



PEMANTAUAN DEFORMASI LERENG TAMBANG TERBUKA PASKA PELEDAKAN
DENGAN *SLOPE STABILITY RADAR*¹

¹⁾ Dhanty Indriastuty*, ²⁾ Fitrah Fajar, ³⁾ Gerson Tappang, dan ⁴⁾ Alif Irsyad

^{1,2,3,4} *Geotechnical Support Service, PT. GroundProbe Indonesia,*

Artikel masuk : 11-04-2022 , Artikel diterima : 29-08-2022

Kata Kunci: *Slope stability radar, peledakan, longsor, peringatan dini,*

Keywords: *Slope stability radar, blasting, landslides, early warning*

Abstrak

Ketidakstabilan lereng dapat menjadi tantangan tersendiri dalam kegiatan operasional tambang, yang dapat menyebabkan longsor dengan dampak kerugian baik finansial maupun korban jiwa. Salah satu kegiatan dalam operasional pertambangan adalah aktivitas peledakan (blasting) yang diperlukan untuk memberai massa batuan menjadi fragmen-fragmen. Kegiatan blasting juga menjadi salah satu faktor pemicu terjadinya longsor pada lereng tambang. Oleh karena itu, diperlukan monitoring secara intensif untuk menjaga keselamatan personel dan juga alat yang bekerja pada area kritis. Pemantauan lereng yang terintegrasi secara real time menggunakan GroundProbe Slope Stability Radar (SSR) mampu memberikan informasi akurat mengenai perubahan perilaku massa batuan sebagai tanda peringatan terjadinya longsor. Penelitian ini dilakukan menggunakan data hasil pembacaan deformasi lereng oleh SSR pada contoh kasus longsor di lereng tambang emas dengan formasi batuan keras (hardrock). Hasil penelitian menunjukkan bahwa, lereng yang menunjukkan pola stabil mengalami perubahan pola deformasi massa batuan menjadi linear setelah dilakukan aktivitas peledakan (blasting) pukul 12:40, 15 Juni 2021 di sekitar lereng. Pada periode lereng tersebut menunjukkan pola deformasi linear dijumpai juga adanya indikasi rock fall pada pukul 17:10, 17 Juni 2021. Pola linear tersebut terus berlanjut selama 63 jam kemudian berubah menjadi pola deformasi progresif pada pukul 03:54, 18 Juni 2021 sebelum longsor terjadi. Kelongsoran terjadi pada pukul 17:33, 18 Juni 2021 dengan nilai akumulasi deformasi maksimum 37 mm, kecepatan maksimum 11 mm/jam, dan invers kecepatan minimum 0.09 jam/mm dihitung menggunakan velocity calculation period 60 menit. Sebelum kelongsoran terjadi, terdapat peringatan dini berupa alarm yang terpicu 2 jam 25 menit sebelum

*Penulis Koresponden: dhanty.indriastuty@groundprobe.com

Doi : <https://doi.org/10.36986/impj.v3i2.46>

Abstract

Slope instability can be a challenge in mining operations. This instability can cause landslides which will have an impact on financial losses and cause casualties. One of the activities in mining operations is blasting activity which is required to break a rock mass to fragments. Blasting activity is one of the triggering factors for landslides on mine slopes. Therefore, intensive monitoring is needed to maintain the safety of personnel and tools working in critical areas. Slope monitoring that is integrated in real time using the GroundProbe Slope Stability Radar (SSR) able to provide accurate information about changes in rock mass behavior as a warning sign of landslides. This research was conducted using data from the readings of slope deformation by SSR on a landslide case on the slopes of gold mines with hard rock formations. The results showed that the slopes that showed a stable pattern experienced a change in the rock mass deformation pattern to become linear after blasting activity was carried out at 12:40, 15 June 2021 around the slope. During the period of the slope showing a linear deformation trend, there were also indications of rock fall at 17:10, 17 June 2021. The linear pattern continued for 63 hours and then changed to a progressive deformation trend at 03:54, 18 June 2021 before the landslide occurred. The landslide occurred at 17:33, 18 June 2021 with a maximum accumulated deformation value of 37 mm, a maximum speed of 11 mm/hour, and a minimum velocity inverse of 0.09 hours/mm calculated using a velocity calculation period of 60 minutes. Before the landslide occurred, there was an early warning in the form of an alarm that was triggered 2 hours 25 minutes before the landslide occurred. The configuration of slope monitoring using SSR able to provide an optimal early warning by showing changes in rock mass deformation patterns and also alarms that serve as early warnings to avoid financial losses or fatalities due to landslides in mining operations.

PENDAHULUAN

Lereng tambang akan selalu terganggu oleh aktivitas penambangan, khususnya aktivitas peledakan. Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor gaya penahan dan gaya penggerak. Pada kondisi gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak, lereng tersebut akan berada dalam kondisi stabil. Namun, apabila gaya penahan lebih kecil dari gaya penggerak, lereng tersebut tidak stabil dan akan terjadi longsor. Kestabilan lereng perlu dianalisis untuk mencegah bahaya longsor karena menyangkut keselamatan kerja, keamanan peralatan dan benda-benda lainnya, serta keberlangsungan produksi.

Peledakan merupakan kegiatan yang bertujuan untuk memecah, menghancurkan dan membongkar massa batuan yang memiliki sifat relatif keras dan kompak serta susah untuk diberai secara manual. Kegiatan peledakan biasanya menyebabkan perubahan deformasi pada daerah sekitar lokasi peledakan. Radar dapat digunakan untuk memantau area tambang dan dapat menangkap pergerakan batuan dalam skala yang sangat kecil yang hampir tidak bisa dilihat oleh mata biasa. Perubahan pola deformasi pada lereng umumnya terdiri atas pola deformasi regresif, deformasi transisional atau linear, dan deformasi progresif (Broadbent dan Zavodni, 1982). Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemantauan perubahan deformasi pada sebuah lereng tambang emas dengan formasi penyusun batuan keras (*hardrock*) setelah dilakukannya aktivitas peledakan (*blasting*).

Dengan adanya pemantauan lereng menggunakan *Slope Stability Radar* diharapkan mampu memberi peringatan dini yang optimal untuk mencegah terjadinya kerugian finansial ataupun korban jiwa akibat longsor dalam operasional pertambangan.

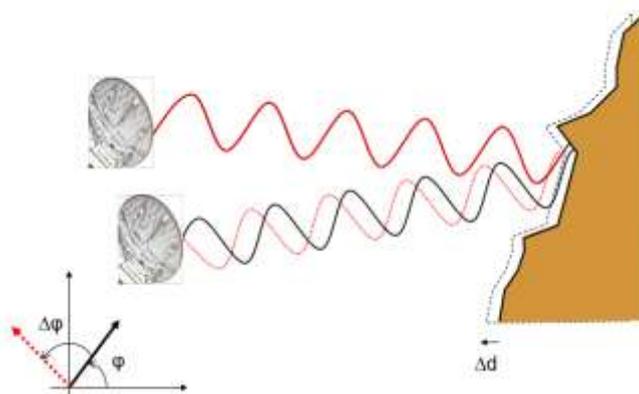
METODOLOGI PENELITIAN

Mekanisme SSR Dalam Mendeteksi dan Memprediksi Kelongsoran

Kestabilan lereng di tambang terbuka merupakan salah satu elemen yang dapat mempengaruhi operasional tambang baik dalam segi finansial ataupun keselamatan. Kestabilan lereng dapat

dipantau dengan beberapa metode dimana salah satunya dengan menggunakan teknologi GroundProbe Slope Stability Radar (SSR). Slope Stability Radar (SSR) dapat memberikan informasi secara real time perihal perilaku lereng atau batuan dengan mengolah data yang diperoleh dari proses pengambilan data secara scan per scan oleh SSR yang bergerak secara 2 dimensi (azimuth dan elevasi) dan menampilkan data tersebut dalam bentuk piksel yang independen (Reeves et al., 2001). Konsep pemantauan lereng menggunakan SSR didasarkan pada teknik interferometri radar. SSR melakukan satu scan dengan memancarkan gelombang elektromagnetik menuju sebuah area pada lereng dan

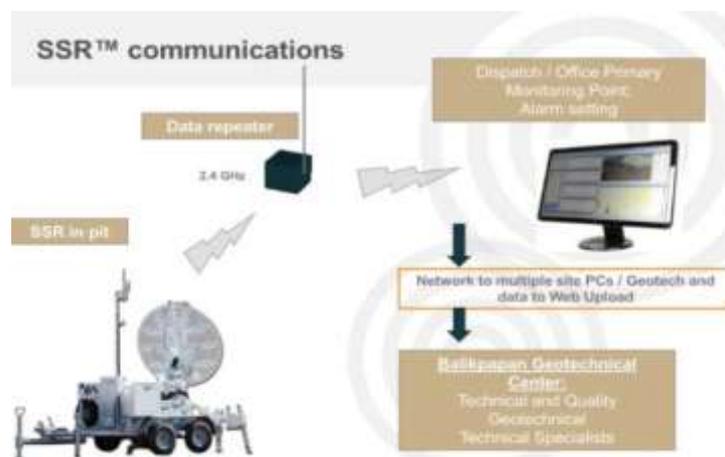
menerima kembali pantulan gelombang tersebut. Setiap pantulan gelombang yang diterima radar memiliki nilai fase gelombang sendiri. SSR menentukan besar dan arah deformasi lereng yang dipantau dengan membandingkan data pengukuran beda sudut fase gelombang antara scan terakhir dengan scan sebelumnya (gambar 1). Kumpulan data setiap scan dalam sebuah periode pemantauan lereng akan membentuk plot deformasi yang merupakan nilai akumulasi pergerakan lereng pada setiap scan. Data deformasi tersebut selanjutnya dapat dianalisis lebih lanjut berdasarkan pola trend deformasi, velocity, inverse velocity, dan velocity ratio.



Gambar 1. Teknik interferometri SSR

Pada pelaksanaannya, SSR diletakkan pada lokasi yang stabil di depan lereng yang akan dipantau pergerakannya. SSR control pada radar akan menerima dan menginterpretasi data. Data dari SSR yang berada di lapangan kemudian dikirim ke Primary Monitoring Point (PMP). PMP ini berupa satu komputer yang dikhususkan untuk kegiatan monitoring,

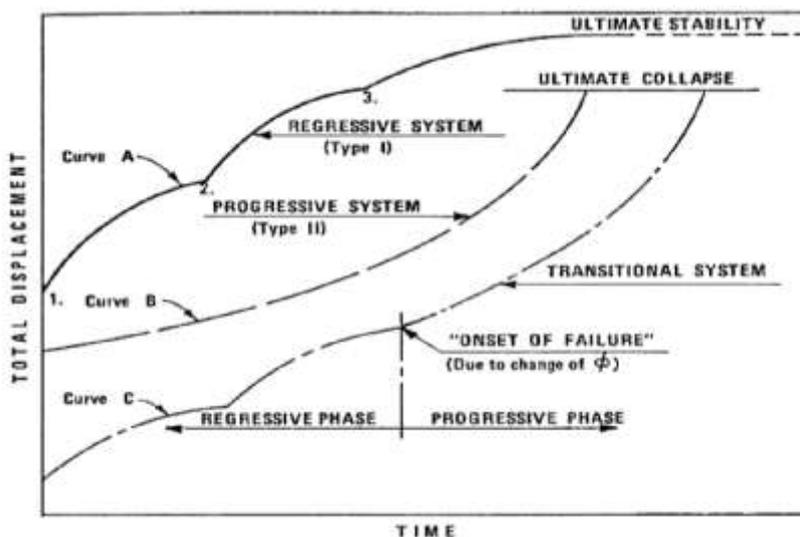
sehingga analisa dan pemantauan deformasi lereng maupun penentuan alarm dapat dilakukan di kantor tanpa harus berada di lapangan atau pit tambang. Untuk keperluan pemantauan jarak jauh, Geotech Engineer GroundProbe akan mengontrol PMP dengan menggunakan remote software untuk melakukan analisis data (Gambar 2).



Gambar 2. Jaringan komunikasi SSR

Pola pergerakan lereng dapat berubah seiring dengan perkembangan waktu. Proses pergerakan ini selain dipengaruhi oleh geometri lereng juga dipengaruhi oleh variabel lain seperti hujan, struktur geologi, even peledakan, dan faktor eksternal lainnya. Menurut *Broadbent dan Zavodni* (1982), Pola pergerakan lereng tersebut dapat dibagi menjadi 3 yaitu fase regresif, transisi dan

progresif (gambar 3). Fase transisi atau linear dicirikan oleh pergerakan lereng dengan kecepatan yang konsisten. Fase progresif dicirikan dengan kecepatan yang meningkat dengan seiringnya waktu dan pada titik tertentu akan berkembang menjadi longsor. Selanjutnya, terdapat fase regresif dimana kecepatan pergerakan lereng mengalami penurunan dari waktu ke waktu.



Gambar 3. Perilaku deformasi batuan pada lereng (Broadbent dan Zavodni 1982)

Perilaku lereng tersebut dapat dideteksi oleh radar dan data deformasi lereng selanjutnya diolah untuk memberikan prediksi waktu terjadinya longsor dengan menggunakan *invers velocity*. Metode prediksi longsor menggunakan *invers velocity* dikembangkan oleh *Fukuzono* (1985). Metode ini berdasarkan hasil dari simulasi tanah longsor yang terjadi akibat pengaruh hujan dengan karakter *creeping* atau pergerakan lereng dengan kecepatan yang lambat pada *soil*. Konsep metode ini menggunakan *invers* dari nilai kecepatan terhadap waktu dimana saat lereng mendekati longsor, nilai tersebut akan semakin mendekati nol seiring dengan peningkatan kecepatan deformasi. Prediksi waktu longsor dapat ditentukan dengan menggunakan plot yang digambarkan menjadi 3 jenis yaitu tren *convex*, *linear*, dan *concave* dimana a adalah nilai konstan, t adalah waktu, dan t_f adalah waktu terjadinya longsor. Selanjutnya, garis tren dari nilai *invers velocity* yang diproyeksikan ke titik nol dimana waktu pada titik tersebut merupakan prediksi waktu longsor. Prediksi waktu longsor bergantung dengan identifikasi

tren yang konsisten, namun kemungkinan perubahan trend akibat faktor yang dapat diamati atau tidak diketahui perlu menjadi perhatian dan hasil prediksi mungkin perlu dievaluasi ulang seiring dengan diterimanya data terbaru (*Rose et al., 2007*).

Alarm

Sistem alarm pada SSR bertujuan sebagai sistem peringatan dini sebelum longsor terjadi, sehingga dapat mencegah terjadinya kerugian finansial maupun korban jiwa akibat longsor dalam operasional pertambangan. Penentuan ambang batas (*threshold*) dalam membuat alarm harus tepat agar tidak terjadi *missed alarm* atau *unwanted alarm*. Pembuatan ambang batas yang terlampaui tinggi akan menyebabkan *missed alarm*, dimana longsor terjadi dibawah nilai ambang batas alarm yang sudah ditentukan sehingga alarm tidak terpicu. Sebaliknya, jika nilai ambang batas alarm terlampaui rendah akan menyebabkan *unwanted alarm*, dimana alarm terpicu bukan karena adanya longsor dan belum

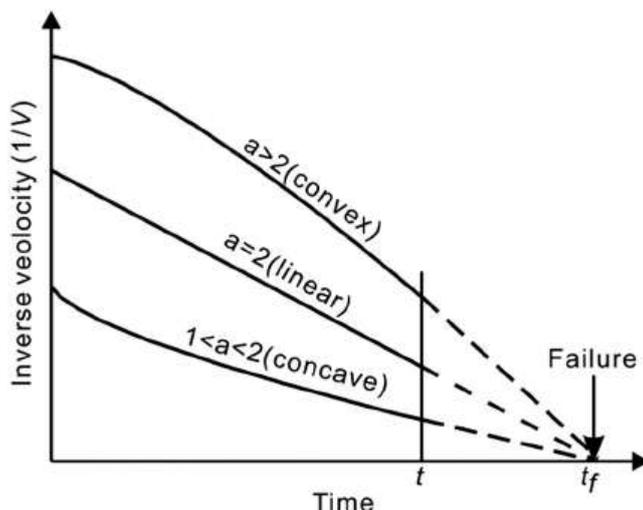
membutuhkan evakuasi pada tambang SSR *Viewer* memiliki enam parameter alarm seperti deformasi, *velocity*, *inverse velocity*, *velocity ratio*, coherence dan *tracking*. Setiap mengevaluasi data SSR terhadap ambang batasnya masing-masing. Pada penelitian ini penulis membahas dua parameter alarm yang digunakan yaitu; deformasi dan invers kecepatan.

Alarm Deformasi

Alarm deformasi menggunakan akumulasi dari deformasi massa batuan (mm). Deformasi bernilai positif (+) jika mendekati SSR dan akan bernilai negatif (-) jika menjauhi SSR. Terdapat tiga tipe alarm deformasi yaitu *Over period*, *Since time* dan *Over period since time*. Alarm tipe *over period* akan mengevaluasi deformasi yang terjadi selama periode waktu tertentu. Alarm

tersebut. parameter alarm memiliki mekanisme tersendiri dalam

tipe *since time* akan mengevaluasi deformasi yang terjadi pada waktu referensi yang ditetapkan dan berlanjut sampai data baru tiba. Alarm *over period since time* merupakan kombinasi dari kedua alarm *Over period* dan *since time*, dimana waktu referensi (*since time*) dan periode (*over period*) evaluasi alarm dapat ditentukan. Evaluasi data deformasi dilakukan secara kontinyu sama seperti tipe *since time* dan dalam periode tertentu seperti halnya tipe *over period*, dimana nilai deformasi akan kembali dihitung mulai dari nol milimeter (0 mm) ketika evaluasi data deformasi telah melebihi periode yang ditentukan.

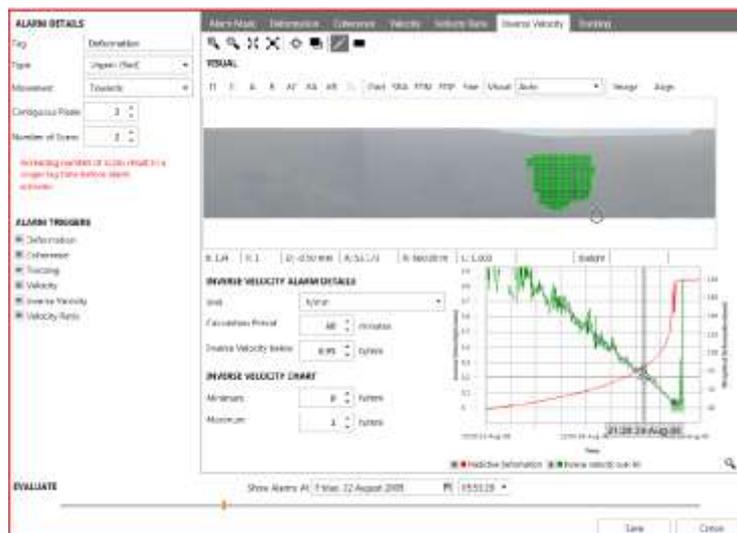


Gambar 4. Metode prediksi waktu terjadinya longsor menggunakan plot *inverse velocity* (Fukozono, 1985).

Alarm Invers Velocity

Alarm *invers velocity* menggunakan nilai invers dari nilai kecepatan terhadap waktu. Nilai invers velocity mulai muncul seiring dengan peningkatan kecepatan atau tren deformasi berkembang menjadi progresif. Namun berbeda dengan alarm deformasi,

seiring dengan lereng bergerak menuju longsor, nilai invers velocity akan bergerak mendekati nol sehingga ambang batas alarm jenis ini ditentukan sebagai batas minimum. *Calculation period* adalah parameter kecepatan deformasi dalam suatu periode tertentu. Penggunaan evaluasi dengan *calculation period* yang berbeda akan menghasilkan hasil yang berbeda.



Gambar 5. Inverse velocity alarm tab.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perilaku Deformasi Lereng

Penelitian ini melakukan analisa balik terhadap longsor yang terjadi pada tambang emas dengan cara mengidentifikasi karakteristik perilaku deformasi lereng dari data deformasi yang dibaca oleh SSR sebelum hingga setelah kegiatan peledakan (*blasting*) dan longsor terjadi. Karakteristik perilaku deformasi yang dievaluasi berupa nilai deformasi, kecepatan deformasi dan invers kecepatan. Longsor yang terjadi di lokasi penelitian terdeteksi oleh SSR, ditunjukkan oleh pixel (196,12) dengan karakteristik perilaku deformasi lereng secara berurutan sebagai berikut, stabil, kegiatan peledakan (*blasting*), perilaku deformasi linear, *on set of failure*, perilaku deformasi progresif, longsor.

- a. Stabil
Sebelum dilakukan kegiatan peledakan (*blasting*), perilaku deformasi lereng tidak menunjukkan adanya deformasi (stabil) sebelum pukul 12:40, 15 Juni 2021. Kegiatan peledakan (*blasting*) diamati pada pukul 12:40, 15 Juni 2021.
- b. Perilaku deformasi linear
Setelah kegiatan peledakan, perilaku deformasi linear terjadi selama 3 hari sejak awal pemantauan SSR pada pukul 12:40, 15 Juni hingga pukul 03:54, 18 Juni 2021. Kecepatan deformasi rata-rata 0.2 – 0.4 mm/jam

(vcp 60 menit) atau 4,2 – 5,6 mm/hari (vcp 1440 menit) yang menghasilkan nilai invers kecepatan antara 0,1 - 0,2 hari/mm (vcp 1440 menit). Ditemukan adanya indikasi *rock fall* yang terdeteksi oleh SSR pada pukul 17:10, 17 Juni 2021. Deformasi linear tersebut berlanjut hingga 63 jam kemudian.

- c. *On set of failure*
Pada tahap ini, perubahan awal perilaku lereng menjadi progresif terdeteksi pukul 03:54, 18 Juni 2021. Perhitungan waktu menuju longsor atau *warning time* dihitung mulai dari *onset of failure* sampai longsor terjadi, sedangkan *possible warning time* dihitung mulai dari *onset of failure* sampai waktu terakhir evakuasi aman dapat dilakukan sebelum terjadinya longsor.
- d. Perilaku deformasi progresif
Tahap ini terdeteksi setelah *onset of failure* pada pukul 03:54 sampai longsor terjadi pada pukul 17:26, 18 Juni 2021, berlangsung selama 13 jam 32 menit. Kecepatan deformasi tertinggi tercatat mulai meningkat dari 0.2 mm/jam ke 11 mm/jam (vcp 60 menit) atau 4,8 mm/hari ke 21 mm/hari (vcp 1440 menit). Nilai invers kecepatan tercatat semakin kecil mulai 0,6 – 0,1 jam/mm (vcp 60 menit) atau antara 0,19 – 0,07 hari/mm.

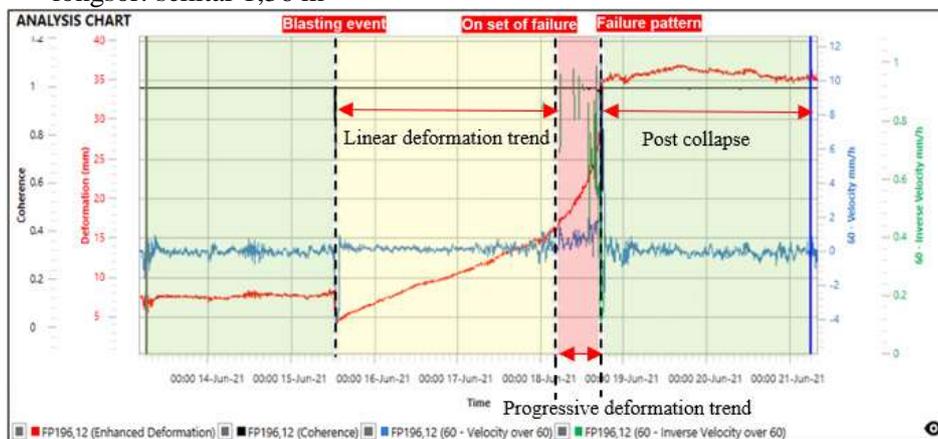
e. Longsor

Karakteristik longsor utama yang terdeteksi oleh SSR secara detail dapat dilihat sebagai berikut:

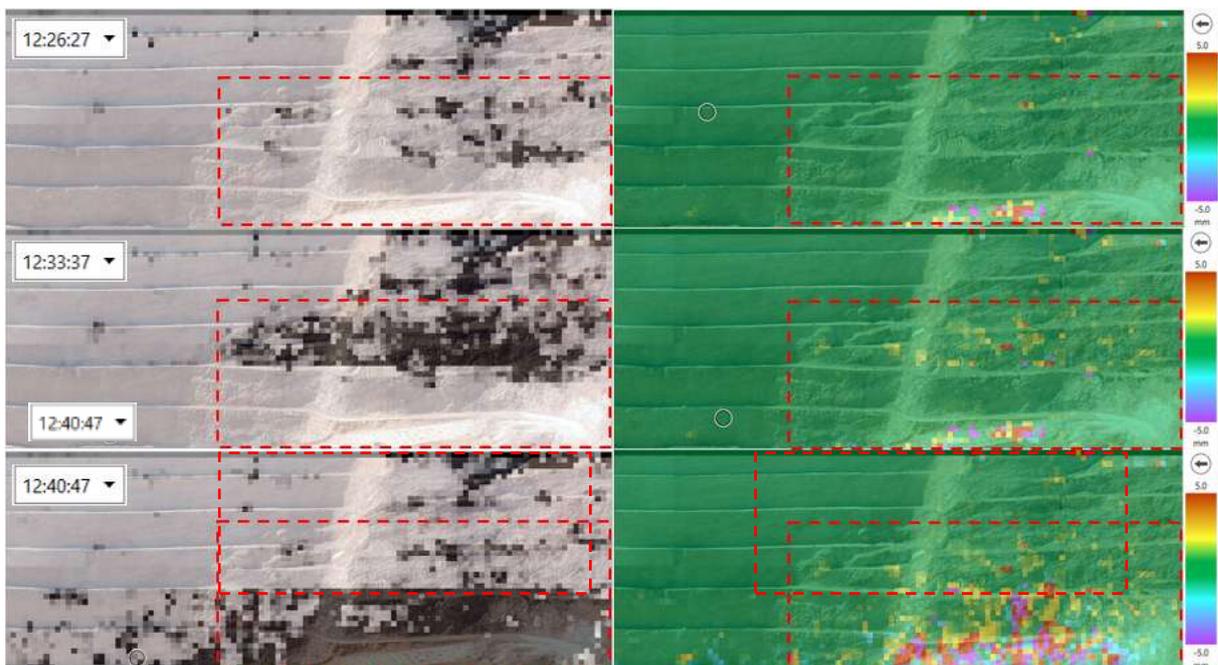
- Waktu terjadinya longsor: Pukul 17:33 tanggal 18 Juni, 2021
- Daerah longsor: Sekitar piksel (196,12)
- *Warning time*: 13 jam 32 menit.
- Deformasi maksimum pada saat longsor: 37 mm pada piksel (196,12)
- Luasan daerah longsor: 1.801,999 m²
- Ketebalan rata-rata daerah longsor: sekitar 1,36 m

- Estimasi volume longsor: 2450,719 m³
- Estimasi massa batuan yang longsor: 6.371,869 t (asumsi berat jenis 2.6 t/m³)
- Kecepatan deformasi maksimum: 11 mm/jam (vcp 60 menit) atau 21 mm/hari
- Invers kecepatan minimum: 0.09 jam/mm (vcp 60 menit) atau 0.049 hari/mm (vcp 1440 menit).

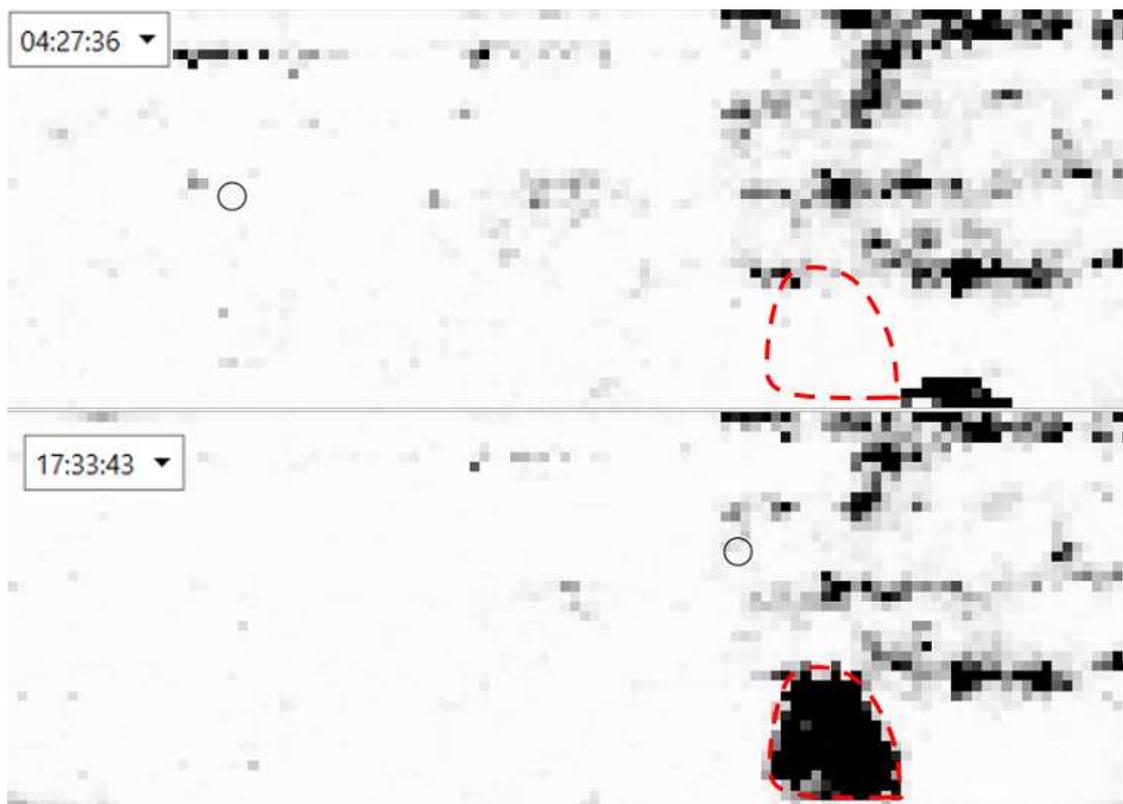
- f. Perilaku deformasi pasca longsor.
Perilaku deformasi lereng pasca longsor yang terdeteksi adalah tidak ada deformasi yang signifikan yang terdeteksi oleh SSR.



Gambar 6. Analisa balik perilaku deformasi lereng sebelum dan setelah longsor terjadi.



Gambar 7. Perbandingan koheren dan deformasi sebelum dan saat terjadinya peledakan.



Gambar 8. Penurunan koheren sebelum dan sesudah terjadinya kelongsoran.

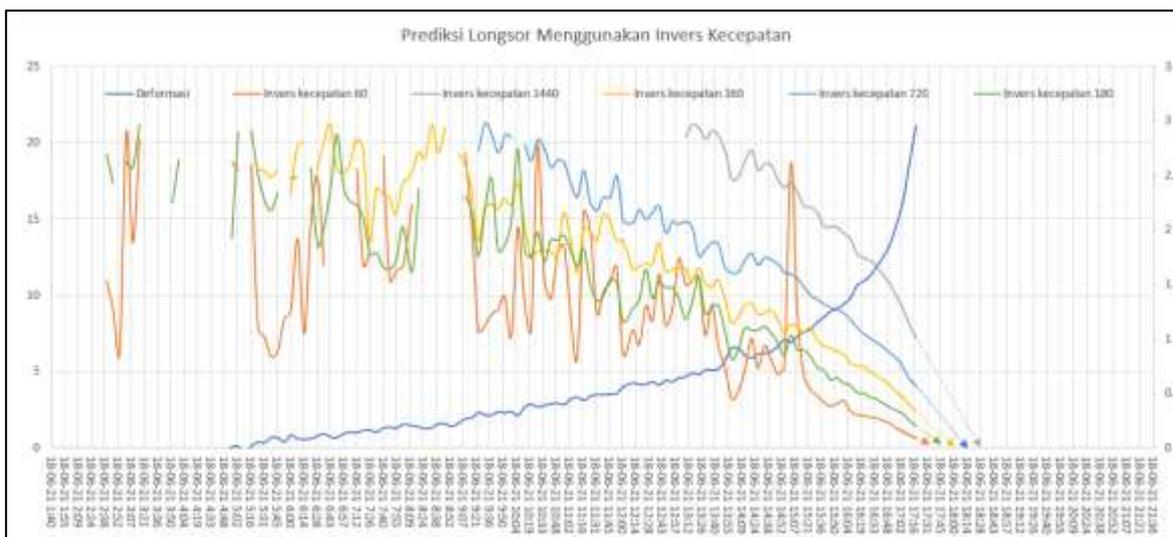
Invers Kecepatan

Perilaku progresif dapat digunakan untuk memprediksi longsor pada suatu area dengan pendekatan invers kecepatan dimana nilai invers kecepatan mendekati nol menggambarkan bahwa lereng tidak stabil/menuju longsor (Fukozuno,1985). Ketika pola deformasi progresif terus meningkat diikuti dengan persilangan kurva invers kecepatan dengan kurva deformasi, prediksi longsor dapat dilakukan. Nilai invers kecepatan minimum yang digunakan adalah 0,095 jam/mm menggunakan periode perhitungan beberapa kecepatan sebagai berikut:

- Invers kecepatan VCP60 = 17:31, 18 Juni 2021
- Invers kecepatan VCP180 = 17:45, 18 Juni 2021
- Invers kecepatan VCP360 = 18:00, 18 Juni 2021

- Invers kecepatan VCP720 = 18:14, 18 Juni 2021
- Invers kecepatan VCP1440 = 18:28, 18 Juni 2021

Aktual longsor terjadi pada pukul 17:33, 18 Juni 2021. Prediksi waktu kelongsoran menggunakan VCP 60 menit menunjukkan waktu prediksi kelongsoran pukul 17:31, 18 Juni 2021 dan menggunakan VCP 180 menit menunjukkan waktu prediksi kelongsoran pukul 17:45, 18 Juni 2021. Bila dibandingkan prediksi longsor dengan aktual longsor, maka dapat diambil kesimpulan selisih waktu prediksi longsor 2 menit lebih awal menggunakan VCP 60 menit dan 12 menit lebih cepat menggunakan VCP 180 menit dibanding waktu longsor. Detail dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 9. Prediksi waktu longsor menggunakan metode *inverse velocity*.

Penerapan alarm sebagai notifikasi dini

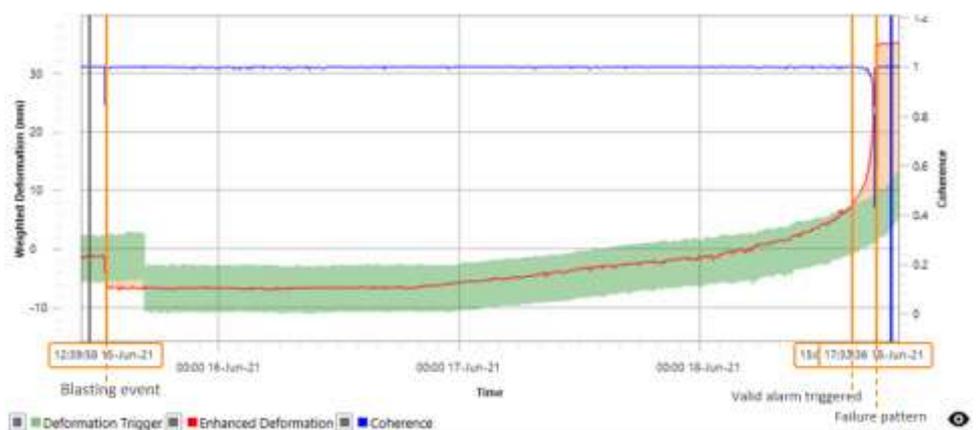
Pengaplikasian alarm pada SSR bertujuan sebagai sistem peringatan dini sebelum terjadinya longsor atau ketika deformasi mencapai ambang batas (*threshold*) yang telah ditentukan. Ketepatan dalam menentukan ambang batas alarm berguna untuk mendapatkan alarm valid yang memungkinkan dilakukannya evakuasi yang aman serta menghindari terjadinya kerugian finansial maupun korban jiwa akibat longsor dalam operasional pertambangan.

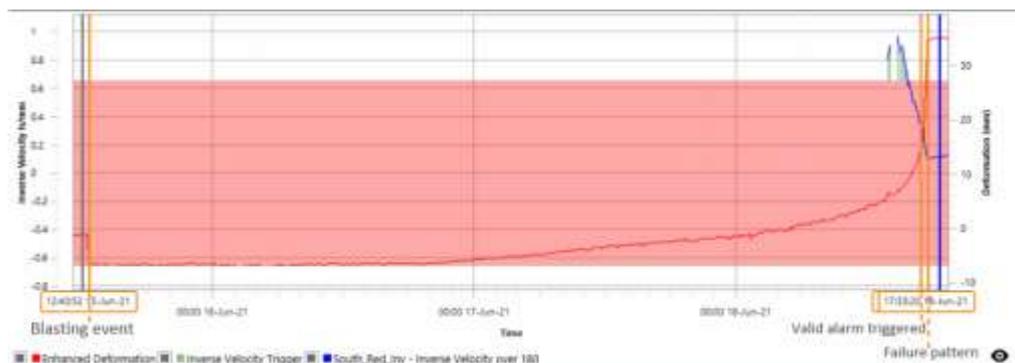
Pada penelitian ini, valid alarm terpicu 2 jam 25 menit sebelum terjadinya longsor. Alarm deformasi yang terpicu menunjukkan adanya perubahan deformasi yang mencapai ambang

batas sebesar 4 mm dalam kurun waktu 4 jam. Alarm ini disebabkan oleh pola deformasi progresif yang memiliki perubahan kecepatan dari 4 – 9 mm/jam (vcp 1440 menit).

Valid alarm selanjutnya, yaitu alarm invers kecepatan terpicu 38 menit sebelum terjadinya longsor dengan nilai ambang batas 0.66 jam/mm dengan vcp 180 menit. Alarm dengan jenis alarm invers kecepatan menunjukkan nilai minimum menuju nol ketika lereng bergerak menuju longsor.

Pemberitahuan ke tim lapangan dilakukan sebagai peringatan dini bahwa adanya pergerakan di lapangan dan adanya kemungkinan kelongsoran.





Gambar 10. Alarm deformasi dan invers kecepatan.

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. *Slope Stability Radar* (SSR) efektif digunakan untuk menganalisa perubahan perilaku deformasi sebagai tanda terjadinya kelongsoran paska kegiatan peledakan dan dapat digunakan sebagai sistem peringatan dini dalam mendeteksi perubahan perilaku deformasi lereng tambang.
2. Perilaku deformasi lereng pada scan area yang dimonitor oleh radar mengalami perubahan mulai dari fase Stabil – linear – progressive – failure setelah terjadi even peledakan pada pukul 12:40, 15 Juni 2021.
3. Hasil analisa balik menunjukkan perubahan tahap-tahap perilaku deformasi lereng pada daerah penelitian dimulai dari tidak ada deformasi yang signifikan, perilaku deformasi linear dimulai setelah kejadian ledakan yang berlangsung 2 hari 8 jam sebelum berubah menjadi progresif dalam kurun waktu 13 jam 32 menit sebelum terjadi longsor.
4. Alarm peringatan dini terpicu 2 jam 25 menit sebelum terjadinya longsor sehingga kerugian finansial maupun korban jiwa akibat longsor dalam operasional pertambangan dapat dihindari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, kami sampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada PERHAPI karena telah menyelenggarakan TPT XXX dan KONGRES XI PERHAPI 2021, serta rekan-rekan GSS *Engineer* Balikpapan yang telah membantu penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, Irwandy. (2016): Geoteknik Tambang Mewujudkan Produksi Tambang yang Berkelanjutan dengan Menjaga Kestabilan Lereng, Jakarta, PT Gramedia Pustaka Utama, 5, 290 – 292.
- Broadbent, C.D., dan Zavodni, Z.M. (1982): Influence of rock structures on stability, in stability in surface mining, *Society of Mining Engineers*, 3, 30 - 35.
- Fukuzono, T.A. (1985): New method for predicting the failure time of a slope, *Proceedings of the Fourth International Conference and Field Workshop on Landslides*, 145 - 150.
- GroundProbe (2017): SSR geotechnical training module, *Internal Document GroundProbe Support Services*.
- Reeves, B., Noon, D., Stickley, G., and Longstaff, D. (2001): Slope stability radar for monitoring mine walls. *In Proceedings of SPIE*. pp. 57–67.
- Rose, N.D., and Hungr, O. (2007): Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 44: 308–320.
- Sannang, M.A., Musa, R.H., dan Manaf, A. (2017): Analisa balik dan penentuan ambang batas alarm menggunakan

slope stability radar (SSR) studi kasus
longsor pada batuan keras,
PROSIDING TPT XXVI PERHAPI
2017, PERHAPI, Balikpapan, 294 –
308.

