

**Ranah Research**

E-ISSN: 2655-0865

Journal of Multidisciplinary Research and Development

082170743613

ranahresearch@gmail.com

<https://jurnal.ranahresearch.com>DOI: <https://doi.org/10.38035/rrj.v8i3><https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Analisis Balik dan Metode Stabilisasi pada Pemantauan Lereng Menggunakan Slope Stability Radar Tambang Pit 2 Banko Barat PT Bukit Asam Tbk

Neci Agus Pranteno¹, Maulana Yusuf², Taufik Toha³,

¹Sriwijaya University, South Sumatera, Indonesia, napranteno@bukitasam.co.id

²Sriwijaya University, South Sumatera, Indonesia, maulanayusuf@unsri.ac.id

³Sriwijaya University, South Sumatera, Indonesia, ttoha@unsri.ac.id

Corresponding Author: icenpranteno@gmail.com¹

Abstract: *This study aims to examine the causes of slope instability and to produce a more representative color-zoning threshold-based early warning system on the lowwall slope of Pit 2 Banko Barat. The novelty of this study lies in the preparation of an actual color-zoning threshold developed from specific slope conditions and actual field data, rather than only referring to the general threshold of the ESDM guidelines that use general deformation parameters. This research threshold integrates several key parameters, namely the safety factor (FK), landslide probability, slope deformation from Slope Stability Radar (SSR) monitoring, rainfall, and groundwater level conditions so that it is more sensitive in detecting changes in slope behavior before a landslide occurs. The research method uses a quantitative approach through back analysis by utilizing SSR monitoring data, rainfall, groundwater level, and rock characteristics. The results show that landslides are influenced by the presence of weak layers and slope saturation due to high rainfall of 67.87–189.42 mm. The slope deformation rate reaches 16.3–18 mm/hour which indicates a state of alert to critical. Increased rainfall caused a rise in groundwater levels at the BKG T 105 drilling point to 4.57 m and BKG T 106 to 18.57 m, thereby reducing the shear strength of the rock. The resulting color zoning threshold consists of green zones (<5 mm/day), yellow (5–10 mm/day), orange (≥10 mm/day), and red (>30 mm/day). This system is able to describe the stages of landslide development in more detail and adaptively than general thresholds because it considers the actual geotechnical and hydrogeological conditions of the slope. Mitigation efforts were carried out through slope reshaping, surface water control, and the addition of counterweights at the toe of the slope. The application of color zoning-based thresholds has been proven to improve the accuracy of the early warning system and the effectiveness of landslide mitigation on the lowwall slope of Pit 2 Banko Barat.*

Keyword: *Lowwall Pit 2 Banko Barat, slope stability radar (SSR), back analysis, color zoning threshold, slope deformation*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penyebab ketidakstabilan lereng serta menghasilkan sistem peringatan dini berbasis *threshold* zonasi warna yang lebih representatif pada lereng *lowwall* Pit 2 Banko Barat. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyusunan threshold aktual berbasis zonasi warna yang dikembangkan dari kondisi spesifik lereng dan

data aktual lapangan, bukan hanya mengacu pada threshold umum pedoman ESDM yang menggunakan parameter deformasi secara umum. *Threshold* penelitian ini mengintegrasikan beberapa parameter utama, yaitu faktor keamanan (FK), probabilitas longsor, deformasi lereng hasil pemantauan *Slope Stability Radar* (SSR), curah hujan, serta kondisi muka air tanah sehingga lebih sensitif dalam mendeteksi perubahan perilaku lereng sebelum terjadi longsoran. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis balik (*back analysis*) dengan memanfaatkan data monitoring SSR, curah hujan, muka air tanah, dan karakteristik batuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa longsoran dipengaruhi oleh keberadaan *weak layer* dan kejenuhan lereng akibat curah hujan tinggi sebesar 67,87–189,42 mm. Kecepatan deformasi lereng mencapai 16,3–18 mm/jam yang menunjukkan kondisi siaga hingga kritis. Peningkatan curah hujan menyebabkan kenaikan muka air tanah pada titik bor BKG 105 hingga 4,57 m dan BKG 106 hingga 18,57 m sehingga menurunkan kekuatan geser batuan. Threshold zonasi warna yang dihasilkan terdiri dari zona hijau (<5 mm/hari), kuning (5–10 mm/hari), oranye (≥ 10 mm/hari), dan merah (>30 mm/hari). Sistem ini mampu menggambarkan tahapan perkembangan longsoran secara lebih detail dan adaptif dibandingkan threshold umum karena mempertimbangkan kondisi geoteknik dan hidrogeologi lereng secara aktual. Upaya penanganan dilakukan melalui reshaping lereng, pengendalian air permukaan, serta penambahan counterweight pada kaki lereng. Penerapan threshold berbasis zonasi warna terbukti meningkatkan akurasi sistem peringatan dini dan efektivitas mitigasi longsoran pada lereng *lowwall* Pit 2 Banko Barat.

Kata Kunci: *Lowwall* Pit 2 Banko Barat, *slope stability radar* (SSR), analisis balik, *threshold* zonasi warna, deformasi lereng

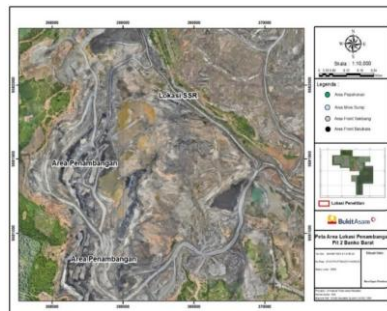
PENDAHULUAN

Kasus longsor pada lereng Tambang menjadi perhatian khusus pada kegiatan Penambangan di Indonesia. Selain dapat merugikan perusahaan secara materil yang cukup besar kasus kelongsoran lereng tambang dapat menghambat operasional penambangan berakibat fatal pada lingkup keamanan pekerjaan yang dilaksanakan di lapangan (Ma'rief, dkk, 2022). PT Bukit Asam, Tbk sebagai perusahaan pertambangan batubara menghadapi kendala pembebasan lahan dan potensi longsoran pada dinding *highwall* di Pit 2 Banko Barat, sehingga diperlukan penelitian kestabilan lereng guna menjaga keselamatan kerja dan keberlanjutan target produksi. Ketidakpastian kekuatan massa batuan akibat adanya bidang lemah pada lereng tambang mendorong perlunya analisis karakteristik longsor berbasis data monitoring SSR, curah hujan, dan muka air tanah guna menentukan nilai *threshold* alarm sebagai sistem peringatan dini potensi longsor di tambang Banko Barat PT Bukit Asam, Tbk. Analisis balik menyatakan adanya perubahan kandungan air sehingga menyebabkan adanya ketidakstabilan lereng. Oleh karena itu, dalam studi penelitian ini dilakukan analisis balik terhadap data – data yang diantaranya mempengaruhi terjadinya longsoran yaitu data karakteristik batuan, kondisi curah hujan, dan tingkat muka air tanah serta dikombinasikan dengan data pemantauan *Slope Stability Radar* sehingga didapatkan lereng yang sesuai dan optimal (Wardana, dkk, 2020). Berdasarkan data *Slope Stability Radar* (SSR), diperlukan metode stabilisasi lereng yang efektif serta rekomendasi nilai *threshold* dan *early warning time* yang akurat guna mencegah longsoran berulang serta meminimalkan risiko fatalitas dan kerugian ekonomi di PT Bukit Asam, Tbk.

METODE

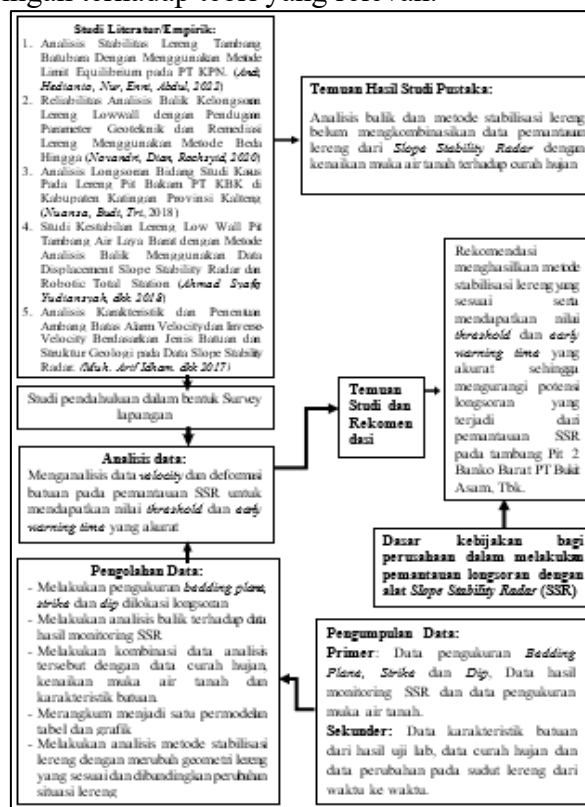
Penelitian ini dilakukan di PT Bukit Asam Tbk, Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan, yang memiliki empat lokasi penambangan dan berjarak sekitar 200 km dari Palembang, dengan batas wilayah meliputi Kabupaten Muara Enim di utara, Suban

Jeriji (Kec. Rambang Niru) di timur, Kecamatan Tanjung Agung di selatan, serta Kecamatan Merapi (Kab. Lahat) di barat.



Sumber: PT Bukit Asam Tbk
Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

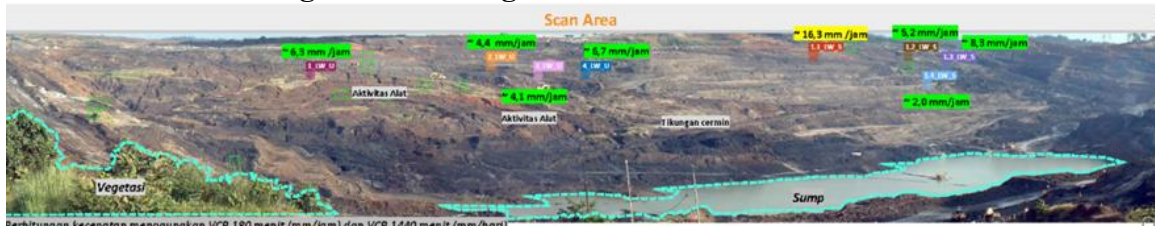
Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif melalui pengukuran *bedding plane*, *strike*, dan *dip*, dilanjutkan dengan analisis balik (*back analysis*) data monitoring SSR yang dikombinasikan dengan data curah hujan, kenaikan muka air tanah, serta karakteristik batuan longsor. Analisis balik dilakukan menggunakan kondisi aktual lereng saat longsor untuk memperoleh parameter geoteknik yang merepresentasikan kondisi lapangan. Model lereng dibangun berdasarkan geometri aktual, parameter material awal, dan kondisi muka air tanah, kemudian parameter kuat geser berupa kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) disesuaikan secara bertahap hingga diperoleh kondisi mendekati runtuh dengan nilai faktor keamanan (FK) $\approx 1,0$. Parameter hasil kalibrasi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis kestabilan dan perancangan rekomendasi stabilisasi lereng. Setelah itu dilakukan analisis stabilisasi melalui perubahan geometri lereng dan evaluasi perubahan kondisi lereng untuk memperoleh desain lereng yang optimal. Tahap berikutnya adalah analisis data *velocity* dan deformasi batuan hasil pemantauan SSR untuk menentukan nilai *threshold* dan *early warning time* yang akurat, sehingga diperoleh rekomendasi sistem peringatan dini berdasarkan hasil analisis balik, metode stabilisasi, dan perbandingan terhadap teori yang relevan.



Sumber: Hasil Riset
Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Klasifikasi Pergerakan Lereng



Sumber : Hasil Riset

Gambar 3. Foto *slope stability radar* (SSR) *lowwall* bulan mei tahun 2024



Sumber: Hasil Riset

Gambar 4. Foto *slope stability radar* (SSR) *lowwall* bulan februari tahun 2024

Berdasarkan data foto analisis *slope stability radar* (SSR) pit 2 Banko Barat, pergerakan pergerakan lereng *lowwall* pit 2 Banko Barat terdapat pergerakan dengan kategori kondisi siaga dikarenakan terdapat pergerakan dengan velocity sebesar 16,3 mm/ jam sampai 18 mm/ jam.

Analisis Kasus Longsoran Lereng

Tabel 1. Kasus longsoran tahun 2024

Lokasi	Waktu	Identifikasi Masalah	Penyebab
<i>Lowwall</i> utara	16-Jan-24	Terjadi longsoran di area <i>lowwall</i> utara	Indikasi <i>weak layer</i> dan tahanan beban lereng merupakan material longsoran
<i>Lowwall</i> tengah	23-Jan-24	Terjadi longsoran di area <i>lowwall</i> tengah	Indikasi <i>weak layer</i>
<i>Lowwall</i> selatan	25-Jan-24	Terjadi longsoran di area <i>lowwall</i> selatan	Indikasi <i>weak layer</i>
<i>Lowwall</i> selatan	28-Feb-24	Terjadi longsoran di area <i>lowwall</i> selatan	Indikasi <i>weak layer</i>
<i>Lowwall</i> selatan	17-Mar-24	Terjadi longsoran di area <i>lowwall</i> selatan	Indikasi <i>weak layer</i>
<i>Lowwall</i> utara	22-Apr-24	Terjadi retakan di area barat disoposal <i>Line C</i>	Indikasi karena <i>base</i> material yang tidak terpadatkan, sehingga tidak mampu menahan beban di atasnya.

Sumber: Hasil Riset

Kasus longsoran yang terjadi di tahun 2024 di pit 2 Banko Barat banyak disebabkan oleh *weak layer* dan penjujukan lereng serta *base material* tidak terpadatkan yang mengakibatkan ketidakmampuan menahan beban diatas lereng.

Analisis Pengaruh Curah Hujan Terhadap Pergerakan Lereng

Tabel 2. Curah hujan tahun 2024

Bulan	Curah Hujan (mm)	Jam Hujan (Jam)
Januari	442,31	189,42
Februari	389,75	165,73
Maret	356,19	137,32

Bulan	Curah Hujan (mm)	Jam Hujan (Jam)
April	221,43	94,30
Mei	359,16	70,97
Juni	128,42	67,87
Juli	38,40	27,80
Agustus	6,86	3,83
September	161,55	70,06
Oktober	102,50	22,78
November	121,01	34,17
Desember	85,44	40,72

Sumber: Hasil Riset

Curah hujan pada tahun 2024, pada awal tahun dari bulan januari sampai bulan juni relatif tinggi sebesar 67,87 mm sampai 189,42 mm. Intensitas hujan yang tinggi menandakan erosi yang besar dan menyebabkan lereng yang lebih sering jenuh serta potensi terjadi longsoran lereng lebih besar dibanding bulan lainnya.

Analisis Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Curah Hujan

Hubungan antara curah hujan terhadap perubahan muka air tanah di area penelitian, dilakukan pengukuran tinggi muka air tanah secara berkala pada dua titik pengamatan, yaitu BKG T 105 dan BKG T 106.

Tabel 3. Muka air tanah pit 2 Banko Barat

Waktu Pengukuran	Tinggi Air Dari Permukaan (m)	
	BKG T 105	BKG T 106
30/01/2024	1,71	8,42
28/02/2024	1,77	7,19
20/03/2024	1,92	17,11
04/04/2024	2,08	7,12
28/05/2024	1,91	16,35
19/06/2024	2,10	16,59
26/07/2024	3,16	17,24
26/08/2024	4,57	18,57
08/9/2024	3,62	18,14
15/10/2024	2,77	17,67
26/11/2024	4,57	18,57
30/12/2024	2,7	16,54

Sumber: Hasil Riset

Terjadi fluktuasi tinggi muka air tanah pada kedua titik pengamatan sepanjang 2024. BKG T 105 menunjukkan peningkatan signifikan sejak pertengahan tahun dengan puncak 4,57 m pada Agustus dan November, sedangkan BKG T 106 memiliki nilai lebih tinggi dengan puncak 18,57 m pada periode yang sama. Pola ini sejalan dengan curah hujan, di mana peningkatan hujan meningkatkan infiltrasi dan *recharge* air tanah, sementara periode kering menyebabkan penurunan muka air tanah.

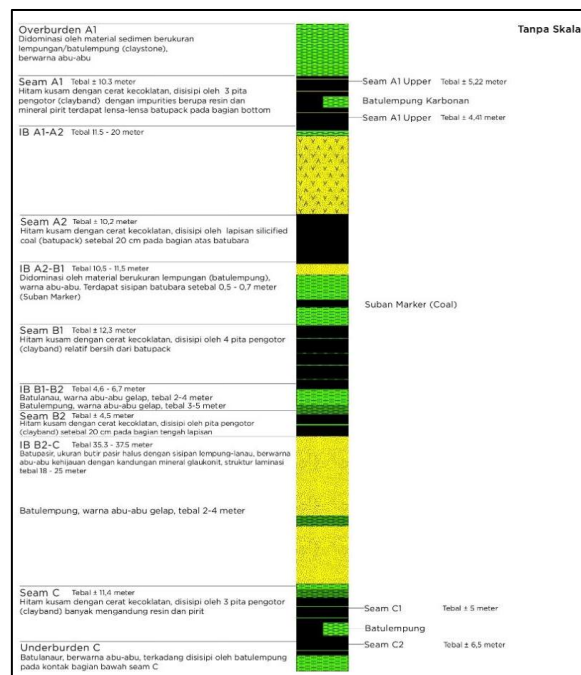
Analisis Pengaruh Karakteristik Batuan Terhadap Longsoran Lereng

Pengaruh karakteristik batuan terhadap potensi longsoran di Pit 2 Banko Barat dianalisis melalui parameter sifat fisik dan mekanik.

Tabel 5. Material properties pit 2 Banko Barat

Material	Density (kN/m ³)	CP (kPa)	CR (kPa)	Phi P (deg)	Phi R (deg)	UCS (kPa)	Poisson Ratio (%)	Modulus Young (kPa)
Top Soil	17,41	31,90	22,95	21,81	17,77	110,06	0,300	26,707
OB A1	20,00	98,20	35,54	22,39	15,26	2191,35	0,381	3239,454
A1	13,33	120,52		29,64		8680,63	0,246	8217,892
IB A1-A2	19,39	113,56	45,08	21,95	16,20	3436,08	0,251	2857,613
A2	12,16	209,08		25,68		9744,86	0,300	5975,277
IB A2-B1	19,79	116,97	70,31	20,26	14,76	2068,61	0,630	3048,552
B1	12,18	145,78		23,10		7352,90	0,373	5379,067
IB B1-B2	20,83	147,40	87,88	24,00	17,68	409,31	0,151	279,065
B2	13,05	210,41		23,94		7239,58	0,300	5195,453
IB B2-C	20,82	103,00	73,18	23,67	16,73	1881,19	0,270	1884,287
C	12,03	158,24		23,78		6090,60	0,300	4802,130
Under C	21,39	120,97	72,17	25,60	19,80	2560,17	0,300	1978,467

Sumber: Hasil Riset



Sumber: Hasil Riset

Gambar 5. Stratigrafi pit 2 banko barat

Longsor lereng di Pit 2 Banko Barat dipengaruhi oleh interaksi kondisi geologi, geometri lereng, dan hidrologi. Stratigrafi didominasi batulempung, batulanau, dan seam batubara dengan kekuatan geser rendah; sedangkan batulempung melemah saat jenuh air. Geometri lereng yang curam meningkatkan gaya penggerak, yang menjadi kritis ketika tidak diimbangi kekuatan geser.

Peningkatan curah hujan menyebabkan infiltrasi dan akumulasi air pada lapisan impermeabel, sehingga menaikkan muka air tanah dan tekanan air pori. Kondisi ini menurunkan tegangan efektif serta parameter kekuatan geser (c dan ϕ), sehingga faktor keamanan < 1 dan longsor terjadi. Secara mekanisme, longsor berkembang progresif pada zona lemah, terutama di kontak batubara–batulempung.

Tindak Lanjut Penanganan Longsoran

Hasil identifikasi kejadian longsoran serta analisis data pemantauan *Slope Stability Radar* (SSR), ditemukan beberapa area lereng yang mengalami ketidakstabilan di Pit 2 Banko Barat. Kondisi ini menunjukkan perlunya tindakan penanganan yang tepat sesuai dengan karakteristik tiap lokasi.

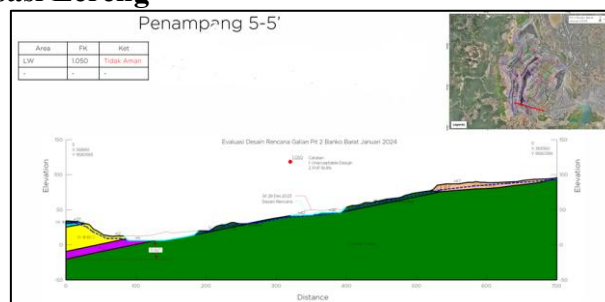
Penanganan longsoran dilakukan melalui reshaping lereng untuk mengurangi kemiringan sebagai faktor utama ketidakstabilan. Pada lokasi tertentu, ditambahkan sodetan tanggul dan *counterweight* untuk mengatasi pengaruh air dan bidang lemah. Secara umum, stabilisasi lereng memerlukan kombinasi perbaikan geometri, pengendalian air, dan penambahan gaya penahan agar efektif sesuai kondisi tiap lokasi.

Tabel 6. Tindak lanjut penanganan longsoran

Lokasi	Identifikasi Masalah	Tindak Lanjut
Lowwall utara	Terjadi longsoran di area lowwall utara	Reshaping dan perapihan lereng
Lowwall tengah	Terjadi longsoran di area lowwall tengah	Reshaping dan perapihan lereng
Lowwall selatan	Terjadi longsoran di area lowwall selatan	Reshaping dan perapihan lereng
Lowwall selatan	Terjadi longsoran di area lowwall selatan	Reshaping dan perapihan lereng
Lowwall selatan	Terjadi longsoran di area lowwall selatan	Reshaping dan perapihan lereng
Lowwall utara	Terjadi retakan di area barat disposal Line C	Reshaping, pembuatan sodetan tanggul dan counter weight

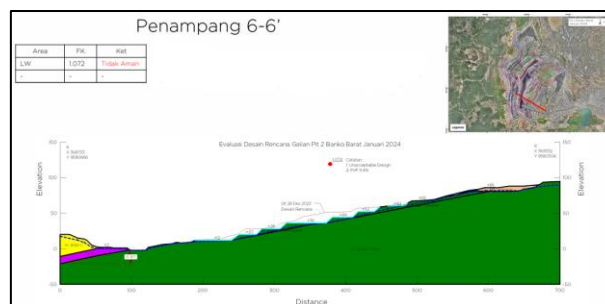
Sumber: Hasil Riset

Rekomendasi Stabilisasi Lereng



Sumber : Hasil Riset

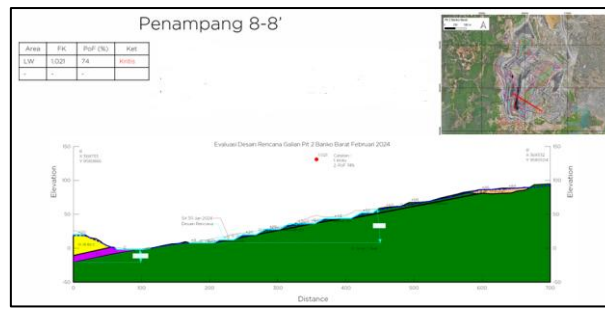
Gambar 6. Penampang lowwall 5-5'



Sumber: Hasil Riset

Gambar 7. Penampang lowwall 6-6'

Desain galian tidak dapat diterima karena berpotensi menyebabkan longsoran bidang. Sehingga direkomendasi untuk mengubah desain rencana galian agar tidak memotong *dip* lapisan batuan dengan deviasi sudut yang besar dan volume yang banyak.



Sumber: Hasil Riset
Gambar 8. Penampang *lowwall* 8-8'

Desain berada pada kategori kritis dan tidak dapat dilaksanakan sesuai desain disebabkan adanya penggalian *undercut* pada area *lowwall* yang memicu terjadinya longsoran bidang sehingga direkomendasikan untuk tidak melakukan penggalian pada area tersebut.

Analisis Nilai *Threshold Time* Terhadap Data Pemantauan *Slope Stability Radar* (SSR)

Nilai *threshold* diperlukan untuk menentukan batasan pergerakan lereng yang diizinkan sehingga dapat membedakan antara pergerakan normal dan pergerakan kritis yang mengindikasikan potensi longsor.

Zona Stabil (Hijau)				Zona Risiko (Kuning)				Zona Kritis (Oranye)				Zona Darurat (Merah)							
Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor berada pada nilai sebagai berikut :				Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor berada pada nilai sebagai berikut :				Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor berada pada nilai sebagai berikut :				Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor berada pada nilai sebagai berikut :							
Jenis Lereng	Keparahan Longsor	FK Statis	FK Dinamis	Probabilitas Longsor (%)	Jenis Lereng	Keparahan Longsor	FK Statis	FK Dinamis	Probabilitas Longsor (%)	Jenis Lereng	Keparahan Longsor	FK Statis	FK Dinamis	Probabilitas Longsor (%)	Jenis Lereng	Keparahan Longsor	FK Statis	FK Dinamis	Probabilitas Longsor (%)
Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	>1,1	-	<5-50	Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	>1,1	-	>5-50	Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	<1,1	-	>5-50	Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	<1,1	-	>5-50
	Rendah	>1,15-1,2	>1,0	<5		Rendah	>1,15-1,2	>1,0	>5		Rendah	<1,15-1,2	<1,0	<5		Rendah	<1,15-1,2	<1,0	<5
	Menengah	>1,2-1,3	>1,0	<20		Menengah	>1,2-1,3	>1,0	>20		Menengah	<1,2-1,3	<1,0	>20		Menengah	<1,2-1,3	<1,0	>20
	Tinggi	>1,2-1,3	>1,1	<10		Tinggi	>1,2-1,3	>1,1	>10		Tinggi	<1,2-1,3	<1,1	>10		Tinggi	<1,2-1,3	<1,1	>10
Lereng Keseluruhan	Rendah	>1,2-1,3	>1	<15-20	Lereng Keseluruhan	Rendah	>1,2-1,3	>1	>15-20	Lereng Keseluruhan	Rendah	<1,2-1,3	<1	>15-20	Lereng Keseluruhan	Rendah	<1,2-1,3	<1	>15-20
	Menengah	>1,3	>1,05	<10		Menengah	>1,3	>1,05	>10		Menengah	<1,3	<1,05	>10		Menengah	<1,3	<1,05	>10
	Tinggi	>1,3-1,5	>1,1	<5		Tinggi	>1,3-1,5	>1,1	>5		Tinggi	<1,3-1,5	<1,1	>5		Tinggi	<1,3-1,5	<1,1	>5
Histori pergerakan atau deformasi berdasarkan instrumen monitoring geoteknik : Constant/linear deformation terdeteksi pada area concern/area penambangan Tidak ada pergerakan atau monitoring lereng menunjukkan pergerakan <5 mm/day atau <3 mm/jam (berdasarkan threshold masing-masing area) Penurunan pergerakan lereng yang dimonitor selama 1 minggu secara real time				Histori pergerakan atau deformasi berdasarkan instrumen monitoring geoteknik : Constant/linear deformation terdeteksi pada area concern/area penambangan Resesi deformation terdeteksi pada area concern/area penambangan Monitoring lereng menunjukkan pergerakan 5-10 mm/day atau 3-5 mm/jam (berdasarkan threshold masing-masing area) Pergerakan konsisten dijumpai selama 1 minggu				Histori pergerakan atau deformasi berdasarkan instrumen monitoring geoteknik : Pergerakan lereng menunjukkan aksesi pada area concern/area penambangan Progressive deformation terdeteksi di area concern Monitoring lereng menunjukkan pergerakan ≥10 mm/day atau 5-10 mm/jam (berdasarkan threshold masing-masing area) Pergerakan konsisten dijumpai selama 1 minggu				Histori pergerakan atau deformasi berdasarkan instrumen monitoring geoteknik : Longsor sudah terjadi dan masih terus terjadi pergerakan massa batuan Progressive deformation teramati dengan jelas di area concern Monitoring lereng menunjukkan pergerakan >30 mm/day atau >10 mm/jam (berdasarkan threshold masing-masing area) Pergerakan konsisten dijumpai selama 1 minggu atau lebih							
Indikasi ketidakstabilan lereng yang dijumpai di lapangan : Retakan kecil dengan spasi <60 mm dan tidak mengalami penambahan dalam waktu yang lama Terdapat area bekas longsor yang penanganannya sudah selesai dikerjakan				Indikasi ketidakstabilan lereng yang dijumpai di lapangan : Retakan yang dijumpai semakin besar dengan spasi 60 mm - 0,6 m dan dijumpai retakan baru di lapangan Terdapat area bekas longsor yang penanganannya masih dikerjakan namun belum seluruhnya selesai				Indikasi ketidakstabilan lereng yang dijumpai di lapangan : Retakan besar dengan spasi 0,6 - 2 m dan terus mengalami penambahan bukaan dalam kurun waktu 1 minggu Deformasi masif yang diindikasikan dengan bukaan retakan yang semakin besar, bulging, dan jatuhnya batuan yang konstan terjadi di lapangan Terdapat area bekas longsor yang belum dilakukan penanganannya				Indikasi ketidakstabilan lereng yang dijumpai di lapangan : Retakan besar dengan spasi > 2 m dan cepat mengalami penambahan bukaan dalam kurun waktu 1 minggu Deformasi masif dan konstan yang diindikasikan dengan bukaan retakan yang semakin besar, bulging, dan jatuhnya batuan yang konstan terjadi di lapangan Terdapat area bekas longsor yang belum dilakukan penanganannya							
Kondisi lainnya : Lokasi kerja merupakan area high risk seperti : lokasi timbunan diatas lumpur atau sump, lokasi galian dibawah sump atau tanggul buatan atau kondisi lainnya yang ditetapkan sebagai area high risk				Kondisi lainnya : Lokasi kerja merupakan area high risk seperti : lokasi timbunan diatas lumpur atau sump, lokasi galian dibawah sump atau tanggul buatan atau kondisi lainnya yang ditetapkan sebagai area high risk				Kondisi lainnya : Lokasi kerja merupakan area high risk seperti : lokasi timbunan diatas lumpur atau sump, lokasi galian dibawah sump atau tanggul buatan atau kondisi lainnya yang ditetapkan sebagai area high risk yang berdampak terhadap keselamatan manusia, peralatan, infrastruktur dan lingkungan				Kondisi lainnya : Lokasi kerja merupakan area high risk seperti : lokasi timbunan diatas lumpur atau sump, lokasi galian dibawah sump atau tanggul buatan atau kondisi lainnya yang ditetapkan sebagai area high risk yang berdampak terhadap keselamatan manusia, peralatan, infrastruktur dan lingkungan							
Status Operasional Operasional produksi berjalan seperti biasa sesuai SOP yang berlaku				Status Operasional Operasional produksi boleh dilakukan dengan pengawasan yang ketat dan dipasang alat patok monitoring lereng				Status Operasional Operasional produksi boleh dilakukan dengan pengawasan yang sangat melekat dan dimonitor dengan alat monitoring lereng real time (radar monitoring & sejenisnya)				Status Operasional Dilarang melakukan aktivitas operasional produksi dan wajib dilakukan perbaikan lereng secepatnya dengan pengawasan yang sangat melekat dan dimonitor dengan alat monitoring lereng real time (radar monitoring & sejenisnya)							

Sumber: Hasil Riset
Gambar 9. Klasifikasi *threshold* akurat

Klasifikasi zonasi menunjukkan hubungan kuantitatif antara faktor keamanan (FK), probabilitas longsor, dan deformasi lereng, yang selanjutnya menjadi dasar dalam penentuan *threshold* berbasis zonasi warna. Pada zona stabil (hijau), nilai FK statis umumnya >1,1 hingga 1,5 dan FK dinamis >1,0–1,1, dengan probabilitas longsor rendah (<5–50%) serta deformasi sangat kecil (<5 mm/hari atau 3 mm/jam), sehingga lereng tergolong aman. Memasuki zona risiko (kuning), FK statis menurun pada kisaran >1,1–1,3 dengan probabilitas longsor meningkat (>5–50%), disertai deformasi awal sebesar 5–10 mm/hari atau 3–5 mm/jam yang menunjukkan awal ketidakstabilan. Pada zona kritis (oranye), FK statis semakin menurun hingga <1,1–1,3 dan FK dinamis <1,0–1,1, dengan probabilitas longsor >10–50% serta deformasi progresif ≥10 mm/hari atau 5–10 mm/jam, yang menandakan kondisi mendekati kegagalan. Sementara itu, zona darurat (merah) ditandai oleh FK rendah (<1,1–1,5) dan deformasi masif >30 mm/hari atau 10 mm/jam, sehingga lereng berada dalam kondisi tidak stabil dan berpotensi mengalami longsor cepat.

Threshold berbasis zonasi warna yang digunakan dalam penelitian ini dinilai lebih akurat dibandingkan dengan *threshold* pedoman umum karena disusun berdasarkan hasil pengamatan aktual di lapangan, meliputi data *Slope Stability Radar* (SSR), curah hujan, serta fluktuasi muka air tanah yang merepresentasikan kondisi nyata lereng. Pendekatan ini mengintegrasikan parameter geoteknik seperti FK, probabilitas longsor, dan kecepatan deformasi aktual, sehingga mampu menggambarkan tingkat kestabilan lereng secara lebih komprehensif dan detail dalam mengidentifikasi tahapan perkembangan longsor dari kondisi stabil hingga darurat.

Threshold aktual yang disusun pada penelitian ini lebih efektif diterapkan pada lereng tambang Banko Barat dibandingkan *threshold* standar umum dari pedoman ESDM karena *threshold* tersebut dikembangkan berdasarkan karakteristik spesifik lereng dan kondisi aktual lapangan. Pedoman umum ESDM hanya menggunakan parameter deformasi lereng secara umum sebagai acuan tingkat kewaspadaan, sedangkan *threshold* penelitian ini mengintegrasikan beberapa parameter utama, yaitu faktor keamanan (FK), probabilitas longsor, deformasi lereng hasil pemantauan *Slope Stability Radar* (SSR), curah hujan, serta kondisi muka air tanah. Integrasi parameter tersebut membuat sistem *threshold* lebih sensitif dalam mendeteksi perubahan perilaku lereng sebelum terjadi longsor.

Pada kondisi lereng Banko Barat, perubahan deformasi tidak selalu langsung menunjukkan potensi longsor apabila tidak dikaitkan dengan kondisi geoteknik dan hidrogeologi lereng. Oleh karena itu, penggunaan FK dan probabilitas longsor pada setiap zonasi warna memberikan gambaran kestabilan lereng yang lebih representatif dibandingkan hanya menggunakan nilai deformasi tunggal seperti pada pedoman umum. Selain itu, data aktual SSR menunjukkan bahwa percepatan deformasi pada lereng Banko Barat memiliki pola yang berbeda terhadap standar umum, sehingga diperlukan penyesuaian *threshold* agar lebih sesuai dengan respon deformasi lokal.

Threshold aktual juga lebih adaptif karena mempertimbangkan pengaruh curah hujan dan kenaikan muka air tanah yang menjadi faktor dominan pemicu ketidakstabilan lereng di Banko Barat. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan kuat geser material lereng dan peningkatan tekanan air pori yang tidak sepenuhnya dapat direpresentasikan oleh *threshold* umum ESDM. Dengan demikian, sistem zonasi aktual mampu memberikan peringatan dini yang lebih akurat terhadap tahapan perkembangan longsor, mulai dari kondisi stabil, awal ketidakstabilan, hingga kondisi kritis dan darurat.

Secara operasional, *threshold* aktual memberikan keuntungan dalam pengambilan keputusan mitigasi karena setiap level zonasi telah disesuaikan dengan kondisi aktual area penelitian. Hal ini memungkinkan respon penanganan dilakukan lebih cepat dan tepat, sehingga risiko longsor terhadap alat, aktivitas penambangan, dan keselamatan pekerja dapat diminimalkan secara lebih efektif dibandingkan penggunaan *threshold* standar umum.

Secara keseluruhan, penurunan nilai FK berbanding lurus dengan peningkatan probabilitas longsor dan kecepatan deformasi. Oleh karena itu, *threshold* berbasis data aktual ini lebih representatif dan adaptif terhadap kondisi spesifik lokasi, serta memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi dalam mendukung sistem peringatan dini dan pengambilan keputusan mitigasi longsor.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, ketidakstabilan lereng di Pit 2 Banko Barat dipengaruhi oleh interaksi kondisi geologi, hidrologi, dan geometri lereng. Keberadaan lapisan lemah (*weak layer*), tingginya curah hujan, serta kenaikan muka air tanah menyebabkan penurunan kekuatan geser batuan dan meningkatkan potensi longsor. Data menunjukkan curah hujan pada awal tahun dari bulan Januari hingga Juni relatif tinggi sebesar 67,87–189,42 mm yang meningkatkan muka air tanah hingga 4,57 m pada BKG 105 dan 18,57 m pada BKG 106, sehingga meningkatkan tekanan air pori dan menurunkan tegangan efektif batuan. Pemantauan

menggunakan Slope Stability Radar (SSR) menunjukkan kecepatan deformasi mencapai 16,3–18 mm/jam yang mengindikasikan kondisi siaga hingga kritis, di mana peningkatan deformasi lereng berkorelasi dengan penurunan faktor keamanan (FK) dan peningkatan probabilitas longsor.

Threshold berbasis zonasi warna yang terdiri dari zona hijau, kuning, oranye, dan merah mampu menggambarkan tahapan perkembangan ketidakstabilan lereng secara lebih detail berdasarkan hubungan antara nilai FK, probabilitas longsor, dan deformasi lereng. Zona stabil (hijau) ditandai deformasi <5 mm/hari, zona risiko (kuning) menunjukkan deformasi awal 5–10 mm/hari, zona kritis (oranye) memiliki deformasi progresif ≥ 10 mm/hari dengan FK mendekati <1,1, sedangkan zona darurat (merah) ditandai deformasi >30 mm/hari dan FK rendah (<1), yang menunjukkan kondisi lereng sangat tidak stabil dan berpotensi mengalami longsoran cepat. Sistem ini lebih efektif dibandingkan threshold umum karena disusun berdasarkan kondisi aktual lereng di Pit 2 Banko Barat melalui integrasi data SSR, curah hujan, muka air tanah, dan karakteristik batuan.

Penerapan sistem peringatan dini berbasis zonasi warna terbukti mampu meningkatkan akurasi identifikasi kondisi lereng, mempercepat pengambilan keputusan mitigasi, serta mendukung penanganan longsoran secara lebih tepat dan adaptif. Upaya stabilisasi melalui reshaping lereng, pengendalian air (drainase/sodetan), dan penambahan counterweight juga menunjukkan efektivitas dalam meningkatkan kestabilan lereng. Dengan demikian, sistem threshold berbasis monitoring aktual dapat menjadi solusi mitigasi longsoran yang lebih representatif, efektif, dan aplikatif pada lereng tambang *lowwall* Pit 2 Banko Barat.

REFERENSI

- Bieniawski, Z.T. (1976). *Rock Mechanics Design in Mining and Civil Engineering (5th ed.)*. London: Pentech Press.
- Direktorat Jendral Mineral dan Batubara. (2013). *Pedoman Teknik Pemantauan Kestabilan Lereng Timbunan Batuan Penutup*. Kemenrian Energi dan Sumber Daya Mineral
- Donati, D., Stead, D., Elmo, D., dan Onsel, E. (2020). *New Techniques For Chracterising Damage In Rock Slopes: Implications For Engineered Slopes And Open Pit Mines*. Proceedings of the 2020 International Symposium On Slope Stability In Open Pit Mining and Civil Engineering . ISBN 978-0-9876389-7-7. Canada: Simon Fraser University.
- Gischig, V.S., Eberhardt, E., Moore, J.R, dan Hungr, O. (2015). *On The Seismic Response Of Deep-Seated Rock Slope Instabilities-Insights From Numerical Modeling*. . Engineering Geology. Vol 193: 1 - 18. Canada: University of British Colombia.
- Hamid, N., Hendarmawan, Muslim, D., dan Ruchjana, B.N. (2016). *Distribusi Kuat Geser Batuan Pada Formasi Muaraenim Yang Mengandung Batubara Di Kecamatan Merapi Barat, Kabupaten Lahat, Provinsi Sumatera Selatan..* Buletin Sumber Daya Geologi. Vol 11 (3): 200-213. Sumedang: Universitas Padjajaran.
- Head, K.H. (1982). *Manual Of Soil Laboratory Testing*. London: Pentech Press.
- Idham, M. A. (2017). *Analisis Karakteristik dan Penentuan Ambang Batas Alarm Velocity dan Inverse-Velocity Berdasarkan Jenis Batuan dan Struktur Geologi pada Data Slope Stability Radar*. (Tesis Master, Universitas Pembangunan Nasional Veteran).
- Iman, I.J.S., Firdaus, Mili, M.Z., dan Wahab. (2022). *Kajian Geoteknik Untuk Perencanaan Geometri Lereng Pit Tambang Nikel Menggunakan Metode Bishop Simplified Pada PT. Riota Jaya Lestari*. Jurnal Riset Teknologi Pertambangan (J-Ristam). Vol2 (2): 200-213. ISSN 2621-3869. Kendari: Universitas Halu Oleo.
- Indriastuty, D., Fajar, F., Tappang, G., dan Irsyad, A. (2021). *Pemantauan Deformasi Lereng Tambang Terbuka Paska Peledakan Dengan Slope Stability Radar*. Indonesian Mining Professional Journal. Vol 3(2): 71 - 82. Jakarta: Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia.

- Karaman, K., Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., dan Demirel, S. (2015). *Utilization Of The Brazilian Test For Estimating The Uniaxial Compressive Strength And Shear Strength Parameters*. The Journal Of The Southern Institute Of Mining and Metallurgy. Vol 115: 185-192. Turkiye: Karadeniz Technical University
- Luqman, F., Haryanto, I., Firmansyah, Y., Gani, R.M.G., dan Indriyanto, Y. (2018). *Tektonostratigrafi Berdasarkan Analisis Seismik 2D Pada Sub Cekungan Jambi, Cekungan Sumatera Selatan*. Padjadjaran Geoscience Journal. Vol 3(1): 18-28. ISSN 2579-4033. Sumedang: Universitas Padjajaran.
- Ma'rief, A.A., dkk. (2022). *Analisis Stabilisasi Lereng Tambang Batubara Dengan Menggunakan Metode Limit Equilibrium Pada PT. Kalimantan Prima Nusantara*. Jurnal Cecebeles. Vol 6(2): 117-125. ISSN 2579-5821. Makassar:Universitas Hasanuddin.
- 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*. South Africa: University of The Witwatersand Johannesburg
- Ramadhan, M.A., Anggraeny, F.T., dan Putra, C.A. (2024). *Klasifikasi Curah Hujan Menggunakan Metode K-Nearest Neighbor*. Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika. Vol 8 (3): 3863-3869 Surabaya: Universitas Nasional "Veteran" Jawa Timur.
- Stead, D., dan Wolter, A. (2015). *A Critical Review Of Rock Slope Failure Mechanics: The Importance Of Structural Geology*. Journal of Structural Geology. Vol 74: 1 - 23. Canada: Simon Fraser University.
- Wardana, N.K., Ipmawati, M.R., dan Pratiwi, N. (2020). *Analisis Rekah Tarik Lereng Sidewall Penambangan Blok Menyango Berdasarkan Realibilitas Kemantapan Lereng Menggunakan Metode Finite Difference*. Mining Journal Exploration, Exploitation Georesource Processing and Mine Enviromental. Vol 8(2):72-79. Yogyakarta: Institut Nasional Teknologi Yogyakarta.
- Zhao, L., Liu, X., Zang, X., dan Zhao, H. (2022). *Back Analysis Of Geotechnical Engineering Based On Data-Driven Model And Grey Wolf Optimization*. Applied Science. Vol 12: 1 - 19. China: Shandong University of Technology.