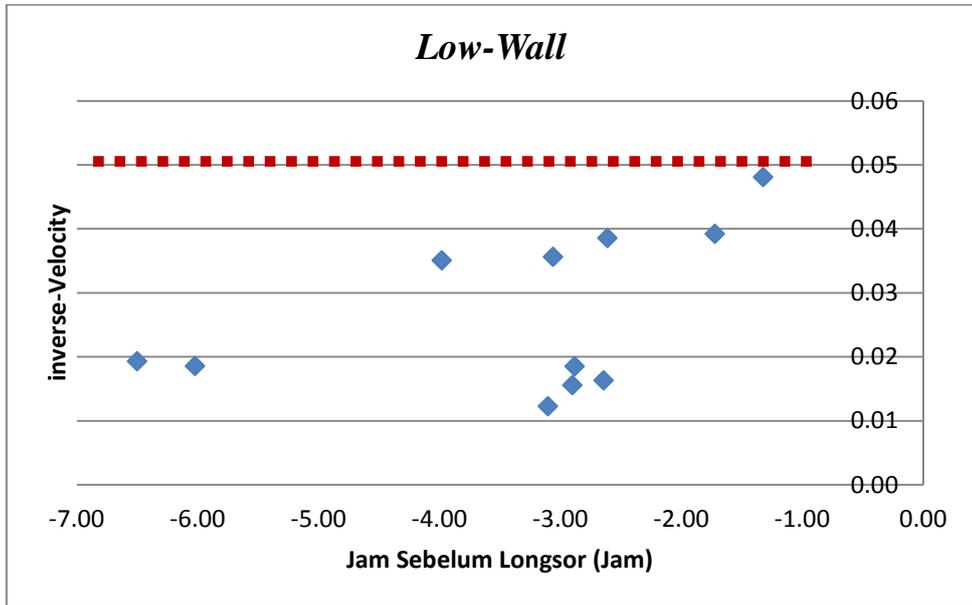
Gambar 5.11

Ambang batas dari *Velocity Low-wall*



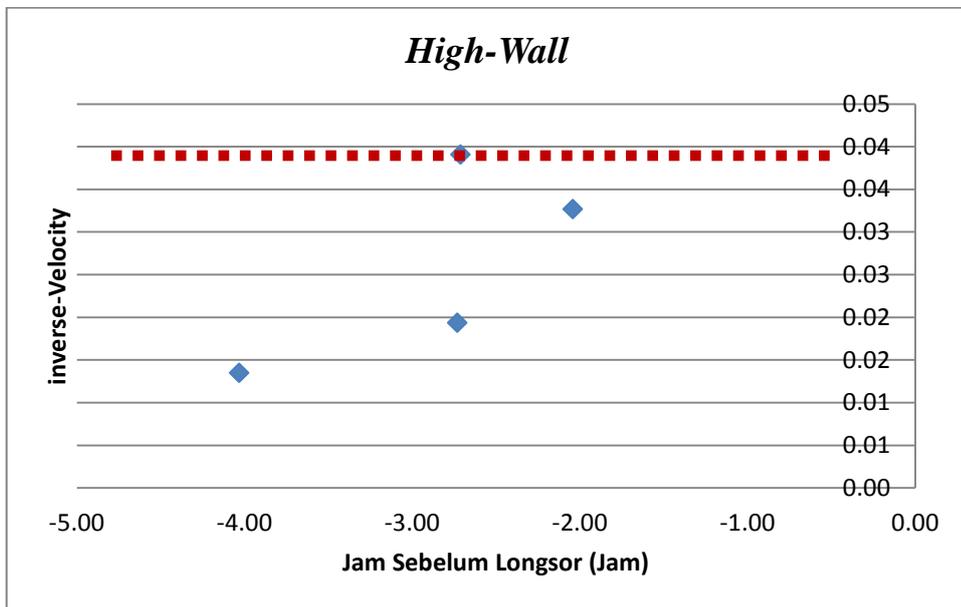
Gambar 5.12

Ambang batas dari *Velocity High-wall*



Gambar 5.13

Ambang batas *inverse-Velocity* Low-wall



Gambar 5.14

Ambang batas *inverse-Velocity* High-wall

Tabel 5.1

Nilai ambang batas velocity dan *inverse-velocity* *Low-wall* dan *High-wall*

Paramater	Ambang batas (<i>threshold</i>)		Onset of failure (jam)
	Velocity (mm/jam)	Inverse Velocity	
<i>Low-wall</i>	20	0.05	-3.34
<i>High-wall</i>	25	0.04	-2.88

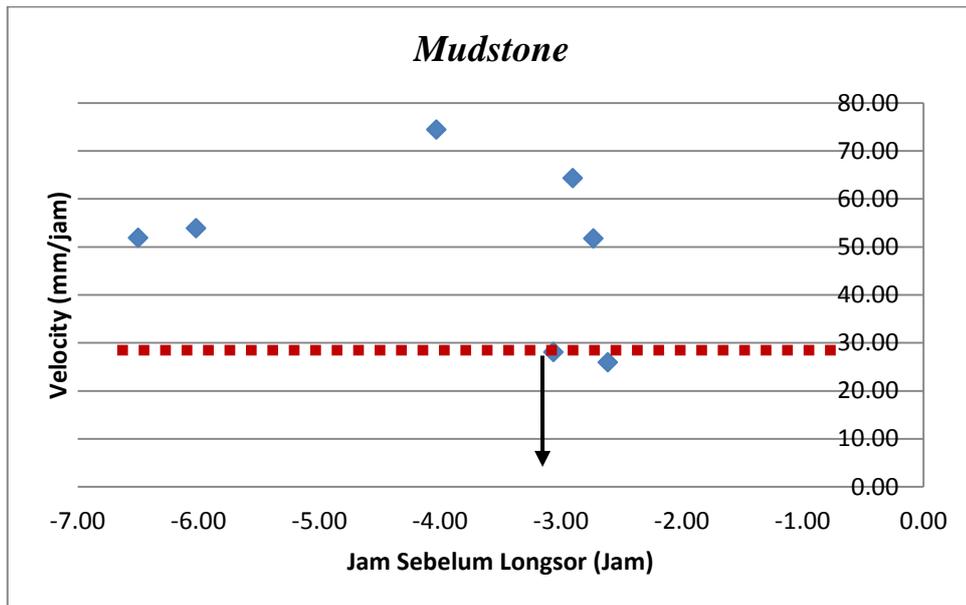
5.2.2 Penentuan Ambang Batas (*threshold*) *Mudstone* dan *Sandstone*

Nilai minimum *velocity* dan maximum *inverse-velocity* yang terdeteksi dari longsor di *Mudstone* dan *Sandstone* diperlihatkan pada Gambar 5.15 - 5.18. Dari frekuensi data terlihat bahwa nilai minimum *velocity* *Mudstone* 25 mm/jam dan 20 mm/jam pada *Sandstone*. Nilai frekuensi terbesar dari *inverse-velocity* *Mudstone* 0.04 dan pada *Sandstone* adalah 0.05. Waktu sebelum longsor (*onset of failure*) pada *Mudstone* adalah 3.06 jam dan untuk *Sandstone* adalah 2.08 jam, hal ini menunjukkan waktu yang dibutuhkan sebelum terjadinya longsor pada *Sandstone* lebih cepat dibanding *Mudstone*. Nilai masing- masing *velocity* dan *Inverse-velocity* pada Batuan *Mudstone* dan *Sandstone* ditunjukkan pada Tabel 5.2. (Perbandingan hasil ambang batas *Velocity* pada site TSA untuk jenis batuan *Mudstone* 50 mm/jam dan *Sandstone* 40 mm/jam, dan *Inverse-Velocity* *Mudstone* 0.02 dan *Sandstone* 0.025)

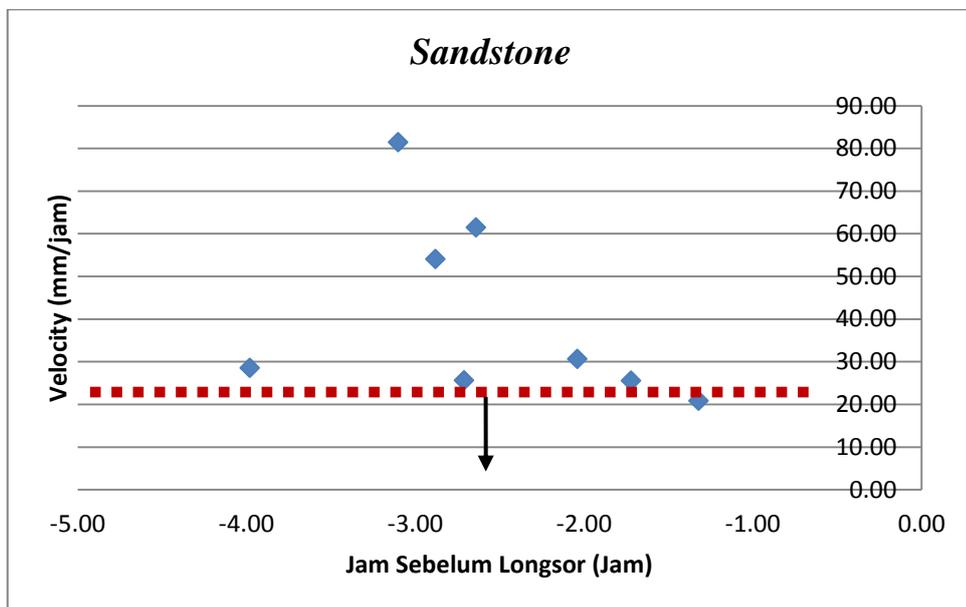
Tabel 5.2

Nilai ambang batas velocity dan *inverse-velocity* *Mudstone* dan *Sandstone*

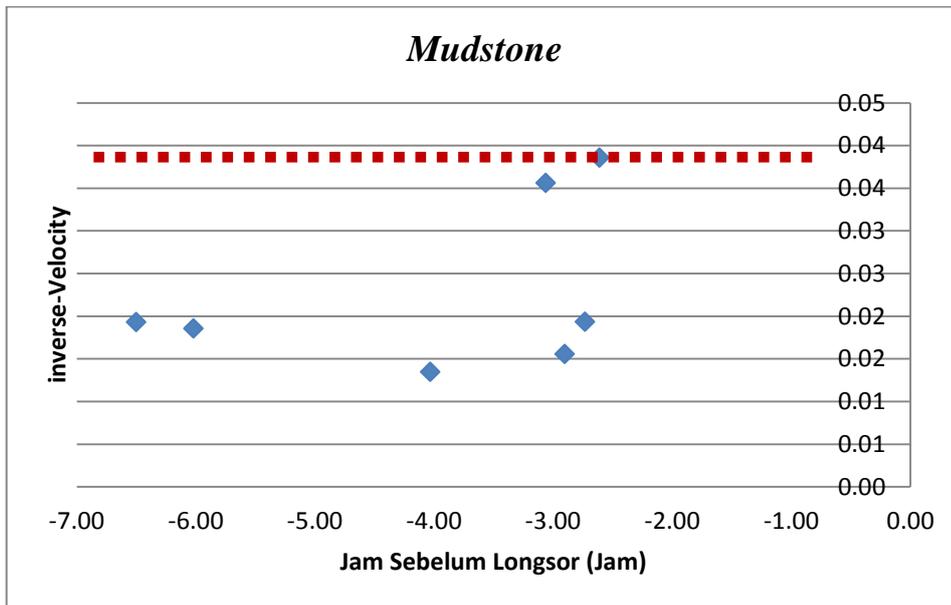
Parameter	Ambang batas (<i>threshold</i>)				Onset of failure (jam)
	Velocity (mm/jam)	TSA	Inverse Velocity	TSA	
<i>Mudstone</i>	25	50	0.04	0.02	-3.06
<i>Sandstone</i>	20	40	0.05	0.025	-2.68



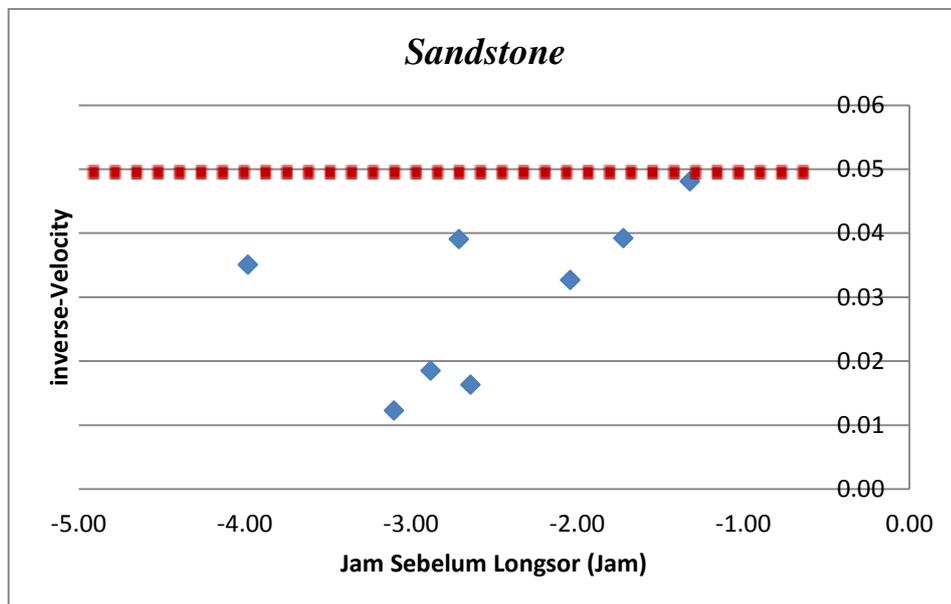
Gambar 5.15
Ambang batas *Velocity Mudstone*



Gambar 5.16
Ambang batas *Velocity Sandstone*



Gambar 5.17
Ambang batas *Inverse Velocity Mudstone*



Gambar 5.18
Ambang batas *Inverse Velocity Sandstone*

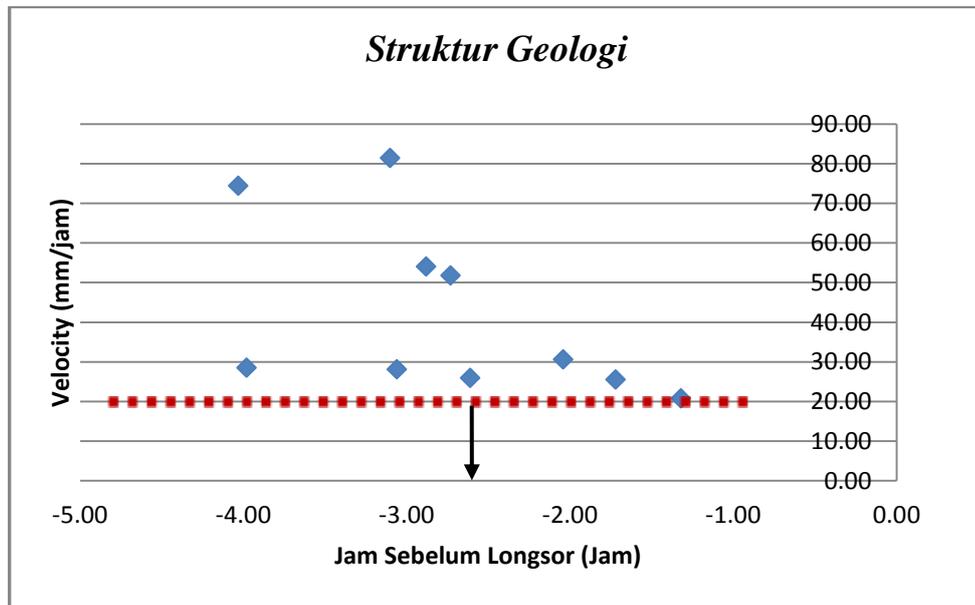
5.2.1 Penentuan Ambang Batas (*threshold*) Pada Area Struktur Geologi dan area *Non-Struktur Geologi*.

Dari lokasi kejadian longsor yang ada, dari 15 Longsor di area *Low-wall* dan *High-wall* sebagian besar dipicu oleh struktur geologi yang ada (*Triggering*). Dari data *Low-wall* dan *High-wall* menunjukkan karakteristik yang berbeda untuk area dengan struktur geologi dan area dengan *Non-Struktur Geologi* sebagai pemicu terjadinya longsor. Gambar 5.15 hingga Gambar 5.18 memperlihatkan nilai minimum *velocity* dan maksimum *inverse-velocity* yang terdeteksi dari longsor di *Low-wall* dan *High-wall* dengan pemicu Struktur Geologi lebih dominan. Dari frekuensi data terlihat bahwa nilai minimum *velocity* dengan Struktur Geologi adalah 20 mm/jam dan pada area *non-Struktur Geologi* adalah 25 mm/jam. Nilai maksimum *Inverse-velocity* dengan Struktur Geologi adalah 0.05 mm/jam dan pada area dengan *Non-Struktur Geologi* 0.04 mm/jam. Waktu sebelum longsor (*onset of failure*) pada area struktur geologi adalah 2.75 jam dan untuk area *Non- struktur geologi* adalah 4.15, hal ini menunjukkan area dengan Struktur Geologi sebagai pemicu (*Trigger*) membutuhkan nilai perpindahan yang lebih kecil dibanding Struktur Geologi yang tidak dominan. Nilai masing- masing *velocity* dan *Invers-velocity* berdasarkan parameter struktur Geologi dan *non-Struktur Geologi* ditunjukkan pada Tabel 5.3.

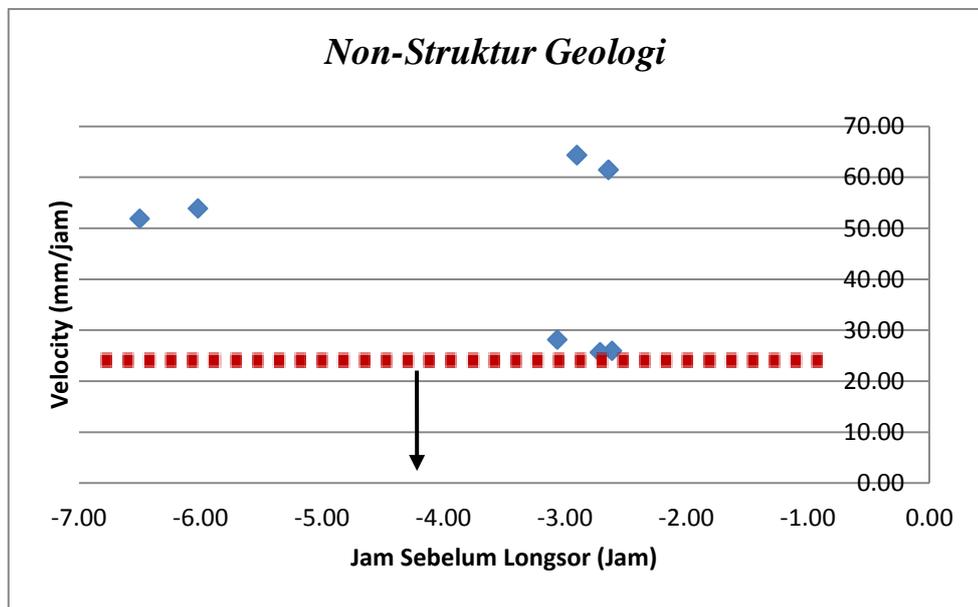
Tabel 5.3.

Nilai ambang batas *velocity* dan *inverse-velocity* Struktur Geologi

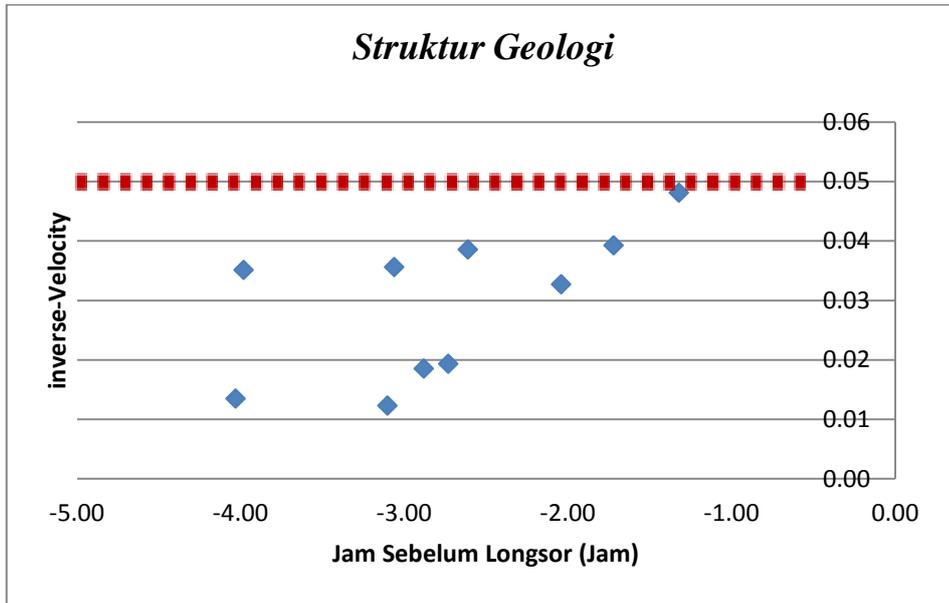
Parameter	Ambang batas (<i>threshold</i>)		Onset of failure
	Velocity (mm/jam)	Inverse Velocity	(jam)
<i>Struktur Geologi</i>	20	0.05	-2.75
<i>Non-Struktur Geologi</i>	25	0.04	-4.15



Gambar 5.19
Ambang batas *Velocity* Struktur Geologi

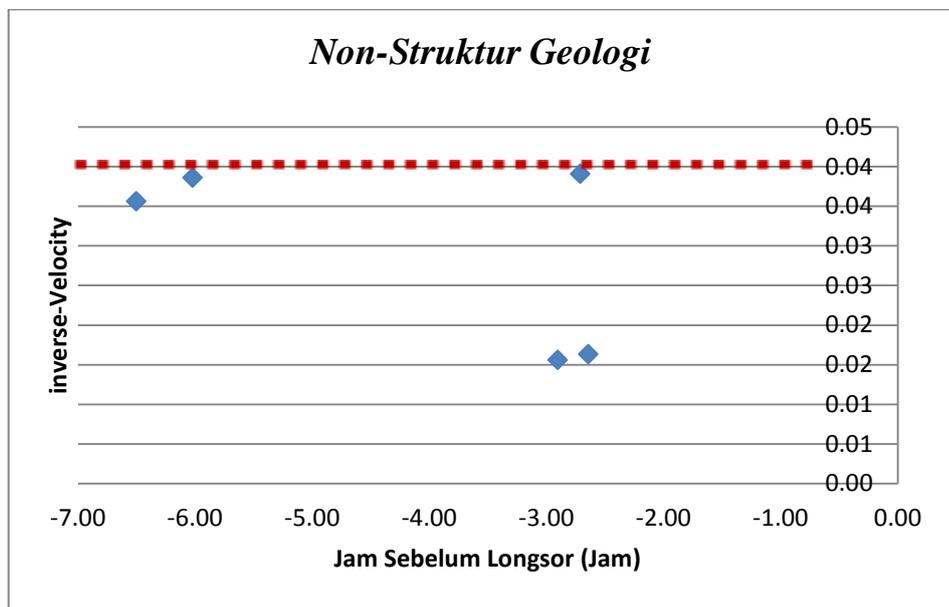


Gambar 5.20
Ambang batas *Velocity non-Struktur Geologi*



Gambar 5.21

Ambang batas *Inverse Velocity* Struktur Geologi



Gambar 5.22

Ambang batas *Inverse Velocity non-Struktur Geologi*

5.3 Analisis Hubungan *Inverse-Velocity* Longsor dengan *Warning Time*

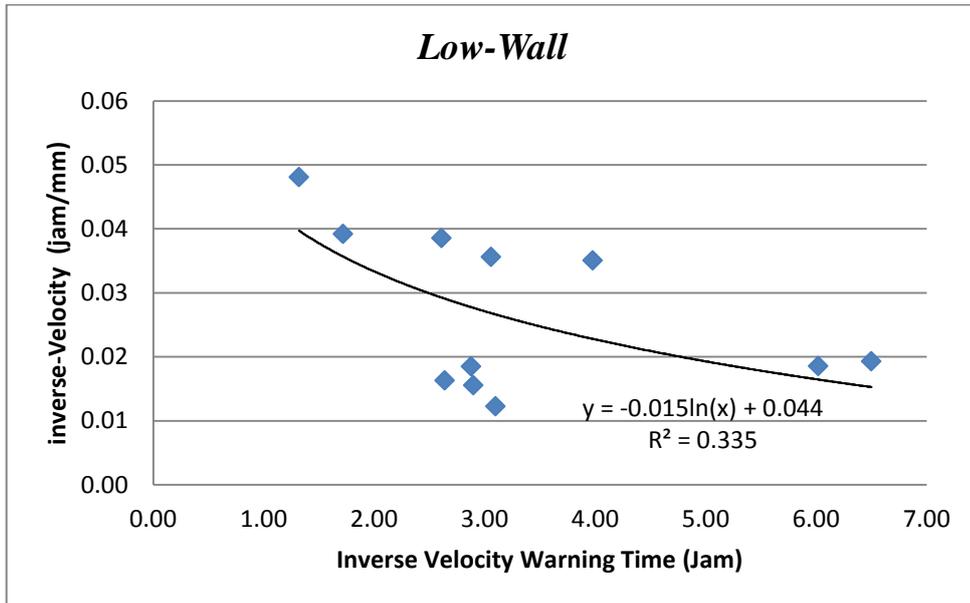
Hubungan antara nilai *inverse-Velocity maximum* dengan *warning time* pada longsor yang terjadi pada parameter tertentu menunjukkan fungsi persamaan yang variatif. Fungsi yang paling mendekati adalah fungsi *logarithmic* dan berdasarkan tingkat hubungan maka digunakan interpretasi atau pedoman koefisien korelasi menurut buku *Metode Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif Dan R&D* (Sugiyono,2008:184). Fungsi persamaan *Logarithmic* dan Tingkat hubungan berdasarkan parameter tertentu dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Hasil dari hubungan dengan *Warning Time* menunjukkan Semakin kecil nilai *inverse-velocity* akan berbanding lurus terhadap perubahan waktu menuju longsor (*warning time prior to failure*) dan fungsi longsor yang ada bersifat linier dengan persamaan logharitmic dan tingkat hubungan yang variatif. Penggunaan tren linear yang diperbarui secara berkelanjutan akan lebih baik untuk mengidentifikasi tren kelengkungan sebelum terjadi longsor, sehingga bertambahnya jumlah data maka tingkat hubungan diharapkan akan semakin baik. Hubungan antara nilai *inverse-Velocity maximum* dengan *warning time* pada longsor yang terjadi pada semua parameter dapat dilihat pada Gambar 5.23 – 5.30

Tabel 5.4.

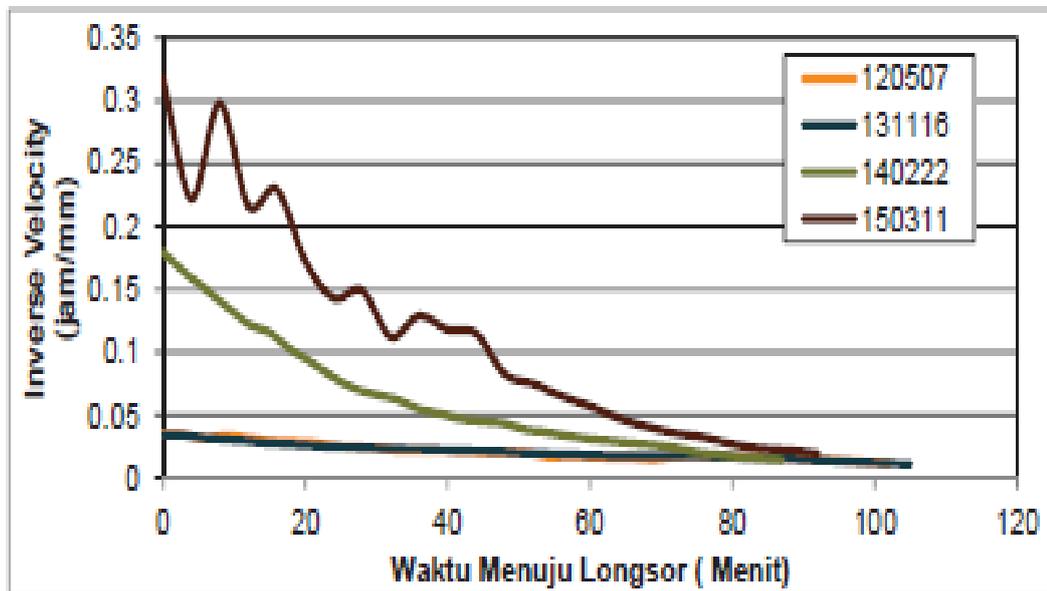
Nilai *Inverse_ velocity*, Nilai Koefisien Regresi dan Tingkat Hubungan

No	Parameter	<i>Inverse_ velocity</i>	Persamaan	R ²	Hubungan
1	<i>Low-wall</i>	0.05	$-0.015\ln(x) + 0.044$	0.3350	Rendah
2	<i>High-wall</i>	0.04	$-0.03\ln(x) + 0.0565$	0.4918	Sedang
3	<i>Mudstone</i>	0.04	$-0.011\ln(x) + 0.0379$	0.1915	Sangat Rendah
4	<i>Sandstone</i>	0.05	$-0.043\ln(x) + 0.0612$	0.9756	Sangat Kuat
5	Struktur Geologi	0.05	$-0.023\ln(x) + 0.051$	0.4219	Sedang
6	<i>Non-Struktur Geologi</i>	0.04	$-0.006\ln(x) + 0.0299$	0.0787	Sangat Rendah



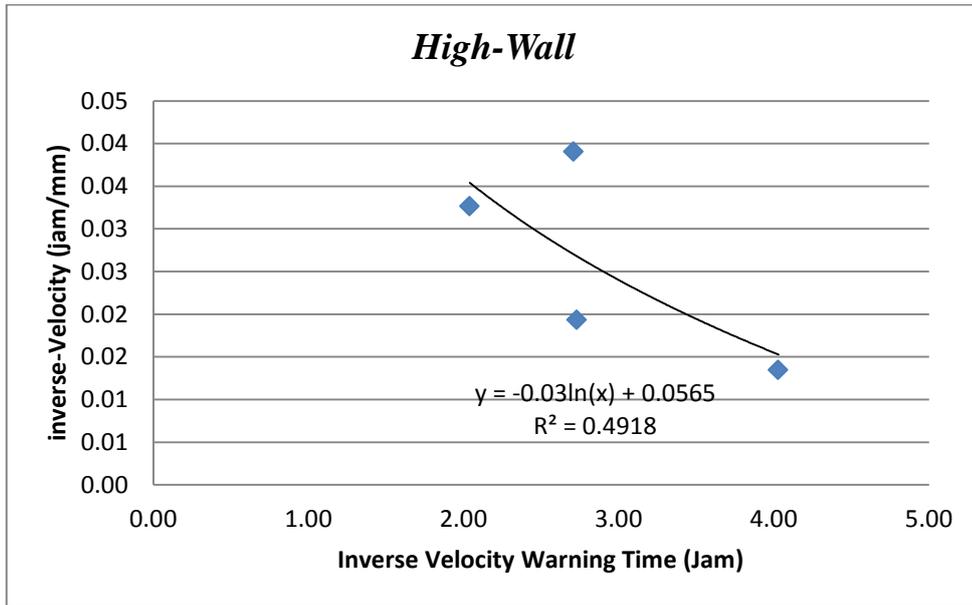
Gambar 5.23

Hubungan *Inverse-Velocity* dan *Warning Time*
Low-wall



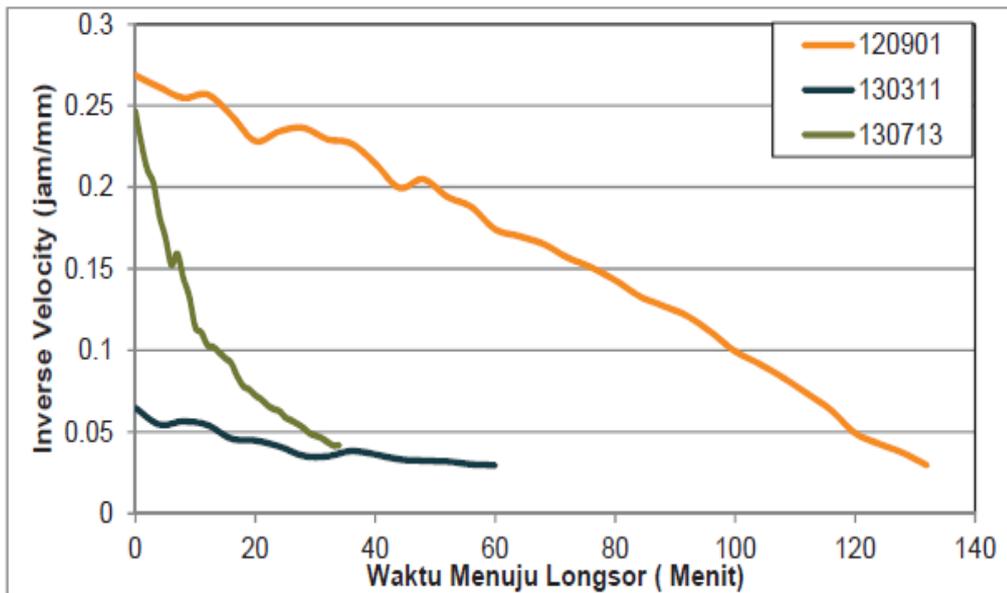
Gambar 5.24

Trend persamaan *Inverse-Velocity* dan *Warning Time*
Low-wall



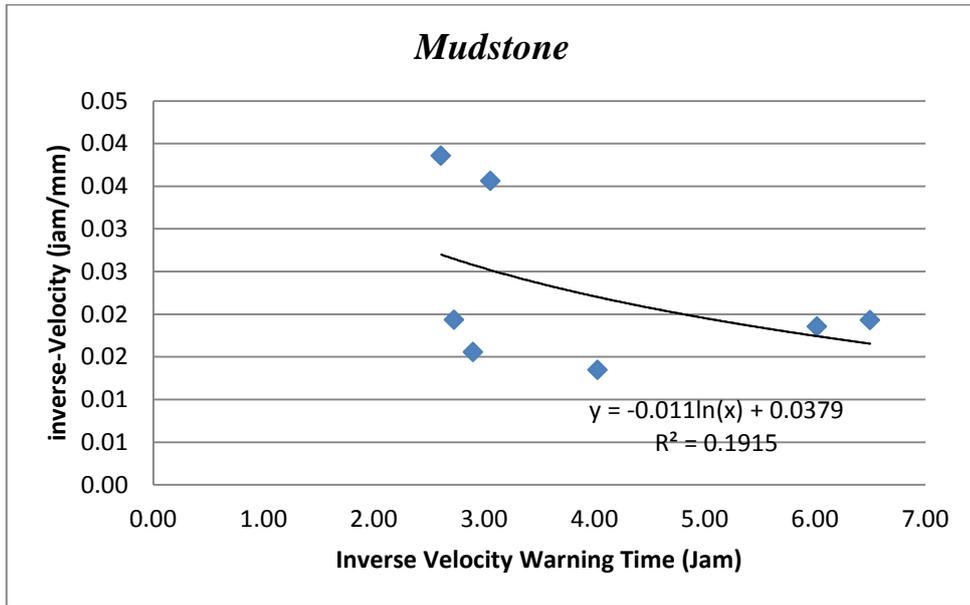
Gambar 5.25

Hubungan *Inverse-Velocity* dan *Warning Time*
High-wall



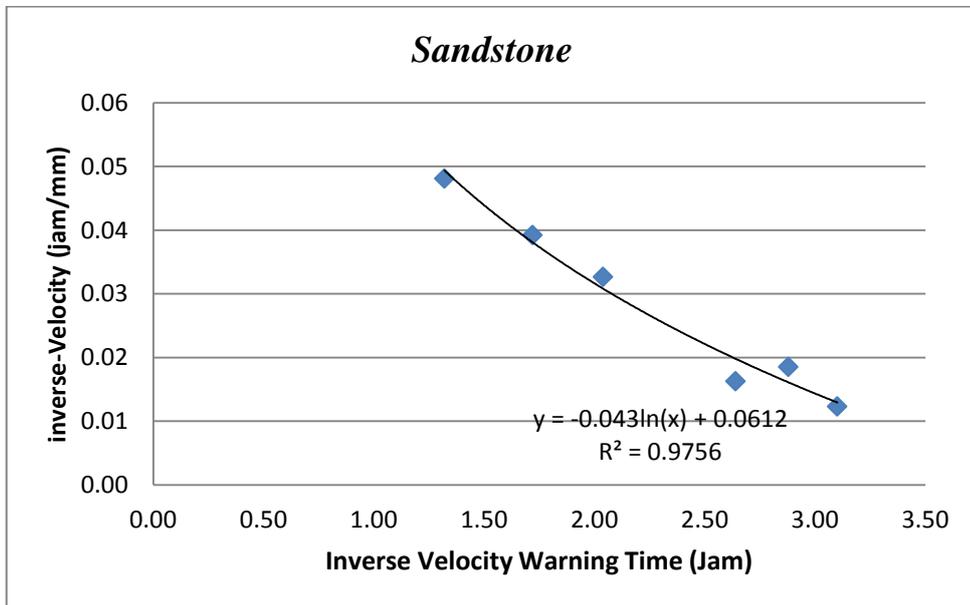
Gambar 5.26

Trend persamaan *Inverse-Velocity* dan *Warning Time*
High-wall



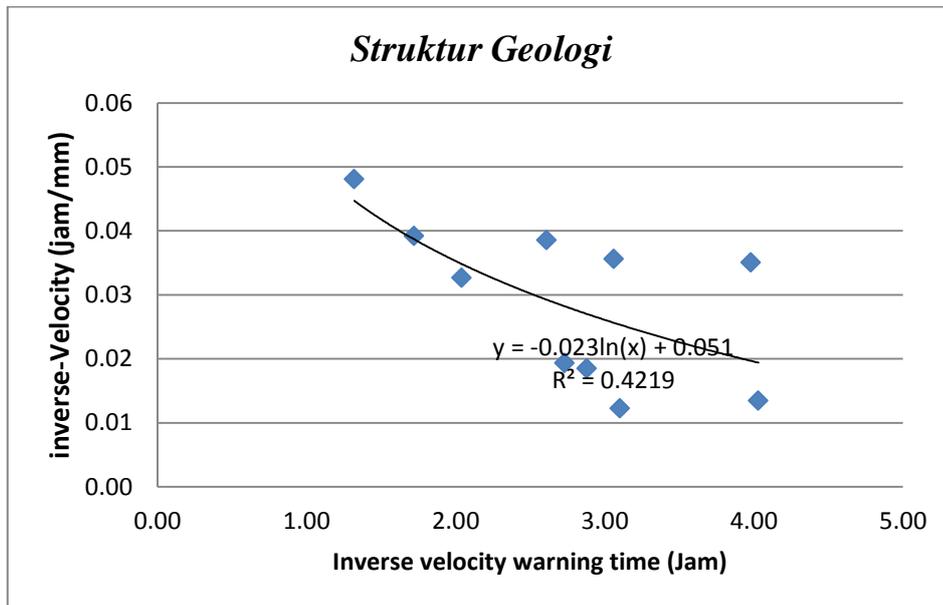
Gambar 5.27

Hubungan *Inverse-Velocity* dan *Warning Time*
Mudstone



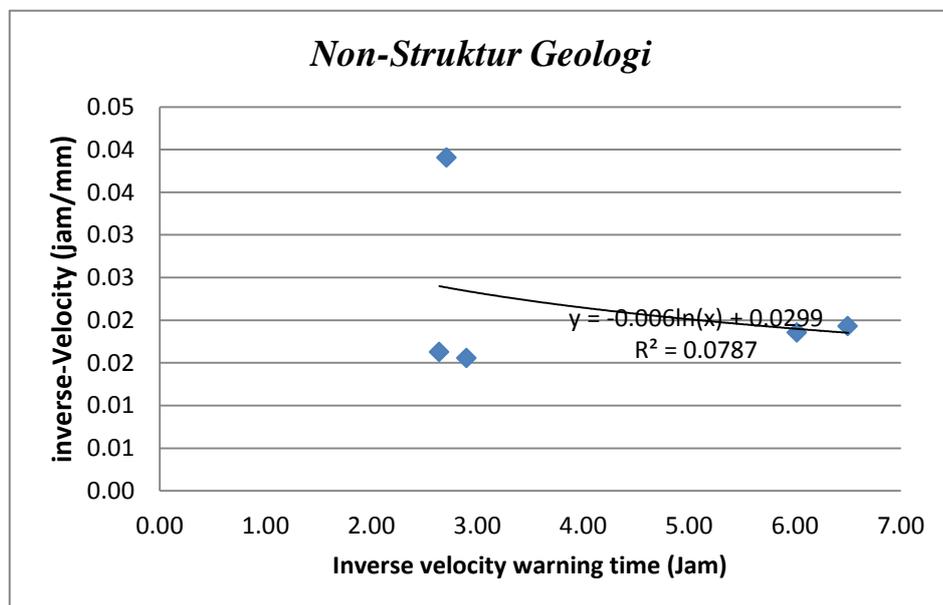
Gambar 5.28

Hubungan *Inverse-Velocity* dan *Warning Time*
Sandstone



Gambar 5.29

Trend persamaan *Inverse-Velocity* dan *Warning Time* Struktur Geologi



Gambar 5.30

Trend persamaan *Inverse-Velocity* dan *Warning Time* Non-Struktur Geologi.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Pada penelitian pemantauan dari data *Slope Stability Radar* dapat diambil kesimpulan antara lain :

1. Karakteristik *velocity* dan *inverse-velocity* pada pengamatan daerah penelitian sangat dipengaruhi oleh faktor internal dan external. Faktor internal yaitu kekuatan massa batuan, struktur geologi yang bekerja, dan keberadaan air tanah dan faktor external seperti aktivitas peledakan, curah hujan yang tinggi, dan aktivitas penggalian pada kaki lereng dapat menjadi pemicu perubahan karakteristik grafik dari linier kearah progresif hingga longsor.
2. Hasil penentuan dari ambang batas (*threshold*) alarm yang dianalisis akan digunakan sebagai acuan untuk penentuan tingkat risiko dari mitigasi longsor TARP (*Trigger Action Respon Plan*) berdasarkan parameter jenis batuan dan struktur geologi yang bekerja pada daerah penelitian.
3. Struktur geologi yang berkembang berupa struktur geologi sesar naik dan lipatan banyak meningkatkan ketidakstabilan pada dinding tambang hingga beberapa kasus menjadi pemicu kejadian longsor. Dari data *velocity* dan *Inverse-velocity* menunjukkan waktu kejadian longsor pada area dengan Struktur Geologi sebagai pemicu (*Triggers*) terjadi lebih cepat.
4. Hasil analisis dari hubungan *inverse-velocity* dan *warning time* memperlihatkan grafik trend yang menunjukkan setiap pertambahan waktu maka nilai *inverse-velocity* akan semakin kecil, Berdasarkan nilai koefisien regresi yang ada maka persamaan logarithmic pada jenis batuan *Sandstone* memiliki nilai hubungan sangat kuat, area dengan struktur geologi dominan berdasarkan koefisien regresi memiliki hubungan sedang.

6.2 Saran

Saran dari penelitian dan beberapa hal yang dapat ditindaklanjuti antara lain :

1. Semakin banyak data maka akan menunjukkan grafik tren yang berbeda, sehingga penggunaan tren linear *Inverse-velocity* yang diperbarui secara berkelanjutan akan lebih baik untuk mengidentifikasi tren kelengkungan sebelum terjadi longsor.
2. Kecepatan longsor berdasarkan parameter jenis batuan masih harus diverifikasi lagi dengan parameter lain yang mempengaruhi kestabilan lereng.
3. Penelitian mengenai ambang batas dengan pendekatan parameter yang berbeda dapat di lakukan seperti pengaruh peledakan, pengaruh hujan atau aktifitas proses penambangan.
4. Data struktur geologi, kekuatan batuan dan deformasi radar dapat dikombinasikan untuk mengetahui pola deformasi longsor dan diperlukan kajian secara spesifik.

DAFTAR PUSTAKA

- Broadbent C.D. and Zavodni, Z.M., **1982**, Influence of Rock Structures on Stability, in Stability in Surface Mining, *Society of Mining Engineers, Denver, Co. Vol. 3, Ch. 2.*
- Cabrejo, A.G. and Harries, N., **2012**, Effective Slope Monitoring for OpenCut Coal Mines, *Australian and Coal Industry's Research Program (ACARP) Project number C 17023.*
- Fukuzono, T., **1985**, A new method for predicting the failure time of a slope. *Proces. 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, 145 – 150.*
- Golder, 2007, Preliminary Geotechnical Review Wahana Pit Feasibility Study South Kalimantan. Internal dokumen.
- Gultom, J., Sanang, A. M., Musa, R.H., **2014**, Prediksi Waktu Longsoran Di Lereng Highwall Tambang Batubara Terbuka Dengan Metode Inverse Velocity, *Prosiding TPT XXIII Perhapi, Makassar Indonesia.*
- Harries, N., **2008**, The use of Slope Stability Radar (SSR) in managing slope instability hazards," *Geomechanics*, pp. 53-54, January/February 2008.
- Hoek, E., and Bray, J.W., **1981**, "Rock Slope Engineering", *Institution of Mining and Metallurgy*, London.
- Hungr, O., **2003**, Flow slides and flows in granular soils. Keynote Paper. In Picarelli (ed.), *Proc., FLOWS 2003, International Workshop, Sorrento, Italy, Kluwer Publishers.*
- Silaen, H., Setiadi, B., Gautama, S., Widijanto, E., Sunyoto, W., **2014**, Managing Geotechnical Risk At Grasberg Open Pit Mine, Papua, Indonesia, *Prosiding TPT XXIII Perhapi, Makassar Indonesia.*
- Oktavianto, H., Bahri, S., Nugroho, P., Arif, I., **2010**, Slope Stability Radar Monitoring pada Deep Seated Slope Movement di tambang Tutupan, *TPT Perhapi, Balikpapan, Indonesia*
- Kramadibrata, K., Saptono, S., Wicaksana, Y., Prasetyo, S., **2009**, Soft Rock Behaviour With Particular Reference to Coal Bearing Strata. *2nd International Symposium of Novel Carbon Resource Science - ITB, 10-11 March 2009*
- Mercer, K. G., **2006**, Investigation into the Time Dependent Deformation

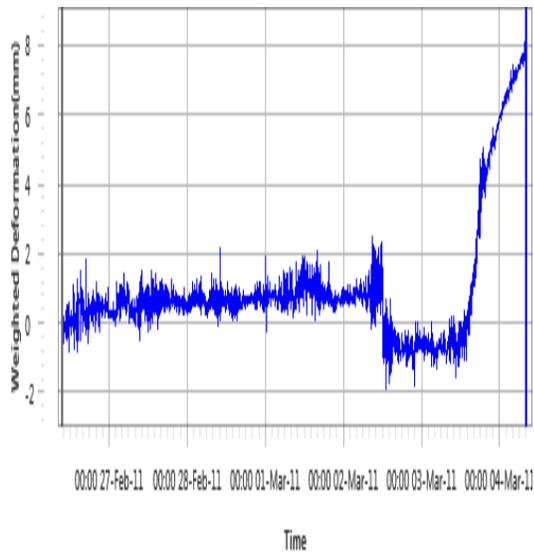
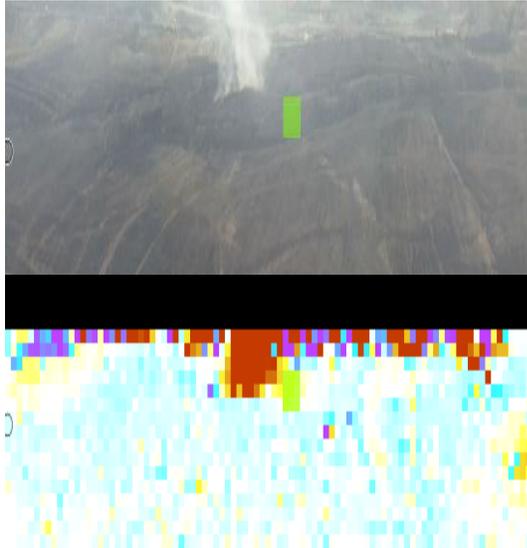
Behaviour and Failure Mechanisms of Unsupported Rock Slopes Based on the Interpretation of Observed Deformation Behaviour, *Unpublished PhD Thesis*, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.

- Noon, D., and Harries, N., **2003**, Slope Stability Radar for Managing Rock Fall Risks in Open Cut Mines, *Sixth Large Open Pit Mining Conference*, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Perth, pp 93-98.
- Osasan, K. S., **2012**, Open-Cast Mine Slope Deformation and Failure Mechanisms Interpreted from Slope Radar Monitoring, *Unpublished PhD Thesis*, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa..
- Rai, M. A., Kramadibrata, S., Wattimena, R., **2013**, *Mekanika Batuan*, Bandung, Penerbit ITB.
- Rose, N. D. and Hungr, O., 2006 : Forecasting Potential Rock Slope Failure in Open Pit Mines Using the Inverse-Velocity Method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 44, pp 308-320
- Saptono, S., **2012**, Pengembangan Metode Analisis Stabilitas Lereng Berdasarkan Karakterisasi Batuan Di Tambang Terbuka Batubara, *Unpublished PhD Thesis*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.
- Sulistianto, B., Sulaiman, S., Wattimena, R., Arif, I., Analisis Kemantapan Lereng *Lowwall* Tambang Terbuka Batubara Dengan Kemiringan Perlapisan Curam, *Program Studi Teknik Pertambangan, FIKTM, ITB, Bandung, Indonesia*.
- Sutiyono, 2010. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung. Indonesia. Alfabeta
- Varnes, D. J., **1982**, Time-deformation relations in creep to failure of earth materials, *Proceedings of the Seventh Southeast Asian Geotechnical Conference*, Hong Kong, Vol. 2, pp 107-130.
- Wahana Geotech, 2014, Laporan Geoteknik Pada Area Longsoran Low-Wall Blok 77 -79. *Internal Document*, Kalsel, Indonesia
- Yuliantoro, F., **2011**, *Ground Control Management Plan Bayan Resources Group*, Internal Document, Kalsel, Indonesia

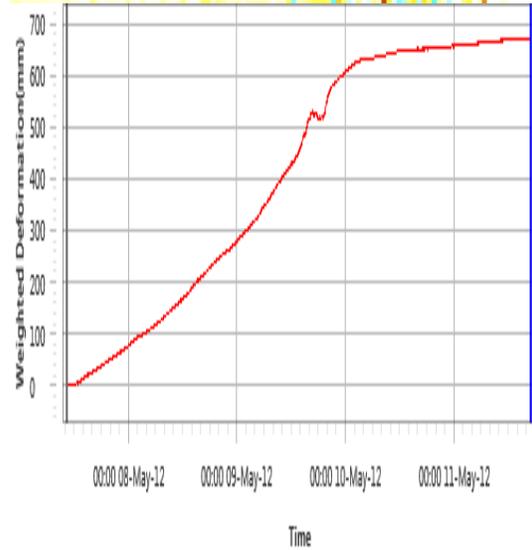
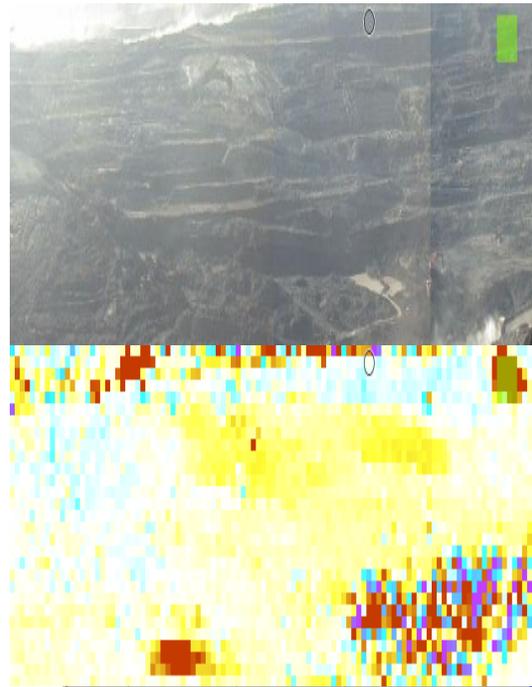
LAMPIRAN A.

DATA WALL FOLDER SLOPE STABILITY RADAR

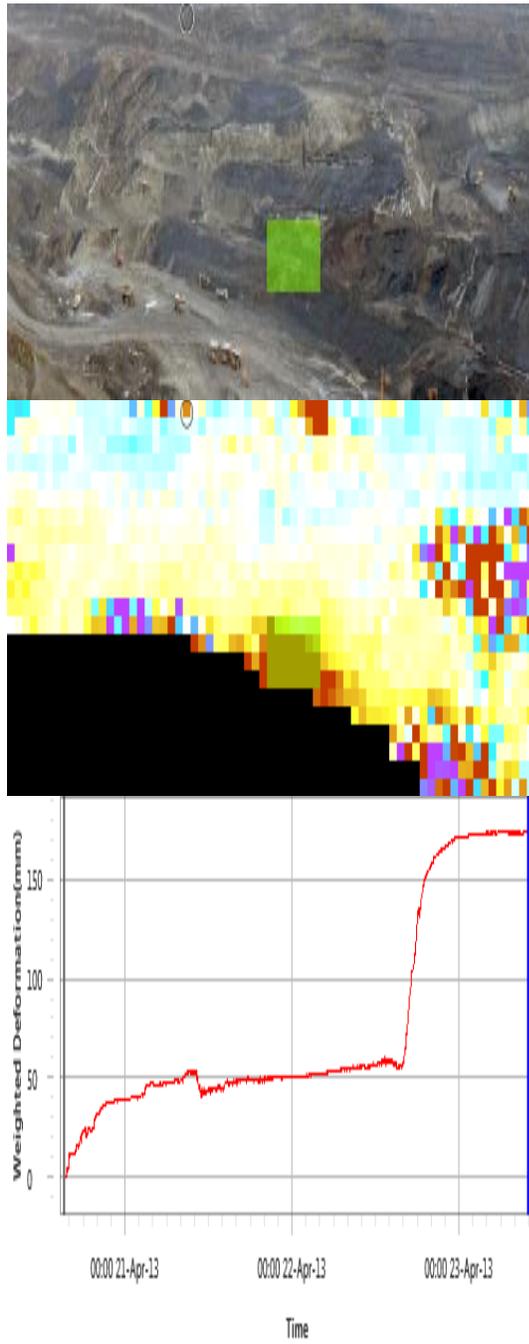
SSR107_110226_wahana_broto_Low_Wall
_Monitoring__72__73



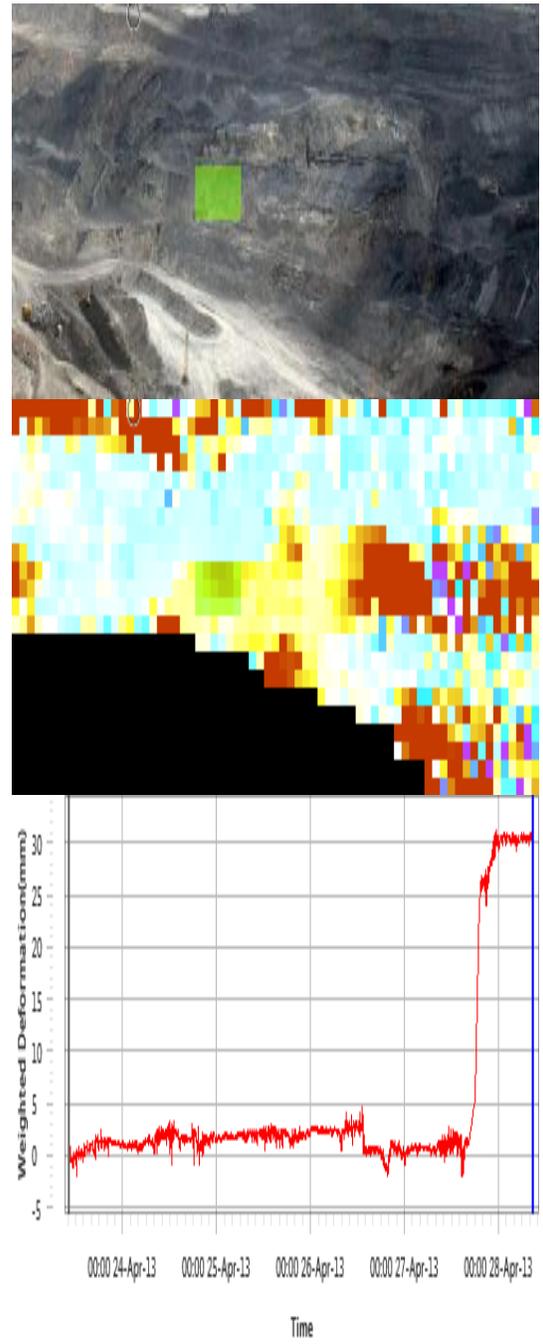
SSR107_120507_Wahana
Baratama_Middle_Lowwall_Monitoring



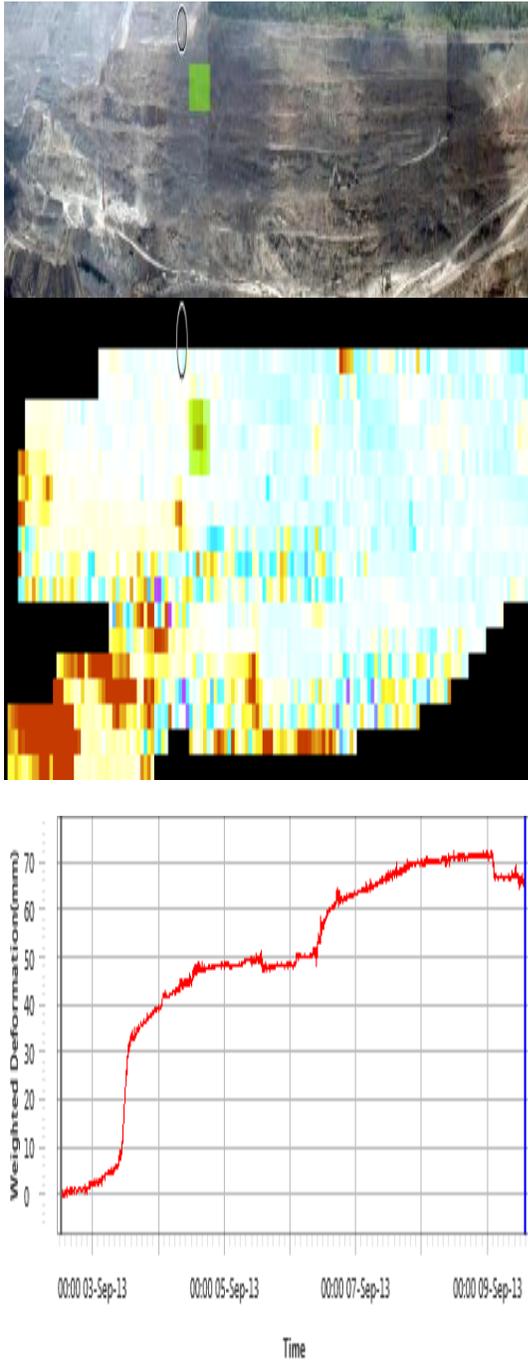
SSR107_120921_Wahana_East
Pit_lowwall_monitoring_20120921



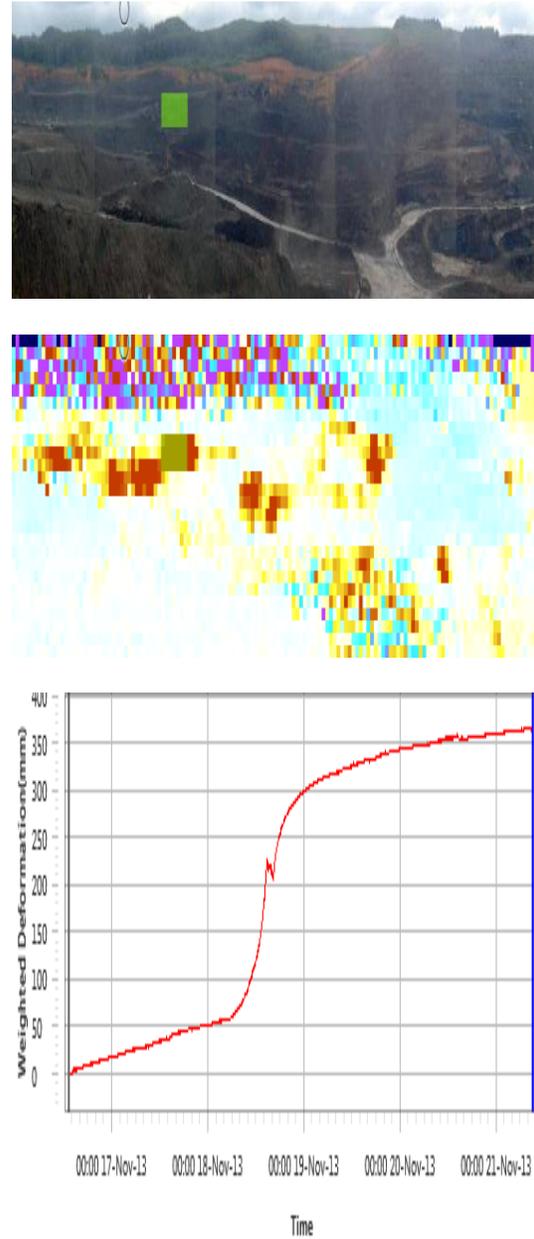
SSR107_130420_Wahana_WBM_lowwall_
monitoring_20130420



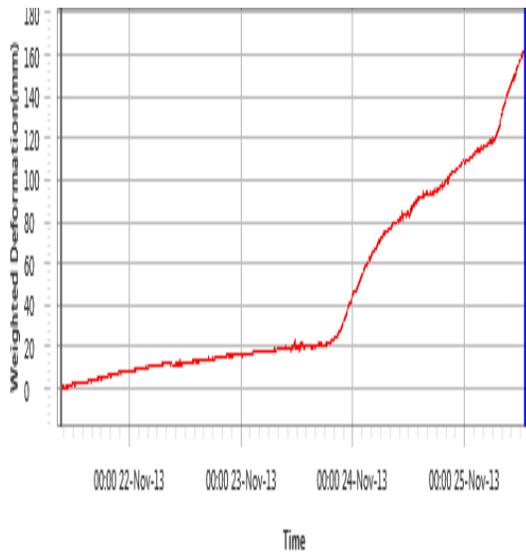
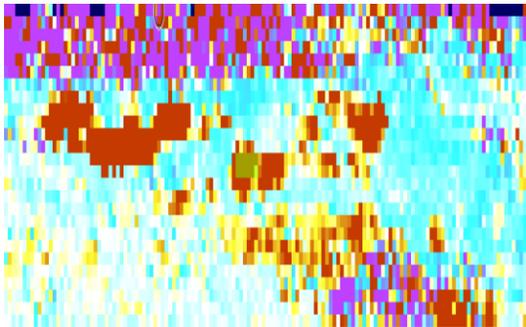
SSR107_130902_Wahana_Wahana_LW_m
onitoring_bndry



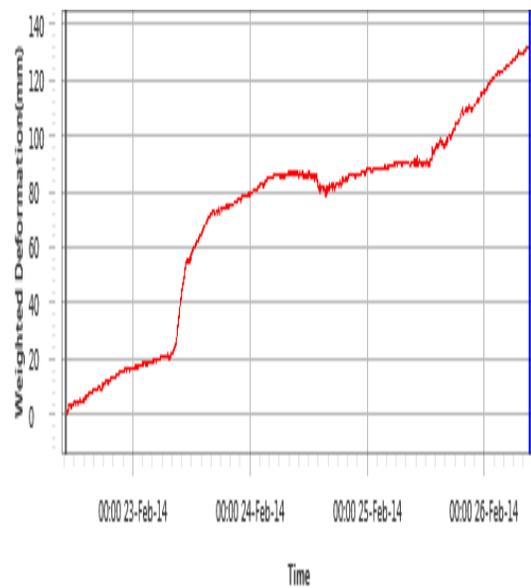
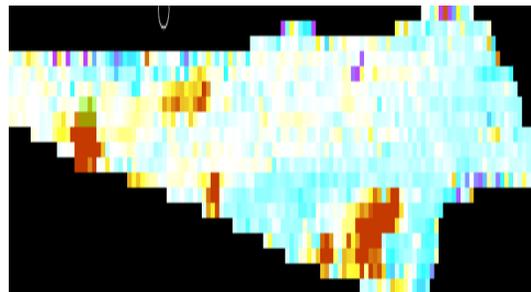
SSR107_131116_Wahana_Wahana_Monito
ring_Lowwall_B84b87_Bdy_Farwest



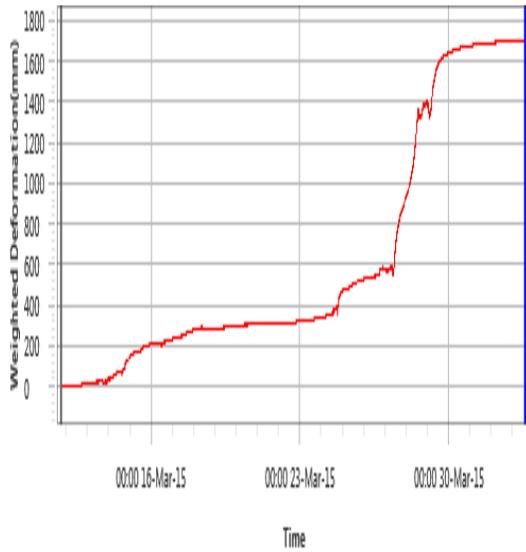
SSR107_131121_Wahana_Wahana_Instability_Block_85-87



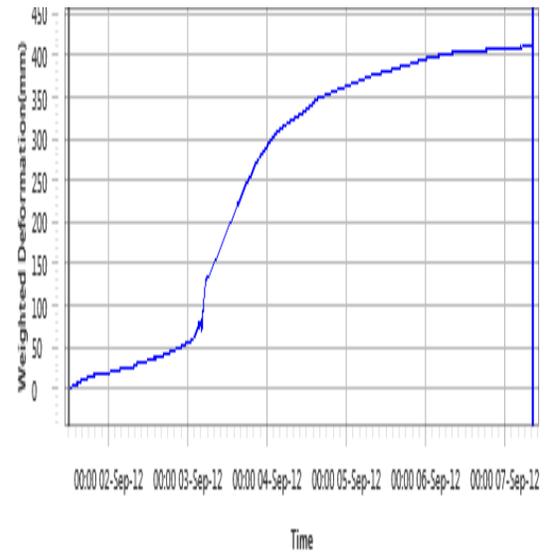
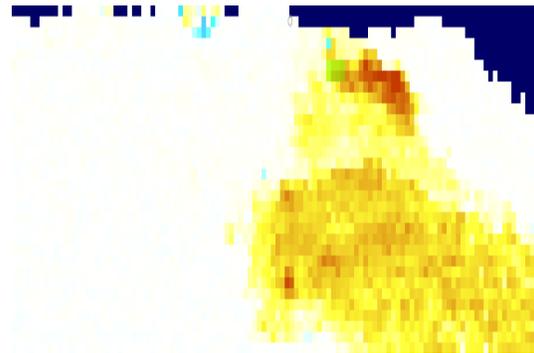
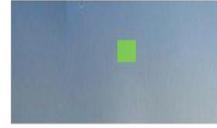
SSR107_140222_Wahana_wahana_Monitoring_Lowwall_West_Pit



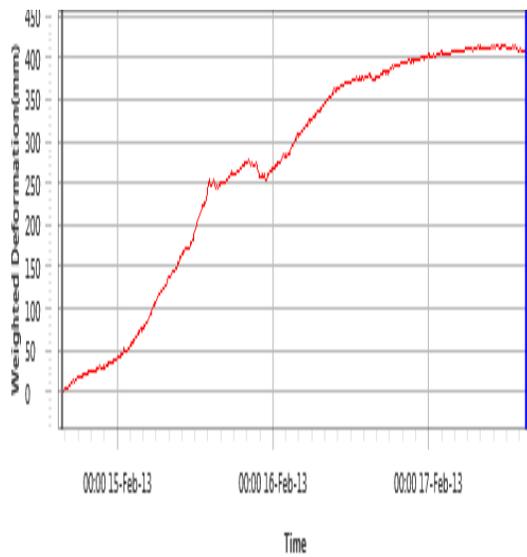
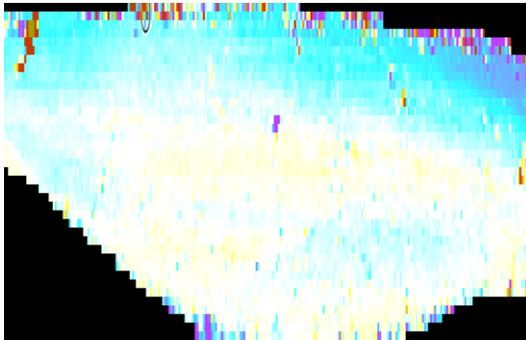
SSR107_150311_WAHANA_Low
Wall_Monitoring_East_Boundary



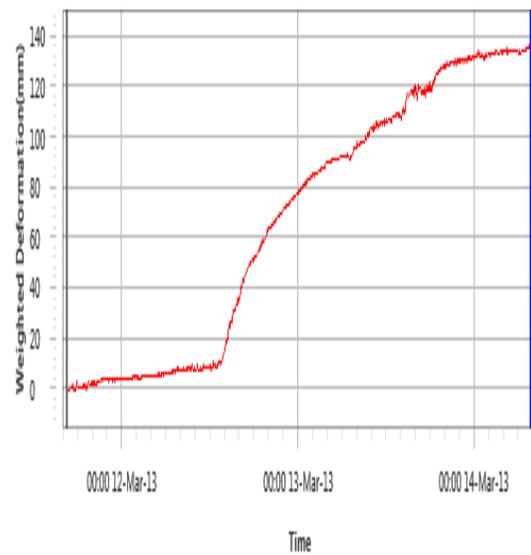
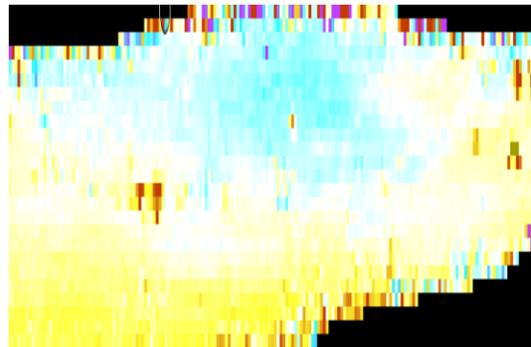
SSR107_120901_Wahana
Baratama_Middle_Hauling_Road_Failure_2
0120901



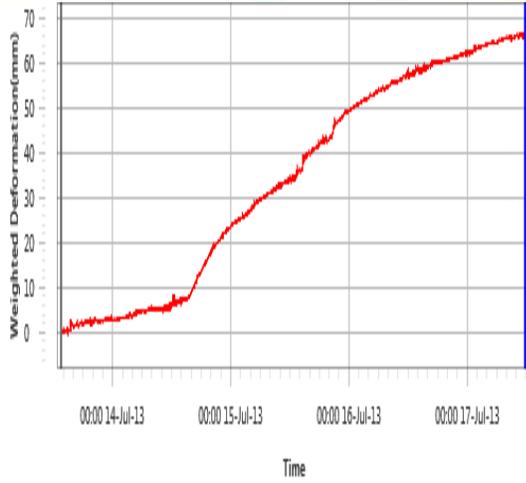
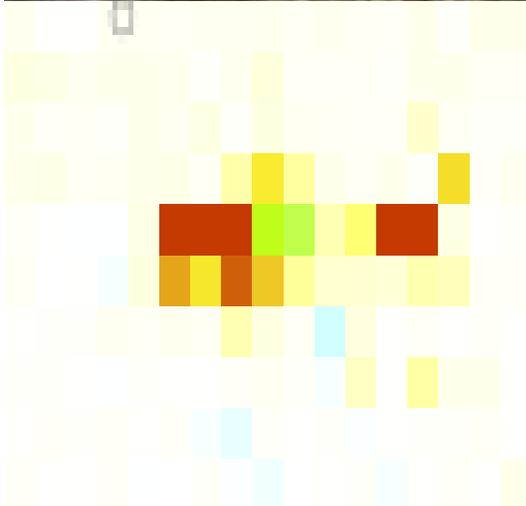
SSR107_130214_Wahana_WBM_HW_Mo
nitoring_GT



SSR107_130311_Wahana_WBM_HW_Mo
nitoring_Western_Pit



SSR107_130713_Wahana Mine
Project_WBM_cutback_monitoring_instability_62_HW



LAMPIRAN B.

DATA ANALISIS WALL FOLDER SSR

No	Wall Folder	Wall Folder ID	max velocity 1h time window (mm/hr) over 60	max velocity 24h time window (mm/day) over 1440	min inverse velocity 1h time window (mm/hr) over 60	min Inverse velocity 24h time window (mm/day) over 1440	Max displacement (mm)	Estimated surface (m2)	Waktu (jam) Graphic			Karakteristik
									Progresif	Failure	Post-failure	
1	LW_72_73	A	19.91	64.29	0.05	0.02	247.00	3461	8	3	13	Linear - progresif - failure – regresif - post failure
2	Wahana Baratama_Middle_Low wall_Monitoring	B	55.48	54.01	0.02	0.02	323.00	1511	48	5	24	Linear - progresif - failure – regresif - post failure
3	WBM_lowwall_monitoring_20130420	C	67.18	25.50	0.02	0.04	123.00	7912	2.5	0.5	11	Regresif – linear - progresif - failure – regresif (post failure)
4	WBM_lowwall_monitoring_20130421	D	26.87	20.79	0.01	0.05	175.00	3164.8	1.5	0.5	36	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)
5	WBM_lowwall_monitoring_20130423	E	59.28	28.51	0.00	0.04	200.00	9604	24	10	45	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)
6	Wahana_LW_monitoring_bndry	F	29.30	61.41	0.03	0.02	197.00	595.81	12	5	36	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)
7	Wahana_Monitoring_Lowwall_B84b87_Bdy_Farwest	G	82.80	53.88	0.01	0.02	354.00	505	40	5	52	Regresif - linear - progresif - failure – regresif (post failure)
8	Wahana_Instability_Block_85-87	H	25.05	25.93	0.04	0.04	261.00	4659	72	14	36	Regresif - progresif - collapse – regresif - linear – progresif
9	wahana_Monitoring_Lowwall_West_Pit	I	44.90	28.08	0.02	0.04	456.00	1061	22	6	32	Regresif - progresif - failure – regresif – linear (post failure)
10	Wahana_TEST_MTM_APR14	J	25.20	81.44	0.02	0.01	202.30	565	25	2	32	Regresif – linear - progresif - failure – regresif (post failure)
11	WAHANA_Low Wall_Monitoring_East_Boundary	K	40.26	51.85	0.03	0.02	405.00	8536	96	18	84	Linear - progresif - failure – regresif (post failure)

12	Wahana Baratama_Middle_Hauling_Road_Failure_2012_0901	A1	55.75	74.39	0.02	0.01	134.20	5724	40	15	46	Linear - progressif - failure – regresif (post failure)
13	Wahana_WBM_HW_Monitoring_GT	B1	28.30	30.62	0.04	0.03	220.90	1491	5	4	5	Linear - progressif - failure – regresif (post failure)
14	Wahana_WBM_HW_Monitoring_Western_Pit	C1	10.40	51.75	0.10	0.02	113.00	180	6	8	12	Linear - progressif - failure – regresif – failure- regresif
15	Mine Project_WBM_cutback_monitoring_instability_62_HW	D1	29.20	25.60	0.03	0.04	267.00	526	36	48	40	Linear - progressif - failure – regresif (post failure)

LAMPIRAN C.

DATA DAN ANALISIS LONGSOR PENGAMATAN DATA LAPANGAN

No	Wall Folder	Wall Folder ID	Jenis Batuan	Tinggi lereng (m)	Sudut	FK	Triggering	Struktur Geologi
1	LW_72_73	A	Mudstone	18	50	2.87	Rain, spontaneous combustion	Tidak
2	Wahana Baratama_Middle_Lowwall_Monitoring	B	Sandstone	25	50	4.08	Rain and structural geology	Ya
3	WBM_lowwall_monitoring_20130420	C	Sandstone	20	50	4.09	Structural geology	Ya
4	WBM_lowwall_monitoring_20130421	D	Sandstone	18	50	4.32	Rain and bedding shear	Ya
5	WBM_lowwall_monitoring_20130423	E	Sandstone	25	50	5.17	Rainy event and Structural geology	Ya
6	Wahana_LW_monitoring_bndry	F	Sandstone	15	50	5.55	mining activity	Tidak
7	Wahana_Monitoring_Lowwall_B84b87_Bdy_Farwest	G	Mudstone	22	50	2.03	structural geology	Tidak
8	Wahana_Instability_Block_85-87	H	Mudstone	15	50	2.61	Mining activity	Ya
9	wahana_Monitoring_Lowwall_West_Pit	I	Mudstone	14	50	2.12	Rainy	Ya
10	Wahana_TEST_MTM_APR14	J	Sandstone	20	50	4.09	Rainy event and Structural geology	Ya

11	WAHANA_Low Wall_Monitoring_East_Boundary	K	Mudstone	30	50	2.25	Rain events and structural geology	Tidak
12	Wahana Baratama_Middle_Hauling_Road_Failure_20120901	A1	Mudstone	20	55	2.12	Rain events and structural geology	Ya
13	Wahana_WBM_HW_Monitoring_GT	B1	Sandstone	25	55	3.75	Rain events and structural geology	Ya
14	Wahana_WBM_HW_Monitoring_Western_Pit	C1	Mudstone	20	55	2.13	Rain events and structural geology	Ya
15	Mine Project_WBM_cutback_monitoring_instability_62_HW	D1	Sandstone	15	55	4.55	Mining activity	Tidak

LAMPIRAN D.

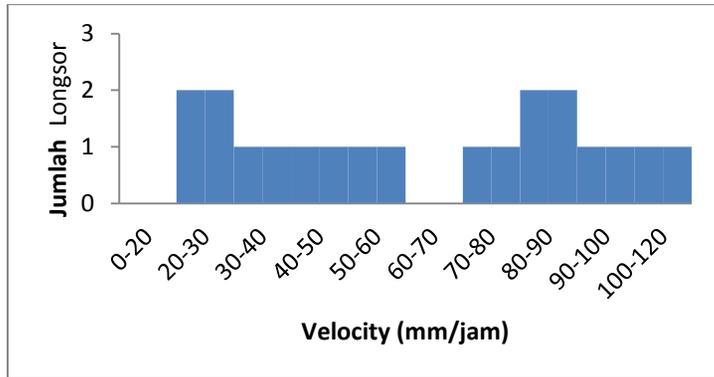
TABEL INTERPRETASI KOEFISIEN KORELASI

Interval Koefisien (R²)	<u>Tingkat Hubungan</u>
0.00 – 0.199	<u>Sangat rendah</u>
0.20 – 0.399	<u>Rendah</u>
0.40 – 0.599	<u>Sedang</u>
0.60 – 0.799	<u>Kuat</u>
0.80 – 1.000	<u>Sangat Kuat</u>

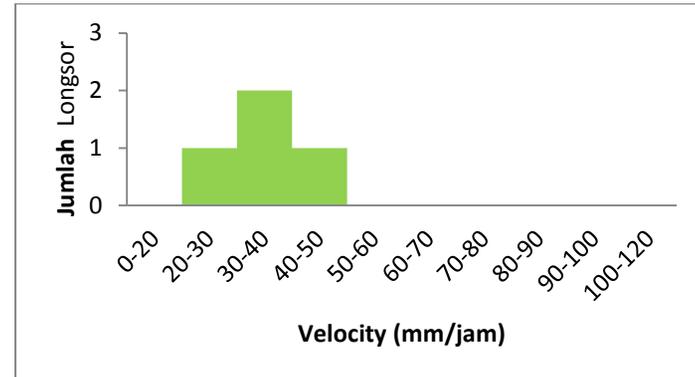
Notes : Nilai R terbesar adalah +1 dan R terkecil adalah -1. R = +1 menunjukkan hubungan positif sempurna, sedangkan R = -1 menunjukkan hubungan negatif sempurna. R tidak mempunyai satuan atau dimensi. Tanda + atau - hanya menunjukkan arah hubungan.

LAMPIRAN E

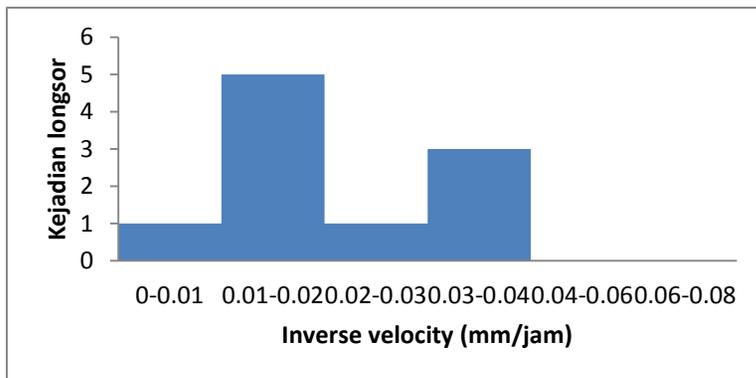
HISTOGRAM DATA VELOCITY DAN INVERSE-VELOCITY



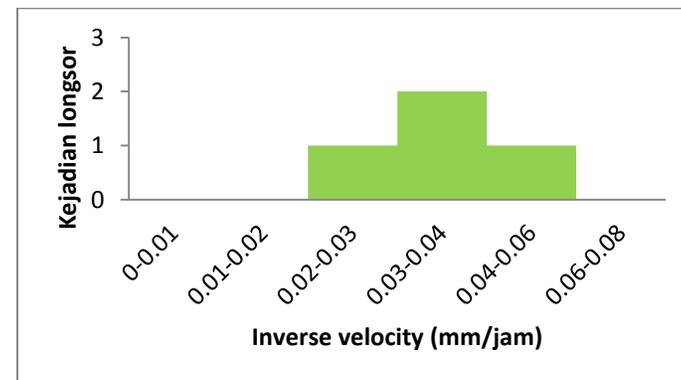
Histogram *Velocity Low-wall*



Histogram *Velocity High-wall*



Histogram *inverse-Velocity Low-wall*



Histogram *inverse-Velocity High-wall*

LAMPIRAN F.
KEPUTUSAN MENTERI PERTAMBANGAN DAN
ENERGI NOMOR : 555.K/26/M.PE/1995

BAB VI
TAMBANGPERMUKAAN
Bagian Pertama
Cara Kerja Yang Aman

Pasal 239
Umum

1. Di sekitar bagian tambang baik yang masih ada kegiatan maupun yang sudah ditinggalkan dan dapat menimbulkan bahaya, harus diberi pagar pengaman dengan tinggi sekurang kurangnya 80 sentimeter atau dipasang tanda peringatan.
2. Jalan masuk ke setiap tempat kerja pada kegiatan tambang harus dirawat.
3. Setiap Jalan masuk sebagaimana dimaksud dalam ayat (2) yang mempunyai kemiringan lebih dari 40 derajat harus dilengkapi dengan tangga yang dipasang secara tetap atau jalan bertangga. Apabila tangga dipasang lebih curam dari 75 derajat harus dilengkapi pagar sandaran punggung.
4. Tangga tetap sebagaimana dimaksud dalam ayat (3) harus terpasang kuat dan aman.
5. Tangga tetap yang panjangnya lebih dari 10 meter harus mempunyai lantai istirahat pada setiap selang jarak 10 meter dan ujung tangga tersebut harus menonjol 90 sentimeter pada tiap lantai.
6. Penggunaan kereta gantung (*cable way*) atau kendaraan yang berjalan di atas rel untuk pengangkutan orang harus mendapat izin Kepala Pelaksana Inspeksi Tambang.
7. Mulut sumuran, bak penampung, dapur pemanggangan atau corongan harus diberi pagar pengaman.

Pasal 240
Cara Kerja

1. Kepala Teknik Tambang harus menjamin bahwa kemandapan lereng penambangan, penimbunan, dan material lainnya telah diperhitungkan dalam perencanaan tambang.
2. Penimbunan tanah penutup hanya dapat dilakukan pada jarak sekurang-kurangnya 7,5 meter dari ujung teras atas penambangan.
3. Dilarang melakukan penggalian potong bawah (*undercutting*) pada permukaan kerja, teras atau galeri, kecuali mendapat persetujuan Kepala Pelaksana Inspeksi Tambang.
4. Permukaan kerja harus aman dari batuan menggantung dan pada waktu pengguguran batuan, para pekerja di tempat tersebut harus menyingkir.
5. Apabila suatu pekerjaan harus dilakukan secara manual pada permukaan kerja yang tingginya lebih dari 2,5 meter dari lantai kerja, para pekerja tambang harus memakai sabuk pengaman atau pelana pengaman.
6. Permukaan kerja tambang permukaan pada bagian atas daerah kegiatan tambang bawah tanah hanya dapat dibuat setelah mendapat persetujuan Kepala Pelaksana Inspeksi Tambang.
7. Dilarang bekerja atau berada di atas timbunan aktif batu pecah, kecuali :
 - a. berdasarkan perintah seorang pengawas tambang;
 - b. curahan baru ke dan dari timbunan telah dihentikan;
 - c. telah diperoleh kepastian bahwa corongan di bawah timbunan telah ditutup dan
 - d. pekerja mengenakan sabuk pengaman yang dihubungkan dengan tali yang sesuai panjangnya, diikatkan secara kuat dan aman pada titik tetap di atasnya.

Pasal 241
Tinggi Permuka Kerja
Dan Lebar Teras Kerja

1. Kemiringan, tinggi dan lebar teras harus dibuat dengan baik dan aman untuk keselamatan para pekerja agar terhindar dari material atau benda jatuh.
2. Tinggi jenjang (*bench*) untuk pekerjaan yang dilakukan pada lapisan yang mengandung pasir, tanah liat, kerikil, dan material lepas lainnya harus :
 - a. tidak boleh lebih dari 2,5 meter apabila dilakukan secara manual;
 - b. tidak boleh lebih dari 6 meter apabila dilakukan secara mekanik.
 - c. Tidak boleh lebih dari 20 meter apabila dilakukan dengan menggunakan *clamshell*, *drag line*, *bucket wheel excavator* atau alat sejenis kecuali mendapat persetujuan Kepala Pelaksana Inspeksi Tambang.
3. Tinggi jenjang untuk pekerjaan yang dilakukan pada material kompak tidak boleh lebih dari 6 meter, apabila dilakukan secara manual.
4. Dalam hal penggalian dilakukan sepenuhnya dengan alat mekanis yang dilengkapi dengan kabin pengaman yang kuat, maka tinggi jenjang maksimum untuk semua jenis material kompak 15 meter, kecuali mendapat persetujuan Kepala Pelaksana Inspeksi Tambang.
5. Studi kemandapan lereng harus dibuat apabila :
 - a. tinggi jenjang keseluruhan pada sistem penambangan berjenjang lebih dari 15 meter.
 - b. tinggi setiap jenjang lebih dari 15 meter.
 - c. Lebar lantai teras kerja sekurang-kurangnya 1,5 kali tinggi jenjang atau disesuaikan dengan alat yang digunakan sehingga dapat bekerja dengan aman dan harus dilengkapi dengan tanggul pengaman (*safety berm*) pada tebing yang terbuka dan diperiksa pada setiap giliran kerja dari kemungkinan adanya rekahan atau tanda-tanda tekanan atau tanda-tanda kelemahan lainnya.

Pasal 242

1. Pada waktu membuat sumuran, parit atau pekerjaan sejenis, yang dinding bukannya mencapai tinggi lebih dari 1,2 meter harus diberi penyangga atau dibuat miring dengan sudut yang aman.
2. Pembuatan tanggul atau bendungan air baik yang bersifat sementara atau tetap harus cukup kuat memenuhi persyaratan yang berlaku.