Jurnal Cahaya Mandalika
https://ojs.cahayamandalika.com/index.php/jcm
Vol. 7, No.3, 2026
e-ISSN: 2721-4796
pp. 74-82

Analisis pergerakan lereng tambang menggunakan alat ssr (*slope stability radar*) pit kgu pt cipta kridatama *jobsite* pt borneo indobara di kabupaten tanah bumbu provinsi kalimantan selatan

Muhammad Iksan Hamsyah[1], Adi Kurniadi[2], Bayu Angkasa Utama[3], Sapna Rizqi Febriany[4], Briam Fansesa Adiguna[5], Muhammad Mahfud[6], Fahmi Sanjaya[7]
[1,2,3,4,5,6,7]Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia
*Corresponding Author e-mail: Ikhsan90hamsyah@gmail.com

Abstract
Mine slopes play a vital role in mining operations, making slope stability one of the most critical geotechnical challenges in the mining industry. Careful slope design is essential to ensure operational safety; however, continuous monitoring remains necessary because stable slopes may become unstable due to ground movement that can eventually trigger slope failure. One of the most advanced monitoring technologies is the GroundProbe Slope Stability Radar (SSR-XT), a ground-based radar system capable of measuring displacement with an accuracy of up to 0.04 mm. Its rapid, real-time data acquisition enables early detection of slope deformation and potential failures.This study was conducted at PT Cipta Kridatma in the PIT KGU area using SSR monitoring data from pixel coordinates x = 65, y = 26 and x = 167, y = 25 during January 2026. The observed deformation behavior was predominantly linear, with several regressive deformation events and one progressive deformation event that resulted in a slope failure on January 28, 2026, at 13:38. Failure prediction was performed using the inverse velocity method with MonitorIQ and Microsoft Excel. Back-analysis estimated the failure time at 14:28. Before failure, the monitored slope recorded a cumulative displacement of 627 mm and a velocity of 8.44 mm/hour. The failure covered approximately 2,164 m², with an estimated volume of 21,641 m³ and mass of 56,267 tons. These findings demonstrate the effectiveness of SSR monitoring and the inverse velocity method for improving slope failure prediction and geotechnical risk management.
***Keywords**: deformation; failure; slope stability radar; velocity*

Abstrak
Lereng tambang memiliki peran penting dalam kegiatan penambangan sehingga kestabilan lereng menjadi salah satu permasalahan geoteknik yang paling krusial di industri pertambangan. Perencanaan lereng yang baik diperlukan untuk menjamin keselamatan operasi, namun pemantauan secara berkelanjutan tetap harus dilakukan karena lereng yang semula stabil dapat menjadi tidak stabil akibat pergerakan massa batuan yang berpotensi menyebabkan longsor. Salah satu teknologi pemantauan lereng yang paling canggih adalah Slope Stability Radar (SSR-XT) dari GroundProbe, yaitu radar berbasis darat yang mampu mengukur perpindahan dengan ketelitian hingga 0,04 mm. Kemampuan akuisisi data secara cepat dan real-time memungkinkan deteksi dini terhadap deformasi lereng serta potensi kegagalan lereng.Penelitian ini dilakukan di PT Cipta Kridatma pada area PIT KGU menggunakan data pemantauan SSR pada koordinat piksel x = 65, y = 26 dan x = 167, y = 25 selama Januari 2026. Hasil pengamatan menunjukkan deformasi lereng didominasi pola linier, disertai beberapa deformasi regresif dan satu deformasi progresif yang menyebabkan longsor pada 28 Januari 2026 pukul 13.38. Prediksi waktu longsor dilakukan menggunakan metode *inverse velocity* dengan bantuan perangkat lunak MonitorIQ dan Microsoft Excel. Hasil *back analysis* memperkirakan waktu longsor pada pukul 14.28. Sebelum longsor, lereng mengalami perpindahan kumulatif sebesar 627 mm dengan kecepatan 8,44 mm/jam. Area longsor mencapai sekitar 2.164 m² dengan volume 21.641 m³ dan massa sekitar 56.267 ton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SSR dan metode *inverse velocity* efektif meningkatkan prediksi longsor serta pengelolaan risiko geoteknik.
Kata kunci: *ssr,* deformasi, kecepatan, longsoran

PENDAHULUAAN

Desain lereng merupakan salah satu aspek penting dalam kegiatan pertambangan terbuka karena berkaitan langsung dengan keseimbangan antara keselamatan operasi, kestabilan massa batuan, dan pencapaian target ekonomi perusahaan. Geometri lereng yang dirancang terlalu landai dapat meningkatkan volume material penutup atau *waste* yang harus dipindahkan sehingga berpotensi meningkatkan biaya penambangan. Sebaliknya, desain lereng yang terlalu curam dapat meningkatkan potensi terjadinya ketidakstabilan, terutama apabila kondisi massa batuan, struktur geologi, air tanah, dan kondisi pembebanan tidak diperhitungkan secara memadai. Oleh karena itu, desain lereng pada tambang terbuka pada dasarnya merupakan proses optimasi yang mempertimbangkan faktor teknis, keselamatan, dan ekonomi secara bersamaan (Read & Stacey, 2009; Stead & Wolter, 2015).

Dalam proses perancangan lereng tambang, informasi geoteknik memiliki peranan yang sangat penting karena karakteristik batuan dan kondisi geologi suatu lokasi tambang tidak selalu seragam. Data mengenai litologi, tingkat pelapukan, kekuatan batuan, diskontinuitas, orientasi struktur geologi, kondisi air tanah, serta karakteristik massa batuan diperlukan untuk menentukan geometri lereng yang sesuai. Semakin lengkap dan representatif data geoteknik yang diperoleh, semakin baik pula kemampuan ahli geoteknik dalam memahami mekanisme keruntuhan dan menentukan parameter desain lereng. Pendekatan desain yang didasarkan pada data

Copyright©2026, Author (s)
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

lapangan, investigasi geoteknik, pemodelan, dan pemantauan kondisi aktual akan membantu mengurangi ketidakpastian dalam penentuan sudut lereng serta meningkatkan keandalan desain (Hoek & Diederichs, 2006; Stead & Wolter, 2015).

Optimasi desain lereng menjadi semakin penting ketika perusahaan berupaya meningkatkan perolehan cadangan (*ore recovery*) tanpa mengabaikan aspek keselamatan. Lereng yang lebih curam secara geometris dapat mengurangi volume *waste* sehingga memungkinkan peningkatan *stripping ratio* dan efisiensi penambangan. Namun, peningkatan kemiringan lereng juga dapat mengurangi margin kestabilan dan meningkatkan sensitivitas lereng terhadap perubahan kondisi geologi maupun hidrogeologi. Oleh sebab itu, penerapan sudut lereng yang optimal tidak dapat hanya ditentukan berdasarkan pertimbangan ekonomi, tetapi harus didukung oleh analisis kestabilan dan pemantauan deformasi secara berkelanjutan. Prinsip *observational approach* menjadi relevan dalam kondisi tersebut karena desain dapat dievaluasi dan disesuaikan berdasarkan perilaku aktual lereng selama kegiatan penambangan berlangsung (Read & Stacey, 2009; Stead & Wolter, 2015).

Kegagalan lereng pada tambang terbuka dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap keselamatan pekerja, alat berat, infrastruktur tambang, serta keberlangsungan produksi. Mekanisme kegagalan dapat berupa longsoran bidang, longsoran baji, longsoran guling, longsoran melingkar, maupun mekanisme kompleks yang dipengaruhi oleh kombinasi struktur geologi dan karakteristik massa batuan. Selain faktor geologi, perubahan tekanan air pori, curah hujan, aktivitas peledakan, penggalian bertahap, dan perubahan geometri lereng dapat memengaruhi kondisi kestabilan. Dengan demikian, pemahaman terhadap perilaku deformasi sebelum terjadinya kegagalan menjadi bagian penting dalam pengelolaan risiko geoteknik pada tambang terbuka (Wyllie & Mah, 2004; Read & Stacey, 2009).

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan kestabilan lereng adalah sistem pemantauan deformasi secara *real-time*. Perkembangan teknologi pemantauan geoteknik memungkinkan pergerakan permukaan lereng dideteksi dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi sebelum perubahan tersebut dapat diamati secara visual. Salah satu teknologi yang banyak digunakan pada kegiatan pertambangan adalah *Slope Stability Radar* (SSR). Teknologi radar memungkinkan pengukuran deformasi permukaan lereng dari jarak tertentu tanpa memerlukan kontak langsung dengan objek yang dipantau. Keunggulan tersebut menjadikan radar sebagai salah satu instrumen yang bermanfaat untuk memantau lereng tambang dalam kondisi operasional yang dinamis (Carlà et al., 2019; Macciotta et al., 2016).

Penggunaan SSR memungkinkan pengamatan perubahan deformasi secara spasial dan temporal. Data hasil pemantauan dapat digunakan untuk mengetahui lokasi yang mengalami pergerakan, besarnya perpindahan, kecepatan deformasi, serta perubahan pola deformasi dari waktu ke waktu. Informasi tersebut sangat penting karena lereng yang akan mengalami kegagalan pada kondisi tertentu dapat menunjukkan perubahan perilaku sebelum keruntuhan terjadi. Dengan pengamatan secara kontinu, perkembangan deformasi dapat dianalisis sehingga indikasi ketidakstabilan dapat diketahui lebih awal dan dapat digunakan sebagai salah satu dasar pengambilan keputusan dalam sistem manajemen risiko geoteknik tambang (Carlà et al., 2019; Intrieri et al., 2019).

Pola deformasi lereng sebelum mengalami longsoran pada umumnya dapat dianalisis berdasarkan perubahan kecepatan deformasi terhadap waktu. Secara konseptual, perilaku deformasi dapat menunjukkan pola regresif, transisional atau linear, dan progresif. Pada deformasi regresif, kecepatan pergerakan cenderung mengalami penurunan sehingga menunjukkan adanya kecenderungan stabilisasi. Sebaliknya, deformasi progresif ditandai oleh peningkatan kecepatan pergerakan yang dapat mengindikasikan semakin dekatnya lereng terhadap kondisi keruntuhan. Sementara itu, pola transisional atau linear menunjukkan perkembangan deformasi yang relatif konstan dalam periode tertentu. Identifikasi pola tersebut menjadi penting dalam interpretasi data radar karena perubahan kecepatan dapat memberikan informasi mengenai perkembangan kondisi kestabilan lereng (Carlà et al., 2017; Carlà et al., 2019).

Deteksi dini terhadap potensi longsoran tidak hanya membutuhkan data deformasi, tetapi juga membutuhkan metode analisis yang mampu mengubah data pemantauan menjadi informasi yang dapat digunakan untuk memperkirakan waktu menuju kegagalan (*time to failure*). Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah analisis *inverse velocity* atau metode yang memanfaatkan hubungan antara kecepatan deformasi dan waktu. Konsep tersebut didasarkan pada perubahan kecepatan deformasi yang terjadi menjelang kegagalan, sehingga kecenderungan peningkatan kecepatan dapat diekstrapolasi untuk memperoleh estimasi waktu terjadinya keruntuhan. Meskipun demikian, prediksi waktu longsor tetap memiliki ketidakpastian karena perilaku massa batuan dapat dipengaruhi oleh kondisi geologi, air tanah, geometri lereng, dan faktor eksternal lainnya (Fukuzono, 1985; Carlà et al., 2017).

Dalam pemantauan lereng berbasis SSR, analisis nilai *Velocity, Critical Point* (VCP) dan *Monitoring IQ* dapat digunakan sebagai bagian dari pendekatan evaluasi perilaku deformasi. Parameter tersebut dapat membantu mengidentifikasi perubahan karakteristik pergerakan pada area pemantauan dan mendukung interpretasi kondisi lereng. Penggunaan lebih dari satu parameter atau metode analisis menjadi penting karena prediksi keruntuhan berdasarkan satu indikator saja dapat menghasilkan ketidakpastian. Perbandingan hasil prediksi dari beberapa pendekatan dapat memberikan gambaran mengenai konsistensi estimasi waktu longsor sekaligus membantu ahli geoteknik dalam melakukan evaluasi terhadap kondisi aktual lereng (Carlà et al., 2017; Intrieri et al., 2019).

Selain digunakan untuk peringatan dini, data pemantauan deformasi dapat dimanfaatkan untuk melakukan *back analysis* terhadap desain lereng yang telah diterapkan. *Back analysis* merupakan proses evaluasi terhadap kondisi lereng berdasarkan perilaku aktual yang terjadi di lapangan dengan tujuan memperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai parameter geoteknik dan mekanisme keruntuhan. Hasil analisis tersebut dapat digunakan untuk membandingkan kondisi aktual dengan asumsi yang digunakan pada tahap desain sebelumnya. Dengan demikian, hasil pemantauan tidak hanya berfungsi sebagai alat keselamatan, tetapi juga dapat menjadi sumber data untuk meningkatkan kualitas desain lereng pada tahap penambangan berikutnya (Hoek & Diederichs, 2006; Read & Stacey, 2009).

Pendekatan *back analysis* juga memungkinkan perusahaan melakukan evaluasi terhadap keberhasilan desain lereng secara lebih objektif. Apabila deformasi yang terukur masih berada dalam pola yang dapat diterima, maka desain dapat dievaluasi berdasarkan respons aktual massa batuan. Sebaliknya, apabila ditemukan peningkatan deformasi dan perubahan pola ke arah progresif, kondisi tersebut dapat menjadi dasar untuk mengevaluasi kembali geometri lereng, kondisi struktur geologi, maupun parameter material yang digunakan dalam analisis kestabilan. Pendekatan ini sejalan dengan konsep pemantauan sebagai bagian integral dari desain geoteknik karena kondisi aktual lereng dapat memberikan informasi baru yang tidak seluruhnya dapat diperoleh melalui investigasi awal (Read & Stacey, 2009; Stead & Wolter, 2015).

Berdasarkan uraian tersebut, pemantauan deformasi secara *real-time* menggunakan SSR memiliki peranan penting dalam memahami perilaku lereng tambang dan mendukung upaya deteksi dini terhadap potensi kegagalan. Data deformasi yang diperoleh secara kontinu dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan kecepatan, menentukan pola deformasi, serta melakukan estimasi waktu menuju longsoran. Selanjutnya, hasil pemantauan tersebut dapat dibandingkan dengan pendekatan prediksi yang berbeda sehingga dapat diketahui tingkat kesesuaian antar-metode dalam memperkirakan waktu kegagalan lereng (Carlà et al., 2019; Intrieri et al., 2019).

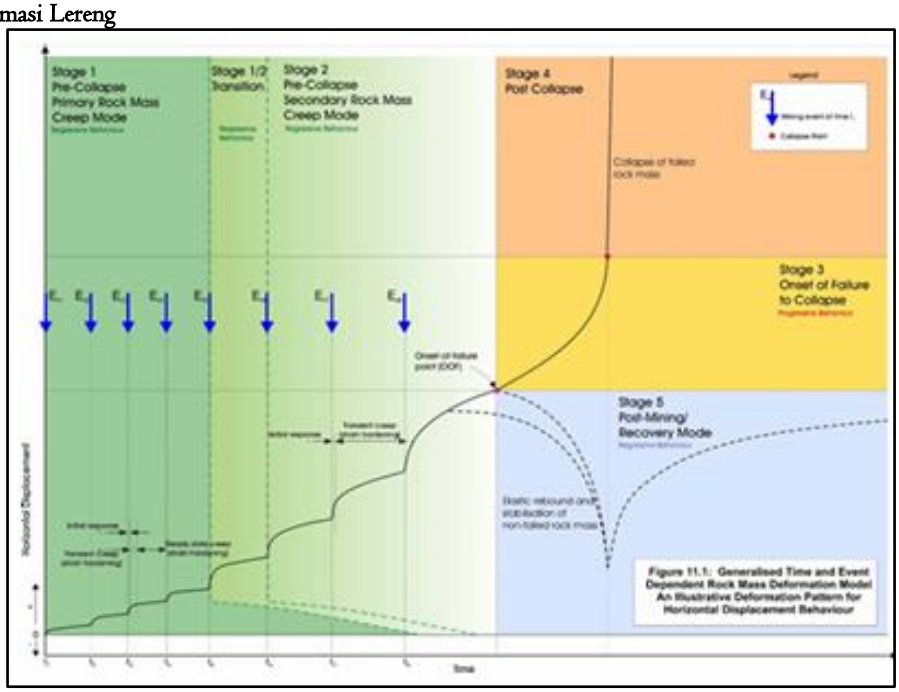
Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik deformasi pada suatu lereng tambang berdasarkan data pemantauan SSR serta mengevaluasi perubahan pola deformasi yang terjadi sebelum kegagalan lereng. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui perbandingan prediksi waktu terjadinya longsoran berdasarkan nilai VCP dan *Monitoring IQ*. Hasil perbandingan tersebut selanjutnya digunakan sebagai salah satu dasar dalam melakukan *back analysis* terhadap kondisi lereng tambang. Dengan pendekatan tersebut, penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai perilaku deformasi aktual lereng serta menjadi masukan dalam evaluasi desain lereng dan peningkatan pengelolaan risiko geoteknik pada kegiatan pertambangan terbuka (Read & Stacey, 2009; Carlà et al., 2017).

KAJIAN TEORITIS

Pemantauan Lereng

Dalam kegiatan penambangan, kegagalan pada tahap perancangan maupun perhitungan lereng masih dapat terjadi akibat keterbatasan informasi geologi dan geoteknik yang belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi material sebenarnya di lapangan. Kondisi tersebut dapat memicu terjadinya longsor atau pergerakan lereng yang berpotensi mengganggu bahkan membahayakan aktivitas penambangan (Supandi, 2011). Oleh karena itu, monitoring menjadi salah satu upaya penting yang dilakukan melalui proses pengukuran dan pengumpulan data secara berkala untuk mengamati perubahan yang terjadi pada suatu objek atau lokasi (Putri dkk., 2025). Menurut Hawley & Cunning (2017), tujuan utama sistem pemantauan lereng tambang adalah memberikan peringatan dini terhadap perkembangan kondisi ketidakstabilan lereng, sehingga tindakan mitigasi dapat segera dilakukan guna mengurangi atau mencegah dampak yang ditimbulkan akibat ketidakstabilan tersebut.

Karakteristik Deformasi Lereng



Gambar 1 Perilaku Deformasi Menurut (Marcer 2006)

Berdasarkan hasil kajian terhadap berbagai kejadian longsor lereng tambang di sejumlah lokasi pertambangan di dunia, Mercer (2006) mengelompokkan tahapan deformasi lereng tambang menjadi lima fase, yaitu:

Tahap 1 – Fase sebelum longsor yang ditandai dengan terjadinya rayapan primer (primary creep) pada massa batuan.
Tahap 2 – Fase sebelum longsor yang ditandai dengan rayapan sekunder (secondary creep) pada massa batuan.
Tahap 3 – Fase awal terjadinya longsor (*onset of failure*), ketika lereng mulai menunjukkan perilaku kegagalan.
Tahap 4 – Fase setelah longsor (*post-failure*), yang menggambarkan kondisi lereng setelah kegagalan terjadi.

Tahap 5 – Fase pasca-penambangan atau pasca-pemulihan, yang ditandai dengan kembali terjadinya rayapan massa batuan sebagai bagian dari proses penyesuaian lereng.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini menerapkan pendekatan yang diawali dengan pengumpulan bahan penelitian, meliputi kajian teori serta data yang diperoleh melalui pengamatan langsung terhadap objek di lapangan. Pelaksanaan penelitian dilakukan secara bertahap, yang terdiri atas tahap pra-lapangan, tahap lapangan, dan tahap pasca-lapangan.

Tahap Pra Lapangan

Tahap pra-lapangan merupakan tahap persiapan yang dilakukan sebelum kegiatan pengambilan data di lapangan. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan seluruh kebutuhan penelitian telah dipersiapkan dengan baik. Adapun kegiatan yang dilakukan pada tahap ini meliputiStudi literatur

1. Observasi lapangan
2. Penentuan lokasi pengamatan
3. Persiapan alat dan bahan yang meliputi alat pelindung diri, *handphone,* alat tulis, kalkultor dan *laptop*

Tahap Lapangan

Tahap lapangan merupakan tahap pengumpulan data penelitian. Data diperoleh melalui observasi secara langsung di lokasi penelitian serta data pendukung yang disediakan oleh perusahaan. Data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder.

Data Primer

- Data Monitoring Radar SSR (*Slope Stability Radar*)
- Strike and dip

Data Sekunder

- Foto Drone

Tahap Pasca Lapangan

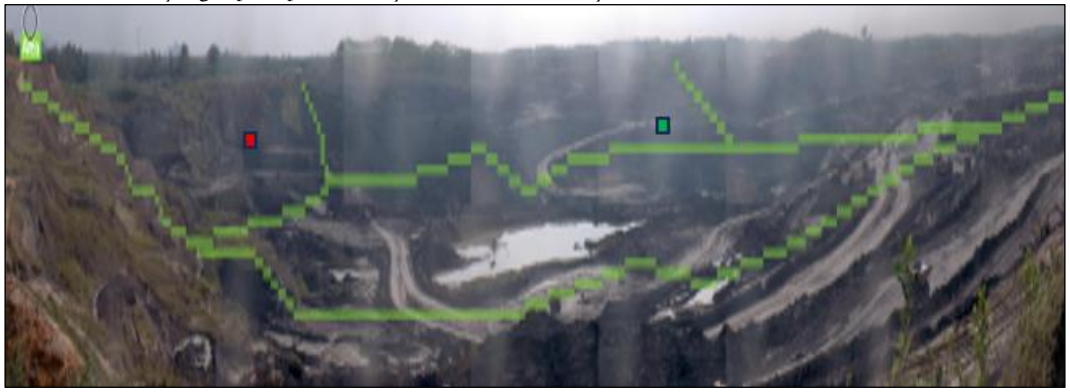
Pada tahap *pasca* lapangan yaitu tahap dimana data yang telah didapatkan dilapangan selanjutnya langsung di olah:

1. Mengumpulkan data hasil monitoring dari Slope Stability Radar (SSR) yang berupa nilai deformasi dan velocity. Data tersebut kemudian diolah untuk mengetahui karakteristik deformasi yang terjadi pada lereng.
2. Melakukan interpretasi terhadap hasil pembacaan SSR yang terdiri atas data deformasi, velocity, dan pixel. Nilai deformasi digunakan untuk mengidentifikasi pola deformasi lereng, sedangkan data velocity dimanfaatkan untuk mengevaluasi laju pergerakan lereng. Sementara itu, data pixel digunakan untuk menentukan lokasi yang menunjukkan indikasi potensi longsoran. Seluruh hasil analisis, seperti nilai deviasi, perpindahan, perpindahan kumulatif, dan pergerakan lereng, disajikan dalam bentuk tabel kemudian dievaluasi berdasarkan klasifikasi tingkat peringatan longsor.
3. Melakukan prediksi waktu terjadinya longsoran berdasarkan data velocity pada setiap pembacaan radar, yaitu VCP 60 dan VCP 180. Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak Monitor IQ dan Microsoft Excel sehingga diperoleh estimasi waktu terjadinya longsoran berdasarkan tren perubahan kecepatan lereng.

HASIL DAN PEMBAHASAN

PT Cipta Kridatama adalah salah satu perusahaan kontraktor pertambangan batubara di Provinsi Kalimantan Selatan Slope Stability Radar (SSR) digunakan sebagai instrumen untuk memantau pergerakan lereng pada PIT KGU. Pemanfaatan SSR dipilih karena mampu menyajikan informasi mengenai pergerakan lereng secara real time sehingga kondisi lereng dapat dipantau secara berkelanjutan.

Analisis data dari penelitian ini dilakukan dari hasil pembacaan radar SSR pada area PIT KGU PT Cipta Kridatama yang ditransmisikan ke SSR Viewer dari awal 20 Januari hingga akhir 20 Februari 2026. Pada area PIT KGU menggunakan SSR jenis XT untuk melakukan pemantauan lereng dengan area yang di pantau *Sidewall* utara, *lowwall, Sidewall Selatan* dan *Sump Gibson* area yang konsen yakni *Sidewall* utara dan *Lowwall* . Area PIT KGU *sidewall* utara yang dipilih dengan piksel SSR, yaitu x = 65.00 dan y = 26.00 dan *lowwall* yang dipilih pixel SSR, yaitu x : 176.00 dan y : 25.00

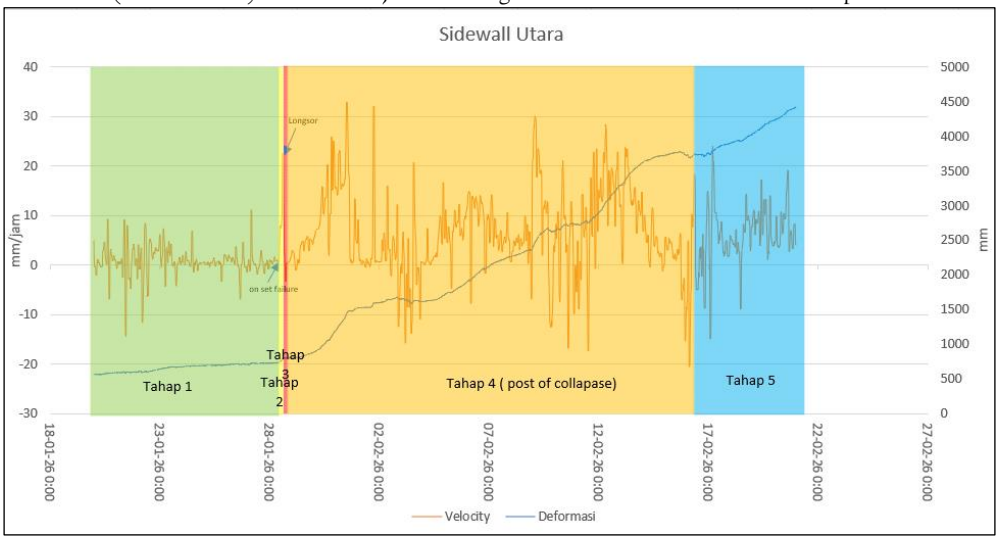


Gambar 1 Daerah pemantauan PIT KGU melalui SSR *viewer*

PERILAKU DEFORMASI

SIDEWALL UTARA

Dari analisis data pemantauan lereng yang dilakukan oleh SSR dimulai dari 20 Januari 2026 hingga 20 February 2026, didapatkan bahwa kejadian longsor terjadi pada tanggal 20 January 2026. Terdapat peningkatan kecepatan deformasi pada lereng yang mengalami longsor, dengan analisis yang difokuskan pada piksel yang berada pada koordinat X:65.00 dan Y:26.00 serta memiliki luas area sebesar (6.77x6.62 m). Piksel ini dijadikan sebagai titik referensi untuk memahami perilaku deformasi lereng.



Gambar 2 Grafik perubahan pergerakan lereng dari 20 Januari – 20 Februari 2026

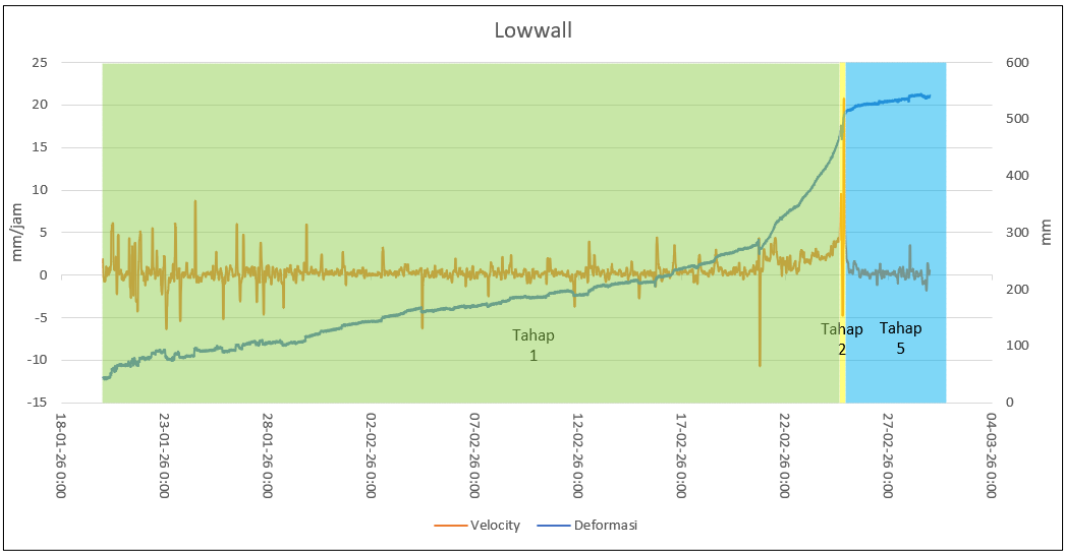
Berdasarkan gambar 2 didapatkan data hasil pembacaan SSR dari bulan January - February 2026, kemudian dilakukan analisis perilaku deformasi dan *velocity* per setiap hari. Perilaku deformasi pada bulan 20 January – 20 February 2026 dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe sebagai berikut:

1. Tahap I : Pada fase ini merupakan fase dimana pergerakan lerengnya stabil/linear pada fase ini dimulai dari pukul 00:04 wita tanggal 20 January 2026 – 09:48 wita tanggal 28 January 2026. Pada tahap ini berlangsung selama selama 201 jam 43 menit. Dengan kecepatan rata rata velocitynya 0.814 mm/jam.
2. Tahap 2 : pada fase ini merupakan fase progresif pada fase ini di mulai dari 09:58 wita tanggal 28 January 2026 – 13:20 wita tanggal 28 january 2026. Pada tahap ini berlangsung selama 3 jam 21 menit dengan kecepatan velocitynya 5.30 mm/jam.
3. Tahap 3 : Pada fase guguran material ini terjadi dari pukul 13:30 wita tanggal 28 January 2026 – 14:37 wita tanggal 28 january 2026 dengan kecepatan velocitynya 22:61 mm/jam. Pada tahap ini berlangsung selama 1 jam 7 menit dan kecepatan rata rata nya 13,677 mm/jam.
4. Tahap 4 : pada fase ini merupakan pasca keruntuhan terjadi dimulai pada pukul 14:47 wita pada tanggal 28 january 2026 – pukul 07:39 wita pada tanggal 13 February 2026. Pada tahap ini berlangsung selama 376 jam 52 menit dengan kecepatan rata ratanya 6.695 mm/jam.
5. Tahap 5 : pada fase ini merupakan fase dimana dimana lereng kembali normal dan deformasinya kembali normal dimulai dari pukul 07:49 tanggal 13 Februari 2026 – pukul 23:59 tanggal 20 februari 2026 dengan rentang waktu 184 jam 10 menit. Dengan kecepatan rata rata velocity 5.64 mm/jam

Terdapat satu kali longsor pada bulan Januari, yaitu pada tanggal 28 Januari pukul 14:28 (WITA). Longsor ini secara pemantauan SSR sudah dapat dikenali dari perilaku deformasi progresif yang dicirikan oleh pola garis deformasi (berwarna merah) terus bergerak dimulai dari 28 Januari 2026 pukul 10:07 sampai tanggal 28 Januari pukul 14:28.

LOWWALL

Dari analisis data pemantauan lereng yang dilakukan oleh SSR dimulai dari 20 Januari 2026 hingga 28 February 2026. Terdapat peningkatan kecepatan deformasi pada lereng yang mengalami progresif, dengan analisis yang difokuskan pada piksel yang berada pada koordinat X:176 dan Y:25 serta memiliki luas area sebesar meter (9.22x9.11 m). Piksel ini dijadikan sebagai titik referensi untuk memahami perilaku deformasi lereng.



Gambar 3 Grafik perubahan pergerakan lereng dari 20 Januari – 28 Februari 2026

Berdasarkan gambar 3 didapatkan data hasil pembacaan SSR dari bulan January - February 2026, kemudian dilakukan analisis perilaku deformasi dan *velocity* per setiap hari. Perilaku deformasi pada bulan January – February 2026 dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe sebagai berikut:

1. Tahap I : Pada fase ini merupakan fase dimana pergerakan lerengnya stabil/linear pada fase ini dimulai dari pukul 00:04 wita tanggal 20 January 2026 – 19:29 wita tanggal 24 Februari 2026. Pada tahap ini berlangsung selama selama 859 jam 25 menit. Dengan kecepatan rata rata velocitynya 0.50 mm/jam.
2. Tahap 2 : Pada fase ini merupakan fase progresif pada fase ini di mulai dari 19:39 wita tanggal 24 Februari 2026 – 20:37 wita tanggal 24 Februari 2026. Pada tahap ini berlangsung selama 58 Menit dengan kecepatan velocitynya 17.16mm/jam.
3. Tahap 5 : Pada fase ini merupakan fase dimana dimana lereng kembali normal dan deformasinya kembali normal dimulai dari pukul 20:47 tanggal 24 Februari 2026 – pukul 23:59 tanggal 28 februari 2026 dengan rentang waktu 184 jam 10 menit. Dengan kecepatan rata rata velocity 0.45 mm/jam.

PREDIKSI WAKTU LONGSORAN

Dalam penelitian ini, estimasi waktu terjadinya longsoran dilakukan menggunakan dua metode, yaitu Microsoft Excel dan Monitor IQ. Pada Monitor IQ, prediksi dilakukan melalui fitur Add Forecast pada grafik inverse velocity. Hasil proyeksi berupa garis tren linear yang mengarah ke sumbu waktu (sumbu x) digunakan sebagai dasar untuk memperkirakan waktu terjadinya longsoran. Selanjutnya, hasil prediksi dari Monitor IQ dibandingkan dengan hasil pengolahan menggunakan Microsoft Excel untuk mengetahui metode yang memberikan estimasi waktu longsoran yang paling mendekati kondisi aktual. Dapat dilihat pada (Tabel 1).

Tabel 1 Perbandingan waktu longsoran berdasarkan Exel dan Monitor IQ

Pembacaan	Prediksi	Selisih	Aktual
Exel 60	15:24	64 menit	14:28
Monitor IQ 60	14:03	25 Menit	
Exel 180	14:52	34 menit	
Monitor IQ 180	14:15	13 Menit	

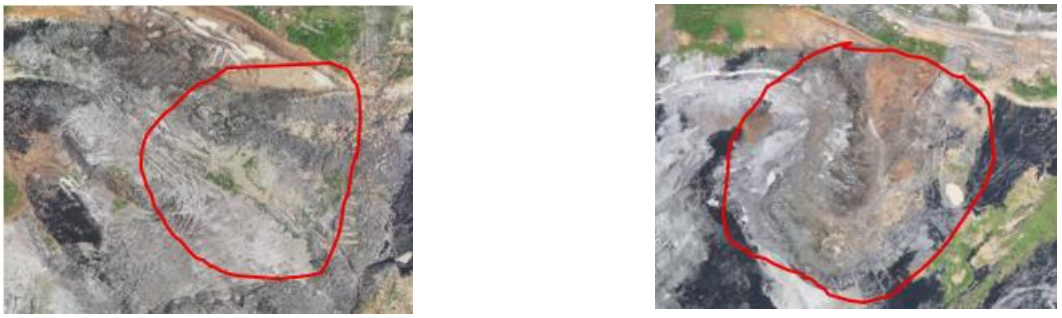
Berdasarkan hasil analisis menggunakan data VCP 60, prediksi waktu longsoran dengan Monitor IQ menunjukkan kejadian longsor diperkirakan terjadi pada 28 Januari 2026 pukul 14.03, sedangkan hasil pengolahan menggunakan Microsoft Excel memperkirakan longsoran terjadi pada 28 Januari 2026 pukul 15.24. Waktu aktual terjadinya longsoran tercatat pada 28 Januari 2026 pukul 14.28. Dengan membandingkan hasil prediksi terhadap waktu aktual, diperoleh bahwa hasil prediksi menggunakan Monitor IQ memiliki selisih waktu sekitar 25 menit, sehingga memberikan estimasi yang lebih mendekati waktu kejadian longsoran dibandingkan dengan hasil pengolahan menggunakan Microsoft Excel.

Pada analisis menggunakan data VCP 180, hasil prediksi dari Monitor IQ menunjukkan waktu longsoran diperkirakan terjadi pada 28 Januari 2026 pukul 14.15, sedangkan hasil pengolahan menggunakan Microsoft Excel memperkirakan longsoran terjadi pada 28 Januari 2026 pukul 14.52. Waktu aktual longsoran tetap terjadi pada 28 Januari 2026 pukul 14.28. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa prediksi menggunakan Monitor IQ memiliki selisih waktu sekitar 13 menit, sedangkan Microsoft Excel memiliki selisih sekitar 24 menit. Dengan demikian, pada pembacaan VCP 180, metode yang menggunakan Monitor IQ memberikan estimasi waktu longsoran yang lebih mendekati waktu kejadian aktual.

BACK ANALISIS LONGSORAN

Back analysis dilakukan untuk mengetahui mekanisme longsoran, waktu terjadinya failure, serta karakteristik deformasi lereng berdasarkan data pergerakan yang diperoleh dari monitoring *Slope Stability Radar* (SSR). Tujuan utama dari back analysis pada event failure adalah untuk mengkarakterisasikan respons rock slope terhadap behaviour deformasi, velocity, dan inverse velocity, guna mendapatkan referensi yang dapat digunakan untuk konfigurasi alarm.

Litologi pada sidewall utara ini terdiri dari material top soil (warna coklat) dan dibawahnya claystone (warna abu abu). Pada material top soil yang bersifat lepas, serta memiliki tingkat kekompakanyang rendah, serta nilai kekuatan gesernya yang rendah. Sehingga menyebabkan material menjadi mudah menggalami deformasi ketika menerima beban tambahan maupun gravitasi yang menyebabkan kestabilan lereng berkurang. Pada material claystone ini memiliki sifat yang plastis ketika jenuh air.
Kondisi litologi tersebut dapat mempegaruhi kestabilan lereng terutama ketika terdapat genangan air dapat dilihat pada gambar (4) terdapat genangan air yang menyebabkan material daerah situ menjadi jenuh yang menyebabkan terjadinya longsoran. Air yang meresap ke dalam lapisan tanah dapat menurunkan kekuatan geser tanah dapat menurunkan kekuatan geser material dan kontak antara topsoil dan claystone ini berpotensi berkembang menjadi bidang gelincir planar. Oleh karena itu Kondisi ini menyebabkan massa tanah pada bagian atas meluncur mengikuti bidang tersebut searah dengan kemiringan lereng, sehingga memicu terjadinya longsoran bidang (planar failure) Dapat dilihat pada gambar (4) merupakan perbandingan sebelum dan sesudah longsoran.



Gambar 4 Perbandingan sebelum dan sesudah longsor pada sidewall utara



Gambar 5 Lereng yang mengalami longsoran pada 28 Januari 2026

Dapat dilihat pada (Gambar 4) dilihat bahwa lerengn yang mengalami longsor ini berada di sidewall utara dan pada litologi pada daerah tersebut di dominasi oleh soil material lepas. Dapat dilihat pada (Tabel 2) merupakan karakteristik dari failure yang terjadi.

Tabel 2 Karakteristik *Failure*

Parameter	Nilai
Waktu *Failure*	14:28 28 January 2026
Waktu menuju *Failure OSF*	10:07 28 january 2026 – 14:28 28 January 2026
Deformasi maximun pada *Failure* area	803 mm
Luas Area *Failure*	2.164 m^2
Kedalaman permukaan slip	10 Meter
Estimasi volume *Failure*	21.641 m^3

Parameter	Nilai
Estimasi Berat	56.267 t
Jenis Longsoran	Busur
Maksimun velocity dalam 1 Jam	22.6 mm/jam
Minimun Inverse Velocity 1 Jam	0.04 mm/jam
Maksimun *velocity* dalam 1 hari	1,81 mm/jam
Minimun *Inverse Velocity* 1 hari	0.552 mm/jam

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perilaku deformasi lereng pada PIT KGU, khususnya pada *sidewall* utara dan *lowwall*, dapat disimpulkan bahwa proses menuju terjadinya longsoran berlangsung secara bertahap dan menunjukkan perubahan karakteristik deformasi dari waktu ke waktu. Pada *sidewall* utara, deformasi berkembang melalui beberapa tahapan yang menunjukkan adanya perubahan respons lereng sebelum akhirnya mengalami longsoran. Tahap 1 berlangsung selama 201 jam 43 menit, tahap 2 selama 3 jam 21 menit, tahap 3 selama 1 jam 7 menit, tahap 4 selama 376 jam 52 menit, dan tahap 5 selama 184 jam 10 menit. Rangkaian tahapan tersebut menunjukkan bahwa deformasi lereng tidak terjadi secara tiba-tiba, tetapi didahului oleh perkembangan pergerakan yang dapat diamati melalui sistem pemantauan deformasi. Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya pemantauan secara kontinu untuk mengenali perubahan perilaku lereng sebelum mencapai kondisi kegagalan.

Pada area *lowwall*, perkembangan deformasi juga menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan *sidewall* utara. Tahap 1 berlangsung selama 859 jam 25 menit, sedangkan tahap 2 berlangsung selama 58 menit dan tahap 4 selama 184 jam 10 menit. Perbedaan durasi pada setiap tahap menunjukkan bahwa respons deformasi tidak selalu berlangsung dengan pola yang sama pada setiap bagian lereng. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik massa batuan, struktur geologi, geometri lereng, kondisi pembebanan, maupun faktor hidrogeologi. Oleh karena itu, interpretasi kestabilan lereng perlu mempertimbangkan karakteristik deformasi secara spasial dan temporal, bukan hanya berdasarkan satu titik atau satu parameter pengamatan.

Berdasarkan hasil analisis prediksi waktu longsoran menggunakan VCP 60, VCP 180, *Monitor IQ* 60, dan *Monitor IQ* 180, diperoleh adanya perbedaan antara hasil perhitungan menggunakan Excel dengan hasil analisis pada sistem *Monitor IQ*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa metode dan interval analisis yang digunakan dapat memberikan estimasi waktu kegagalan yang berbeda. Dari beberapa pendekatan yang dibandingkan, hasil *Monitor IQ* 180 menunjukkan prediksi yang paling mendekati waktu longsoran aktual. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan interval pemantauan dan metode analisis yang sesuai memiliki peranan penting dalam meningkatkan ketepatan interpretasi perkembangan deformasi dan estimasi waktu menuju kegagalan.

Hasil *back analysis* menunjukkan bahwa longsoran diperkirakan terjadi pada pukul 14:28 tanggal 28 Januari 2026, sedangkan kejadian longsoran aktual tercatat pada pukul 14:38 tanggal 28 Januari 2026. Dengan demikian, hasil analisis mampu memberikan indikasi waktu kegagalan sebelum kejadian aktual. Pada saat prediksi tersebut, deformasi tercatat mencapai sekitar 803 mm. Area longsoran diperkirakan seluas 2.164 m^2 dengan kedalaman sekitar 10 m, sehingga estimasi volume material yang mengalami longsoran mencapai 21.641 m^3. Berdasarkan estimasi tersebut, berat material yang terlibat dalam longsoran mencapai sekitar 56.267 ton.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pemantauan deformasi menggunakan SSR, analisis VCP dan *Monitor IQ*, serta *back analysis* dapat digunakan secara bersama-sama untuk memahami perkembangan kestabilan lereng pada PIT KGU. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa longsoran yang terjadi merupakan tipe longsoran busur dengan perkembangan deformasi yang dapat diamati sebelum kegagalan. Perbedaan antara waktu prediksi dan waktu kejadian aktual juga menunjukkan bahwa metode pemantauan dan analisis dapat memberikan informasi peringatan dini yang penting bagi pengelolaan risiko geoteknik. Dengan demikian, integrasi data deformasi *real-time* dengan analisis prediksi dan *back analysis* dapat menjadi dasar evaluasi desain lereng serta mendukung pengambilan keputusan terkait keselamatan dan kegiatan operasional tambang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, kasih karunia, serta penyertaan-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kekuatan, dan kemudahan dalam menyelesaikan jurnal ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Bapak dan Ibu Dosen atas bimbingan, arahan, masukan, serta saran yang diberikan selama proses penyusunan jurnal ini.Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada PT Cipta Kridatama Jobsite PT Borneo Indobara atas kesempatan, dukungan, dan kerja sama yang telah diberikan selama pelaksanaan penelitian. Penulis turut menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga proses penelitian hingga penyusunan jurnal ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR REFERENSI

1. Andara, G., Arseno, D., & Armi, N. (2020). Analisis Kinerja Light Detecting And Ranging (Lidar) Untuk Deteksi Objek Menggunakan Metode Jarak Euclidean. *e-Proceeding of Engineering*.
2. Arif, i. (2021). *Geoteknik Tambang*. PT Gramedia Pustaka Utama.
3. Azhar, M., & Setyo Muntohar, A. (2017). *Pemodelan Deformasi Lereng Akibat Rembesan Air Hujan Modelling of The Slope Movement Due to Rainfall Seepage*.
4. Broadbent, C. D., & Zavodni, Z. M. (1982). Influence of rock structure on stability. *Stability in surface mining*, *3*(2).

5. Coetsee, S., Armstrong, R., & Terbrugge, P. (2020). *The use of strain threshold in slope stability trigger action response plans*. 339–352.
6. Fell, R., Hungr, O., Leroueil, S., & Riemer, W. R. (2000). Keynote lecture-Geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills in soil. *Proc. Conference GeoEng*.
7. Fukuzono. (1985). A New Method for Predicting the Failure Time of a SloPe. *Proc IV th internasional conference and field warkshop on landslides*, 145–150.
8. Gultom, J., Sannang, M. A., & Hamid Musa, R. (2014). Prediksi Waktu Longsoran Di Lereng Highwall Tambang Batubara Terbuka Dengan Metode Inverse Velocity. *PROSIDING TPT PERHAPI 2014*.
9. Haryanti, S., Suryolelono, B. kabul, & Jayadi, R. (2010). Analisis Pengaruh Karakteristik Hujan terhadap Gerakan Lereng (Analysis on Rainfall Characteristics Effect to the Slope Movement). *ILMIAH SEMESTA TEKNIKA*, *13*(2), 105–115.
10. Ilman M, Z., Yogiristanto, K., & Tronics, A. (2022). Penentuan Kondisi Kestabilan Timbunan Pit Menggunakan Prisma Berdasarkan Nilai Ambang Batas Laju Pergerakan Relatif Hasil Uji Balik. *PROSIDING TPT XXXI PERHAPI 2022*, 155–163.
11. Indriastuty, D., Fajar, F., Tappang, G., & Irsyad, A. (2022). Pemantauan Deformasi Lereng Tambang Terbuka Paska Peledakan Dengan Slope Stability Radar. *Indonesian Mining Professionals Journal*, *3*(2), 71–82.
12. Jectio Firsta, R. (2021). KAJIAN KESTABILAN LERENG HIGHWALL DENGAN METODE BISHOP PADA PIT MUARA *TIGA BESAR UTARA TAMBANG BATUBARA PT. BUKIT ASAM Tbk. SUMATERA SELATAN*. UNIVERSITAS JAMBI.
13. Khairil, R. (2021). Pemantauan Pergerakan Lereng Menggunakan Total Station Pada Tambang Batubara Terbuka Di Pit X Pt. Khotai Makmur Insan Abadi. *Prosiding FIT ISI*, *1*, 31–37.
14. 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.
15. Novandara, T. A. (2023). *Analisi Pemantuan Lereng Menggunakan Slope Stability Radar (SSR) Di PIT Timur, PT Kuansing Inti Makmur, Kabupaten Muaro Bungo, Provinsi Jambi*. Universitas Jambi.
16. Putri, E. A., Trides, T., Devy, S. D., Oktaviani, R., & Pontus, A. J. (2025). Monitoring Pergerakan Lereng Disposal dengan Total Station di Pit PT Fajar Sakti Prima, KALIMANTAN SELATAN. *Jurnal Kendali Teknik dan Sains*, *3*, 18–36.
17. Reeves, B., Noon, D. A., Stickley, G. F., & Longstaff, D. (2001). Slope stability radar for monitoring mine walls. *Subsurface and Surface Sensing Technologies and Applications III*, *4491*, 57–67.
18. Rustamaji, & Djaelani, E. (2012). Radar Jamming Suatu Konsep Rancang Bangun. *Electrans*, *11*(2), 71–80.
19. Sembiring, I. I. (2025). *Evaluasi Trigger Action Response Plan (Tarp) Pergerakan Lereng Disposal Menggunakan Alat Slope Stability Radar (Ssr) Pada Disposal PT Bara Tabang, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi KALIMANTAN SELATAN*. Universitas Mulawarman.
20. Sinaga, H. (2024). *Analisis Failure Time Menggunakan Data Gps Geodetic Dengan Metode Inverse Velocity Pada Lereng Disposal Hw 123 South Tutupan Pt. Adaro Indonesia, Kalimantan Selatan.* Universitas Jambi.
21. Steven, Afria S, F., Anggraeni, W., & Ikhsan N, M. (2020). Manajemen Risiko Kegagalan Lereng Pada Tambang Emas Menggunakan Teknologi Slope Stability Radar. *PROSIDING TPT XXIX PERHAPI*.
22. Supandi. (2011). Pengamatan Kestabilan Lereng Tambang Menggunakan Slope Stability Radar (SSR). *Teknologi Technoscientia*, 94–104.