

Artikel

Analisis Deformasi Lereng Yang Mengalami Longsor Menggunakan Slope Stability Radar (SSR) Pada *Pit 2* Blok Banko Barat PT Bukit Asam Tbk, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan

Alkhodri Rahmatullah¹, Anggi Deliana Siregar², Ericson^{1*}, Jarot Wiratama¹, Aditya Denny Prabawa¹, Bagus Adhitya², Wahyudi Zahar¹, Sarwo Sucitra Amin³

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

²Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

³Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

*Corr Author: ericson@unja.ac.id

Abstrak: Salah satu perusahaan pertambangan di Indonesia yang mengelola dan memproduksi batubara ialah PT Bukit Asam Tbk yang berlokasi di Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan. Kegiatan penambangan yang dilakukan secara terus-menerus dapat menyebabkan terganggunya kestabilan pada lereng tambang, sehingga perlu dilakukan analisis terhadap deformasi lereng agar menghindari bahaya longsor yang dapat terjadi. Selama periode pemantauan dari tahun 2022 hingga tahun 2023 terdapat tujuh kejadian longsor yang tercatat pada *pit 2*, baik pada *highwall* maupun pada *lowwall*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan perilaku deformasi lereng selama terjadi longsor, penetapan ambang batas kecepatan longsor serta analisis deformasi lereng sebelum longsor. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa perilaku deformasi lereng selama terjadinya longsor pada *highwall* didapatkan nilai rata-rata kecepatan maksimum di kondisi regresif sebesar 10,94 mm/jam, kondisi progresif sebesar 27,18 mm/jam, kondisi longsor sebesar 26,13 mm/jam dan kondisi setelah longsor sebesar 19,85 mm/jam. Pada *lowwall* didapatkan nilai rata-rata kecepatan maksimum di kondisi regresif sebesar 3,85 mm/jam, kondisi progresif sebesar 24,35 mm/jam, kondisi longsor sebesar 32,42 mm/jam dan kondisi setelah longsor sebesar 5,02 mm/jam. Kemudian nilai ambang batas kecepatan pergerakan lereng pada *highwall* dengan rata-rata nilai LCL sebesar -0,65 mm/jam, nilai UCL sebesar 4,45 mm/jam dan *critical value* sebesar 18,23 mm/jam. Pada *lowwall* dengan rata-rata nilai LCL sebesar -0,32 mm/jam, nilai UCL sebesar 3,02 mm/jam dan *critical value* sebesar 18,60 mm/jam. Hasil perhitungan analisis deformasi lereng pada *highwall* didapatkan rata-rata deformasi maksimum lereng sebesar 10,63 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan SRF = 1,07. Sementara itu, pada *lowwall* didapatkan rata-rata deformasi maksimum lereng sebesar 23,17 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan SRF = 0,03.

Kata Kunci: Pemantauan SSR, Perilaku Deformasi Lereng, Ambang Batas Kecepatan Longsor, Deformasi Lereng

Abstract: One of the mining companies in Indonesia that manages and produces coal is PT Bukit Asam Tbk located in Muara Enim Regency, South Sumatra Province. Mining activities that are carried out continuously can cause disruption to the stability of the mine slope, so it is necessary to analyze the slope deformation in order to avoid the danger of landslides that can occur. During the monitoring period from 2022 to 2023, there were seven landslides recorded on *pit 2*, both on the *highwall* and on the *lowwall*. This study aims to determine the behavior of slope deformation during landslides, setting landslide speed thresholds and analyzing slope deformation before landslides. From the results of the study, it was found that the slope deformation behavior during the landslide on the *highwall* obtained the average maximum speed value in regressive conditions of 10.94 mm/hour, progressive conditions of 27.18 mm/hour, landslide conditions of 26.13 mm/hour and conditions after landslides of 19.85 mm/hour. In the *lowwall*, the average maximum speed value in regressive conditions was 3.85 mm/hour, progressive conditions were 24.35 mm/hour, landslide conditions were 32.42 mm/hour and conditions after landslides were 5.02 mm/hour. Then the threshold value of slope movement speed on the *highwall* with an average LCL value of -0.65 mm/hour, UCL value of 4.45 mm/hour and *critical value* of 18.23 mm/hour. On the *lowwall* with an average LCL value of -0.32 mm/hour, UCL value of 3.02 mm/hour and *critical value* of 18.60 mm/hour. The calculation results of slope deformation analysis on the *highwall* obtained an average maximum slope deformation of 10.63 meters with a decrease in the strength of the rock mass SRF = 1.07. Meanwhile, the *lowwall* obtained an average maximum slope deformation of 23.17 meters with a decrease in the strength of the rock mass SRF = 0.03.

Keywords : SSR Monitoring, Slope Deformation Behaviour, Landslide Speed Threshold, Slope Deformation

PENDAHULUAN

Perusahaan pertambangan di Indonesia yang mengelola dan memproduksi batubara salah satunya adalah PT Bukit Asam Tbk atau lebih dikenal dengan nama PTBA yang berlokasi di Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan. Perusahaan ini bergerak di bidang penyelidikan umum, eksplorasi, eksploitasi, pengelolaan, pengangkutan dan perdagangan bahan-bahan galian terutama batubara. PTBA memegang hak atas Izin Usaha Pertambangan (IUP) untuk operasi produksi dengan total seluas 68.777 ha.

Sistem penambangan yang diterapkan PTBA adalah *open pit mining* dengan metode penambangan yang digunakan yaitu *strip mining* dengan menggunakan alat mekanis berupa *excavator* dan *dump truk*. Selain itu juga menerapkan metode *continuous mining* dengan menggunakan alat mekanis berupa *Bucket Wheel Excavator* (BWE) yang dikombinasikan dengan *belt conveyor* sebagai alat angkutnya. Saat ini BWE hanya dioperasikan sebagai alat penanganan batubara (*coal handling*) dikarenakan usia alat yang sudah lama, ditempatkan pada beberapa area *temporary stockpile* yaitu di MTB, TAL maupun Banko tengah B.

Kegiatan penambangan yang dilakukan secara terus-menerus dapat menyebabkan terganggunya kestabilan pada lereng tambang, sehingga perlu dilakukan analisis terhadap kestabilannya agar menjaga lereng tetap stabil baik itu ketika tahapan perancangan, tahapan penambangan, maupun tahapan setelah penambangan. Juga mencegah bahaya longsor diwaktu yang akan datang karena hal ini menyangkut keselamatan kerja, keamanan peralatan dan benda-benda lainnya, serta keberlangsungan produksi [1][2][3]. Lereng yang dianalisis dapat berupa lereng tambang aktif, lereng timbunan bijih/batubara (*stockpile*), lereng timbunan tanah penutup (*disposal*), maupun lereng bangunan infrastruktur seperti lereng pada jalan, lereng di sekitar bangunan dan lereng pada bendungan.

Bahaya longsor menjadi ancaman besar bagi perusahaan, dampak yang timbul dapat berupa kerusakan infrastruktur, kerusakan alat, tertutupnya akses jalan tambang, tertutupnya cadangan yang akan di tambang, adanya korban jiwa (*fatality*), hingga dapat menyebabkan sebuah tambang ditutup. Untuk mengurangi resiko ini, PTBA menggunakan alat pemantau lereng berupa Slope Stability Radar (SSR) yang dapat bekerja secara *real time* untuk membantu kegiatan pemantauan lereng tambang terutama pada lereng tambang yang tidak stabil. Berdasarkan studi pada 500 tambang di Indonesia, rata-rata kecepatan deformasi saat terjadi longsor di tambang batubara adalah 30-50 mm/jam. Penting untuk mempelajari data ini dan menjadi acuan dalam studi kestabilan lereng terutama pada batu bara [3][8].

SSR adalah suatu alat pemantauan kestabilan lereng yang bertujuan mengidentifikasi deformasi lereng berdasarkan perubahan fase gelombang. Adapun keunggulan dari alat ini yaitu mampu meningkatkan keamanan pada area lereng yang kritis, meningkatkan luas area serta cadangan yang dapat ditambang dan memungkinkan penyesuaian terhadap geometri lereng. SSR menggunakan gelombang elektromagnetik untuk melakukan pemantauan lereng. Gelombang ini merupakan gelombang yang memancar tanpa media rambat serta membawa muatan energi listrik dan magnet (elektromagnetik) [1][2][7][11].

SSR mulai ditempatkan pada *pit 2* sejak awal tahun 2022. Selama periode pemantauan dari tahun 2022 hingga tahun 2023, terdapat tujuh kejadian longsor yang tercatat. Longsor terjadi pada *highwall* sebanyak empat kali dan longsor yang terjadi pada *lowwall* sebanyak tiga kali. Kedua area lereng ini memiliki perilaku deformasi yang berbeda, dampak terbesar yang ditimbulkan dari longsor ini terjadi pada area *lowwall* berupa terputusnya jalur akses jalan tambang yang mengharuskan untuk dilakukan pembuatan akses jalan baru.

METODE PENELITIAN

Studi Literatur

Studi literatur merupakan sebuah awalan ketika memulai sebuah penelitian tugas akhir dengan cara mengumpulkan bahan referensi serta informasi berupa teori, konsep, regulasi, serta pustaka terkait penelitian yang merujuk pada beberapa buku dan jurnal penelitian, dokumen perusahaan, *handbook* serta penelitian tugas akhir terdahulu terkait pemantauan lereng tambang dengan menggunakan Slope Stability Radar (SSR) yang dijadikan sebagai acuan penelitian [8][13].

Pengambilan Data

Pengambilan data dilapangan dapat dilakukan setelah dilaksanakannya observasi lapangan guna mengetahui permasalahan yang ada sehingga dapat diambil suatu solusi yang tepat. Data yang diambil berupa data yang mendukung penyelesaian penelitian analisis kestabilan lereng. Dalam pelaksanaan penelitian ini terdapat 2 jenis data yang diambil yaitu data primer dan data sekunder yang kemudian dikembangkan sesuai dengan tujuan penelitian.

Data Primer

Data primer adalah data yang diambil dan dikumpulkan dengan melakukan pengamatan dan observasi lapangan secara langsung [5][9]. Dalam penelitian ini, data primer yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

1. Pengamatan dan dokumentasi lapangan

Data ini didapat ketika melakukan observasi lapangan, data pengamatan visual berguna sebagai gambaran kondisi lapangan untuk memudahkan dalam melakukan pengolahan data. Sementara itu dokumentasi lapangan berguna untuk menyimpan kejadian diwaktu tertentu seperti kejadian longsor serta tempat terjadinya longsor.

2. Data hasil pemantauan lereng tambang

Data hasil pemantauan lereng menggunakan SSR dibutuhkan untuk menentukan jenis permasalahan yang diangkat dalam penelitian. Data yang dihasilkan ialah data deformasi lereng berupa grafik yang berisikan angka guna menentukan tipe perilaku pergerakan dari lereng yang mengalami longsor.

Data Sekunder

Data sekunder adalah data pendukung dari data primer atau data yang telah tersedia berfungsi untuk menguatkan data primer [1][5][9][11][12]. Dalam penelitian ini, data primer yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

1. Topografi situasi tambang

Data topografi merupakan data berupa koordinat yang memiliki posisi dan ketinggian (x, y, z). Berupa kontur digital yang menunjukkan situasi dan kondisi area *pit*. Data topografi yang dimaksud adalah topografi update situasi dan end of month (EOM) terbaru di perusahaan. Data topografi yang didapatkan ini berupa data string files hasil dari pengambilan bentuk permukaan lapangan menggunakan drone.

2. Peta geologi regional dan lokal

Data dari peta geologi merupakan data yang berisikan tentang jenis formasi, endapan, struktur geologi, singkapan batubara maupun strike dan dip batubara. Digunakan untuk mengetahui keadaan geologi yang ada di lokasi penelitian.

3. Geometri lereng

Kerangka sebuah lereng tambang yang optimal penting ketika melakukan penambangan agar meminimalisir kecelakaan kerja serta memaksimalkan penambangan. Berupa tinggi lereng, lebar lereng serta kemiringan lereng. Digunakan untuk mengetahui bentuk muka lereng pada daerah penelitian.

4. Data sayatan penampang

Sayatan penampang (*cross section*) didapatkan dengan cara membuat sebuah sayatan yang memotong kontur serta bawah permukaannya, disederhanakan dalam bentuk model 2 dimensi. Digunakan untuk mengetahui tebal dan geometri lapisan yang ada dibawah permukaan, mengetahui tingkat keamanan sebuah lereng, menggambarkan hubungan struktur dan kemenerusan lapisan serta dapat mengetahui material yang hilang setelah terjadinya longsor. dibutuhkan untuk mengetahui jenis lapisan batuan penyusun pada lereng tambang.

5. Data uji laboratorium

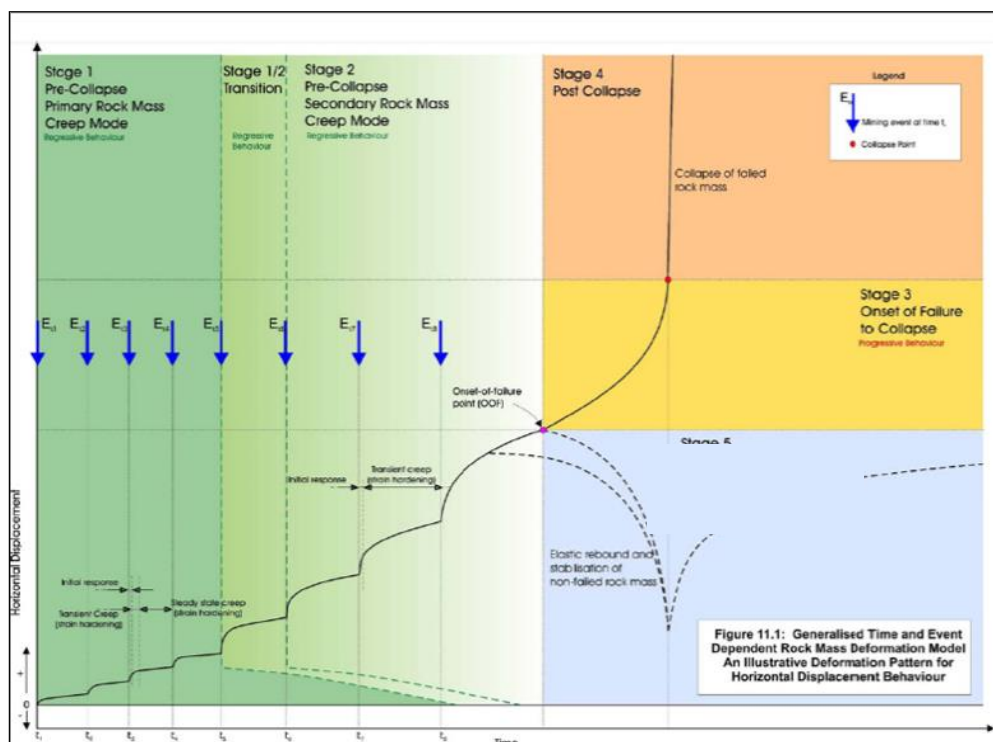
Uji laboratorium terhadap sampel batuan pada lereng tambang berguna untuk mendapatkan informasi mengenai kondisi lapisan tanah agar dapat menjadi parameter dalam menganalisis kestabilan pada sebuah lereng tambang. Pengujian yang dilakukan yaitu berupa uji sifat fisik dan uji sifat mekanik batuan, data yang didapatkan dari hasil pengujian ini berupa data bobot isi, kohesi (*peak* dan *residual*) dan sudut geser dalam (*peak* dan *residual*) dari masing-masing litologi penyusun lereng.

PENGOLAHAN DAN ANALISIS DATA

Pengolahan data dilakukan dari data-data yang telah dikumpulkan dan diolah berdasarkan teori dari studi literatur yang sudah ada. Data hasil penelitian yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis sesuai dengan tujuan kegiatan penelitian untuk mendapatkan hasil data sesuai dengan rencana awal permasalahan penelitian ini.

Perilaku Deformasi Lereng

Terdapat dua kategori deformasi batuan. Kategori 1 merupakan perilaku deformasi dengan adanya respon lanjutan berupa longsor akibat adanya faktor dari luar, umumnya dipicu oleh adanya kegiatan penambangan, peledakan maupun curah hujan yang meningkat. Kategori 2 merupakan perilaku deformasi batuan yang tanpa adanya respon lanjutan berupa longsor akibat adanya faktor dari luar yang memengaruhi perilaku deformasi. Awalan longsor dapat terjadi tanpa peringatan sebelumnya dan biasanya terjadi dalam bentuk keruntuhan batuan yang lebih kecil [10].



Gambar 1. Perilaku Deformasi Massa Batuan Menurut Mercer (2006)

Velocity dan Inverse Velocity

Velocity memperlihatkan kecepatan material longsor yang dihitung dari perubahan deformasi berbanding dengan perubahan waktu, semakin tinggi nilai *velocity* dalam waktu tertentu maka lereng menunjukkan fenomena ketidakstabilan. *Inverse velocity* adalah kebalikan dari *velocity*. Jika nilai semakin rendah atau mendekati angka nol pada *inverse velocity* maka lereng akan semakin tidak stabil atau longsor. Kecepatan deformasi didapatkan dari pemindaian deformasi lereng yang dibagi dengan waktu pemindaian dari dua waktu yang berbeda. Adapun rumus untuk menghitung kecepatan deformasi adalah sebagai berikut.

$$v = \frac{\Delta Deformation}{\Delta Time} = \frac{Deformation (d_2) - Deformation (d_1)}{Time(t_2) - Time (t_1)} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

v = Kecepatan Deformasi (per jam) t_2, t_1 = waktu akhir (t_2), waktu awal (t_1)
 d_2, d_1 = deformasi akhir (d_2), deformasi awal (d_1)

Pemantauan pergerakan lereng dengan radar didukung oleh metode *inverse velocity* yang memungkinkan estimasi waktu terjadinya longsor. Metode tersebut dikenal dengan metode *inverse velocity* yang dikembangkan oleh Fukuzono (1985). Metode ini mengemukakan bahwa longsor lereng selalu didahului oleh peningkatan kecepatan perpindahan dan model kecepatan perpindahan terhadap waktu sebagai model linier. Kondisi ini terjadi setelah melewati model kecepatan perpindahan non-linier. Prediksi waktu terjadinya longsor dapat dihitung dengan menggunakan plot yang menggambarkan menjadi 3 jenis grafik: *convex*, *linier*, dan *concave* berdasarkan *inverse velocity* [6]. konsep ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{1}{v} = [A(\alpha - 1)]^{\frac{1}{\alpha-1}} (t_f - t)^{\frac{1}{\alpha-1}} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

$\frac{1}{v}$ = *Inverse-velocity* t = Waktu
 A, α = Konstanta t_f = Waktu longsor terjadi

Ambang Batas Kecepatan Lereng Saat Longsor

Nilai ambang batas yang digunakan adalah *Upper Control Limit* (UCL) dan nilai Kritis (*Critical value*) yang dapat diterapkan pada kecepatan pergerakan lereng. Hal ini memungkinkan identifikasi pergerakan lereng yang melebihi batas yang telah ditetapkan, sehingga memungkinkan untuk mengambil tindakan pencegahan yang sesuai terhadap potensi keruntuhan lereng yang terdeteksi di atas batas pemantauan. Adapun rumus yang digunakan untuk menentukan ambang batas longsor adalah sebagai berikut.

$$UCL = M + (2,67 \times \overline{Mr}) \dots\dots\dots(3)$$

$$\overline{Mr} = \frac{\sum |x_1 - x_2| + \dots + |x_{n-1} - x_n|}{n-1} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

UCL = *Upper control limit* Mr = *Marginal ratio*
LCL = *Lower control limit* M = Rata-rata

Critical Value adalah nilai kritis dari ambang batas yang menandakan titik di mana situasi dianggap sangat kritis atau bahkan berpotensi berbahaya. Saat pergerakan lereng mencapai atau melebihi nilai kritis, ini menunjukkan adanya risiko yang tinggi terhadap keruntuhan lereng atau kejadian yang serius lainnya. Adapun rumus untuk menentukan batas kritis adalah sebagai berikut.

$$T_r = M + (6 \times SD) \dots\dots\dots(5)$$

Dimana:

T_r = Critical value

SD = Standar deviasi

Finite Element Method (FEM)

Finite Element Method atau metode elemen hingga merupakan salah satu bagian dari metode numerik yang membagi domain dari daerah yang akan di analisis yaitu domain ruang (*spatial domain*) dan domain waktu (*time domain*) ke dalam sub-domain atau zona yang lebih kecil yang dinamakan elemen (*node*).

Elemen-elemen tersebut dianggap saling berkaitan pada sejumlah titik simpul. Perpindahan pada setiap titik simpul dihitung terlebih dahulu, kemudian dengan sejumlah fungsi interpolasi yang diasumsikan, perpindahan pada sembarang titik dapat dihitung berdasarkan nilai perpindahan pada titik-titik simpul. Selanjutnya regangan yang terjadi pada setiap elemen dihitung berdasarkan besarnya perpindahan pada masing-masing titik simpul. Berdasarkan nilai regangan tersebut dapat dihitung tegangan yang bekerja pada setiap elemen [1]. Semakin kecil ukuran elemen maka akan semakin tinggi tingkat ketelitian regangan menuju deformasi aktual pada lereng.

Salah satu pendekatan dalam analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode elemen hingga adalah dengan menggunakan metode pengurangan kekuatan geser (*Strength Reduction Method*). Prinsip metode ini yaitu nilai dari kekuatan geser material dikurangi dengan faktor reduksi kekuatan geser (*Strength Reduction Factor*) secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Dalam faktor keamanan (FK), *Strength Reduction Factor* (SRF) didefinisikan sebagai perbandingan antara kuat geser aktual dan kuat geser minimum yang menyebabkan keruntuhan suatu lereng. Nilai SRF dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$\text{Faktor Keaman (FK)} = \frac{\tau}{\tau_f} \dots\dots\dots(6)$$

Nilai τ adalah nilai kuat geser material yang dihitung dengan kriteria Mohr-Coulomb, sedangkan nilai τ_f adalah nilai dari kekuatan geser material berupa kohesi (c_f) dan sudut geser dalam (\emptyset_f) yang diturunkan dengan SRF. Adapun persamaan dari SRF adalah sebagai berikut:

$$c_f = \frac{c}{SRF} \dots\dots\dots(7)$$

$$\emptyset_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \emptyset}{SRF} \right) \dots\dots\dots(8)$$

Sehingga persamaan dari FK dapat diubah menjadi:

$$\text{Faktor Keaman (FK)} = \frac{c + \sigma_n \tan \emptyset}{c_f + \sigma_n \tan \emptyset_f} \dots\dots\dots(9)$$

Persamaan berikut diperoleh dengan menguraikan nilai sudut geser dalam:

$$FK = \frac{c + \sigma_n \tan \emptyset}{\frac{c_f}{SRF} + \sigma_n \tan (\tan^{-1} \left[\frac{\tan \emptyset}{SRF} \right])} \dots\dots\dots(10)$$

$$FK = \frac{c + \sigma_n \tan \emptyset}{\left(\frac{c + \sigma_n \tan \emptyset}{SRF} \right)} \dots\dots\dots(11)$$

$$FK = SRF \dots\dots\dots(12)$$

Ketika tepat akan terjadi keruntuhan besar nilai SRF sama dengan nilai FK tepat akan terjadi keruntuhan atau nilai FK sama dengan 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi Kasus Longsor Highway 25 April 2022

Dari analisis data pemantauan lereng yang dilakukan oleh SSR pada bulan April tahun 2022, didapatkan bahwa kejadian longsor terjadi pada tanggal 25 April. Terdapat peningkatan kecepatan deformasi pada lereng yang mengalami longsor, dengan analisis pada piksel yang berada pada koordinat X=172 dan Y=26 serta memiliki luas

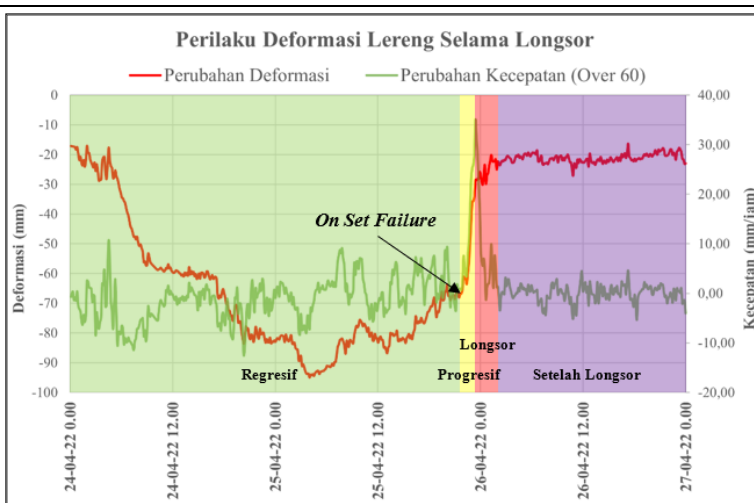
9,83 x 9,90 meter.

a. Perilaku Deformasi Lereng Selama Terjadi Longsor

Hasil analisis deformasi lereng selama 3 hari, teridentifikasi bahwa terjadi kondisi regresif mulai dari tanggal 24 April pukul 00:06 hingga 25 April pukul 22:00. Kondisi progresif tercatat mulai tanggal 25 April pukul 22:00 hingga pukul 23:24. Pada rentang waktu 25 April pukul 23:24 hingga 26 April pukul 01:53, terjadi kondisi longsor. Terakhir, pada tanggal 26 April pukul 01:53 hingga pukul 23:58 teramati kondisi setelah longsor.

Tabel 1. Ringkasan Perilaku Lereng Selama Periode Tiga Hari

Perilaku Lereng	Rentang Waktu	Kecepatan Maksimum	Rata-Rata Kecepatan
Regresif	45 jam 54 menit	10,76 mm/jam	3,36 mm/jam
Progresif	1 jam 24 menit	35,04 mm/jam	16,91 mm/jam
Longsor	2 jam 29 menit	31,37 mm/jam	8,67 mm/jam
Setelah Longsor	22 jam 5 menit	4,61 mm/jam	1,29 mm/jam



Gambar 2. Grafik Peningkatan Kecepatan Pada Kondisi Longsor

b. Penetapan Ambang Batas Kecepatan Longsor

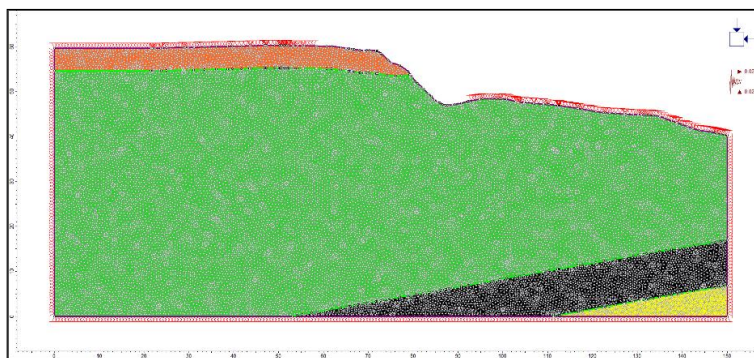
Untuk menentukan nilai ambang batas, digunakan nilai *Lower Control Limit* (LCL), *Upper Control Limit* (UCL) dan *critical value* yang dihitung berdasarkan rata-rata nilai kecepatan pergerakan lereng pada bulan April 2022. Adapun ambang batas pada longsor 25 April 2022 dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Ambang Batas Kecepatan Longsor Pada 25 April 2022

Kejadian Longsor	LCL (Waspada – Hijau)	UCL (Waspada – Kuning)	critical value (Awas)
25 April 2022	-0,74 mm/jam	4,70 mm/jam	16,23 mm/jam

c. Analisis Deformasi Longsor Highwall (Sayatan A-A')

Hasil analisis deformasi lereng, didapatkan bahwa deformasi maksimum lereng saat mengalami keruntuhan adalah sebesar 6,58 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan $SRF = 1,79$.



Gambar 3. Geometri Lereng Highwall April 2022

Studi Kasus Longsor Highwall 13 Oktober 2022

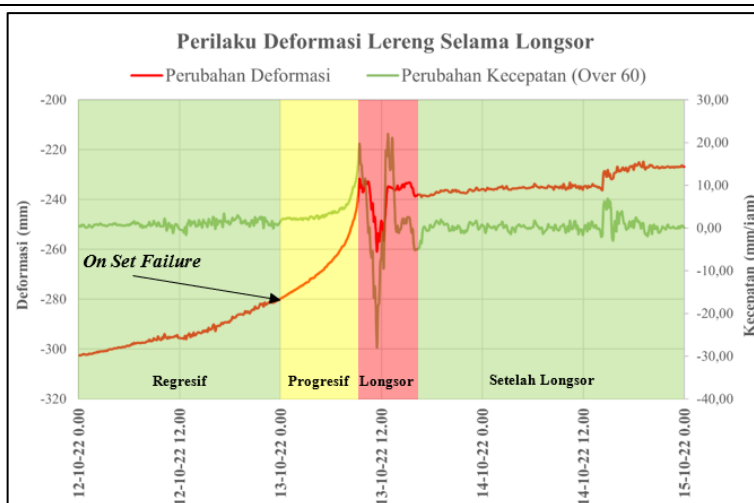
Dari analisis data pemantauan lereng yang dilakukan oleh SSR pada bulan Oktober tahun 2022, didapatkan bahwa kejadian longsor terjadi pada tanggal 13 Oktober. Terdapat peningkatan kecepatan deformasi pada lereng yang mengalami longsor, dengan analisis yang difokuskan pada piksel yang berada pada koordinat X=168 dan Y=23 serta memiliki luas sebesar 9,26 x 9,33 meter. Piksel ini dijadikan sebagai titik referensi untuk memahami perilaku deformasi lereng.

a. Perilaku Deformasi Lereng Selama Terjadi Longsor

Hasil analisis deformasi lereng selama periode 3 hari, teridentifikasi bahwa terjadi kondisi regresif mulai dari tanggal 12 Oktober pukul 00:02 hingga 13 Oktober pukul 00:01. Selanjutnya, kondisi progresif tercatat mulai tanggal 13 Oktober pukul 00:01 hingga pukul 09:23. Pada rentang waktu 13 Oktober pukul 09:23 hingga pukul 15:26, terjadi kondisi longsor. Terakhir, dari tanggal 13 Oktober pukul 15:26 hingga 14 Oktober pukul 23:57 teramati kondisi setelah longsor. Ringkasan lama waktu terjadi kondisi tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. Ringkasan Perilaku Lereng Selama Periode Tiga Hari

Perilaku Lereng	Rentang Waktu	Kecepatan Maksimum	Rata-Rata Kecepatan
Regresif	23 jam 59 menit	3,34 mm/jam	1,01 mm/jam
Progresif	9 jam 22 menit	19,72 mm/jam	4,08 mm/jam
Longsor	6 jam 3 menit	22,02 mm/jam	8,46 mm/jam
Setelah Longsor	32 jam 31 menit	6,87 mm/jam	0,96 mm/jam



Gambar 4. Grafik Peningkatan Kecepatan Pada Kondisi Longsor

b. Penetapan Ambang Batas Kecepatan Longsor

Untuk menentukan nilai ambang batas, digunakan nilai *Lower Control Limit* (LCL), *Upper Control Limit* (UCL) dan *critical value* yang dihitung berdasarkan rata-rata nilai kecepatan

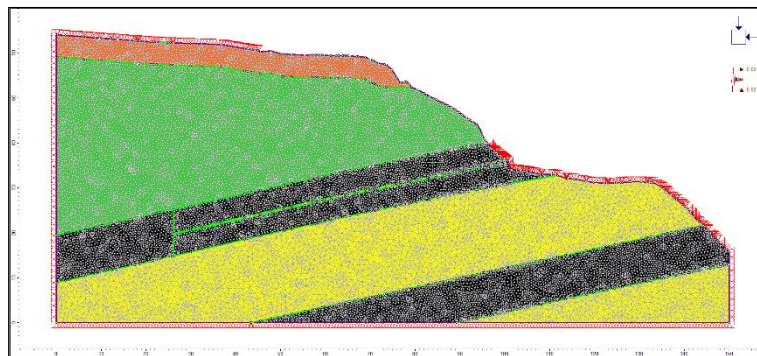
pergerakan lereng pada bulan Oktober 2022. Adapun ambang batas pada longsor 13 Oktober 2022 dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. Ambang Batas Kecepatan Longsor Pada 13 Oktober 2022

Kejadian Longsor	LCL (Waspada – Hijau)	UCL (Waspada – Kuning)	critical value (Awat)
13 Oktober 2022	-0,52 mm/jam	3,46 mm/jam	14,93 mm/jam

c. Analisis Deformasi Longsor *Highwall* (Sayatan C-C')

Hasil analisis deformasi lereng, didapatkan bahwa deformasi maksimum lereng saat mengalami keruntuhan adalah sebesar 23,24 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan SRF = 0,03.



Gambar 5. Geometri Lereng *Highwall* Oktober 2022

Studi Kasus Longsor *Highwall* 18 Januari 2023

Dari analisis data pemantauan lereng yang dilakukan oleh SSR pada bulan Januari tahun 2023, didapatkan bahwa kejadian longsor terjadi pada tanggal 18 Januari. Terdapat peningkatan kecepatan deformasi pada lereng yang mengalami longsor, dengan analisis yang difokuskan pada piksel yang berada pada koordinat X=182 dan Y=31 serta memiliki luas area sebesar 8,44 x 8,52 meter. Piksel ini dijadikan sebagai titik referensi untuk memahami perilaku deformasi lereng.

a. Perilaku Deformasi Lereng Selama Terjadi Longsor

Hasil analisis deformasi lereng selama periode 4 hari, teridentifikasi bahwa terjadi kondisi regresif mulai dari tanggal 16 Januari pukul 00:00 hingga 18 Januari pukul 05:26. Selanjutnya, kondisi progresif tercatat mulai tanggal 18 Januari pukul 05:26 hingga pukul 10:40. Pada rentang waktu 18 Januari pukul 10:40 hingga pukul 21:51, terjadi kondisi longsor. Terakhir, dari tanggal 18 Januari pukul 21:51 hingga 19 Januari pukul 23:57 teramati kondisi setelah longsor. Ringkasan lama waktu terjadi kondisi tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 5. Ringkasan Perilaku Lereng Selama Periode Empat Hari

Perilaku Lereng	Rentang Waktu	Kecepatan Maksimum	Rata-Rata Kecepatan
Regresif	53 jam 26 menit	12,31 mm/jam	2,53 mm/jam
Progresif	5 jam 14 menit	32,76 mm/jam	13,32 mm/jam
Longsor	11 jam 11 menit	31,88 mm/jam	6,00 mm/jam
Setelah Longsor	26 jam 6 menit	30,04 mm/jam	6,58 mm/jam



Gambar 6. Grafik Peningkatan Kecepatan Pada Kondisi Longsor

b. Penetapan Ambang Batas Kecepatan Longsor

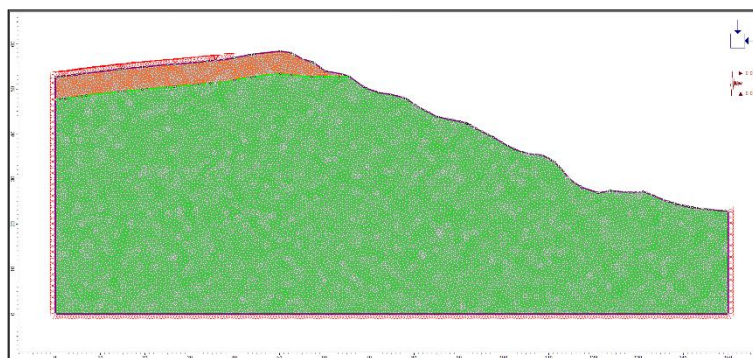
Untuk menentukan nilai ambang batas, digunakan nilai *Lower Control Limit* (LCL), *Upper Control Limit* (UCL) dan *critical value* yang dihitung berdasarkan rata-rata nilai kecepatan pergerakan lereng pada bulan Januari 2023. Adapun ambang batas pada longsor 18 Januari 2023 dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 6. Ambang Batas Kecepatan Longsor Pada 18 Januari 2023

Kejadian Longsor	LCL (Waspada – Hijau)	UCL (Waspada – Kuning)	critical value (Awas)
18 Januari 2023	-0,73 mm/jam	4,73 mm/jam	18,63 mm/jam

c. Analisis Deformasi Longsor Highwall (Sayatan D-D')

Hasil analisis deformasi lereng, didapatkan bahwa deformasi maksimum lereng saat mengalami keruntuhan adalah sebesar 6,23 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan $SRF = 1,43$.



Gambar 7. Geometri Lereng Highwall Januari 2023

Studi Kasus Longsor Lowwall 18 September 2022

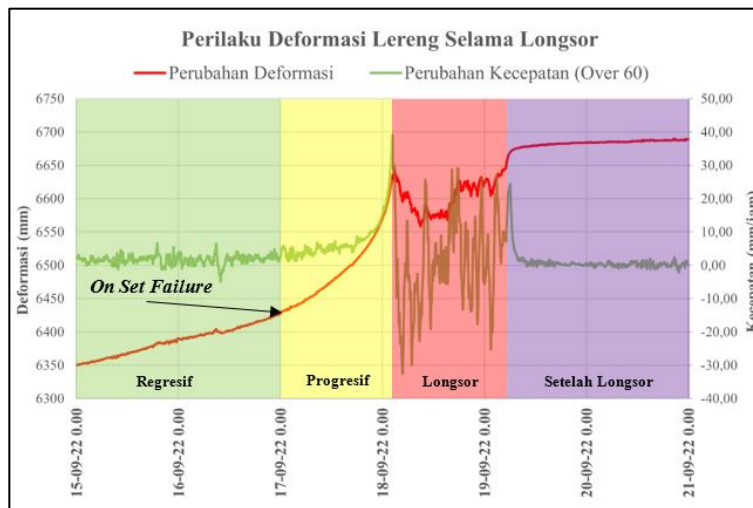
Dari analisis data pemantauan lereng yang dilakukan oleh SSR pada bulan September tahun 2022, didapatkan bahwa kejadian longsor terjadi pada tanggal 18 September. Terdapat peningkatan kecepatan deformasi pada lereng yang mengalami longsor, dengan analisis yang difokuskan pada piksel yang berada pada koordinat $X=71$ dan $Y=21$ serta memiliki luas area sebesar $8,58 \times 8,64$ meter. Piksel ini dijadikan sebagai titik referensi untuk memahami perilaku deformasi lereng.

a. Perilaku Deformasi Lereng Selama Terjadi Longsor

Hasil analisis deformasi lereng selama periode 6 hari, teridentifikasi bahwa terjadi kondisi regresif mulai dari tanggal 15 September pukul 00:06 hingga 17 September pukul 00:18. Selanjutnya, kondisi progresif tercatat mulai tanggal 17 September pukul 00:18 hingga 18 September pukul 02:20. Pada rentang waktu 18 September pukul 02:20 hingga 19 September pukul 09:48, terjadi kondisi longsor. Terakhir, dari tanggal 19 September pukul 09:48 hingga 20 September pukul 23:56 teramati kondisi setelah longsor. Ringkasan lama waktu terjadi kondisi tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 7. Ringkasan Perilaku Lereng Selama Periode Enam Hari

Perilaku Lereng	Rentang Waktu	Kecepatan Maksimum	Rata-Rata Kecepatan
Regresif	48 jam 12 menit	6,61 mm/jam	1,85 mm/jam
Progresif	26 jam 2 menit	38,87 mm/jam	7,45 mm/jam
Longsor	31 jam 28 menit	29,80 mm/jam	10,42 mm/jam
Setelah Longsor	38 jam 8 menit	2,42 mm/jam	0,52 mm/jam



Gambar 8. Grafik Peningkatan Kecepatan Pada Kondisi Longsor

b. Penetapan Ambang Batas Kecepatan Longsor

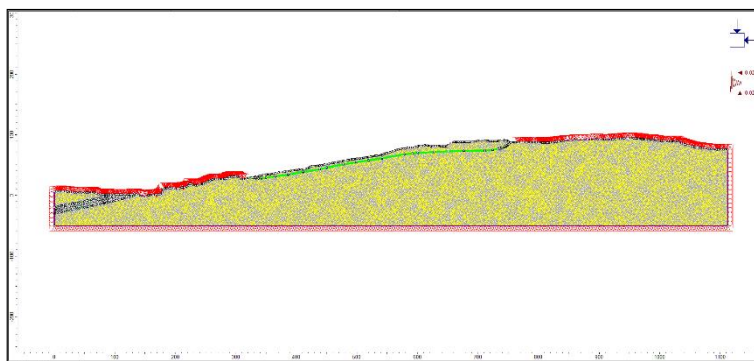
Untuk menentukan nilai ambang batas, digunakan nilai *Lower Control Limit* (LCL), *Upper Control Limit* (UCL) dan *critical value* yang dihitung berdasarkan rata-rata nilai kecepatan pergerakan lereng pada bulan September 2022. Adapun ambang batas pada longsor 18 September 2022 dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 8. Ambang Batas Kecepatan Longsor Pada 18 September 2022

Kejadian Longsor	LCL (Waspada – Hijau)	UCL (Waspada – Kuning)	critical value (Awat)
18 September 2022	-0,33 mm/jam	3,86 mm/jam	20,83 mm/jam

c. Analisis Deformasi Longsor Lowwall (Sayatan E-E')

Hasil analisis deformasi lereng, didapatkan bahwa deformasi maksimum lereng saat mengalami keruntuhan adalah sebesar 25,33 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan SRF = 0,03.



Gambar 9. Geometri Lereng Lowwall September 2022

Studi Kasus Longsor Lowwall 15 Januari 2023

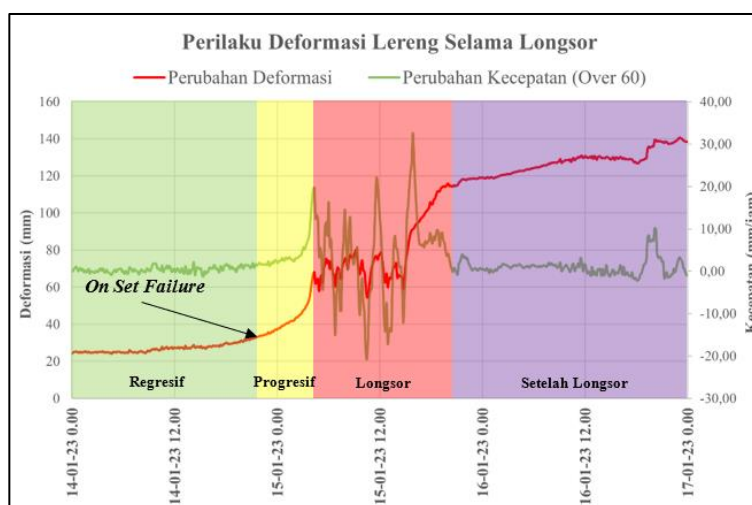
Dari analisis data pemantauan lereng yang dilakukan oleh SSR pada bulan Januari tahun 2023, didapatkan bahwa kejadian longsor terjadi pada tanggal 15 Januari 2023. Terdapat peningkatan kecepatan deformasi pada lereng yang mengalami longsor, dengan analisis yang difokuskan pada piksel yang berada pada koordinat X=89 dan Y=23 serta memiliki luas area sebesar 7,65 x 7,72 meter. Piksel ini dijadikan sebagai titik referensi untuk memahami perilaku deformasi lereng.

a. Perilaku Deformasi Lereng Selama Terjadi Longsor

Hasil analisis deformasi lereng selama periode 3 hari, teridentifikasi bahwa terjadi kondisi regresif mulai dari tanggal 14 Januari pukul 00:03 hingga pukul 21:24. Selanjutnya, kondisi progresif tercatat mulai tanggal 14 Januari pukul 21:24 hingga 15 Januari pukul 04:19. Pada rentang waktu 15 Januari pukul 04:19 hingga pukul 20:14, terjadi kondisi longsor. Terakhir, dari tanggal 15 Januari pukul 20:14 hingga 16 Januari pukul 23:53 teramati kondisi setelah longsor. Ringkasan lama waktu terjadi kondisi tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 9. Ringkasan Perilaku Lereng Selama Periode Tiga Hari

Perilaku Lereng	Rentang Waktu	Kecepatan Maksimum	Rata-Rata Kecepatan
Regresif	21 jam 21 menit	2,08 mm/jam	0,61 mm/jam
Progresif	6 jam 55 menit	19,68 mm/jam	4,17 mm/jam
Longsor	15 jam 55 menit	32,54 mm/jam	8,77 mm/jam
Setelah Longsor	27 jam 39 menit	10,13 mm/jam	1,42 mm/jam



Gambar 10. Grafik Peningkatan Kecepatan Pada Kondisi Longsor

b. Penetapan Ambang Batas Kecepatan Longsor

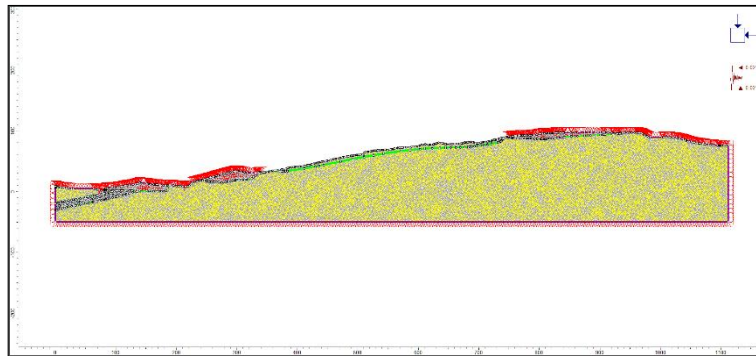
Untuk menentukan nilai ambang batas, digunakan nilai *Lower Control Limit* (LCL), *Upper Control Limit* (UCL) dan *critical value* yang dihitung berdasarkan rata-rata nilai kecepatan pergerakan lereng pada bulan Januari 2023. Adapun ambang batas pada longsor 15 Januari 2023 dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 10. Ambang Batas Kecepatan Longsor Pada 15 Januari 2023

Kejadian Longsor	LCL (Waspada – Hijau)	UCL (Waspada – Kuning)	critical value (Awas)
15 Januari 2023	-0,24 mm/jam	2,63 mm/jam	18,47 mm/jam

c. Analisis Deformasi Longsor Lowwall (Sayatan F-F’)

Hasil analisis deformasi lereng, didapatkan bahwa deformasi maksimum lereng saat mengalami keruntuhan adalah sebesar 25,26 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan SRF = 0,03.



Gambar 11. Geometri Lereng Lowwall Januari 2023

Studi Kasus Longsor Lowwall 6 Februari 2023

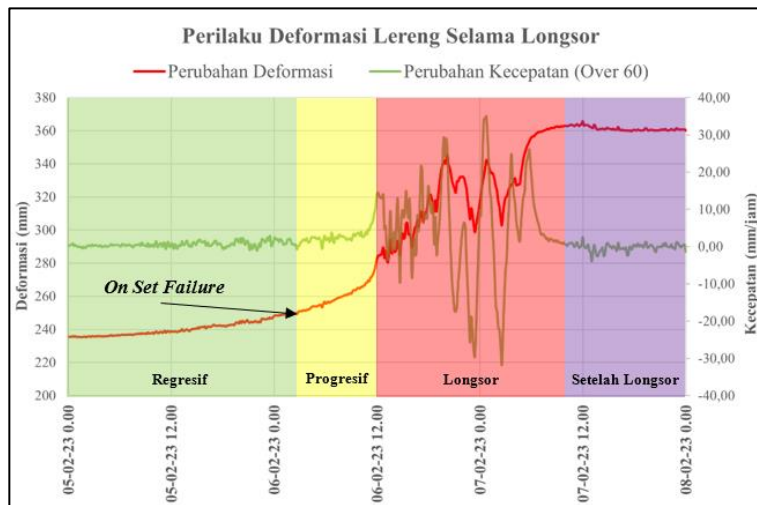
Dari analisis data pemantauan lereng yang dilakukan oleh SSR pada bulan Februari tahun 2023, didapatkan bahwa kejadian longsor terjadi pada tanggal 6 Februari 2023. Terdapat peningkatan kecepatan deformasi pada lereng yang mengalami longsor, dengan analisis yang difokuskan pada piksel yang berada pada koordinat X=78 dan Y=26 serta memiliki luas area sebesar 8,78 x 8,86 meter. Piksel ini dijadikan sebagai titik referensi untuk memahami perilaku deformasi lereng.

a. Perilaku Deformasi Lereng Selama Terjadi Longsor

Hasil analisis deformasi lereng selama periode 3 hari, teridentifikasi bahwa terjadi kondisi regresif mulai dari tanggal 5 Februari pukul 00:03 hingga 6 Februari pukul 03:05. Selanjutnya, kondisi progresif tercatat mulai tanggal 6 Februari pukul 03:05 hingga pukul 12:05. Pada rentang waktu 6 Februari pukul 12:05 hingga 7 Februari pukul 09:44, terjadi kondisi longsor. Terakhir, pada tanggal 7 Februari pukul 09:44 hingga pukul 23:59 teramati kondisi setelah longsor. Ringkasan lama waktu terjadi kondisi tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 11. Ringkasan Perilaku Lereng Selama Periode Tiga Hari

Perilaku Lereng	Rentang Waktu	Kecepatan Maksimum	Rata-Rata Kecepatan
Regresif	27 jam 2 menit	2,85 mm/jam	0,70 mm/jam
Progresif	9 jam 0 menit	14,50 mm/jam	3,18 mm/jam
Longsor	21 jam 39 menit	34,92 mm/jam	11,06 mm/jam
Setelah Longsor	14 jam 15 menit	2,52 mm/jam	0,68 mm/jam



Gambar 12. Grafik Peningkatan Kecepatan Pada Kondisi Longsor

b. Penetapan Ambang Batas Kecepatan Longsor

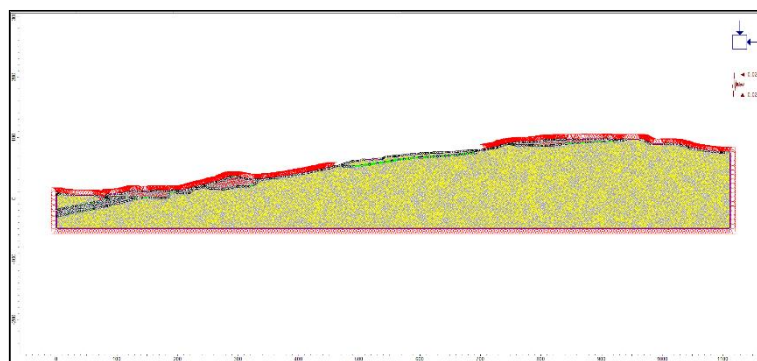
Untuk menentukan nilai ambang batas, digunakan nilai *Lower Control Limit* (LCL), *Upper Control Limit* (UCL) dan *critical value* yang dihitung berdasarkan rata-rata nilai kecepatan pergerakan lereng pada bulan Februari 2023. Adapun ambang batas pada longsor 6 Februari 2023 dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 12. Ambang Batas Kecepatan Longsor Pada 6 Februari 2023

Kejadian Longsor	LCL (Waspada – Hijau)	UCL (Waspada – Kuning)	critical value (Awat)
6 Februari 2023	-0,39 mm/jam	2,56 mm/jam	16,50 mm/jam

c. Analisis Deformasi Longsor Lowwall (Sayatan G-G')

Hasil analisis deformasi lereng, didapatkan bahwa deformasi maksimum lereng saat mengalami keruntuhan adalah sebesar 18,93 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan $SRF = 0,03$.



Gambar 13. Geometri Lereng Lowwall Februari 2023

KESIMPULAN DAN SARAN

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada perilaku deformasi lereng selama terjadinya longsor, ditemukan bahwa perilaku deformasi sebelum longsor terklasifikasi dalam kondisi regresif, progresif, dan tahap longsor itu sendiri. Sementara itu, perilaku deformasi setelah longsor diklasifikasikan sebagai kondisi pasca-longsor. Pada *highwall* didapatkan bahwa kondisi regresif memiliki rata-rata kecepatan maksimum sebesar 10,94 mm/jam dengan rata-rata rentang waktu sebesar 36 jam 35 menit. Kondisi progresif memiliki rata-rata kecepatan maksimum sebesar 27,18 mm/jam dengan rata-rata rentang waktu sebesar 4 jam 15 menit. Kondisi longsor memiliki rata-rata kecepatan maksimum sebesar 26,13 mm/jam dengan rata-rata rentang waktu sebesar 5 jam 53 menit. Kondisi setelah longsor memiliki rata-rata kecepatan maksimum sebesar 19,85 mm/jam dengan rata-rata rentang waktu sebesar 31 jam 11 menit. Pada *lowwall* didapatkan bahwa kondisi regresif memiliki rata-rata kecepatan maksimum sebesar 3,85 mm/jam dengan rata-rata rentang waktu sebesar 32 jam 11 menit. Kondisi progresif memiliki rata-rata kecepatan maksimum sebesar 24,35 mm/jam dengan rata-rata rentang waktu sebesar 13 jam 59 menit. Kondisi longsor memiliki rata-rata kecepatan maksimum sebesar 32,42 mm/jam dengan rata-rata rentang waktu sebesar 23 jam 00 menit. Kondisi setelah longsor memiliki rata-rata kecepatan maksimum sebesar 5,02 mm/jam dengan rata-rata rentang waktu sebesar 26 jam 40 menit.
2. Untuk menentukan nilai ambang batas, digunakan nilai *Lower Control Limit* (LCL), *Upper Control Limit* (UCL) dan *critical value* yang dihitung berdasarkan rata-rata nilai kecepatan pergerakan lereng selama satu bulan. Pada *highwall* rata-rata nilai ambang batas kecepatan pergerakan lereng dengan nilai LCL sebesar -0,65 mm/jam, nilai UCL sebesar 4,45 mm/jam dan *critical value* sebesar 18,23 mm/jam. Pada *lowwall* rata-rata nilai ambang batas kecepatan pergerakan lereng dengan nilai LCL sebesar -0,32 mm/jam, nilai UCL sebesar 3,02 mm/jam dan *critical value* sebesar 18,60 mm/jam.
3. Hasil analisis deformasi lereng pada *highwall* didapatkan rata-rata deformasi maksimum lereng saat mengalami keruntuhan adalah sebesar 10,63 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan $SRF = 1,07$. Sementara itu, pada *lowwall* didapatkan rata-rata deformasi maksimum lereng saat mengalami keruntuhan adalah sebesar 23,17 meter dengan penurunan kekuatan massa batuan $SRF = 0,03$.

Adapun saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan piksel yang baik pada area longsor akan menghasilkan grafik yang baik. Penggunaan piksel yang lebih dari satu akan menyebabkan bentuk grafik yang berbeda pada setiap area, sehingga penggunaan satu piksel lebih baik daripada lebih dari satu. Grafik dengan satu piksel akan menghasilkan bentuk kurva yang melengkung secara vertikal sehingga lebih baik untuk mengidentifikasi Grafik sebelum terjadi longsor serta menghasilkan nilai *inverse velocity* yang lebih akurat
2. Melakukan perbaikan geometri lereng aktual agar sesuai dengan kajian rekomendasi yang telah ada guna menjaga stabilitas lereng. Melakukan pengendalian air permukaan guna mencegah terjadinya erosi dengan membuat paritan untuk mengarahkan aliran air pada lereng. Melakukan pengendalian air bawah permukaan dengan memasang piezometer.
3. Perlu mempertimbangkan analisis kestabilan lereng yang lain seperti menggunakan analisis kriteria keruntuhan lereng Hoek and Brown selain dari parameter Mohr-Coloumb agar dapat menghasilkan desain lereng yang lebih tepat dan dapat dibandingkan antara kedua parameter tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arif, I. (2021). *Geoteknik Tambang*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- [2] Aziz, S., Simamora, C. N., Supriharta, I. W., & Anggana, R. P. (2020). Optimasi Penambangan Batubara Menggunakan Kontrol Slope Stability Radar Di Pit C1 Blok 8 Binungan Mine Operation Area 2 PT Berau Coal. *Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI*, 1(1), 533-554. <https://doi.org/10.36986/ptptp.v1i1.95>
- [3] Cabrejo Lievano, A. G. (2022). A study on 2000+ slope failures in open pit mines detected with interferometric radars.
- [4] Dick, G.J., Eberhardt, E., Cabrejo-Liévano, A.G., Stead, D., dan Rose, D.N. (2015). *Development of an early-warning time-of-failure analysis methodology for open-pit mine slopes utilizing ground-based slope stability radar monitoring data*. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(4): 515-529. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0028>
- [5] Du, S., Feng, G., Wang, J., Feng, S.; Malekian, R. dan Li, Z. (2019). *A New Machine-Learning Prediction Model for Slope Deformation of an Open-Pit Mine: An Evaluation of Field Data*. *Energies*, **12**, 1288. <https://doi.org/10.3390/en12071288>
- [6] Fukuzono, T. (1985). New Method for Predicting the Failure Time of a Slope. In J. L. International Conference and Field Workshop on Landslides, *Proceedings of Fourth International Conference and Field Workshop on Landslides* (pp. 145-150). Tokyo, Japan: Japan Landslide Society.
- [7] Indriastuty, D., Fajar, Tappang, G dan Irsyad, A. (2021). Pemantauan Deformasi Lereng Tambang Terbuka Paska Peledakan Dengan Slope Stability Radar. *Indonesian Mining Professionals Journal*, 71-82.
- [8] Kumar, A., Rathee, R. (2017). Monitoring and evaluating of slope stability for setting out of critical limit at slope stability radar. *Geo-Engineering* **8**, 18. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0054-y>
- [9] Maulana, F.R., Wattimena, R.K. dan Sulistianto, B. (2023). *Integrated D-InSAR and Ground-based Radar for Open Pit Slope Stability Monitoring and Implications for Rock Mass Young's Modulus Reduction*. *Journal of Engineering and Technological Science*, **55** (3), 247-260.
- [10] 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*. University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.
- [11] Nunoo, S., Tannant, D. D., & Newcomen, H. W. (2015). Slope monitoring practices at open pit porphyry mines in British Columbia, Canada. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, **30**(3), 245–256. <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1038865>
- [12] Sharon, R., dan Eberhardt, E. (Eds.). (2020). *Guidelines for Slope Performance Monitoring*. CSIRO PUBLISHING.
- [13] Yi-hai, Z., Hai-tao, M., & Zheng-xing, Y. (2021). *Application Of The Method For Prediction Of The Failure Location And Time Based On Monitoring Of A Slope Using Synthetic Aperture Radar*. *Environmental Earth Sciences*, **80**(21) doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-021-09989-6>