

PREDIKSI WAKTU LONGSOR MENGGUNAKAN METODE INVERSE VELOCITY PADA AREA TAMBANG EMAS, HAURAKI DISTRICT, SELANDIA BARU

Luqman Faza Asfary^{1),*}, Ahmad Amiruddin²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman,

²⁾ PT GroundProbe Indonesia

E-mail: luqmanfazaasfary@gmail.com

ABSTRAK

Longsor adalah pergerakan massa tanah, batuan, atau bahan lain yang turun di bawah lereng karena gaya gravitasi. Fenomena ini sering terjadi di wilayah pegunungan atau lereng yang curam, dan merupakan salah satu bencana alam yang dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan dan mengancam kehidupan. Prediksi waktu terjadinya longsor sangat sulit dilakukan karena banyaknya faktor yang saling berpengaruh, seperti cuaca, kondisi tanah, dan aktivitas manusia. Namun, dengan perkembangan teknologi saat ini, upaya untuk memprediksi longsor semakin berkembang. Pemodelan geoteknik dapat memberikan prediksi tentang kemungkinan terjadinya longsor berdasarkan parameter seperti jenis tanah, kemiringan lereng, dan kadar air tanah. Analisis deformasi adalah bagian penting dari prediksi waktu longsor. Pergerakan tanah dapat dideteksi dengan presisi tinggi menggunakan teknologi Radar yaitu RAR (Real Aperture Radar) yang menggunakan gelombang radio yang dipancarkan ke arah lereng dan mendapatkan pantulan balik yang berisi nilai deformasi. Sehingga faktor utama dalam penyebab longsor tersebut yaitu hujan yang mempengaruhi zona lemah pada lereng yang terbentuk akibat pengaruh alterasi hidrotermal, serta kemungkinan dari desain lereng yang tidak baik/tidak sesuai.

Kata Kunci: Prediksi Longsor, Deformasi, Inverse Velocity

ABSTRACT

Landslides are the movement of masses of soil, rock, or other materials that descend a slope due to gravitational forces. This phenomenon often occurs in mountainous areas or steep slopes, and is one of the natural disasters that can cause significant damage and threaten lives. Predicting the timing of landslides is very difficult due to the many interrelated factors, such as weather, soil conditions, and human activities. However, with the current advancements in technology, efforts to predict landslides are becoming more sophisticated. Geotechnical modeling can provide predictions about the likelihood of landslides based on parameters such as soil type, slope gradient, and groundwater content. Deformation analysis is an important part of predicting landslide timing. Ground movement can be detected with high precision using Radar technology, which is RAR (Real Aperture Radar) these technologies use radio waves emitted towards the slope and capture the backscatter that contains deformation values. Thus, the main factor causing the landslide is the rain, which affects the weak zones on the slope formed by hydrothermal alteration, as well as the possibility of poor or inappropriate slope design.

Keyword: Prediksi Waktu Longsor, Deformation, Inverse Velocity

1. Pendahuluan

Longsor adalah pergerakan massa tanah, batuan, atau bahan lain yang turun di bawah lereng karena gaya gravitasi. Fenomena ini sering terjadi di wilayah pegunungan atau lereng yang curam, dan merupakan salah satu bencana alam yang dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan dan mengancam kehidupan. Dengan topografinya yang berbukit dan bergunung, longsor cukup sering terjadi di daerah yang memiliki iklim yang ekstrim seperti curah hujan yang tinggi, kondisi geologi yang tidak stabil, dan aktivitas manusia seperti pembalakan hutan dan pembangunan infrastruktur.

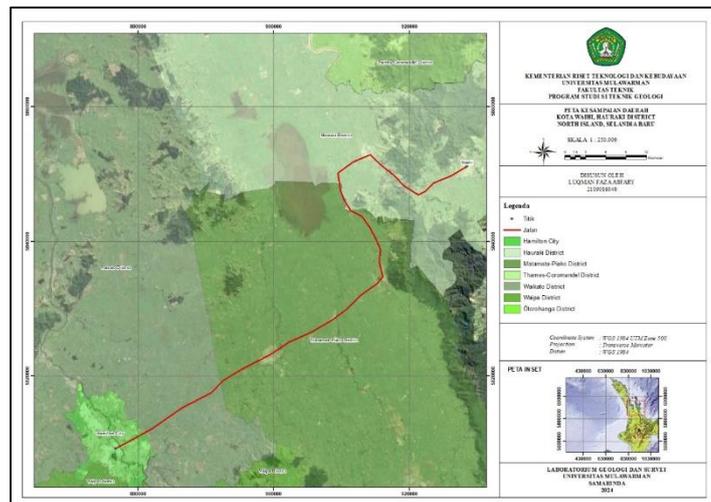
Prediksi waktu terjadinya longsor sangat sulit dilakukan karena banyaknya faktor yang saling berpengaruh, seperti cuaca, kondisi tanah, dan aktivitas manusia. Namun, dengan perkembangan teknologi saat ini, upaya

untuk memprediksi longsor semakin berkembang. Pemodelan geoteknik dapat memberikan prediksi tentang kemungkinan terjadinya longsor berdasarkan parameter seperti jenis tanah, kemiringan lereng, dan kadar air tanah. Teknik baru untuk mengawasi deformasi tanah juga muncul. Selain itu, pemantauan area rawan longsor dengan akurasi yang lebih tinggi dapat dilakukan dengan menggunakan citra satelit dan teknologi LIDAR atau Radar.

Analisis deformasi adalah bagian penting dari prediksi waktu longsor. Pergerakan tanah dapat dideteksi dengan presisi tinggi menggunakan teknologi Radar yang terbagi menjadi dua yaitu RAR (Real Aperture Radar) dan SAR (Synthetic Aperture Radar) yang menggunakan gelombang radio yang dipancarkan ke arah lereng dan mendapatkan pantulan balik yang berisi nilai deformasi. Untuk memprediksi kapan kondisi tanah mencapai titik kegagalan yang menyebabkan longsor, pemodelan stabilitas lereng, yang biasanya dilakukan dengan metode numerik seperti metode inverse velocity, membantu. Faktor geologi, seperti jenis tanah atau batuan yang ada di lereng juga turut mempengaruhi tingkat deformasi tanah.

Menurut Fukuzono (1985) menerbitkan makalah berjudul “Metode baru untuk memprediksi waktu kegagalan lereng” pada Konferensi Internasional dan Lokakarya Lapangan ke-4 tentang Tanah Longsor di Tokyo. Dalam makalah ini, penulis menyajikan ekspresi matematis untuk memperkirakan waktu runtuhnya massa tanah di bawah kondisi laboratorium yang dikendalikan dan mensimulasikan hujan. Metode ini (digunakan di sebagian besar lokasi tambang) digunakan untuk mengekstrapolasi linier tren data saat ini hingga proyeksi tersebut memotong sumbu horizontal waktu. Semua operasi dan tindakan evakuasi diatur berdasarkan tanggal dan waktu yang ditetapkan oleh persimpangan tersebut, yang menentukan waktu prediksi runtuhnya dinding.

Secara administratif lokasi penelitian ini berlokasi di Hauraki District, Coromandel Peninsula, Selandia Baru. Lokasi penelitian ini dapat ditempuh dengan menggunakan kendaraan roda dua maupun roda empat, estimasi waktu perjalanan dari Kota Hamilton menuju lokasi penelitian ± 1 jam 20 menit. Peta Kesampaian Daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (Sumber Data: Basemap Citra Satelit ArcGIS)

2. Metode Penelitian

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan laptop dan juga radar dengan perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah Monitor IQ. Dengan data primer berupa data radar dengan jenis Radar *Real Aperture Radar* (RAR) dengan seri SSR-XT yang berlokasi pada Hauraki District tepatnya di Waihi Goldmine.

Tahapan pendahuluan merupakan tahap yang dilakukan dalam persiapan sebelum melakukan pengambilan data primer. Tahapan pendahuluan terdiri studi literatur yang dilakukan untuk memahami serta mengidentifikasi mengenai lokasi yang akan diteliti dengan proses mengumpulkan dan menganalisis dari berbagai sumber yang relevan dengan topik penelitian seperti buku, laporan penelitian, artikel, dan jurnal. Kemudian penentuan metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode *Inverse Velocity*. Metode ini digunakan untuk mengekstrapolasi linier tren data saat ini hingga proyeksi tersebut memotong sumbu horizontal waktu. Semua operasi dan tindakan evakuasi diatur berdasarkan tanggal dan waktu yang ditetapkan oleh persimpangan tersebut, yang menentukan waktu prediksi runtuhnya dinding. Lalu perumusan masalah dimana

tahapan dalam perumusan masalah ini dilakukan untuk memahami dan mengidentifikasi masalah serta analisis literatur. Tujuan dari tahap ini adalah untuk memastikan bahwa masalah yang diteliti relevan, penting dan dapat dipecahkan dengan penelitian. Serta penentuan area penelitian dilakukan dengan mencari site yang sudah mengalami longsor dan mencari lereng yang berpotensi mengalami kegagalan kesatbilan lereng/longsor pada lokasi penelitian agar dapat mengantisipasi kejadian tersebut di masa mendatang.

Tahapan pengumpulan data adalah proses penting dalam penelitian atau analisis yang melibatkan pengumpulan informasi yang relevan dan berkaitan dengan topik atau tujuan penelitian. Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini berupa data lapangan (data primer), tahapan-tahapan tersebut akan dijelaskan sebagaimana berikut. Data primer adalah data yang dikumpulkan langsung dari lapangan dengan melakukan penelitian secara langsung dengan objek yang diteliti. Adapun data primer yang dikumpulkan dalam penelitian kali ini yaitu data akuisisi radar.

Tahapan pengolahan dan analisis data radar yaitu dengan pemeriksaan parameter kualitas data, analisis balik longsor, analisis deformasi. Setelah masing-masing pemeriksaan telah dilakukan maka dilanjutkan dengan pengolahan data. Berikut merupakan langkah-langkah pengujian yang dilakukan:

a. Parameter Kualitas Data

Parameter Kualitas Data dimulai dengan pemeriksaan kesehatan sistem yang dimana jarak, elevasi, dan sebagainya sudah sesuai dengan radar yang digunakan. Kemudian pemeriksaan area pemindaian apakah radar memiliki pantulan balik yang baik dari lereng, kualitas fotografi dipastikan baik dan tidak terhalang ataupun rusak, masking dalam lereng yang membatasi area yang tidak dilakukan pemantauan seperti langit dan area aktif yang sedang ditambang, sistem alarm tidak ada namun jika ada maka dipastikan tidak mudah untuk ke trigger oleh deformasi yang terjadi.

b. Analisis Balik Longsor

Analisis Balik Longsor dipergunakan sebagai acuan dalam prediksi waktu longsor untuk mengetahui waktu aktual terjadinya longsor. Dengan mengetahui karakteristik longsor seperti waktu longsor, waktu menuju longsor dari tren progresif menuju longsor, jumlah piksel tren progresif yang mencakup area lereng, nilai deformasi maksimum, nilai kecepatan maksimum jendela waktu 1 jam, nilai minimum kecepatan balik jendela waktu 1 jam, perilaku lereng, dan luas yang diperkirakan.

c. Analisis Deformasi

Analisis deformasi yang dilakukan untuk menentukan pergerakan asli atau tidak (vegetasi, pergerakan alat, kabel, dan sebagainya) yang berhubungan dengan prediksi waktu longsor, tiap pergerakan akan mencakup dari lereng dengan berupa piksel yang berubah berdasarkan kondisi lereng. Berdasarkan analisis deformasi pada lereng dapat dipastikan bahwa pergerakan deformasi berupa deformasi asli sehingga dapat dilakukan tahap selanjutnya.

d. Tahapan pengolahan dan analisis prediksi waktu longsor berdasarkan analisis data radar, berdasarkan acuan dari analisis balik longsor untuk mendapatkan waktu aktual longsor dengan dua (2) waktu longsor yang berbeda maka dapat dilakukan prediksi waktu longsor dengan inverse velocity yang menggunakan jendela waktu yang berbeda yaitu VCP 60 menit/1 jam, VCP 180 menit/3 jam, VCP 360 menit/6 jam, dan VCP 720 menit/12 jam yang akan menghasilkan prediksi waktu longsor yang berbeda-beda sehingga dapat mengetahui perbandingan serta keefektifan menggunakan metode inverse velocity dengan VCP yang berbeda-beda. Adapun VCP tertentu lebih akurat dikarenakan dalam pembacaan VCP yang lebih panjang radar akan membaca dalam jangka waktu yang panjang pula sehingga penarikan garis atau interpolasi nya akan semakin jauh dari waktu terjadi longsor, jendela waktu turut berpengaruh karena semakin dekat jendela waktu maka hasil prediksi juga semakin akurat, maka dari itu peruntukan prediksi waktu longsor lebih baik dipergunakan dalam monitoring secara live dibandingkan dengan arsip. Namun dalam penelitian ini dipergunakan dalam arsip karena menunjukkan keefektifan serta keakuratan monitoring serta prediksi menggunakan Radar. Adapun VCP tertentu lebih akurat dikarenakan dalam pembacaan VCP yang lebih panjang radar akan membaca dalam jangka waktu yang panjang pula sehingga penarikan garis atau interpolasi nya akan semakin jauh dari waktu terjadi longsor, jendela waktu turut berpengaruh karena semakin dekat jendela waktu maka hasil prediksi juga semakin akurat.

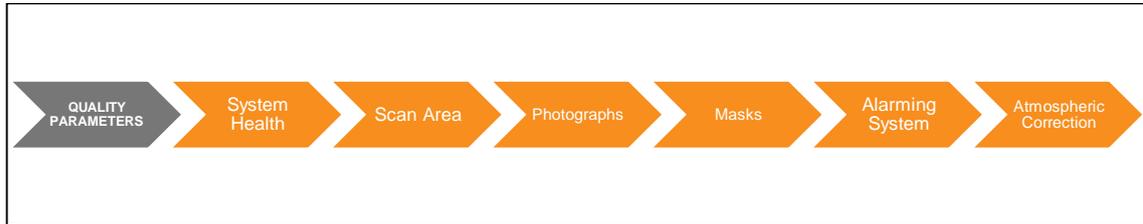


Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

A. Hasil

Dengan pemeriksaan parameter kualitas data terutama digunakan untuk folder dinding Live tetapi dapat digunakan untuk folder dinding Arsip dengan beberapa keterbatasan. Terdiri dari 6 Kualitas Data yang digunakan dalam satu area atau lebih, setiap area memiliki set deskripsi berdasarkan Parameter Kualitas Data.



Gambar 3. Bagan Parameter Kualitas Data

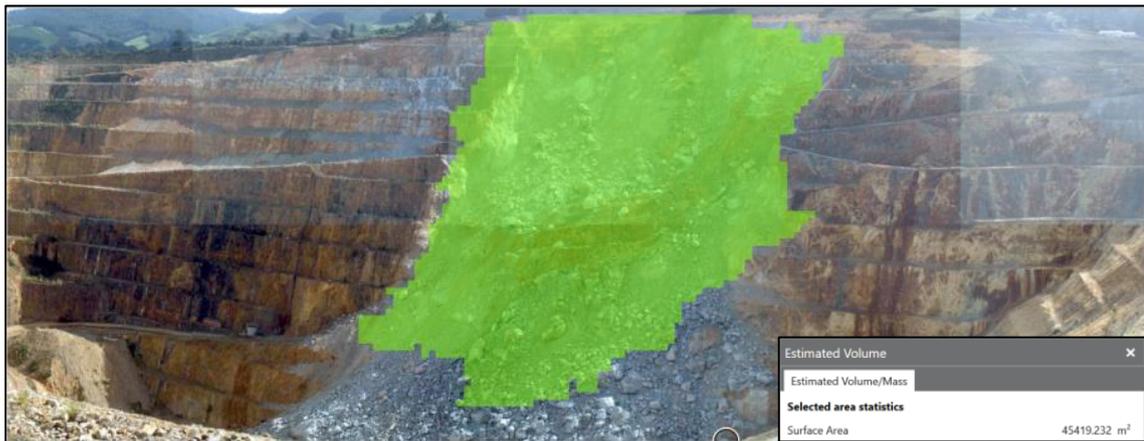
Tabel 1. Parameter Kualitas Data

Kualitas Parameter	Status	Catatan
Kesehatan Sistem	Optimal	Konfigurasi SSR (mode pemindaian, amplitudo sinyal, koherensi sinyal, dan algoritma koreksi deformasi) adalah optimal. Waktu pemindaian rata-rata saat ini adalah 10 menit.
Area Pemindaian	Optimal	Area pemindaian optimal. Namun, beberapa area dalam area pemindaian mengalami kehilangan vektor karena sudut dinding.
Kualitas Fotografi	Optimal	Kualitas foto dan penyalarsan kamera sangat baik. Sedikit kabur pada beberapa gambar.
Masking	Optimal	Enhanced Deformation Mask (EDM) diaplikasikan.
Sistem Alarm	N/A	Tidak ada alarm diaplikasikan pada lereng.
Koreksi Atmosfer	Optimal	Koreksi Atmosfer optimal.

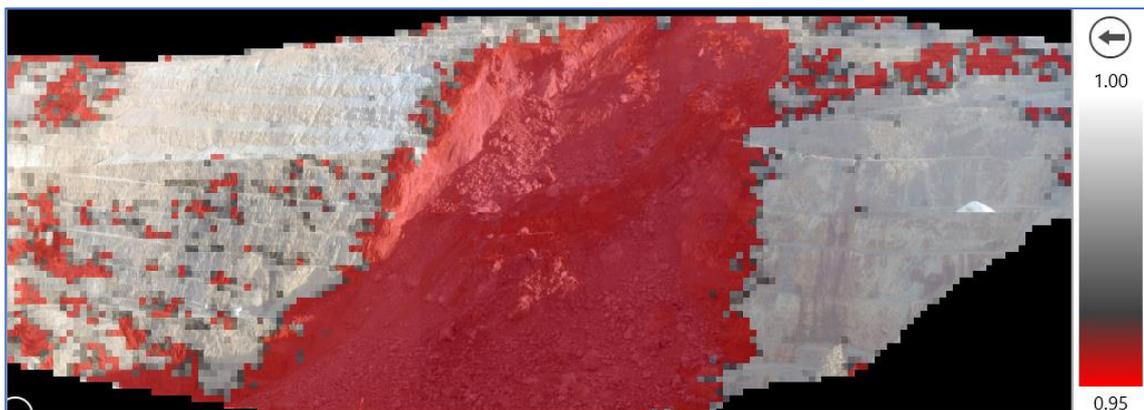
Kemudian dilakukannya Analisis balik longsor. Tujuan utama dari analisa balik longsor terhadap peristiwa longsor adalah untuk mengkarakterisasikannya dalam hal respons lereng batuan terhadap perilaku deformasi, kecepatan, dan kecepatan invers, sebagai referensi untuk konfigurasi alarm namun dalam hal ini digunakan untuk data acuan dan perbandingan serta selisih waktu longsor sebenarnya dengan prediksi waktu longsor. Pada longsor 1 dilakukan analisa balik longsor dengan karakteristik sebagai berikut:

Tabel 2. Analisis Balik Longsor 1

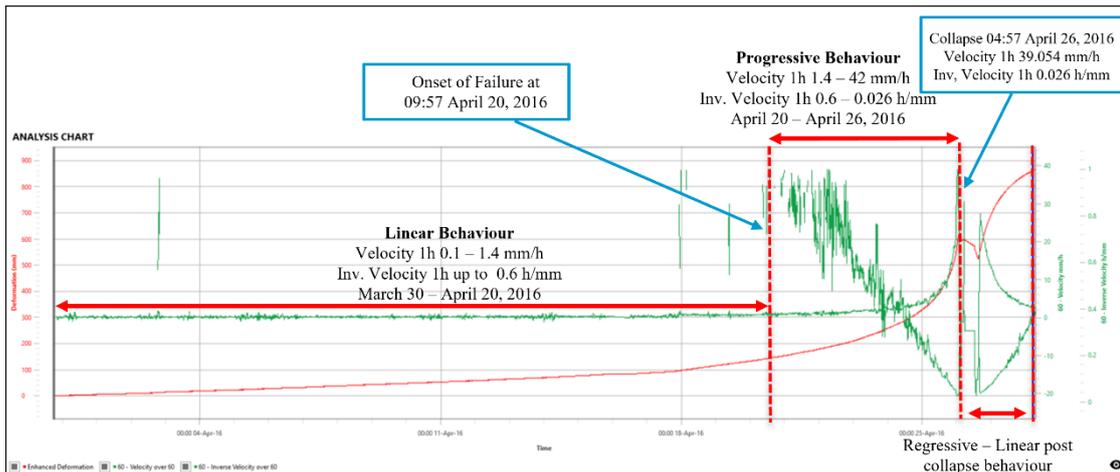
No	Karakteristik	Keterangan
1	Waktu longsor	04:57 April 26, 2016
2	Waktu menuju longsor (dari tren progresif menuju longsor)	diperkirakan 6 hari 7 jam menuju kejadian longsor.
3	Jumlah piksel tren progresif	sekitar 500 piksel
4	Deformasi maksimum	613.122 mm pada Piksel (93,34)
5	Kecepatan maksimum jendela waktu 1 jam	39.054 mm/jam (VCP60 menit)
6	Kecepatan balik minimum jendela waktu 1 jam	0.026 jam/mm
7	Perilaku lereng	Linear - Progresif – Pergerakan Cepat - Longsor – Regresif - Linear (paska longsor).
8	Luas yang diperkirakan	45419.232 m ²



Gambar 4. Piksel deformasi *overlay* dengan foto lereng



Gambar 5. *Coherence overlay* dengan foto lereng

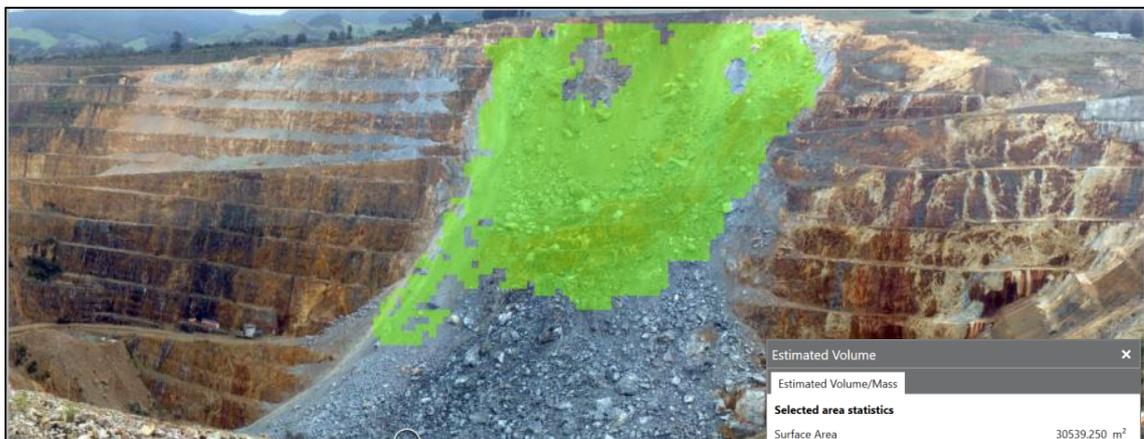


Gambar 6. Figur perilaku lereng dan waktu longsor aktual

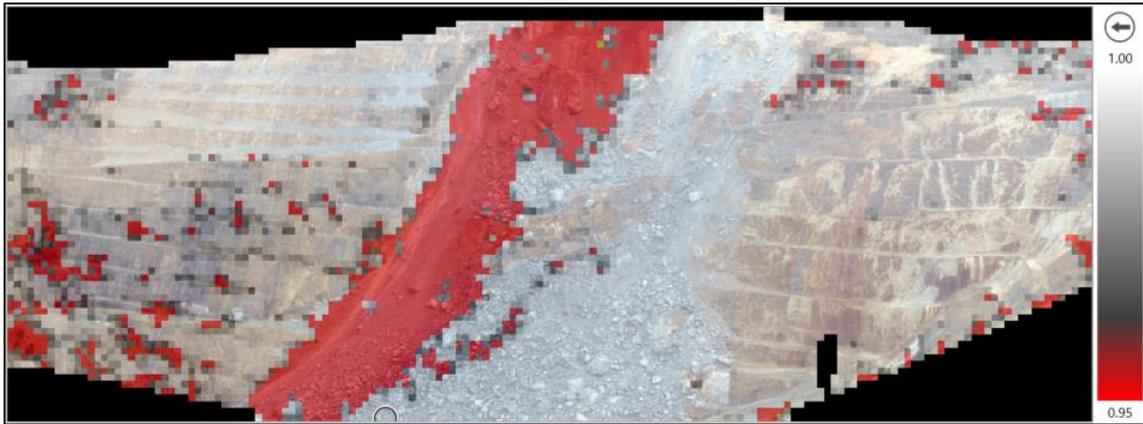
Pada longsor 2 dilakukan analisa balik longsor dengan karakteristik sebagai berikut:

Tabel 3. Analisis Balik Longsor 2

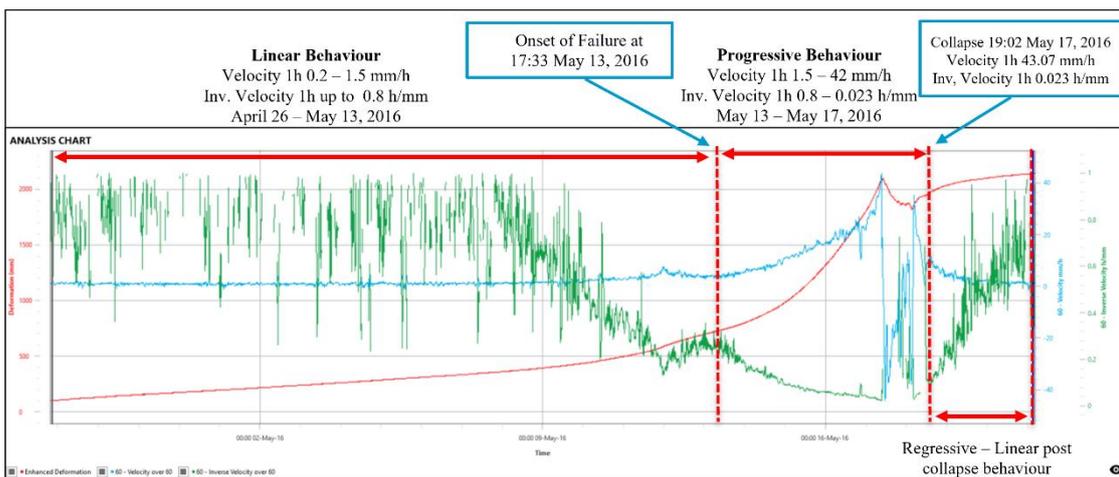
No	Karakteristik	Keterangan
1	Waktu longsor	19:02 Mei 17, 2016
2	Waktu menuju longsor (dari tren progresif menuju longsor)	diperkirakan 4 hari 1 jam and 29 menit menuju kejadian longsor.
3	Jumlah piksel tren progresif	sekitar 300 piksel
4	Deformasi maksimum	2098.151 mm pada Piksel (89,57)
5	Kecepatan maksimum jendela waktu 1 jam	43.07 mm/jam (VCP60 menit)
6	Kecepatan balik minimum jendela waktu 1 jam	0.023 jam/mm
7	Perilaku lereng	Linear - Progresif – Pergerakan Cepat – Longsor - Linear (paska longsor).
8	Luas yang diperkirakan	42598.663 m ²



Gambar 7. Piksel deformasi overlay dengan foto lereng



Gambar 8. Coherence overlay dengan foto lereng

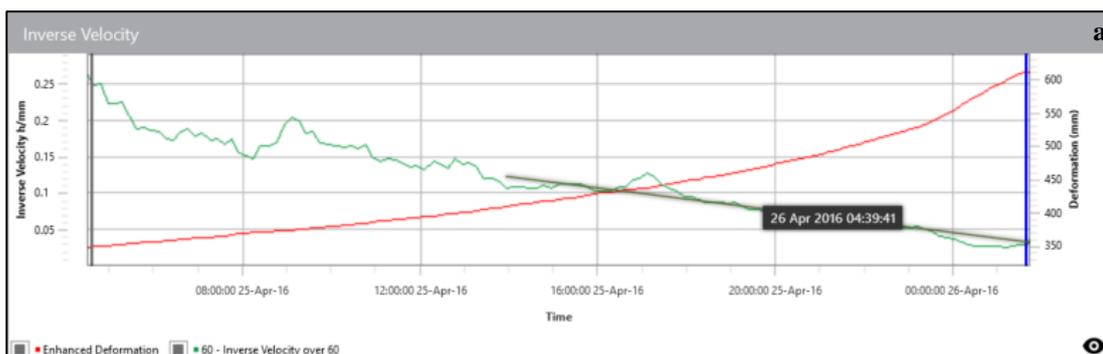


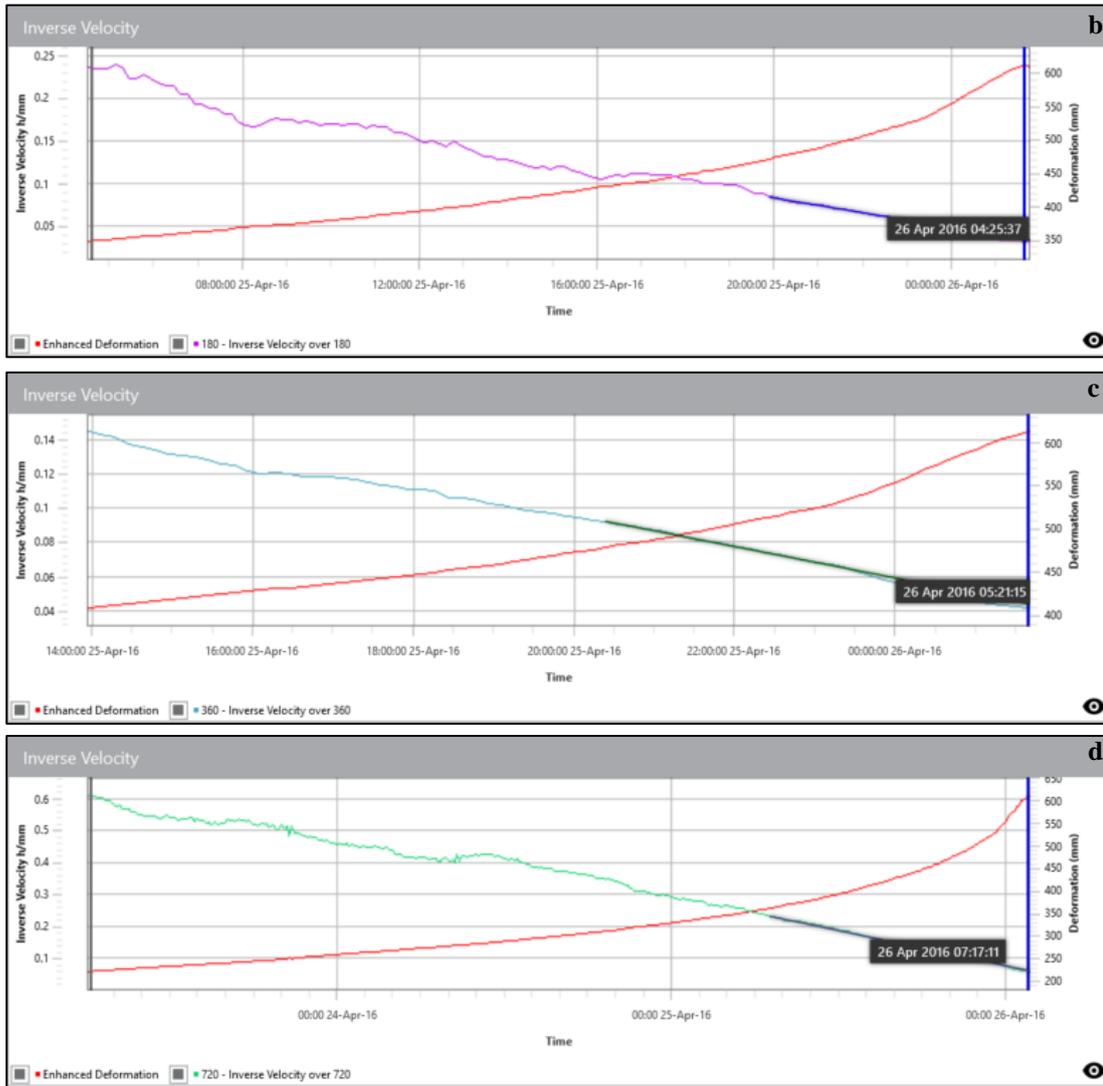
Gambar 9. Figur perilaku lereng dan waktu longsor aktual

Dalam prediksi waktu longsor dengan metode inverse velocity berdasarkan analisa balik longsor yang telah dibuat dengan adanya longsor pada dua (2) waktu berbeda dengan beberapa parameter yang telah diketahui. Prediksi waktu longsor dilakukan dengan menggunakan perbandingan antara 4 VCP yaitu VCP 60, VCP 180, VCP 360, VCP 720. Jendela waktu yang digunakan yaitu 3 jam, 6 jam, dan 9 jam sebelum waktu longsor.

Untuk menyaring noise dalam data radar, periode perhitungan kecepatan (VCP) sangat penting. Kegunaan dari VCP yaitu meningkatkan perkiraan longsor dan kecepatan invers. Serangkaian VCP yang berbeda harus digunakan dalam perangkat lunak pemantauan radar untuk mendeteksi berbagai proses deformasi yang sedang berlangsung yang mungkin tidak terlihat jelas untuk VCP tertentu. Sehingga bisa mendapatkan dan melihat VCP berapa yang paling akurat ataupun mendekati waktu longsor.

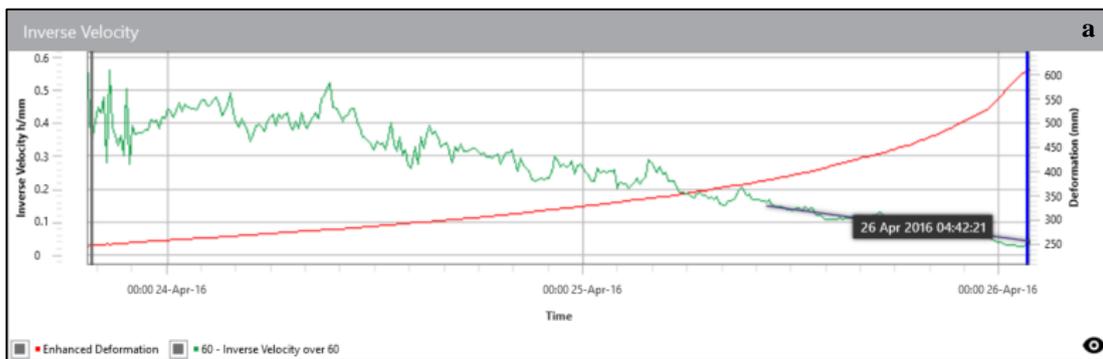
Prediksi waktu longsor 1 jendela waktu 3 jam. Dilakukan prediksi waktu longsor dengan jeda waktu 3 jam sebelum waktu longsor aktual dengan penggunaan beberapa vcp:

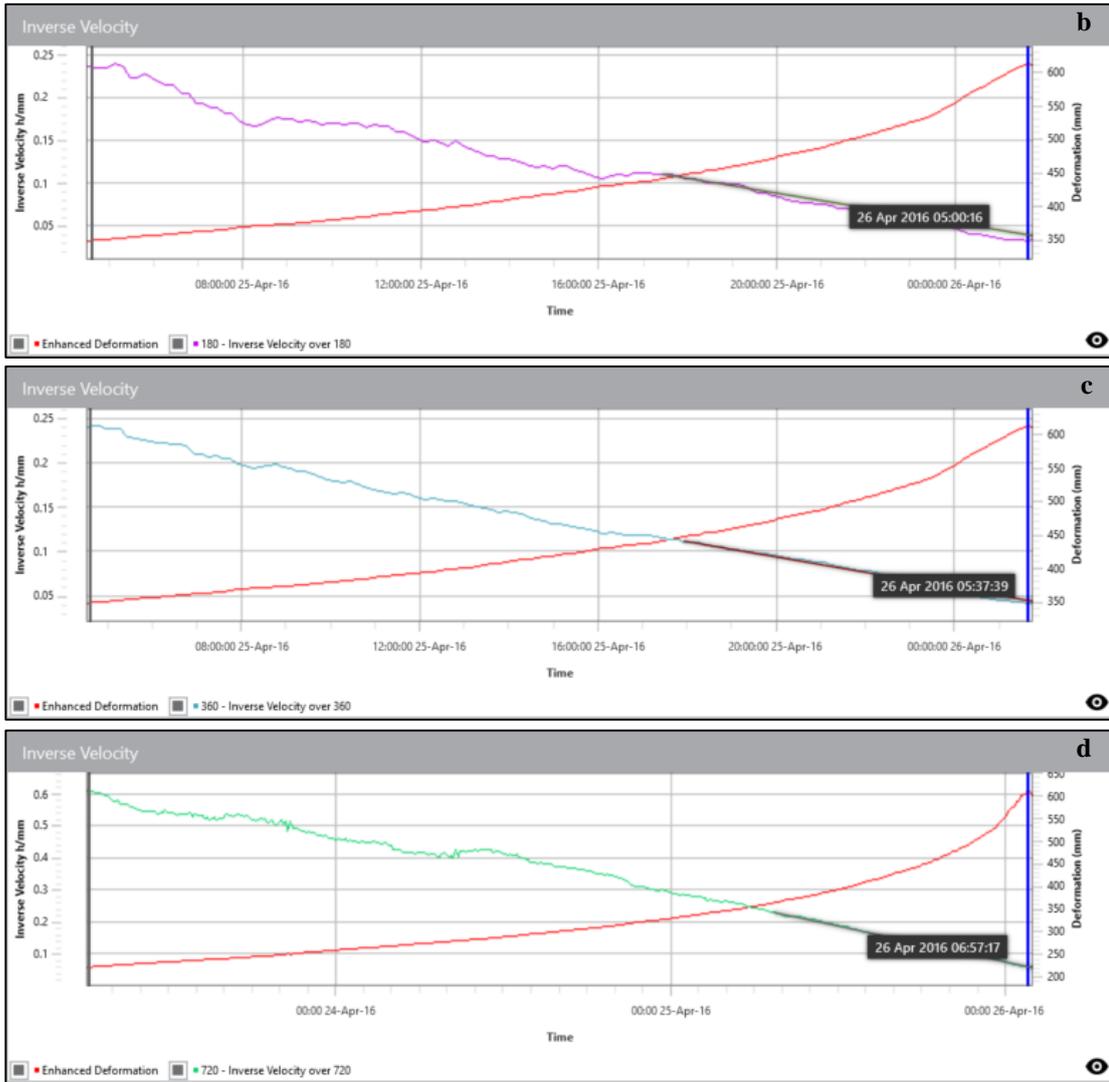




Gambar 10 Diagram Prediksi Waktu Longsor 1 Jendela Waktu 3 Jam (a) VCP 60, (b) VCP 180, (c) VCP 360, (d) VCP 720

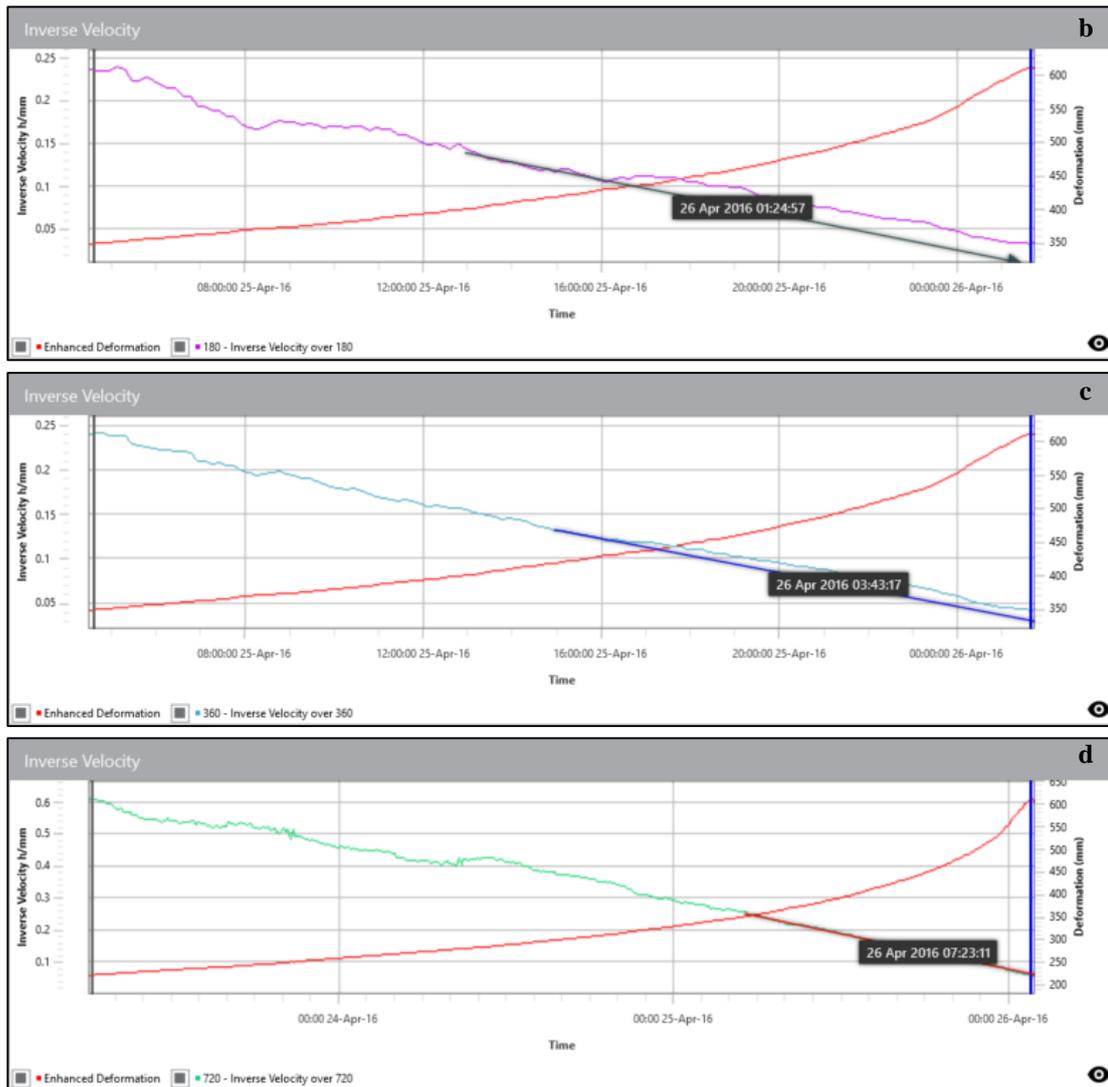
Prediksi waktu longsor 1 jendela waktu 6 jam. Dilakukan prediksi waktu longsor dengan jeda waktu 6 jam sebelum waktu longsor aktual dengan penggunaan beberapa vcp:





Gambar 11. Diagram Prediksi Waktu Longsor 1 Jendela Waktu 6 Jam (a) VCP 60, (b) VCP 180, (c) VCP 360, (d) VCP 720
 Prediksi waktu longsor 1 jendela waktu 9 jam. Dilakukan prediksi waktu longsor dengan jeda waktu 9 jam
 sebelum waktu longsor aktual dengan penggunaan beberapa vcp:





Gambar 12. Diagram Prediksi Waktu Longsor 1 Jendela Waktu 9 Jam (a) VCP 60, (b) VCP 180, (c) VCP 360, (d) VCP 720

Perbandingan Perbandingan dan Selisih Prediksi Waktu dengan Waktu Aktual Longsor. Setelah dilakukan prediksi waktu longsor dengan menggunakan VCP yang berbeda dan Jendela Waktu sebelum waktu terjadinya longsor yang berbeda maka selanjutnya dibuat perbandingan antara waktu aktual longsor dengan prediksi waktu longsor.

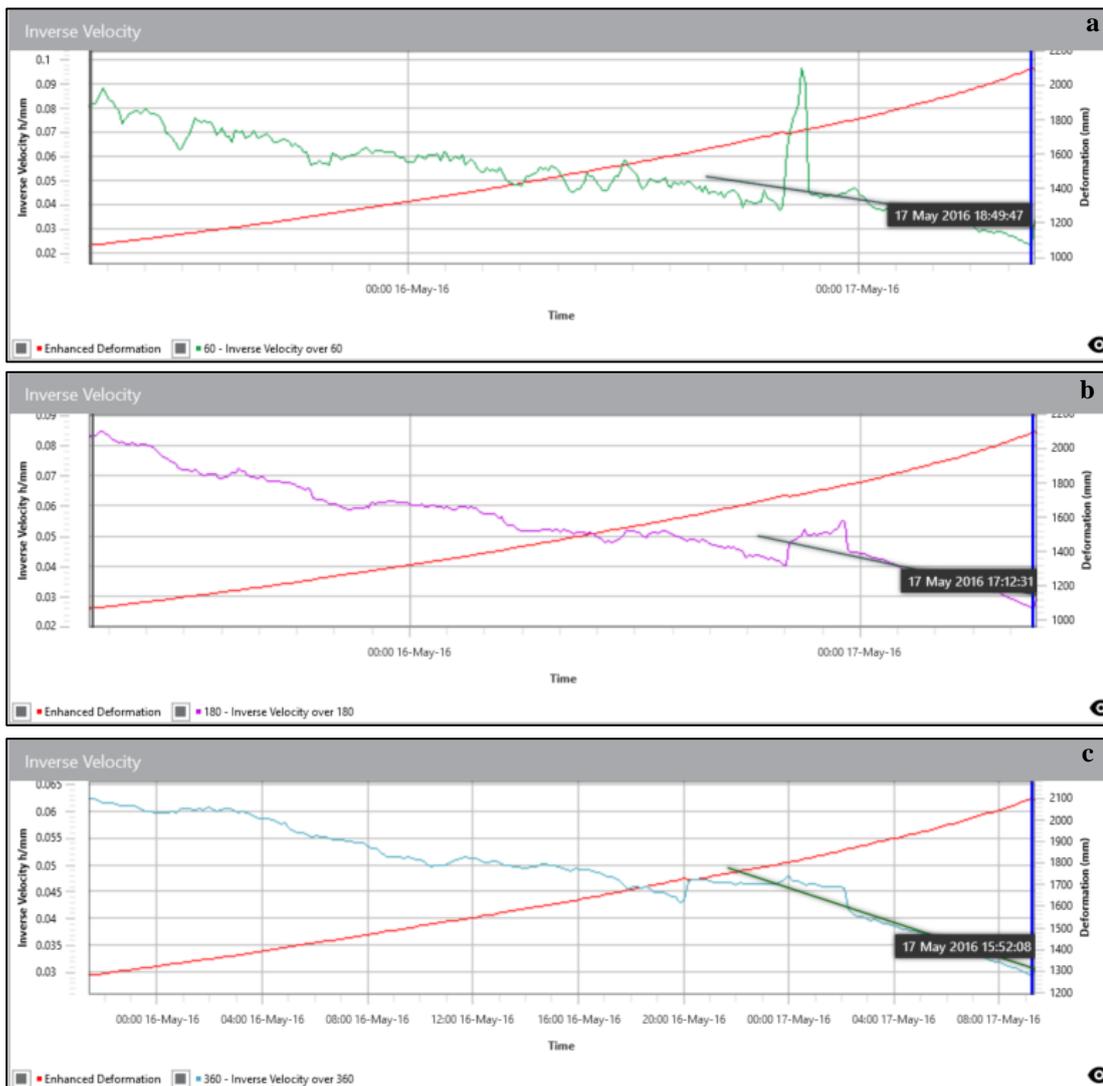
Tabel 4. Perbandingan dan selisih prediksi waktu longsor dengan waktu aktual longsor

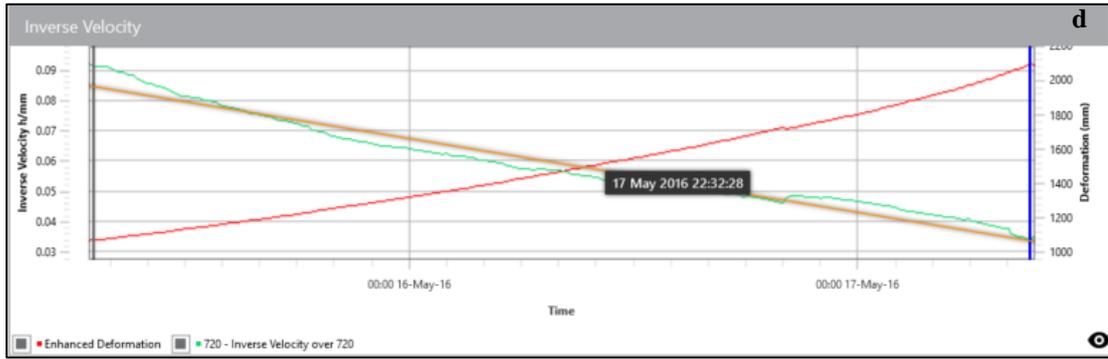
No	VCP	Jendela Waktu	Prediksi Waktu Longsor	Waktu Aktual Longsor	Selisih Waktu
1	60	3 Jam	26/04/2016 4:39	26/04/2016 4:57	0Jam17Menit19Detik
		6 Jam	26/04/2016 4:42		0Jam15Menit0Detik
		9 Jam	26/04/2016 2:48		2Jam9Menit0Detik
2	180	3 Jam	26/04/2016 4:25		0Jam32Menit0Detik
		6 Jam	26/04/2016 5:00		0Jam3Menit0Detik
		9 Jam	26/04/2016 1:24		3Jam33Menit0Detik

3	360	3 Jam	26/04/2016 5:21		0Jam24Menit0Detik
		6 Jam	26/04/2016 5:37		0Jam40Menit0Detik
		9 Jam	26/04/2016 3:43		1Jam14Menit0Detik
4	720	3 Jam	26/04/2016 7:17		2Jam20Menit0Detik
		6 Jam	26/04/2016 6:57		2Jam0Menit0Detik
		9 Jam	26/04/2016 7:23		2Jam26Menit0Detik

Setelah dibuat tabel dengan menggunakan VCP 60, 180, 360, dan 720 dan jendela waktu 3, 6, dan 9 jam didapatkan prediksi waktu longsor yang kemudian dibandingkan dengan waktu aktual longsor pada longsor 1, sehingga didapatkan selisih waktunya.

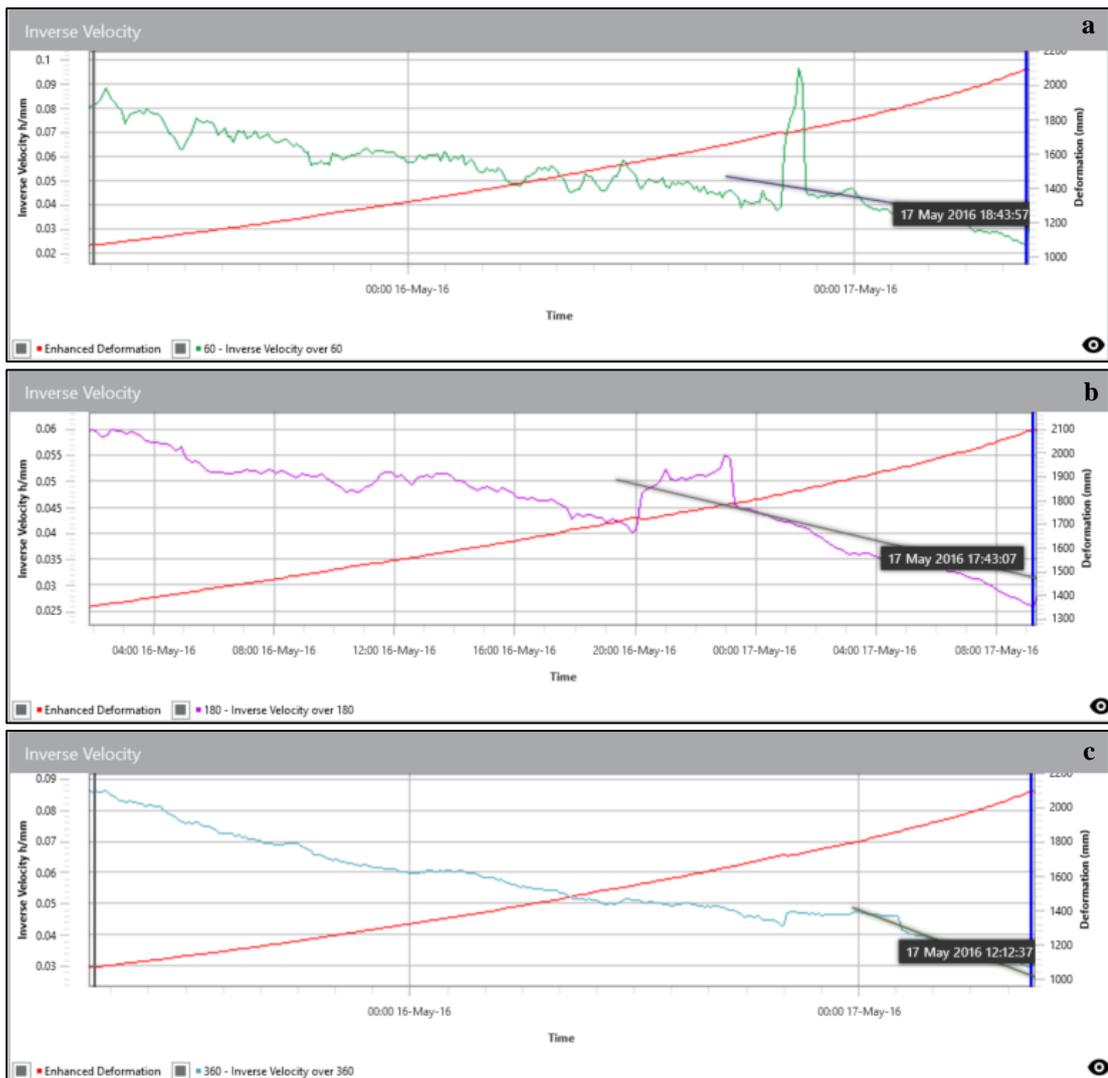
Prediksi waktu longsor 2 jendela waktu 3 jam. Dilakukan prediksi waktu longsor dengan jeda waktu 3 jam sebelum waktu longsor aktual dengan penggunaan beberapa vcp:

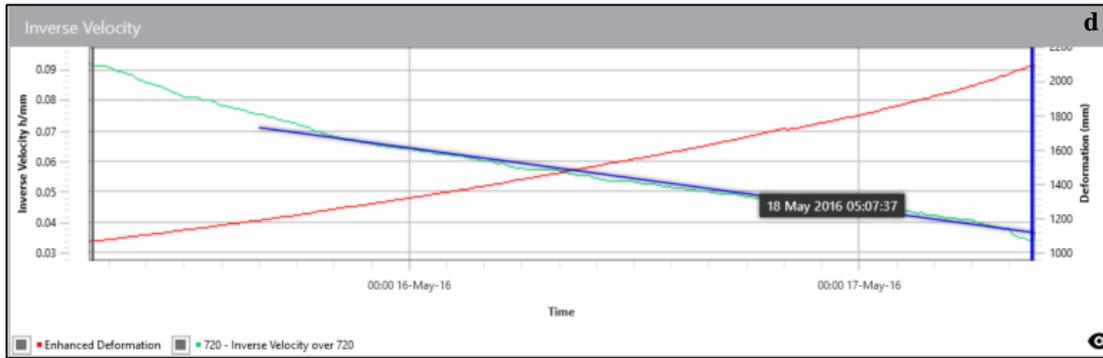




Gambar 13. Diagram Prediksi Waktu Longsor 2 Jendela Waktu 3 Jam (a) VCP 60, (b) VCP 180, (c) VCP 360, (d) VCP 720

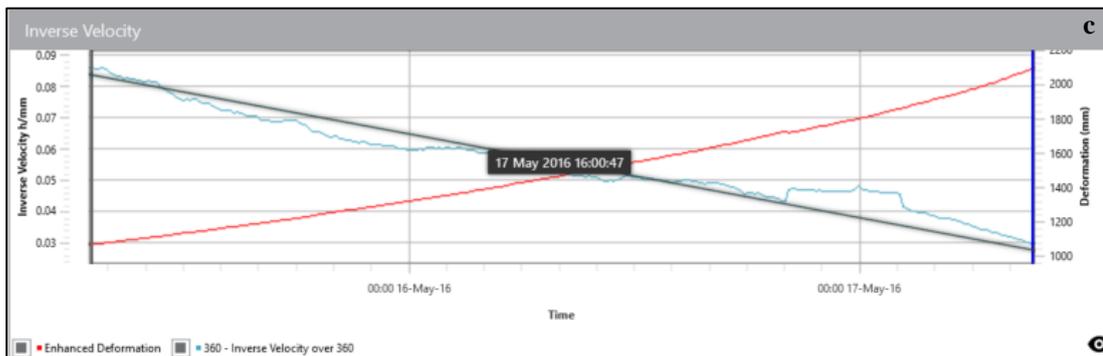
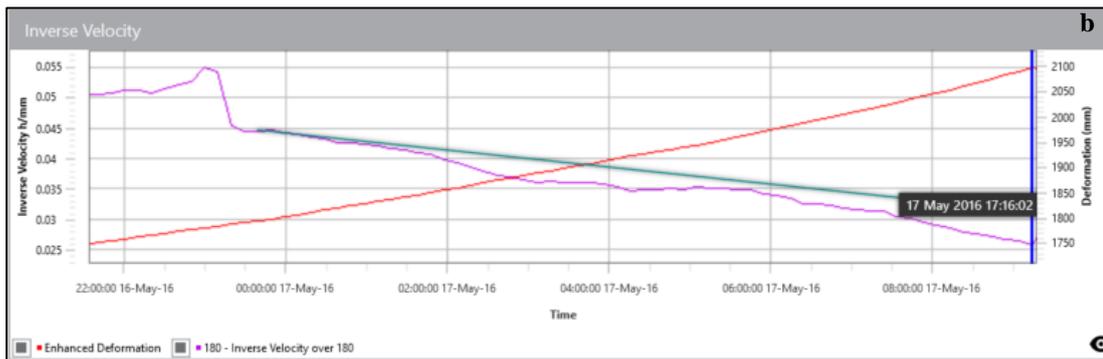
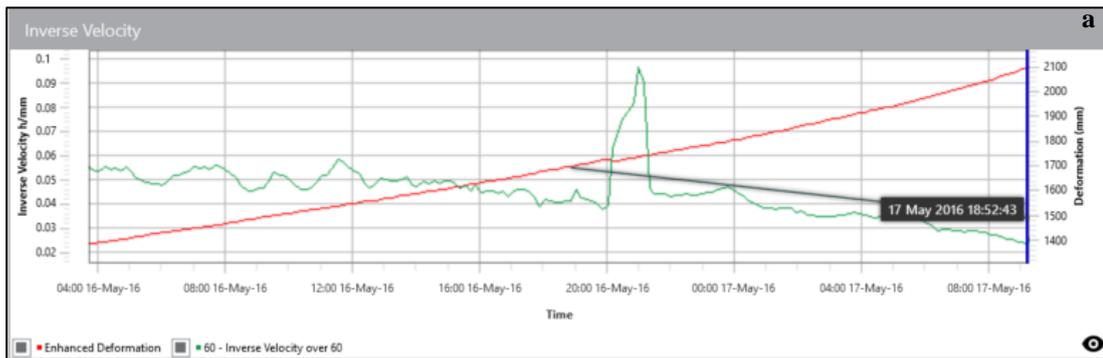
Prediksi waktu longsor 2 jendela waktu 6 jam. Dilakukan prediksi waktu longsor dengan jeda waktu 6 jam sebelum waktu longsor aktual dengan penggunaan beberapa vcp:

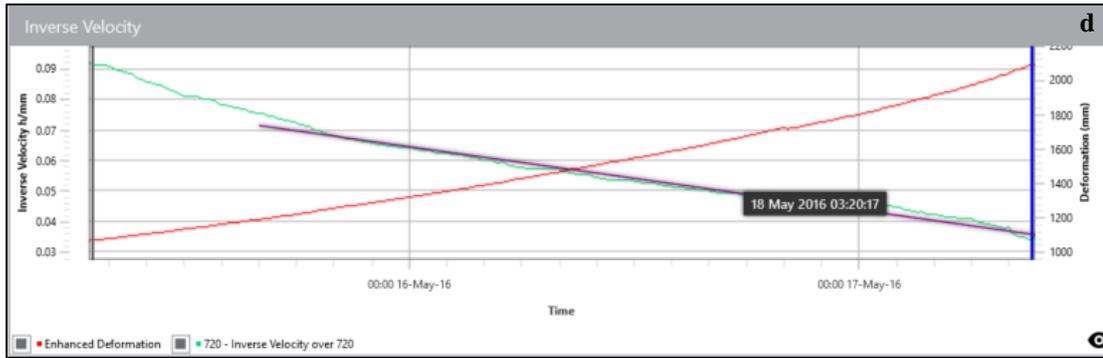




Gambar 14. Diagram Prediksi Waktu Longsor 2 Jendela Waktu 6 Jam (a) VCP 60, (b) VCP 180, (c) VCP 360, (d) VCP 720

Prediksi waktu longsor 2 jendela waktu 9 jam. Dilakukan prediksi waktu longsor dengan jeda waktu 9 jam sebelum waktu longsor aktual dengan penggunaan beberapa vcp:





Gambar 15. Diagram Prediksi Waktu Longsor 2 Jendela Waktu 9 Jam (a) VCP 60, (b) VCP 180, (c) VCP 360, (d) VCP 720

Perbandingan dan Selisih Prediksi Waktu dengan Waktu Aktual Longsor. Setelah dilakukan prediksi waktu longsor dengan menggunakan VCP yang berbeda dan Jendela Waktu sebelum waktu terjadinya longsor yang berbeda maka selanjutnya dibuat perbandingan antara waktu aktual longsoor dengan prediksi waktu longsor

Tabel 5. Perbandingan dan selisih prediksi waktu longsor dengan waktu longsor sebenarnya

No	VCP	Jendela Waktu	Prediksi Waktu Longsor	Waktu Aktual Longsor	Selisih Waktu
1	60	3 Jam	17/05/2016 18:49	17/05/2016 19:02	0Jam13Menit0Detik
		6 Jam	17/05/2016 18:43		0Jam19Menit0Detik
		9 Jam	17/05/2016 18:52		0Jam10Menit0Detik
2	180	3 Jam	17/05/2016 17:12		1Jam50Menit0Detik
		6 Jam	17/05/2016 17:43		1Jam19Menit0Detik
		9 Jam	17/05/2016 17:16		1Jam46Menit0Detik
3	360	3 Jam	17/05/2016 15:52		3Jam10Menit0Detik
		6 Jam	17/05/2016 12:12		6Jam50Menit0Detik
		9 Jam	17/05/2016 16:00		3Jam2Menit0Detik
4	720	3 Jam	17/05/2016 22:32		3Jam30Menit0Detik
		6 Jam	18/05/2016 5:07		10Jam5Menit0Detik
		9 Jam	18/05/2016 3:20		8Jam18Menit0Detik

Setelah dibuat tabel dengan menggunakan VCP 60, 180, 360, dan 720 dan jendela waktu 3, 6, dan 9 jam didapatkan prediksi waktu longsor yang kemudian dibandingkan dengan waktu aktual longsor pada longsor 2, sehingga didapatkan selisih waktunya.

B. Pembahasan

Pada prediksi waktu longsor yang telah dilakukan berdasarkan dua (2) waktu longsor yang berbeda, prediksi waktu longsor dilakukan dengan menggunakan perbandingan antara 4 VCP yaitu VCP 60, VCP 180, VCP 360, VCP 720. Pada longsor 1 didapatkan waktu longsor aktual pada 04:57 26 April 2016 dan pada longsor 2 didapatkan waktu longsor aktual pada 19:02 17 Maret 2016. Hasil analisis menunjukkan bahwa akurasi prediksi waktu longsor bervariasi tergantung pada jendela waktu yang digunakan. Prediksi longsor 1 dengan VCP 60 lebih akurat pada jendela waktu 3 jam, VCP 180 lebih akurat pada jendela waktu 6 jam, VCP 360 lebih akurat pada jendela waktu 3 jam, dan VCP 720 lebih akurat pada jendela waktu 6 jam, namun pada keseluruhan

VCP menggunakan VCP 180 lebih akurat digunakan dengan selisih waktu 3 menit sebelum waktu longsor terjadi. Prediksi waktu longsor 2 dengan VCP 60 lebih akurat pada jendela waktu 9 jam, VCP 180 lebih akurat pada jendela waktu 6 jam, VCP 360 lebih akurat pada jendela waktu 9 jam, dan VCP 720 lebih akurat pada jendela waktu 3 jam, namun pada keseluruhan VCP menggunakan VCP 60 lebih akurat digunakan dengan selisih waktu 10 menit sebelum waktu longsor terjadi.

Pemilihan Velocity Calculation Period (VCP) pendek (60 menit) dalam penelitian ini didasarkan pada kebutuhan untuk mendeteksi perubahan kecepatan deformasi lereng secara cepat dan akurat. VCP pendek memberikan resolusi temporal yang lebih tinggi, sehingga mampu menangkap peningkatan kecepatan deformasi yang terjadi secara tiba-tiba, terutama saat lereng memasuki fase progresif menuju longsor. Dalam menentukan kecepatan maksimum deformasi, VCP pendek lebih unggul karena mampu mencatat nilai sesaat yang sebenarnya, tanpa terpengaruh oleh efek perataan dari periode perhitungan yang panjang. Meskipun beberapa macam VCP digunakan untuk analisis seperti VCP panjang untuk memahami tren jangka panjang, VCP pendek tetap menjadi pilihan utama karena memberikan respons yang lebih cepat dan akurat terhadap perubahan perilaku lereng yang kritis.

Geometri Lereng

Geometri lereng merupakan salah satu faktor utama yang menentukan kestabilan lereng tambang terbuka, termasuk di Tambang Emas Waihi, khususnya di area Martha Open Pit (MOP). Berdasarkan laporan teknis Waihi Townsend (2024), geometri lereng di Martha Pit didesain dengan memperhatikan beberapa parameter teknis seperti sudut lereng keseluruhan (Overall Slope Angle), tinggi bench (Bench Height), dan lebar berm (Berm Width). Namun, konfigurasi geometri tersebut menghadapi tantangan khusus, terutama karena area ini merupakan tambang terbuka yang telah beroperasi sejak 1988 hingga 2015 dan mengalami proses cutback atau pengembangan lereng baru di beberapa fase. Townsend (2024) menyebutkan bahwa desain lereng Martha Open Pit sangat dipengaruhi oleh keterbatasan infrastruktur dan kondisi geoteknik historis yang menyebabkan beberapa penyesuaian sudut lereng. Kemiringan lereng antar area diatur antara 25° hingga 35°, tergantung kualitas batuan dan kondisi air tanah.

Faktor Geologi dan Karakteristik Batuan Penyebab Longsor

Selain faktor geometri, kondisi geologi lokal di area Waihi juga memberikan pengaruh signifikan terhadap kestabilan lereng. Berdasarkan peta geologi regional (Gambar 2.2 dan Gambar 2.3), area Waihi terletak dalam zona yang didominasi oleh batuan andesit, dasit, dan riolit yang mengalami alterasi hidrotermal pada kala Miosen hingga Pliosen. Townsend (2024:49) menjelaskan bahwa batuan di sekitar Martha Pit telah mengalami proses alterasi hidrotermal yang intensif, terutama dalam bentuk silicification dan argillization. Alterasi ini menyebabkan penurunan kekuatan batuan akibat penggantian mineral asli oleh mineral lempung atau silika sekunder, yang berdampak langsung pada penurunan kohesi dan kekuatan geser dalam material batuan. Keberadaan urat kuarsa (Quartz Vein) yang terpotong oleh berbagai sistem sesar normal (normal faults) dan bidang kekar (joints) menghasilkan zona-zona lemah di dalam massa batuan. Struktur geologi ini menjadi bidang gelincir potensial pada lereng tambang, terutama saat lereng mengalami peningkatan tegangan akibat pemotongan lereng atau kejadian hujan intensitas tinggi. Townsend (2024) dalam bagian analisis geoteknik juga menekankan bahwa kombinasi antara litologi lemah, struktur diskontinuitas, dan air tanah merupakan faktor dominan dalam penentuan risiko longsor di Waihi

Data Geoteknik Penunjang Analisis Penyebab Longsor

Untuk mendapatkan hasil analisis stabilitas lereng yang akurat dan tidak hanya bersifat asumptif, OceanaGold sebagai pemilik dan pengelola Tambang Waihi telah melakukan pengumpulan data geoteknik yang komprehensif melalui kegiatan geotechnical logging, uji laboratorium kekuatan batuan, serta pengukuran sifat-sifat fisik batuan in-situ. Berdasarkan Waihi District Technical Report Townsend (2024), berikut adalah parameter utama yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng di area Martha Pit dan sekitarnya

Parameter Densitas

Bulk density menggambarkan berat jenis total massa batuan, termasuk rongga atau pori-pori di dalamnya.

Tabel 6. Nilai Densitas (Townsend,2024)

Domain	Sample Count	Mean Density
Andesite	2,321	2.43
Quartz Andesite	18,348	2.53

Vein	4,024	2.50
------	-------	------

Jika nilai rendah maka gaya berat lebih kecil dan lereng cenderung lebih stabil sedangkan jika nilai tinggi maka gaya berat total lebih besar kemudian driving force meningkat dan risiko longsor meningkat.

Parameter UCS, UTS, Modulus, dan Poissons Ratio

UCS (Uniaxial Compressive Strength) menunjukkan daya tahan batuan terhadap gaya tekan. Nilai UCS yang rendah berarti batuan memiliki kekuatan rendah terhadap tekanan vertikal, sehingga lebih mudah mengalami gagal geser (shear failure) atau gagal tekan (compression failure). Sedangkan UTS (Uniaxial Tensile Strength) adalah kekuatan maksimum batuan dalam menahan tarik murni, yaitu beban yang berusaha menarik batuan hingga putus. Modulus of Elasticity (E) adalah ukuran kekakuan batuan, atau seberapa besar batuan berdeformasi elastis saat diberikan tegangan. Poisson’s Ratio adalah rasio antara regangan lateral dengan regangan aksial saat material mengalami beban. Berikut hasil uji lab yang dilakukan.

Tabel 7. Uji Laboratorium (Townsend, 2024)

	UCS (Mpa)	UTS (Mpa)	Modulus (Gpa)	Poissons Ratio
Mean	106	8	36	106
Max	255	20.6	47	255
Min	9	1.9	19	9
Sample Size	36	45	24	36

UCS Rendah (misal <20 MPa) maka batuan cenderung mudah hancur, terutama jika mendapat beban berat dari atas lereng (overburden) sehingga Risiko gagal tekan (compressive failure) meningkat, jika UCS Tinggi (misal >50 MPa) maka Lereng lebih stabil karena batuan bisa menahan beban besar tanpa hancur. UTS Rendah (misal <1 MPa) maka batuan sangat lemah dalam tarik, sehingga mudah terjadi crack propagation atau tensile failure pada kondisi stress tinggi, jika UTS Tinggi maka batuan lebih tahan terhadap cracking dan opening sepanjang diskontinuitas. Modulus Rendah (<20 GPa) maka batuan mudah terdeformasi, jika Modulus Tinggi (>40 GPa) maka batuan lebih tahan terhadap deformasi. Poissons Ratio bernilai rendah (<0,2) maka batuan cenderung rapuh, deformasi lateral kecil saat diberi beban, jika nilai tinggi (>0,3) maka batuan lebih compressible.

Parameter Kondisi Hidrogeologi

Kondisi air tanah (hydrogeology) menjadi faktor eksternal utama yang mempengaruhi stabilitas lereng melalui dua mekanisme utama jika peningkatan tekanan air pori (pore pressure) terjadi maka dapat menurunkan tegangan efektif di dalam massa batuan kemudian mengurangi kekuatan geser.

Tabel 8. Uji Laboratorium (Townsend, 2024)

Area	Go Forward Case (m ³ /d)
Access Tunnel Processing Plant to Willows	2,400
Dual Tunnels Willows to WUG	7,000
WUG (Intera results)	2,600
Total mine dewatering	12,000

Kaitan Peta Geologi, Data Geoteknik, dan Longsor Waihi

Kaitan antara peta geologi, data parameter geoteknik, dan kejadian longsor di Tambang Waihi menunjukkan bahwa sebaran litologi dan struktur geologi (faults, veins, alteration zones) sangat mempengaruhi variabilitas parameter strength seperti UCS, cohesion, friction angle, modulus, serta perilaku air tanah. Kombinasi geometri lereng yang curam dengan desain inter-ramp angle 25°–35° meningkatkan driving force.

Ditambah tekanan air pori tinggi/groundwater inflow besar dengan dewatering rate mencapai 7.000 m³/day menandakan groundwater sangat aktif kualitas, massa batuan yang buruk di beberapa area, menjadi faktor kunci penyebab longsor di area Martha Pit.

4. Kesimpulan

Dalam prediksi waktu longsor dengan metode inverse velocity berdasarkan analisa balik longsor yang telah dibuat dengan adanya longsor pada dua (2) waktu berbeda dengan beberapa parameter yang telah diketahui. Prediksi waktu longsor dilakukan dengan menggunakan perbandingan antara 4 VCP yaitu VCP 60, VCP 180, VCP 360, VCP 720. Menggunakan metode inverse velocity dapat dengan baik dipergunakan untuk memprediksi waktu longsor dengan beberapa faktor yang diperlukan seperti faktor atmosfer atau cuaca, faktor manusia, faktor alat, faktor lingkungan, dan juga berdasarkan material yang ada.

Pada prediksi waktu longsor yang telah dilakukan berdasarkan dua (2) waktu longsor yang berbeda, prediksi waktu longsor dilakukan dengan menggunakan perbandingan antara 4 VCP yaitu VCP 60, VCP 180, VCP 360, VCP 720. Pada longsor 1 didapatkan waktu longsor aktual pada 04:57 26 April 2016 dan pada longsor 2 didapatkan waktu longsor aktual pada 19:02 17 Maret 2016. Hasil analisis menunjukkan bahwa akurasi prediksi waktu longsor bervariasi tergantung pada jendela waktu yang digunakan. Prediksi longsor 1 menggunakan VCP 180 lebih akurat digunakan dengan selisih waktu 3 menit sebelum waktu longsor terjadi. Prediksi waktu longsor 2 menggunakan VCP 60 lebih akurat digunakan dengan selisih waktu 10 menit sebelum waktu longsor terjadi dan pemilihan Velocity Calculation Period (VCP) pendek (60 menit) dalam penelitian ini didasarkan pada kebutuhan untuk mendeteksi perubahan kecepatan deformasi lereng secara cepat dan akurat. VCP pendek memberikan resolusi temporal yang lebih tinggi, sehingga mampu menangkap peningkatan kecepatan deformasi yang terjadi secara tiba-tiba, terutama saat lereng memasuki fase progresif menuju longsor.

Kaitan antara peta geologi, data parameter geoteknik, dan kejadian longsor di Tambang Waihi menunjukkan bahwa sebaran litologi dan struktur geologi (faults, veins, alteration zones) sangat mempengaruhi variabilitas parameter strength seperti UCS, cohesion, friction angle, modulus, serta perilaku air tanah. Kombinasi geometri lereng yang curam dengan desain inter-ramp angle 25°–35° meningkatkan driving force. Ditambah tekanan air pori tinggi/groundwater inflow besar dengan dewatering rate mencapai 7.000 m³/day menandakan groundwater sangat aktif kualitas, massa batuan yang buruk di beberapa area, menjadi faktor kunci penyebab longsor di area Martha Pit.

5. Daftar Pustaka

- Barker, S. L. L., Hood, S., Hughes, R. M., & Richards, S. 2019. The lithogeochemical signatures of hydrothermal alteration in the Waihi epithermal district, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 62(4), 513–530. <https://doi.org/10.1080/00288306.2019.1651345>
- Cabrejo-Liévano, A. G. 2013. Analysis of failures in open pit mines and consideration of the uncertainty when predicting collapses.
- Fukuzono, T. 1985. A New Method for Predicting the Failure Time of a Slope.
- Intrieri, E., Carlà, T., & Gigli, G. 2019. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 193, pp. 333–349). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.019>
- Masood Mohd Maneeb, G. Y. R. and T. V. 2022. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. Indian Institute of Technology (BHU), Uttar Pradesh: India. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2022/29982>
- Mortimer, N., Brathwaite, R. L., Christie, A. B., & Campbell, H. J. 2016. Accepted For New Zealand Mineral Deposits Monograph Regional Geological Framework of New Zealand's Mineral Deposits.
- Reeves, B., Noon, D., Stickley, G., & Longstaff, D. 2001. Slope stability radar for monitoring mine walls. <http://www.cssip.edu.au>;
- Rose, N. D., & Hunger, O. 2007. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 308–320. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.07.014>
- Sannang, M. A., Musa, H., & Manaf, A. 2017. Analisa Balik dan Penentuan Ambang Batas Alarm Menggunakan Slope Stability Radar (SSR) Studi Kasus Longsor Pada Batuan Keras.

Shellam, R., & Coggan, J. 2020. Analysis of velocity and acceleration trends using slope stability radar to identify failure ‘signatures’ to better inform deformation trigger action response plans. 227–240. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2025_10

Townsend, D., Crawford-Flett, L., Hollis, K., Leslie, E., & Maton, T. 2024. NI 43-101 Technical Report Waihi District Pre-feasibility Study, New Zealand