

Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode *Finite Element* dan *Monitoring Real Time* Lereng *Low Wall* pada Pit X PT. Indomico Mandiri, Kabupaten Kutai Timur, Provinsi Kalimantan Timur

Al Maida Nur¹, Albertus Juvensius Pontus², Lucia Litha Respati³, Revia Oktaviani⁴, Tommy Trides⁵

Universitas Mulawarman, Indonesia

*Korespondensi Email: almaidanur9@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng low wall di Pit X yang dioperasikan oleh PT Indomico Mandiri di Kabupaten Kutai Timur, Kalimantan Timur. Metode yang digunakan meliputi pemodelan numerik dengan Metode Elemen Hingga (FEM) dan pemantauan lereng secara real-time menggunakan Slope Stability Radar (SSR). Data sifat mekanik batuan diperoleh dari pengujian laboratorium dan observasi lapangan, sementara nilai Geological Strength Index (GSI) ditentukan menggunakan grafik Hoek-Marinos. Pemodelan dilakukan pada enam penampang lereng dengan kondisi kering dan jenuh. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh nilai faktor keamanan (FK) melebihi ambang batas stabilitas ($FK > 1,2$), dengan nilai tertinggi 1,35. Displacement hasil pemodelan numerik terkonsentrasi di dasar lereng, dengan nilai maksimum 515 mm pada kondisi kering. Pemantauan real-time menggunakan SSR dari 23 November hingga 23 Desember mencatat pergerakan terbesar sebesar 2000 mm di Area A.1S, yang disebabkan oleh limpasan air permukaan dan aliran dari luar lereng. Perbandingan antara hasil FEM dan data SSR menunjukkan perbedaan signifikan dalam nilai displacement, yang kemungkinan disebabkan oleh asumsi ideal dalam pemodelan. Meskipun demikian, pola pergerakan yang dihasilkan kedua metode menunjukkan kesesuaian, sehingga FEM tetap dapat digunakan untuk prediksi awal ketidakstabilan lereng dan mendukung pengambilan keputusan teknis dalam pertambangan terbuka.

Kata Kunci: Kestabilan Lereng, Metode Elemen Hingga, SSR, GSI, Tambang Terbuka

Abstract

This study aims to analyze the stability of the low wall slope at Pit X, operated by PT Indomico Mandiri in East Kutai Regency, East Kalimantan. Numerical modeling using the Finite Element Method (FEM) and real-time monitoring with the Slope Stability Radar (SSR) were applied. Data on rock properties were obtained from laboratory tests and field observations, while the Geological Strength Index (GSI) was determined using the Hoek-Marinos chart. Six slope sections were modeled under dry and saturated conditions. The results showed that all safety factors (SF) exceeded the stability threshold ($SF > 1.2$), with a maximum value of 1.35. Displacement from FEM modeling was concentrated at the toe of the slope, with the highest value of 515 mm under dry conditions. Real-time monitoring from SSR, conducted from November 23 to December 23, recorded the largest movement of 2000 mm in Area A.1S, attributed to surface runoff and external water inflow. A comparison between FEM results and SSR data revealed significant differences in displacement values, likely due to idealized assumptions in the model. Despite this, both methods showed consistent movement patterns, indicating that FEM is a useful tool for early prediction of slope instability and supports technical decision-making in open-pit mining.

Keywords: Slope Stability, Finite Element Method, SSR, GSI, Open-Pit Mining

PENDAHULUAN

Stabilitas lereng menjadi aspek yang sangat penting dalam kegiatan tambang terbuka (Muntaha, 2016; Tandidatu & Hariadi, 2019). Meskipun lereng low wall memiliki kemiringan yang lebih landai dibanding high wall, namun tetap memiliki potensi ketidakstabilan (Wang & Liu, 2020). Stabilitas lereng pada tambang terbuka sangat bergantung pada berbagai faktor, termasuk geometri lereng dan sifat material tanah (Jiang et al., 2021). Oleh karena itu, dibutuhkan metode analisis yang akurat, salah satunya yaitu metode Finite Element, yang mampu memodelkan kondisi lereng secara numerik dan memprediksi besarnya deformasi (Zhao et al., 2019). Metode ini terbukti efektif dalam menganalisis dan mengoptimalkan desain lereng untuk meningkatkan keselamatan tambang (Yuan & Zhang, 2021). Sebagai pelengkap, dilakukan juga monitoring menggunakan alat Slope Stability Radar (SSR) untuk memperoleh

data real-time kondisi lereng, yang nantinya digunakan sebagai validasi terhadap hasil analisis numerik (Li et al., 2022). Monitoring ini sangat penting dalam memberikan informasi yang akurat dan up-to-date untuk pengambilan keputusan yang lebih cepat dalam pengelolaan risiko (Liu et al., 2020). Selain itu, penggunaan teknologi radar ini semakin populer karena kemampuannya untuk mendeteksi pergeseran atau pergerakan tanah yang terjadi di bawah permukaan lereng (Huang & Yang, 2021).

Kestabilan lereng dalam tambang terbuka merupakan faktor utama dalam menjaga keselamatan operasional dan efisiensi produksi. Nilai kestabilan lereng dinyatakan dalam bentuk faktor keamanan (FK), yaitu perbandingan antara gaya penahan dan gaya pendorong. Berdasarkan Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018, nilai ambang FK statis minimum berkisar antara 1,1 hingga 1,5 tergantung pada jenis lereng dan tingkat keparahan longsor. Evaluasi kestabilan lereng memerlukan pertimbangan terhadap geometri lereng, kondisi geologi, sifat mekanik massa batuan, dan pengaruh air tanah (Azizi, 2018).

Kriteria keruntuhan Generalized Hoek-Brown digunakan untuk memodelkan kekuatan massa batuan yang memiliki diskontinuitas saling mengunci. Parameter dalam model ini seperti m , s , dan α diturunkan dari nilai GSI dan disturbance factor (D), yang menggambarkan kondisi kualitas batuan dan tingkat gangguan akibat aktivitas tambang (Hoek et al., 2002). Nilai GSI sendiri dapat ditentukan secara kualitatif menggunakan grafik Hoek-Marinos (2005) berdasarkan observasi struktur blok batuan dan kondisi permukaan diskontinuitas.

Finite Element Method (FEM) merupakan pendekatan numerik yang banyak digunakan dalam analisis kestabilan lereng karena kemampuannya untuk memodelkan geometri kompleks, variasi properti batuan, serta tekanan air pori secara kontinu. FEM menganalisis distribusi tegangan dan deformasi dalam massa batuan menggunakan pendekatan elemen diskret dan metode reduksi kekuatan geser (Strength Reduction Method) untuk menentukan nilai FK (Akbas, 2015). Keunggulan utama FEM adalah tidak memerlukan asumsi bentuk bidang gelincir, sehingga lebih representatif terhadap kondisi aktual lereng.

Phase2 adalah perangkat lunak berbasis FEM yang dikembangkan oleh Rocscience untuk analisis regangan bidang dua dimensi pada batuan dan tanah. Perangkat ini memungkinkan simulasi kondisi lereng dengan input geometri, properti material, serta kondisi tekanan air tanah. Phase2 mendukung berbagai kriteria keruntuhan termasuk Hoek-Brown dan Mohr-Coulomb, serta menghasilkan output visual berupa distribusi tegangan, displacement, dan faktor keamanan. Program ini juga dilengkapi fitur untuk memperhitungkan efek jenuh air dan analisis kondisi steady-state maupun transien (Rocscience, 2004).

Monitoring lereng secara real-time menggunakan Slope Stability Radar (SSR) menjadi metode penting dalam mendeteksi pergerakan lereng secara kontinu. SSR bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi ke permukaan lereng, lalu mengukur perubahan jarak pantulan gelombang secara presisi hingga skala milimeter. Salah satu teknologi SSR yang umum digunakan di tambang terbuka adalah IBIS-ArcSAR dan IBIS-FM yang dikembangkan oleh IDS GeoRadar, yang mampu memberikan data deformasi, kecepatan pergerakan, dan inverse velocity secara real-time bahkan dalam kondisi cuaca ekstrem (IDS GeoRadar, 2023). Teknologi ini telah terbukti efektif dalam sistem peringatan dini dan evaluasi risiko geoteknik, serta banyak diterapkan di industri pertambangan global (Rose & Hungr, 2007; Upasna, 2016).

Urgensi penelitian ini sangat tinggi, mengingat pentingnya prediksi dini untuk mengidentifikasi potensi pergerakan lereng yang dapat menyebabkan keruntuhan. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak kecelakaan di tambang yang disebabkan oleh ketidakstabilan lereng, baik di dalam negeri maupun secara internasional. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan metode yang lebih akurat dalam analisis kestabilan lereng, dengan menggunakan Finite Element Method (FEM) dan Slope Stability Radar (SSR), yang dapat memberikan gambaran lebih realistis mengenai potensi pergerakan lereng.

Beberapa penelitian sebelumnya (Azizi, 2018; Hoek et al., 2002) telah menggunakan metode FEM dalam analisis kestabilan lereng, namun mereka lebih fokus pada parameter geoteknik yang bersifat teoritis dan kurang memperhitungkan kondisi lapangan secara real-time. Di sisi lain, penggunaan teknologi radar untuk pemantauan pergerakan lereng sudah banyak diterapkan di beberapa tambang (Rose & Hungr, 2007), tetapi masih sedikit yang mengintegrasikan hasil pemantauan radar dengan model numerik untuk validasi. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menggabungkan kedua metode untuk meningkatkan ketepatan prediksi kestabilan lereng.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penerapan finite element analysis yang dipadukan dengan monitoring real-time menggunakan SSR untuk memvalidasi dan memperbaiki ketepatan hasil model numerik. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh prediksi yang lebih akurat mengenai potensi pergerakan lereng, yang akan membantu para pengelola tambang dalam mengambil keputusan yang lebih tepat dalam kegiatan operasional mereka.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kestabilan lereng pada Pit X PT. Indomico Mandiri dengan menggunakan metode FEM dan validasi data melalui pemantauan real-time menggunakan Slope Stability Radar (SSR). Manfaat dari penelitian ini tidak hanya memberikan solusi praktis untuk mengidentifikasi potensi ketidakstabilan lereng, tetapi juga dapat diterapkan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk meningkatkan keselamatan kerja dan efisiensi operasional tambang terbuka di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan teknik pengumpulan data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui pengamatan lapangan dengan menggunakan alat Slope Stability Radar (SSR) untuk memantau pergerakan lereng secara real-time selama periode 30 hari, mulai dari 23 November hingga 23 Desember 2024. Alat SSR memberikan data displacement yang digunakan untuk memantau deformasi lereng. Data piezometer juga diambil pada dua kondisi berbeda: kondisi normal (kering) dan kondisi jenuh (setelah hujan), untuk menganalisis perubahan tekanan air tanah pada lereng. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini meliputi desain geometrik lereng, data sifat mekanik batuan yang diperoleh dari pengujian di laboratorium, serta peta geologi dan topografi kawasan penelitian. Setelah data terkumpul, analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Phase2, yang merupakan perangkat analisis berbasis metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM). Data yang diolah meliputi parameter geometri lereng, sifat mekanik batuan, serta kondisi air tanah, yang kemudian digunakan untuk memodelkan kestabilan lereng dan menghitung faktor keamanan (FK) serta displacement pada berbagai section lereng. Pemodelan numerik ini dilakukan dengan mempertimbangkan dua kondisi lereng, yaitu kondisi kering dan kondisi jenuh. Dengan menggunakan pendekatan ini, hasil analisis dapat memberikan gambaran lebih akurat mengenai kestabilan lereng serta potensi pergerakan lereng yang dapat terjadi dalam jangka waktu tertentu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sifat mekanik sebagai parameter yang akan digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng *low wall*. Untuk sifat mekanik dari litologi lereng *low wall* didapatkan dari data sekunder yang diberikan oleh PT. Indominco Mandiri yang diujikan di Laboratorium. Litologi daerah *Low wall* terdiri dari dominan lapisan *claystone*, *sandstone*, *siltstone* dan sedikit *limestone*. Adapun nilai UCS, *unit weight*, *modulus young* dan *poission ratio* pada litologi lereng dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Sifat Mekanik Material

No	Litologi/material	UCS (Mpa)	Unit Weight (MN/m ³)	Modulus Young (Mpa)	Poission Ratio
1	<i>Siltstone</i>	13,11	0,0227	1.450,66	0,26
2	<i>Sandstone</i>	16,54	0,016	6.077,20	0,25
3	<i>Claystone</i>	1,32	0,0144	314,89	0,29
4	<i>Claystone</i>	31,01	0,0177	7.233,72	0,27
5	<i>Sandstone</i>	26,98	0,016	5.77,71	0,25
6	<i>Coal</i>	3,5	0,0125	800	0,3
7	<i>Limestone</i>	35	0,0245	10.000	0,28

Sumber: Peneliti

Selain data sifat mekanik material lereng, pengambilan data air tanah juga dibutuhkan. Pengambilan data dilakukan 2 waktu saat kondisi normal (kering) dan kondisi jenuh (setelah hujan). Data piezometer ini menjadi salah satu parameter dalam menganalisis kestabilan lereng yang akan dilakukan. Berikut ini tabel data piezometer.

Tabel 2. Pengambilan Data Piezometer

Piezo Hole	Coordinate		Elev	Range (m)	
	E	N		Kering	Hujan
PZ.UCG.20	540888	14656	88 m	27,33	25,88

Sumber: Peneliti

Analisis Geological Strength Index

Dari hasil pengamatan lapangan, diperoleh nilai GSI pada beberapa titik pengukuran dengan rentang nilai GSI min 28 – maks 70, yang menunjukkan bahwa batuan di area penelitian termasuk dalam kategori sedang sampai buruk. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai GSI di lokasi penelitian antara lain, kondisi visual lapisan dan nilai RQD batuan (Lampiran B Analisis GSI). RQD yang dijadikan acuan data dari logging dan data hasil pengujian lab Perusahaan. Tingkat pelapukan batuan mengalami pelapukan ringan hingga sedang. Hasil ini digunakan dalam analisis numerik untuk menentukan parameter kekuatan batuan dalam pemodelan kestabilan lereng. Berikut Tabel 3 hasil analisis GSI dari pemantauan visual yang telah dilakukan.

Tabel 3. Hasil Analisis Nilai GSI

No	Litologi	Interval Kedalaman (m)	Sample Code	RQD (%)	Keterangan Visual	Nilai GSI
1	<i>Siltstone</i>	2.65 – 14.95	SPL 1–6	65	Rekahan sedang, agak lapuk	33
2	<i>Sandstone 1</i>	23.3 – 27.5	SPL 7–10	78	Batuan keras, blok besar	44

3	<i>Claystone 1</i>	30 – 39.2	SPL 12– 13	50	Blok kecil, agak rapuh, lapuk	28
4	<i>Claystone 2</i>	40.3 – 40.82	SPL 14– 15	60	Batuan agak kompak, rekahan tertutup, sedikit lapuk	30
5	<i>Sandstone 2</i>	42.1 – 43.8	SPL 22–27	100	Kompak, keras, sedikit rekahan	61
6	<i>Coal</i>	51 – 65	SPL 16– 17	45	Rapat, lunak, mudah hancur	25
7	<i>Limestone</i>	91.35 – 97	SPL 22	100	Keras, permukaan kasar	70

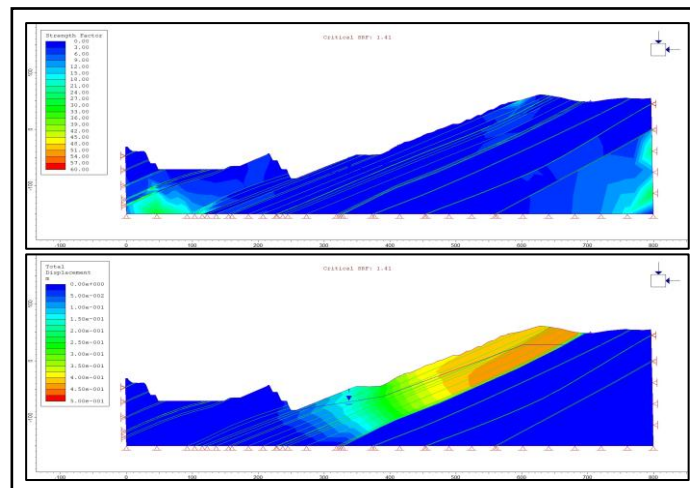
Sumber: Peneliti

Analisis SRF Dengan Metode *Finite element*

Analisis kestabilan lereng menggunakan metode *finite element* dilakukan dengan membagi lereng menjadi beberapa *section*, yaitu *Section 1*, *Section 2*, *Section 3*, *Section 4*, *Section 5*, dan *Section 12*. Alat radar digunakan untuk memantau pergerakan lereng, namun analisis dilakukan hanya hingga *Section 5*. Di atas *Section 5*, aktivitas loading batubara sedang berlangsung, yang menambah beban pada lereng dan berpotensi memengaruhi kestabilannya. Metode *finite element* diterapkan untuk menganalisis nilai FK dan deformasi pada lereng *low wall*.

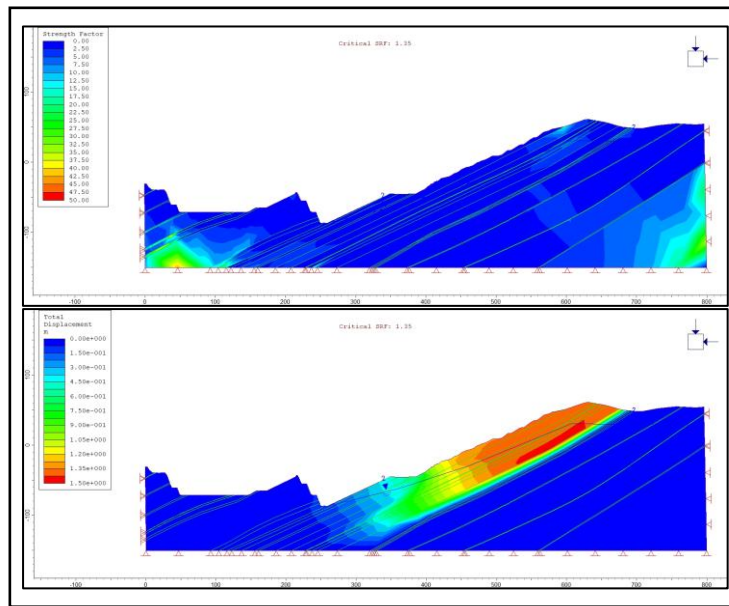
Hasil Analisis *Section 1*

Hasil analisis lereng menunjukkan bahwa faktor keamanan atau SRF lereng *low wall Section 1* berada dalam kondisi stabil, untuk keadaan kering (normal) dengan nilai FK sebesar 1,41 dan untuk keadaan jenuh (setelah hujan) dengan nilai SRF 1,35. Berdasarkan standar kestabilan lereng, nilai FK ini menunjukkan bahwa lereng aman.



Gambar 2. SRF Keadaan Normal Pada *Section 1* (1,41)

Sumber: Peneliti

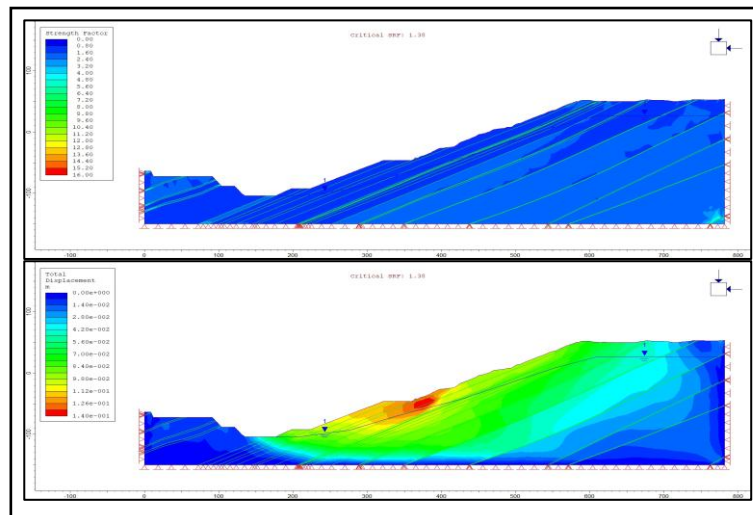


Gambar 3. SRF Keadaan Muka Air Tanah Jenuh Pada *Section 1* (1,35)

Sumber: Peneliti

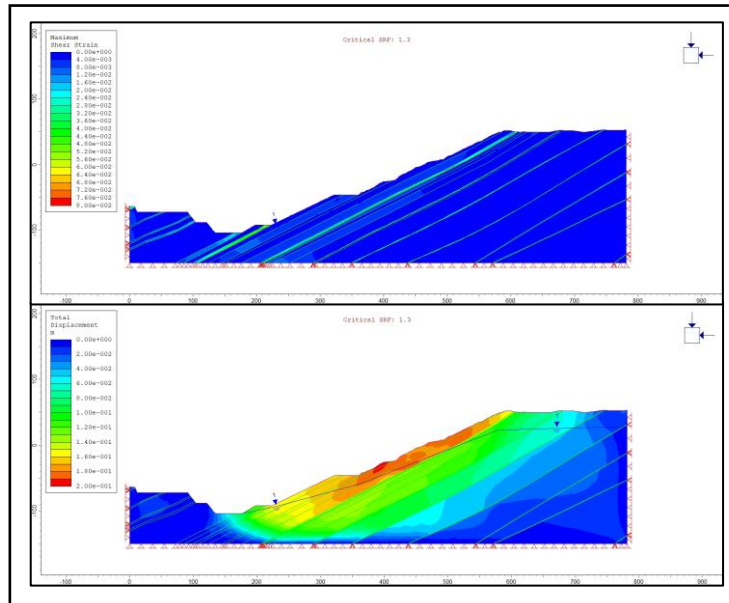
Hasil Analisis *Section 2*

Hasil analisis lereng menunjukkan bahwa faktor keamanan atau SRF lereng *low wall Section 2* berada dalam kondisi stabil, untuk keadaan kering (normal) dengan nilai FK sebesar 1,38 dan untuk keadaan jenuh (setelah hujan) dengan nilai SRF 1,3. Berdasarkan standar kestabilan lereng, nilai FK ini menunjukkan bahwa lereng aman..



Gambar 4. SRF Keadaan Normal Pada *Section 2* (1,38)

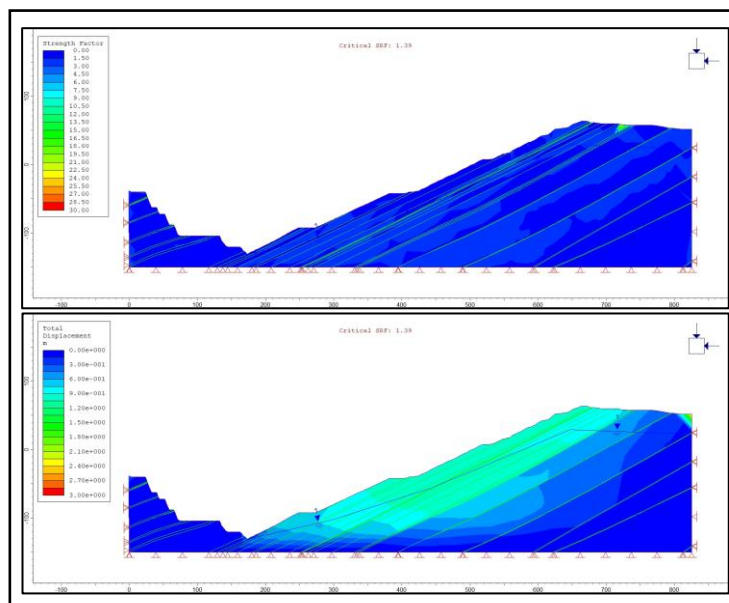
Sumber: Peneliti



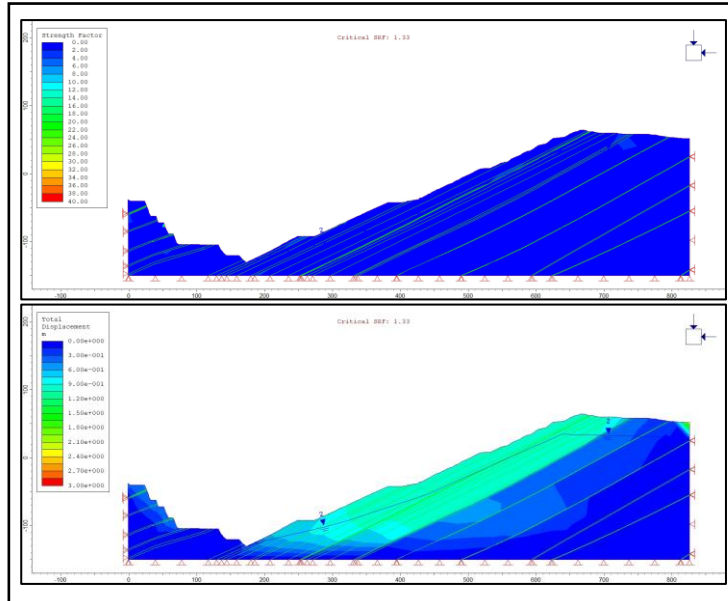
Gambar 5. SRF Keadaan Muka Air Tanah Jenuh Pada *Section 2 (1,3)*
 Sumber: Peneliti

Hasil Analisis *Section 3*

Hasil analisis lereng menunjukkan bahwa faktor keamanan atau SRF lereng *low wall Section 3* berada dalam kondisi stabil, untuk keadaan kering (normal) dengan nilai FK sebesar 1,39 dan untuk keadaan jenuh (setelah hujan) dengan nilai SRF 1,33. Berdasarkan standar kestabilan lereng, nilai FK ini menunjukkan bahwa lereng aman..



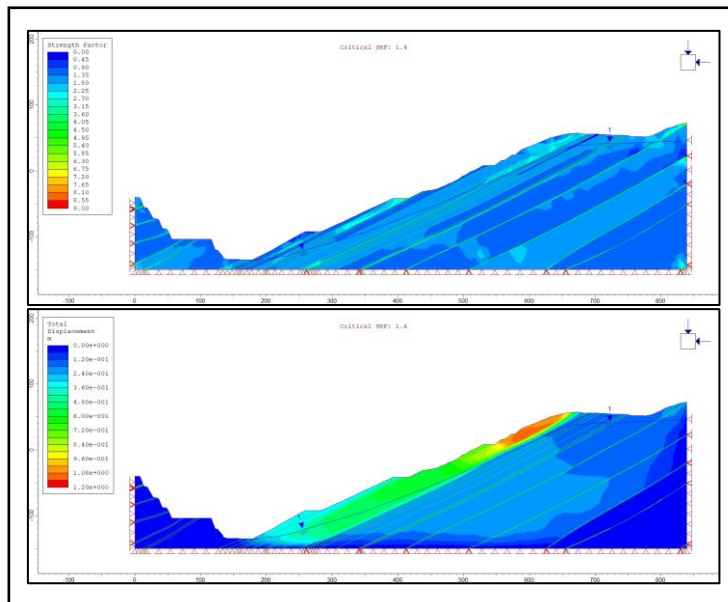
Gambar 6. SRF Keadaan Normal Pada *Section 3 (1,39)*
 Sumber: Peneliti



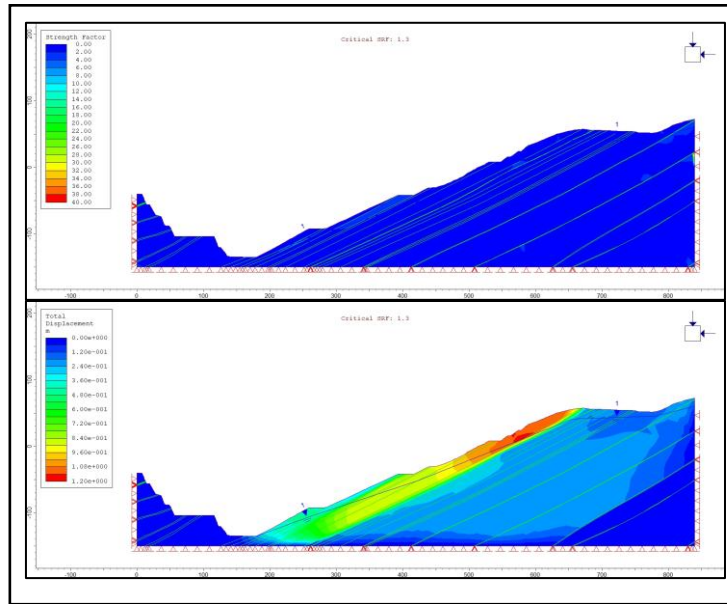
Gambar 7. SRF Keadaan Muka Air Tanah Jenuh Pada Section 3 (1,33)
 Sumber: Peneliti

Hasil Analisis Section 4

Hasil analisis lereng menunjukkan bahwa faktor keamanan atau SRF lereng *low wall Section 4* berada dalam kondisi stabil, untuk keadaan kering (normal) dengan nilai FK sebesar 1,4 dan untuk keadaan jenuh (setelah hujan) dengan nilai SRF 1,26. Berdasarkan standar kestabilan lereng, nilai FK ini menunjukkan bahwa lereng aman..



Gambar 8. SRF Keadaan Normal Pada Section 4 (1,4)
 Sumber: Peneliti

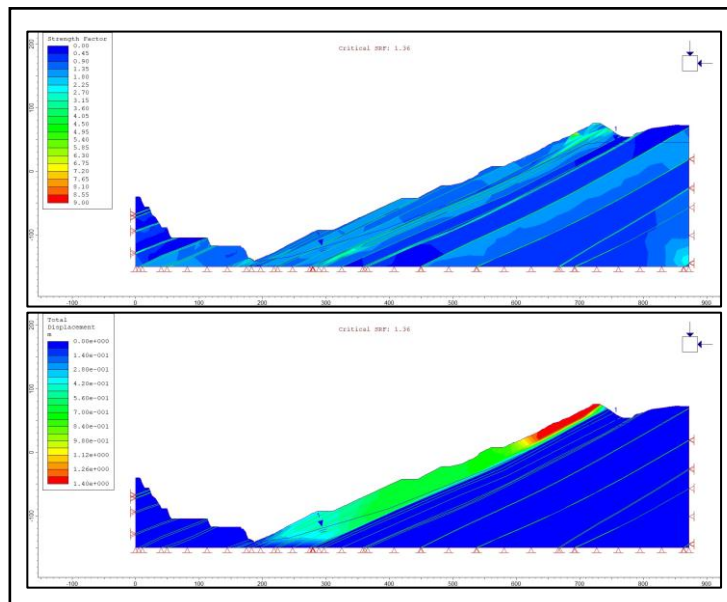


Gambar 9. SRF Keadaan Muka Air Tanah Jenuh Pada *Section 4 (1,3)*

Sumber: Peneliti

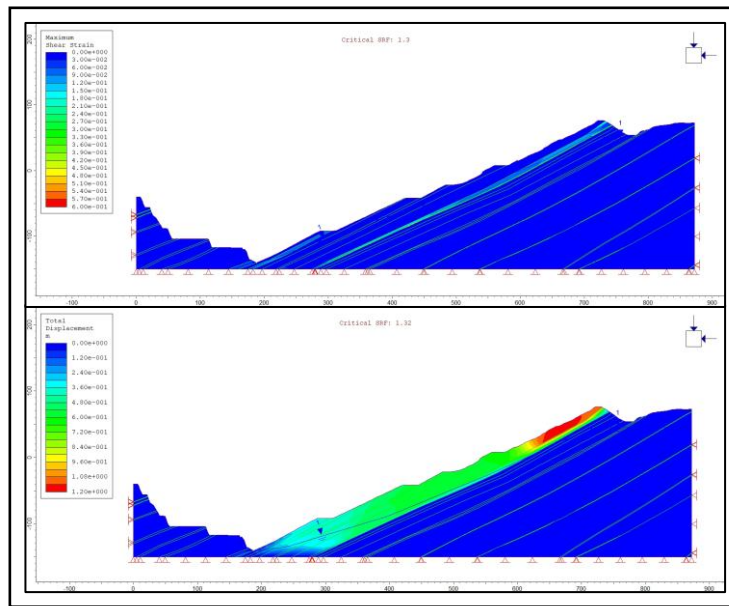
Hasil Analisis *Section 5*

Hasil analisis lereng menunjukkan bahwa faktor keamanan atau SRF lereng *low wall Section 5* berada dalam kondisi stabil, untuk keadaan kering (normal) dengan nilai FK sebesar 1,36 dan untuk keadaan jenuh (setelah hujan) dengan nilai SRF 1,30. Berdasarkan standar kestabilan lereng, nilai FK ini menunjukkan bahwa lereng aman.



Gambar 10. SRF Keadaan Normal Pada *Section 5 (1,36)*

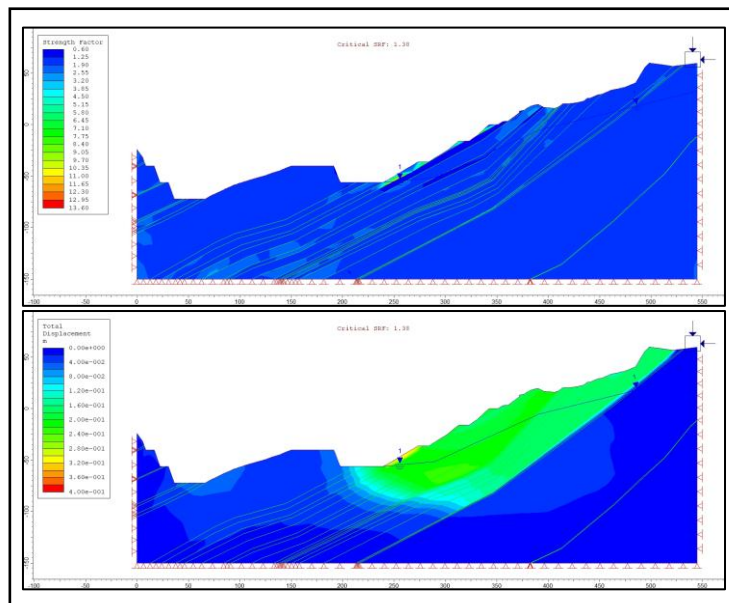
Sumber: Peneliti



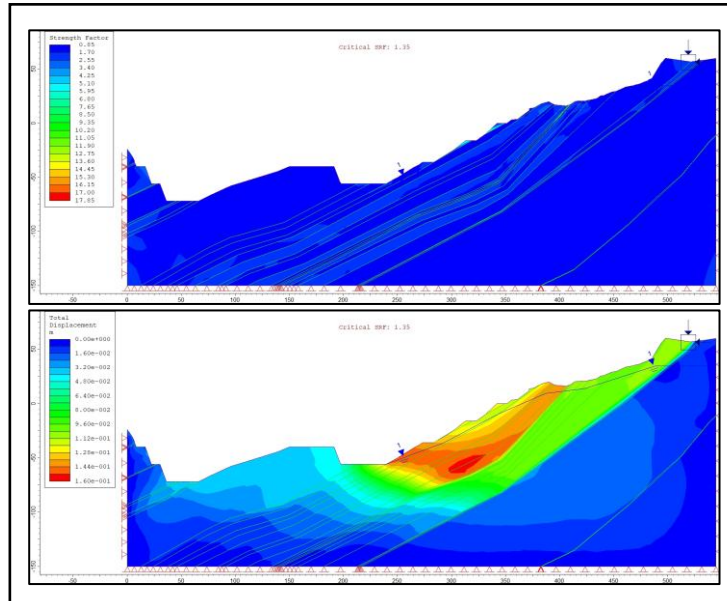
Gambar 11. SRF Keadaan Muka Air Tanah Jenuh Pada *Section 5 (1,30)*
Sumber: Peneliti

Hasil Analisis *Section 12*

Hasil analisis lereng menunjukkan bahwa faktor keamanan atau SRF lereng *low wall Section 12* berada dalam kondisi stabil, untuk keadaan kering (normal) dengan nilai FK sebesar 1,34 dan untuk keadaan jenuh (setelah hujan) dengan nilai SRF 1,35. Berdasarkan standar kestabilan lereng, nilai FK ini menunjukkan bahwa lereng aman.



Gambar 12. SRF Keadaan Normal Pada *Section 12 (1,38)*
Sumber: Peneliti (2025)



Gambar 13. SRF Keadaan Muka Air Tanah Jenuh Pada Section 12 (1,35)
Sumber: Peneliti (2025)

Tabel 4. Rekapitulasi Faktor Keamanan (FK) Lereng pada Berbagai Section

No	Section	FK Normal (Kering)	FK Jenuh (Muka Air tanah Jenuh)	Keterangan
1	1	1,41	1,35	Aman
2	2	1,38	1,3	Aman
3	3	1,39	1,33	Aman
4	4	1,4	1,3	Aman
5	5	1,36	1,3	Aman
6	12	1,38	1,35	Aman

Sumber: Peneliti (2025)

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng pada enam *section* yang ditampilkan dalam Tabel 4, seluruh nilai Faktor Keamanan (FK) dalam kondisi normal (kering) menunjukkan nilai $\geq 1,30$, sehingga memenuhi batas minimum yang disyaratkan dalam Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 untuk kondisi kering. Dalam kondisi jenuh (muka air tanah tinggi), seluruh *section* juga menunjukkan nilai FK $\geq 1,30$, dengan nilai terendah sebesar 1,30. Artinya, seluruh *section* masih berada dalam kategori "aman" meskipun dalam kondisi jenuh.

Hasil Analisis *Displacement Finite Element Per-Area*

Hasil analisis *Finite Element Method* (FEM) selain untuk mengetahui SRF-nya analisis ini juga untuk mengetahui nilai *displacement* per-titik area. *Maximum displacement* yang didapat akan menjadi acuan yang akan dibandingkan dengan *displacement* aktual hasil *monitoring*. Analisis dilakukan pada 4 *Section* yang disesuaikan dengan area yang di *monitoring* oleh alat radar. Adapun *section* yang dianalisis yaitu *section 3*, *section 4*, *section 5*, dan *section 12*. Untuk *Section 3* terdapat Area A.1C dan Area A.14, *Section 4* terdapat Area A.7N dan A.8N, *Section 5* terdapat Area A.6N dan A.17N, dan *Section 12* terdapat Area A.1S, hasil analisis dapat dilihat pada (Lampiran E *Maximum Total Displacement*). Dari hasil numerik per-titik area ini dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 5. Total Displacement Hasil Numerik

<i>Section</i>	<i>Area</i>	<i>Displacement Normal (Kering) (mm)</i>	<i>Displacement Jenuh (Muka Air Tanah Jenuh) (mm)</i>
<i>Section 12</i>	A.1S	102	93
<i>Section 3</i>	A.1C	325	325
	A.4C	230	170
<i>Section 4</i>	A.7N	218	218
	A.8N	447	447
<i>Section 5</i>	A.6N	515	515
	A.17N	245	245

Sumber: Peneliti (2025)

Hasil Monitoring Realtime Lereng

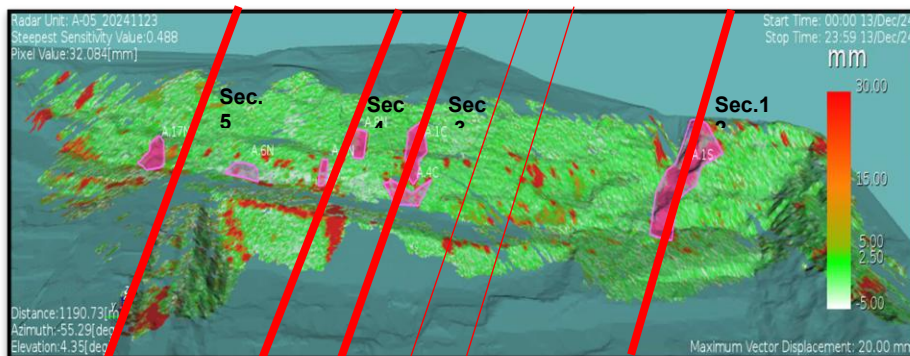
1. Nilai Displacement

Adapun data yang diperoleh dari hasil *monitoring* selama 30 hari pengamatan menunjukkan adanya pergerakan lereng dengan nilai *displacement* yang bervariasi, mengindikasikan aktivitas deformasi. Pengambilan data diplot mulai dari tanggal 23 november sampai dengan 24 desember 2024 selama satu bulan. Maka grafik akan menampilkan nilai *displacement* dalam 1 bulan tersebut (Lampiran D hasil *monitoring* 1 bulan) . Berikut hasil analisis nilai *displacement* dalam kurun waktu sebulan untuk area-area yang dianalisis oleh alat georadar yaitu area (A.1S, A.1C, A.6N, A.7N, A.8N , A.4C dan A.17N).

Tabel 6. Tabel Hasil Monitoring

<i>No</i>	<i>Section</i>	<i>Area</i>	<i>Displacement Hasil Monitoring 23 November - 23 Desember (mm)</i>
1	12	A.1S	2000
2	3	A.1C	600
		A.4C	300
4	4	A.7N	300
		A.8N	500
5	5	A.6N	180
		A.17N	160

Sumber: Peneliti (2025)

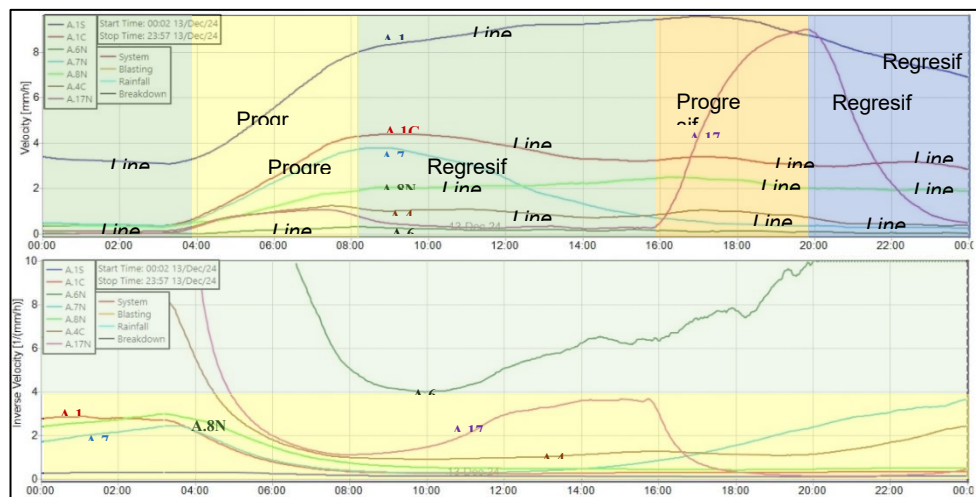
**Gambar 14. Tampilan 3D Area Monitoring oleh Alat Slope Stability Radar**

Sumber: Peneliti (2025)

Pada Gambar 14 Area yang berwarna merah muda merupakan area yang diplot untuk *monitoring* oleh alat. Bisa dilihat seberapa jauh pergerakan lereng yang terjadi pada tiap area. Untuk *Section 12 Area A.1S* pergerakan lerengnya cukup panjang dari atas lereng hingga turun ke kaki lereng. Penyebabnya oleh *loose material* yang disebabkan juga oleh air dari luar masuk ke dalam pit.

2. Hasil Pemantauan *Velocity* dan *Inverse Velocity*

Pemantauan pergerakan lereng selama 30 hari menghasilkan data *velocity* (kecepatan pergerakan) dan *inverse velocity* (1/*velocity*) yang memberikan gambaran jelas tentang tren deformasi. Nilai *velocity* harian berkisar antara 0–4 mm/h, dengan puncak tertinggi terjadi pada hari ke-20 tanggal 13 Desember setelah hujan lebat sehari sebelumnya tanggal 12 Desember, mencapai 8 mm/h (data curah hujan pada lampiran H, hal. 98) . Sementara itu, *inverse velocity* menunjukkan pola penurunan seiring waktu, mengindikasikan akselerasi pergerakan menuju titik kritis. Untuk area dengan nilai *Velocity* terbesar terdapat pada *Section 12 Area A.1S* dan *Section 5 Area A.17N*.



Gambar 15. Grafik *Velocity* dan *Inverse Velocity* Pada Taggal 13 Desember 2024
 Sumber: Peneliti (2025)

Berdasarkan Gambar 4.32 hasil pemantauan data SSR pada tanggal 13 Desember 2024, dilakukan pembacaan grafik pada tabek berikut:

Tabel 7. Pola Pergerakan Grafik

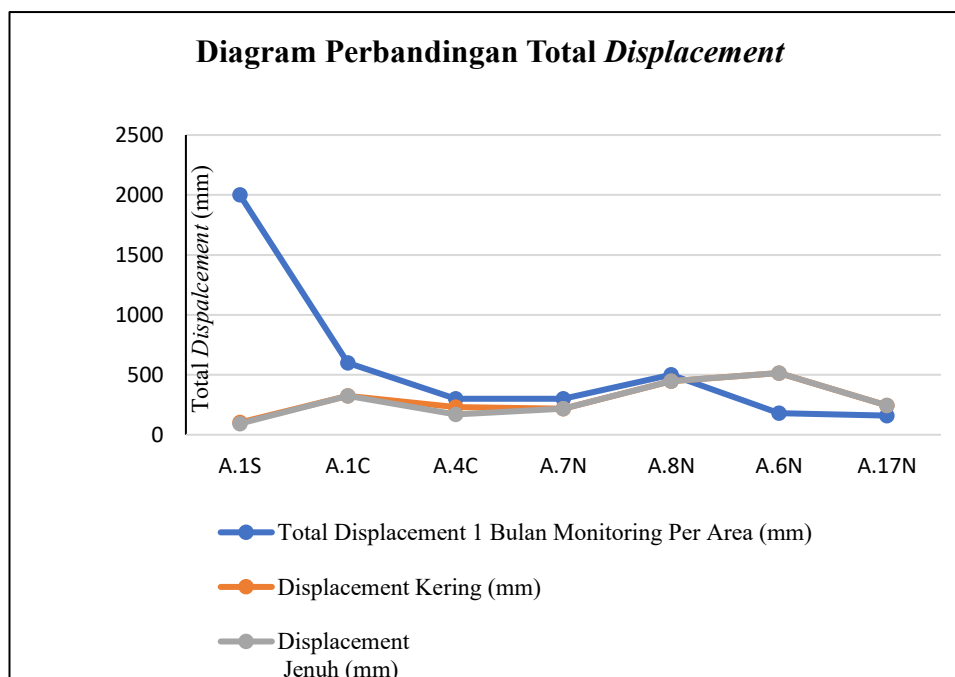
Titik	Pola Pergerakan	Keterangan
A.1S	<i>Linear</i> → <i>Progresif</i> → <i>Regresif</i>	Pergerakan aktif, meningkat cepat (>8 mm/jam) disebabkan pembacaan radar membaca pergerakan air yang masuk melalui lereng area ini, lalu menurun.
A.1C	<i>Linear</i> → <i>progresif</i> ringan → <i>regresif</i> → <i>linear</i> (Stabil)	Kecepatan konstan, belum kritis.
A.6N	<i>Linear</i>	Stabil.

A.7N	<i>Linear</i> → <i>Progresif Ringan</i> → <i>Regresif</i>	Peningkatan kecil kecepatan, Stabil kembali.
A.8N	<i>Linear</i>	Stabil.
A.4C	<i>Linear</i>	Tidak ada aktivitas deformasi signifikan.
A.17N	<i>Linear</i> → <i>Progresif</i> → <i>Regresif</i>	Peningkatan cepat hampir 9 mm/jam, namun tidak terjadi pelepasan massa (keruntuhan lokal) hanya <i>loose material</i> .

Sumber: Peneliti (2025)

Perbandingan Total *Displacement* FEM dan *Monitoring Real-time Slope Stability Radar*

Analisis pergerakan lereng dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi numerik menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) dan data *monitoring real-time* dari *Slope Stability Radar* (SSR) selama satu bulan. Hasil simulasi FEM menunjukkan nilai *displacement* maksimum sebesar 515 mm yang terjadi di Area A.6N, sedangkan hasil pemantauan SSR mencatat aktual tertinggi sebesar 2000 mm pada Area A.1S, dengan tren pergerakan yang bersifat meningkat. Perbandingan antara kedua metode tersebut ditampilkan dalam grafik berikut untuk memberikan gambaran visual terhadap kesesuaian pola pergerakan lereng antara hasil model dan kondisi aktual di lapangan.



Gambar 16. Grafik Perbandingan *Displacement* Hasil Numerik dengan *Monitoring*
Sumber: Peneliti (2025)

Gambar 16 merupakan perbandingan antara metode numerik dan *monitoring real-time* menunjukkan bahwa FEM memberikan estimasi yang mendekati dan berbeda jauh dari hasil *monitoring*. Jika terdapat perbedaan yang signifikan, penyebabnya dapat berupa perbedaan kondisi lapangan yang lebih kompleks dibandingkan model, atau perubahan tekanan air pori yang tidak terprediksi. Grafik di atas menunjukkan perbandingan total *displacement* berdasarkan hasil *monitoring* selama satu bulan dengan hasil simulasi numerik pada kondisi kering dan jenuh untuk masing-masing area. Terlihat bahwa nilai *displacement* hasil *monitoring* lapangan secara umum lebih tinggi dibandingkan hasil simulasi, terutama pada Area A.1S yang

mencapai sekitar 2.000 mm. Pada sebagian besar area, nilai *displacement* simulasi untuk kondisi jenuh (abu-abu) sedikit lebih tinggi dibandingkan kondisi kering (oranye), menunjukkan bahwa keberadaan muka air tanah dapat meningkatkan deformasi lereng. Namun demikian, pada beberapa area seperti A.6N dan A.17N, nilai *displacement* kering dan jenuh relatif sebanding.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik dan monitoring aktual lereng low wall di Pit X PT. Indominco Mandiri, dapat disimpulkan bahwa seluruh lereng berada dalam kondisi stabil dengan nilai faktor keamanan (FK) > 1,2 baik pada kondisi kering maupun jenuh, sesuai standar geoteknik tambang. Perpindahan (*displacement*) terbesar dalam simulasi numerik terpusat di zona batuan lemah seperti lanau berpasir, dengan nilai maksimum sebesar 515 mm, sementara data monitoring real-time dari SSR mencatat pergerakan aktual hingga 2000 mm di area A.1S, yang diduga dipicu oleh limpasan air permukaan dan infiltrasi dari luar lereng. Perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan pengamatan aktual menunjukkan pentingnya integrasi data lapangan dalam pemodelan geoteknik untuk meningkatkan akurasi prediksi dan efektivitas sistem peringatan dini. Kombinasi metode finite element dan monitoring SSR terbukti efektif sebagai pendekatan komprehensif dalam evaluasi kestabilan lereng tambang terbuka.

Sebagai saran untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar monitoring real-time menggunakan Slope Stability Radar (SSR) dilakukan secara lebih intensif dan untuk periode yang lebih lama guna mendapatkan data pergerakan lereng yang lebih representatif, terutama selama kondisi cuaca ekstrem. Selain itu, perlu dilakukan peningkatan akurasi dalam pemodelan numerik dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang lebih rinci seperti variasi tekanan air pori dan aktivitas tambang, guna memperkecil perbedaan antara hasil simulasi dan kondisi lapangan. Pengembangan teknologi pemantauan serta integrasi data lapangan dalam model numerik diharapkan dapat meningkatkan sistem peringatan dini dan pengambilan keputusan di industri pertambangan.

REFERENSI

- Akbas, S. O. (2015). Slope stability analysis using finite element method. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(3), 23–32.
- Azizi, R. (2018). Analisis kestabilan lereng tambang terbuka berdasarkan karakteristik geoteknik dan geometri lereng. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 14(1), 21–30.
- Huang, Y., & Yang, X. (2021). *Application of Slope Stability Radar for real-time monitoring of open-pit mining slopes*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(6), 1243-1255. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.02.003>
- Jiang, L., Wu, X., & Zhang, H. (2021). *Influence of slope geometry and soil properties on the stability of open-pit mining slopes*. *Geotechnical Engineering Journal*, 48(3), 291-302. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2021.05.004>
- Li, Z., Zhao, S., & Xie, X. (2022). *Real-time monitoring of slope stability using Slope Stability Radar: A case study of an open-pit mine*. *Journal of Environmental Engineering and Geophysics*, 10(2), 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.jee.2022.01.002>
- Liu, J., Wang, H., & Liu, F. (2020). *Application of Slope Stability Radar for monitoring and assessing open-pit mine slope stability*. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(4), 529-540. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.06.002>
- Wang, L., & Liu, Y. (2020). *Numerical modeling of slope stability for open-pit mines using finite element methods*. *International Journal of Geomechanics*, 20(5), 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeo.2020.08.004>
- Yuan, L., & Zhang, D. (2021). *Optimization of open-pit mine slope design based on Finite Element Method analysis*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,

- 147(8), 06021009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002597](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002597)
- Zhao, Y., Li, Y., & Xue, D. (2019). *Finite element modeling for slope stability analysis in open-pit mining*. *Computers and Geotechnics*, 114, 103206. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103206>
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion—2002 edition. Proceedings of NARMS-TAC Conference, Toronto.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2005). A brief history of the development of the Hoek–Brown failure criterion. *Soils and Rocks*, 28(1), 1–13.
- Muntaha, M. (2016). Studi kestabilan lereng alam tambang terbuka (studi kasus: lereng tambang batu kapur Lamongan dan Madura). *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 14(1), 1–8.
- IDS GeoRadar. (2023). IBIS Radar Systems for slope monitoring. Retrieved from <https://www.idsgeoradar.com>
- Rocscience Inc. (2004). Phase2: 2D finite element analysis for excavation design. User Manual. Toronto, Canada: Rocscience.
- Rose, N. D., & Hungr, O. (2007). Forecasting potential rock slope failures in open pit mines using radar. Proceedings of the First Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, 287–294.
- Tandidatu, D. T., & Hariadi, S. (2019). Analisis Kemantapan Lereng Highwall Tambang Terbuka Menggunakan Metode Bishop Pada Pit 22 GN Di PT Kitadin Site Embalut Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Geologi Pertambangan (JGP)*, 25(2).
- Upasna, S., George, M., & Prashanth, M. (2016). Application of real time slope monitoring for mine safety. *Journal of Sustainable Mining*, 15(3), 95–101.