



Pengaruh Aktifitas Alat Berat dan Peledakan Terhadap Stabilitas Lereng Timbunan Tambang Batubara

***Fanteri Aji Dharma Suparno, Siti Aminah, Haeruddin, Utari Retno Sulistyio Rini, Kurnia Dewi Mulyani, Emanuel Grace Manek, Muhammad Akbar Assyarbini**

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jember

**)fanteri.teknik@unej.ac.id*

Received: 15 Desember 2024 Revised: 20 Oktober 2025 Accepted: 27 Oktober 2025

Abstract

Open-pit mining generates voids backfilled with overburden, forming artificial slopes susceptible to landslides. Improper slope design and external factors such as heavy equipment loads, blasting vibrations, and groundwater may trigger instability. This study examines the stability of a disposal slope adjacent to the blasting zone at PT X Coal Mine in East Kalimantan, Indonesia. The research uses secondary data from PT X, including geotechnical parameters and operational details. Slope stability was evaluated via the Limit Equilibrium Method (Bishop and Morgenstern-Price) and Finite Element Method (FEM). Initial analyses revealed critical safety factors (FoS) of 0.853 (Bishop, Morgenstern-Price) and 0.520 (FEM), indicating high instability under combined dynamic and hydrogeological stresses. A slope redesign was proposed, improving FoS to 3.932 (dry) and 3.523 (wet) via Limit Equilibrium, and 1.570 (dry) and 1.370 (wet) via FEM. These values comply with the safety threshold (FoS ≥ 1.1) specified in KEPMEN ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018, ensuring operational safety. The study underscores the necessity of integrating geotechnical and operational constraints in slope design to mitigate landslide risks in open-pit mining.

Keywords: *Open-pit mining, slope stability, limit equilibrium method, finite element method*

Abstrak

Penambangan terbuka menghasilkan lubang yang diisi kembali dengan tanah penutup, membentuk lereng buatan yang rentan terhadap longsor. Desain lereng yang tidak tepat dan faktor eksternal seperti beban alat berat, getaran peledakan, dan air tanah dapat memicu ketidakstabilan. Penelitian ini mengkaji stabilitas lereng disposal di area yang berdekatan dengan zona peledakan di PT X Tambang Batubara, Kalimantan Timur, Indonesia. Penelitian menggunakan data sekunder dari PT X, termasuk parameter geoteknik dan detail operasional. Stabilitas lereng dievaluasi dengan Metode Kesetimbangan Batas (Bishop dan Morgenstern-Price) dan Metode Elemen Hingga (FEM). Analisis awal menunjukkan faktor keamanan (FoS) kritis sebesar 0,853 (Bishop, Morgenstern-Price) dan 0,520 (FEM), mengindikasikan ketidakstabilan tinggi akibat gabungan tekanan dinamis dan hidrogeologis. Sebuah redesain lereng diusulkan, meningkatkan FoS menjadi 3,932 (kering) dan 3,523 (basah) dengan Metode Kesetimbangan Batas, serta 1,570 (kering) dan 1,370 (basah) dengan FEM. Nilai-nilai ini memenuhi ambang batas keamanan (FoS $\geq 1,1$) yang ditetapkan dalam KEPMEN ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018, sehingga menjamin keamanan operasional. Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi antara kendala geoteknik dan operasional dalam desain lereng untuk mengurangi risiko longsor pada penambangan terbuka.

Kata kunci: *Tambang terbuka, kestabilan lereng, metode kesetimbangan batas, metode elemen hingga*

Pendahuluan

Lereng timbunan rentan terhadap keruntuhan akibat getaran ledakan, operasi alat berat, rembesan air, dan beban timbunan itu sendiri. Desain dan keamanan lereng pembuangan telah menjadi fokus

utama di dunia, karena banyak insiden kegagalan yang menyebabkan kerugian besar. Pemantauan lereng oleh insinyur geoteknik berkompeten sangat penting untuk mengidentifikasi bahaya dan meminimalkan risiko kecelakaan (Ahangari Nanekharan *et al.*, 2022).

Stabilitas lereng merupakan aspek krusial dalam berbagai bidang *engineering*, khususnya dalam proyek konstruksi, pertambangan, dan infrastruktur (Malik & Koner, 2024). Beban yang bekerja pada lereng sangat beragam dan kompleks, serta dapat dikategorikan menjadi tiga jenis utama. Beban statis merupakan beban yang konsisten, seperti berat material lereng itu sendiri, beban dari struktur di atasnya, dan tekanan air pori. Beban dinamis bersifat sementara dan fluktuatif, contohnya adalah gaya gempa dan getaran akibat peledakan. Selain beban, sifat-sifat tanah juga sangat berpengaruh terhadap stabilitas lereng (Rembah *et al.*, 2023).

Aktivitas penimbunan di area timbunan dengan menggunakan alat berat dapat memicu ketidakstabilan lereng (Huang *et al.*, 2022). Hal ini disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu beban tambahan dari material timbunan dan getaran yang dihasilkan oleh alat berat saat beroperasi (Imani Kalehsar *et al.*, 2022). Beban tambahan ini, yang disebut beban tumpu (*surcharge load*), serta getaran yang berulang dapat melemahkan kekuatan geser tanah pada lereng, sehingga meningkatkan potensi terjadinya longsor. Kondisi dinamis pada area timbunan, di mana proses penimbunan terus berlangsung, semakin memperparah situasi ini. Hasil perhitungan beban tersebut kemudian digunakan untuk menganalisis pengaruh beban dinamis alat berat terhadap stabilitas lereng dan menentukan tindakan mitigasi yang diperlukan (Rembah *et al.*, 2023). Studi yang dilakukan oleh Wu *et al.* (2022) fokus pada metode reduksi kekuatan tanah jenuh. Sementara Kolapo *et al.* (2022) mengkaji tentang kegagalan lereng tanpa mempertimbangkan dinamika alat berat peledakan dan hanya mengevaluasi pengaruh air tanah pada lereng alami, bukan timbunan tambang. Kesenjangan utama penelitian-penelitian tersebut adalah tidak adanya integrasi analisis simultan ketiga faktor kritis, yaitu aktivitas alat berat, getaran peledakan, dan tekanan air tanah, dan penggunaan metode analisis tunggal tanpa validasi silang.

Penelitian ini menyoroti pentingnya pemilihan lokasi dan desain lereng timbunan di area tambang batubara dengan studi kasus PT X, di Kutai Timur Kalimantan Timur. Dalam studi ini menjawab kesenjangan tersebut melalui kombinasi *limit equilibrium method* (Bishop/Morgenstern-Price) dan *finite element method* untuk analisis komplementer, serta pemodelan terpadu yang mempertimbangkan interaksi dinamis ketiga faktor tersebut. Pendekatan ini didukung oleh temuan Jin (2021) yang merekomendasikan kombinasi metode untuk lereng yang kompleks. Hasil analisis diharapkan memberikan nilai faktor keamanan yang aman dan optimal sesuai standar KEPMEN ESDM No. 1827, sekaligus menjadi dasar perancangan

sistem penimbunan yang lebih aman dan berkelanjutan.

Metode

Metode LEM dan FEM dipilih untuk saling melengkapi dalam analisis stabilitas lereng. Metode LEM memberikan keunggulan dalam analisis cepat dengan parameter yang relatif sederhana, sementara FEM mampu mengakomodasi kompleksitas material secara lebih rinci. Hasil dari kedua metode kemudian dibandingkan untuk melakukan validasi silang (*cross-method validation*). Pendekatan kombinasi ini memungkinkan pemeriksaan hasil yang lebih komprehensif dan meningkatkan keandalan temuan penelitian. Pemilihan kombinasi metode ini didasarkan pada kebutuhan untuk memvalidasi hasil secara *cross-method*, mengingat kompleksitas pengaruh alat angkut, peledakan, dan air tanah pada lereng.

Spesifikasi alat angkut

Sumber data yang digunakan adalah dari PT X yang berlokasi di Kabupaten Kutai Timur, Kalimantan Timur. Data mencakup spesifikasi alat berat (CAT 789D, HD 730E, HD 785-7), parameter peledakan (PPV, PPA, frekuensi), dan karakteristik material lereng timbunan (kohesi, sudut geser dalam, dan bobot isi). Lokasi penelitian memiliki topografi bergelombang dengan struktur geologi kompleks di Cekungan Kutai, yang memengaruhi stabilitas lereng. Kajian ini menggunakan alat berat berjenis alat angkut karena alat tersebut memiliki dampak yang cukup signifikan terhadap kestabilan lereng timbunan. Persamaan 1 dan 2 menjelaskan beban tambahan pada alat berat terhadap lereng timbunan menggunakan teori AASTHO LRFD 2014.

$$DD = 1/2 \times \frac{A}{BC} \dots\dots\dots(1)$$

$$IM = 133\% \times DD \dots\dots\dots(2)$$

Dimana, DD adalah beban statis (kPa), A adalah berat kotor dari alat berat (kg), B adalah lebar keseluruhan tapak roda (m) dari ujung ke ujung, C adalah jarak keseluruhan antara ban depan dengan ban belakang, dan IM adalah beban dinamis (kN/m²) (Chai *et al.*, 2022).

Parameter peledakan

Energi yang dihasilkan oleh bahan peledak ditransfer ke massa batuan sebagai energi regangan, muncul dalam bentuk gelombang yang menghancurkan massa batuan di sekitar lubang ledakan. Gelombang ini memiliki tiga sifat penting yang menentukan besarnya energi yang ditransmisikan, yaitu amplitudo, frekuensi, dan durasi. Nilai amplitudo diukur sebagai percepatan

(PPV), kecepatan (PPA), dan perpindahan (PPD), sedangkan frekuensi ditentukan oleh jarak simpangan gelombang (Lu *et al.*, 2021). Besarnya nilai percepatan getaran dapat dilihat di Persamaan 3. Faktor seismik (a_{max}) berhubungan dengan nilai PPA mengikuti teori dari Matsuo (1984) yang memiliki nilai koefisien dari respons analisis sebesar 0,65 (Princessca *et al.*, 2020).

$$a_{max} = Z \times PPA \dots\dots\dots (3)$$

Dengan, a_{max} adalah *acceleration maximal* (g), z adalah koefisien dari respons analisis, dan PPA adalah *peak particle acceleration* (g).

Tekanan air tanah

Salah satu karakteristik penting dari media berpori adalah respons tekanan pori terhadap perubahan tegangan rata-rata dalam kondisi tidak terdrainase. Tekanan air pori pada lereng lempung berpasir dipengaruhi oleh derajat kejenuhan (Chai *et al.*, 2022), sejalan dengan nilai B-bar 0,9 yang digunakan dalam penelitian ini. Penting untuk dicatat bahwa air biasanya digunakan sebagai fluida pori dalam pengujian laboratorium. Black dan Lee (1973) mengkaji nilai teoritis B berdasarkan jenis tanah dalam keadaan jenuh, yang menunjukkan bahwa tanah jenuh memiliki nilai B mendekati 1. Namun, untuk pasir padat dan lempung yang sangat kaku, nilai B turun menjadi sekitar 0,9. Pada kondisi tanah jenuh air, diasumsikan nilai B-bar (\bar{B}) = 1, sehingga setiap peningkatan beban (v) akan menyebabkan peningkatan tekanan air pori (u) dalam jumlah yang sama (Upomo *et al.*, 2022).

Pemodelan

Limit Equilibrium Method (LEM)

Metode kesetimbangan batas (LEM) merupakan salah satu metode konvensional dan banyak digunakan dalam analisis stabilitas lereng. Pendekatan ini mengevaluasi stabilitas lereng secara kuantitatif dengan menggunakan faktor keamanan (FK). Sifat visual dari faktor keamanan membuatnya populer dalam bidang teknik lereng. Metode ini didasarkan pada teori mekanika plastis-kaku, yang hanya fokus pada mekanisme deformasi tanah pada saat kegagalan dan mengabaikan proses deformasi tanah secara keseluruhan. Pendekatan ini hanya membutuhkan keseimbangan gaya dan momen serta mengikuti kriteria Mohr-Coulomb (Kolapo *et al.*, 2022). Persamaan 4 menjelaskan bahwa faktor keamanan lereng F mengacu pada pengurangan indeks kekuatan geser batuan dan tanah menjadi c/F dan $\tan \phi/F$. Massa batuan dan tanah berada dalam kesetimbangan batas di sepanjang permukaan lereng, sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \dots\dots\dots (4)$$

dengan τ adalah tegangan geser (kPa atau kN/m²), c adalah kohesi (kPa), σ adalah tegangan normal (kPa), dan ϕ adalah sudut geser dalam (°).

Metode Bishop membagi massa tanah menjadi irisan-irisan tipis dan menerapkan keseimbangan gaya pada setiap irisan. Gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan meliputi berat irisan, gaya geser antar irisan, tekanan air pori, dan beban eksternal. Faktor keamanan lereng dihitung dengan membandingkan momen gaya penahan (*resisting moment*) dengan momen gaya pendorong (*driving moment*). Selanjutnya, metode ini digunakan untuk menghitung gaya normal dasar efektif (N), dengan memenuhi kesetimbangan gaya vertikal (Pasole *et al.*, 2020). Sedangkan Metode Morgenstern-Price adalah pengembangan dari metode Bishop yang mempertimbangkan distribusi gaya antar irisan secara lebih detail. Proses analisa tersebut merupakan hasil keseimbangan setiap gaya normal dan momen yang bekerja pada setiap irisan daerah keruntuhan lereng. Syarat kesetimbangan yang dipenuhi adalah keseimbangan gaya vertikal dan horizontal, serta keseimbangan momen. Metode ini menggunakan fungsi distribusi gaya yang berbeda untuk menghitung gaya geser antar irisan, sehingga menghasilkan hasil analisis yang lebih akurat, terutama untuk lereng dengan geometri yang kompleks (Alok *et al.*, 2024).

Finite element method (FEM)

Metode elemen hingga (FEM) adalah pendekatan numerik yang digunakan untuk menemukan solusi perkiraan untuk masalah nilai batas kontinu atau benda yang sebenarnya dari suatu objek dibagi menjadi bagian yang lebih kecil dan teratur dalam metode elemen hingga. Elemen-elemen ini dianggap terhubung satu sama lain melalui sambungan tertentu yang disebut node. Node terletak di batas-batas elemen dan merupakan tempat elemen yang berdekatan dianggap terhubung. Dalam penelitian ini, metode elemen hingga menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb sebagai analisis kestabilan lereng. Analisis dilakukan dengan menghitung perpindahan pada setiap titik node kemudian menggunakan fungsi interpolasi yang diasumsikan dengan *software* pemodelan sehingga diperoleh nilai SRF (*strength reduction factor*) (Jin, 2021).

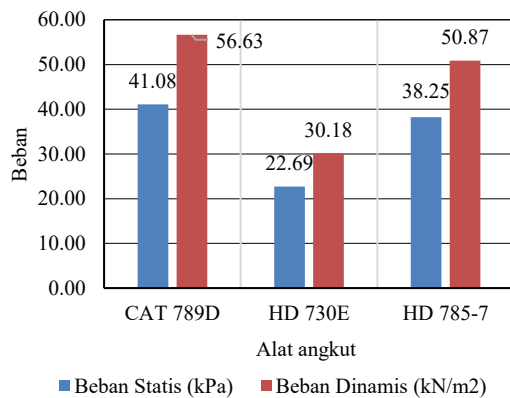
Pendekatan lain yang telah dikembangkan dikenal sebagai metode reduksi kekuatan geser (SRF). Metode ini bekerja dengan cara mengurangi kekuatan geser tanah atau batuan hingga mencapai kondisi longsor secara bertahap. Konsep utama SRF adalah dengan memodifikasi parameter kekuatan material, yaitu kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ), yang merupakan komponen penting dalam kriteria

Mohr-Coulomb. Ketika material mencapai kondisi gagal, nilai kohesi dan sudut gesek dalam akan berubah menjadi c_f dan ϕ_f , dimana saat kondisi tersebut mengalami pengurangan parameter dari kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) (Risky & Raimon, 2021). Perbedaan nilai FK LEM dan FEM disebabkan oleh kompleksitas parameter material dalam FEM.

Hasil dan Pembahasan

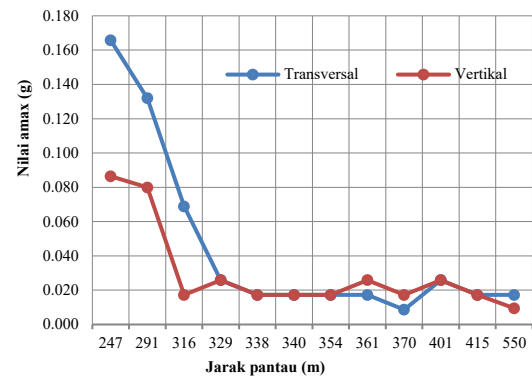
Pengaruh kombinasi beban terhadap kestabilan lereng

Dalam studi ini menyelidiki pengaruh beban dinamis dari alat angkut seperti *dump truck* terhadap kestabilan lereng timbunan. Getaran dan beban dari alat berat, yang bervariasi tergantung pada bobot dan laju kendaraan, dapat mengganggu kestabilan lereng. Hasil menunjukkan bahwa alat berat seperti CAT 789D menghasilkan beban tertinggi (Gambar 1), baik statis maupun dinamis, yang dapat memicu ketidakstabilan lereng. Aktivitas alat berat di area timbunan memberikan tekanan tambahan pada lereng, meningkatkan risiko longsor. Analisis dilakukan sesuai standar SNI 8460:2017 dan mempertimbangkan beban hidup, beban mati, dan beban faktor eksternal lainnya.



Gambar 1. Nilai *surcharge load* (Ningrum et al., 2019)

Peledakan menghasilkan gelombang longitudinal, transversal, dan vertikal, yang dapat menyebabkan deformasi dan ketidakstabilan (Zhu, 2025). Nilai batas maksimal a_{max} yang dapat diterima lereng adalah 0,07g. Pada jarak 247 m dan 291 m (Gambar 2), nilai a_{max} melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh KEPMEN 1827 K/30/MEM/2018, menunjukkan potensi gangguan kestabilan. Manajemen getaran diperlukan untuk mengurangi risiko longsor. Penelitian ini memberikan pemahaman tentang risiko longsor akibat getaran peledakan dan merekomendasikan langkah mitigasi untuk menjaga kestabilan lereng selama operasi penambangan.



Gambar 2. Korelasi nilai a_{max} dengan jarak pantau peledakan

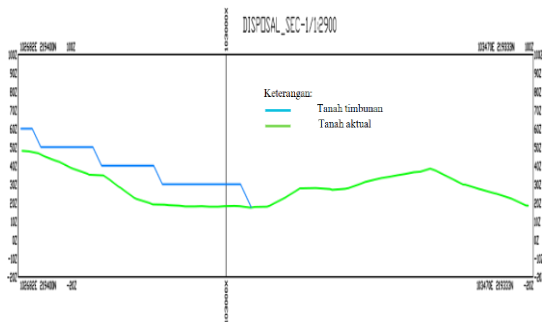
Air dapat mengurangi sifat fisik dan mekanik tanah, meningkatkan tekanan pori, dan menurunkan ketahanan geser lereng (Arif, 2016). Erosi bawah permukaan juga meningkatkan risiko ini. Kondisi tanah yang diasumsikan jenuh air adalah kondisi paling kritis pada lereng, yang mengandung air dalam jumlah maksimal (He, 2021). Penelitian menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan parameter nilai kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan bobot isi (γ). Pada penelitian ini juga menambahkan garis piezometer sedalam 2 m sebagai tanda bahwa didalam timbunan tersebut terdapat adanya air, dan juga menggunakan teori Skempton 1954 yang memiliki nilai b -bar sebesar 0,9, nilai tersebut didasarkan pada kondisi timbunan berpasir dan tanah lempung yang sangat kaku (Vernay, 2020).

Tabel 1. Nilai *surcharge load* dari keseluruhan alat angkut

No	Tipe	Spesifikasi Alat			Pembebanan		
		A (kg)	B (m)	C (m)	Beban statis (kg/m ²)	Beban statis (kPa)	Beban dinamis (kN/m ²)
1	CAT 789D	324.319	6,926	5,7	4107,57	41,08	54,63
2	HD 730E	324.319	5,57	12,83	2269,14	22,69	30,18
3	HD 784-7	163.780	4,325	4,95	3825,07	38,25	50,87
Total Beban				102,02		135,68	

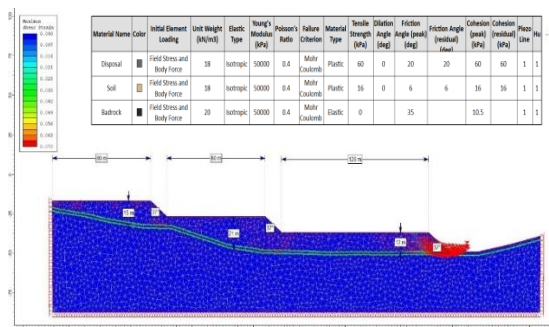
Cross section timbunan

Pemodelan *cross section* timbunan adalah langkah awal dalam analisis kestabilan lereng. pemodelan ini dibuat dari *cross section* yang mewakili seluruh area timbunan tambang dan dimasukkan ke *software Slide* dan *software Phase 2* dalam format *dxg*. *Cross section* yang digunakan dalam penelitian ini adalah garis A-A', yang dipilih karena lokasinya dekat dengan daerah peledakan dan jalan operasi dumping. *Cross section* A-A' dibagi menjadi sisi Utara dan Selatan. Pemodelan dibuat secara manual mengikuti *Cross section* timbunan (Gambar 3).



Gambar 3. Cross section timbunan

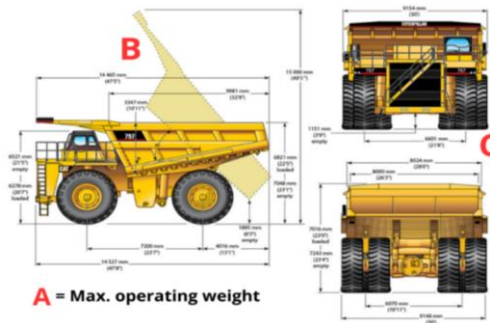
Pemodelan ini menampilkan susunan litologi tanah timbunan, tanah, dan *bedrock*. Desain timbunan memiliki material jalan setinggi 12 m dan panjang 120 m, soil setebal 2 m, *bedrock* setinggi rata-rata 55 m, dan sudut timbunan sebesar 37° sebelum pembebanan (Gambar 4).



Gambar 4. Pemodelan penampang sebelum pembebanan dengan Metode FEM

Penentuan parameter pembebanan pada area timbunan

Penentuan parameter pembebanan pada alat berat, peledakan, dan muka air tanah untuk menghitung faktor keamanan (FK) lereng menggunakan *software Slide* dan *Phase 2*. Parameter alat berat (Gambar 5 dan Tabel 1) meliputi berat kotor, lebar tapak ban, dan jarak antar ban, yang diperoleh dari *handbook Caterpillar* (Caterpillar, 2022) dan *Komatsu* (Komatsu, 2009).



Gambar 5. Parameter alat berat

Untuk peledakan, parameter yang digunakan adalah percepatan maksimal (a_{max}) dari hubungan antara teori Matsuo (1984) dengan nilai pengujian peledakan menggunakan nilai PPA (arah gelombang transversal dan vertikal) dapat dilihat pada Tabel 2. Dalam analisis muka air tanah, *piezometric line* diasumsikan berada 2m di bawah permukaan tanah timbunan, dengan nilai tekanan air pori (μ) sebesar 0,9, mengingat campuran material tanah lempung berpasir dan batuan. Semua parameter ini digunakan untuk menghitung nilai FK lereng dan memastikan kestabilannya.

Tabel 2. Nilai parameter peledakan

Jarak Pantau (m)	a_{max}	
	Trans.	Vert.
247	0,166	0,086
291	0,132	0,080
316	0,069	0,017
329	0,026	0,026
338	0,017	0,017
340	0,017	0,017
354	0,017	0,017
361	0,017	0,026
370	0,009	0,017
401	0,026	0,026
415	0,017	0,017
550	0,017	0,009

Analisis nilai FK dengan Metode LEM

Metode LEM adalah untuk menghitung nilai faktor keamanan (FK) di area timbunan dengan mempertimbangkan parameter material properti, alat berat, peledakan, dan muka air tanah. *Software Slide* digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng dan mencari bidang runtuh kritis secara otomatis untuk mendapatkan nilai FK. Metode LEM yang digunakan adalah metode Bishop dan Morgenstern-Price, yang menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb yang menggabungkan tegangan normal dan tegangan geser untuk menentukan kondisi keruntuhan geser. Analisis dilakukan pada kondisi kering hingga basah untuk menilai kestabilan lereng.

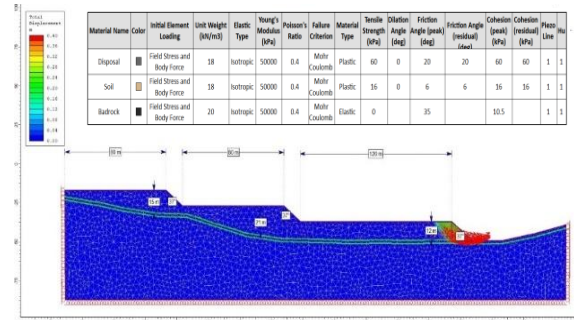
Metode Bishop digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng di area timbunan yang berdekatan dengan peledakan. Data parameter dari PT X dimasukkan ke *Software Slide* untuk memodelkan susunan tanah timbunan, tanah, dan batuan dasar, menentukan arah runtuh, dan mendapatkan nilai faktor keamanan. Hasil awal menunjukkan FK sebesar 1,949, namun nilai ini menurun menjadi 1,307 setelah pembebanan dinamis dari alat berat. Penambahan beban dari peledakan menghasilkan nilai FK sebesar 0,955, mengindikasikan kondisi kritis. Analisis dilanjutkan dengan menambahkan faktor tekanan air tanah, yang menurunkan nilai FK menjadi 0,853. Hasil penelitian menunjukkan pentingnya analisis yang mendetail dan penambahan variabel seperti tekanan air tanah dan beban dinamis untuk memahami dan mengatasi potensi ketidakstabilan lereng.

Selanjutnya penelitian ini menggunakan metode Morgenstern-Price untuk menganalisis kestabilan lereng dengan memasukkan data parameter dari PT X dan menentukan arah runtuh. Hasil awal menunjukkan nilai faktor keamanan (FK) sebesar 2,009, yang dianggap stabil. Setelah menambahkan beban dari alat berat (*surchARGE load*), nilai FK menurun menjadi 1,305. Penambahan beban dari peledakan menghasilkan nilai FK sebesar 0,969. Selanjutnya, dengan menambahkan variabel tekanan air tanah, nilai FK menurun lebih lanjut menjadi 0,853. Meskipun metode Morgenstern-Price dan Bishop berbeda, keduanya dapat menghasilkan nilai FK yang sama dalam kondisi tertentu jika parameter yang dimasukkan identik. Penelitian ini menunjukkan bahwa lereng mengalami keruntuhan parah karena gaya pendorong melebihi gaya penahan, sehingga perlu dilakukan analisis ulang untuk memodelkan lereng yang aman dan optimal. Nilai FK keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 10. Kemudian penelitian ini dilanjutkan dengan analisis LEM dan FEM untuk mengkaji kestabilan lereng di area timbunan. Data parameter dari PT X dimasukkan ke dalam *software Phase 2* dengan menerapkan kondisi batas yang tepat dan menggunakan *mesh* segitiga 6 simpul.

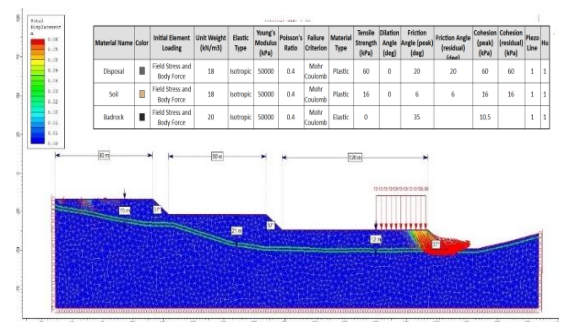
Hasil awal menunjukkan nilai faktor pengurangan kekuatan (SRF) adalah sebesar 1,450 sebelum pembebanan (Gambar 6). Setelah menambahkan beban statis dan dinamis dari alat berat, nilai SRF turun menjadi 1,020 (Gambar 7). Penambahan beban dari getaran seismik mengurangi nilai SRF menjadi 0,700, menunjukkan kondisi kritis (Gambar 8).

Analisis menunjukkan bahwa stabilitas lereng dipengaruhi secara signifikan oleh kombinasi tiga faktor utama. Pertama, beban dinamis dari alat berat CAT 789D menghasilkan tekanan tertinggi sebesar

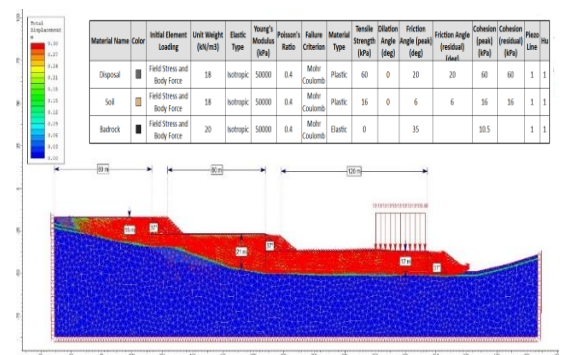
135,68 kN/m², yang menyebabkan penurunan faktor keamanan (FK) dari 1,949 menjadi 1,307 berdasarkan metode Bishop. Kedua, getaran peledakan dengan percepatan maksimal ($a_{max} = 0,166g$) semakin mengurangi FK hingga mencapai 0,853, mengindikasikan kondisi lereng yang kritis. Ketiga, tekanan air tanah pada material lempung berpasir dengan $\mu = 0,9$ memperparah ketidakstabilan, terutama ketika material berada dalam kondisi jenuh air, seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 6. Lereng timbunan tanpa beban



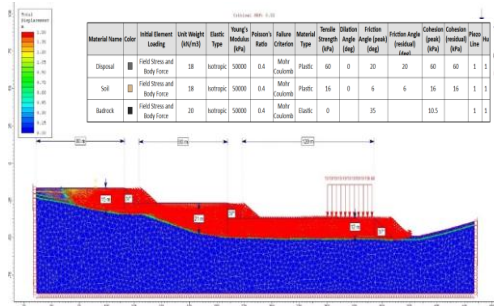
Gambar 7. Lereng timbunan dengan surcharge load



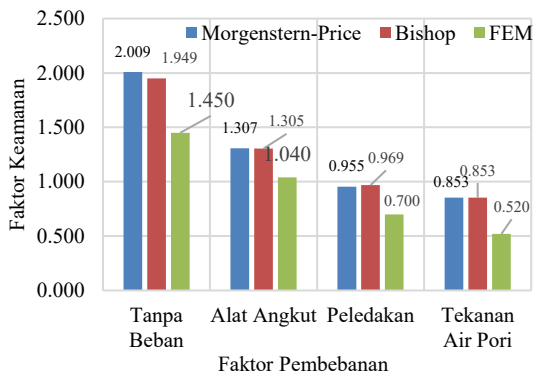
Gambar 8. Lereng timbunan dengan seismic load

Hasil perhitungan nilai FK dapat dilihat pada Gambar 10, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa terdapat korelasi antara pembebanan dengan nilai FK. Faktor pembebanan dihitung secara bertahap dari tidak ada beban sampai dengan penambahan beban. Warna balok menunjukkan

penggunaan metode yang berbeda, dimana balok biru mewakili metode Morgenstern-Price, balok oranye mewakili metode Bishop, dan balok abu-abu mewakili metode FEM. Dari nilai FK yang sudah diketahui tersebut dapat dilihat bahwa nilai FK dari metode LEM pasti lebih besar daripada metode FEM, hal tersebut disebabkan oleh parameter yang lebih kompleks dari metode FEM itu sendiri.



Gambar 9. lereng timbunan dengan water pressure

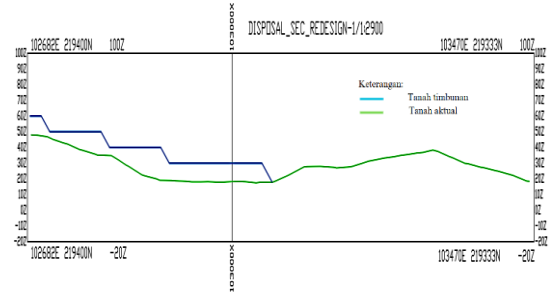


Gambar 10 Korelasi antara nilai pembebanan terhadap nilai FK

Pemodelan Lereng Timbunan yang Aman dan Optimal pada Metode LEM dan FEM

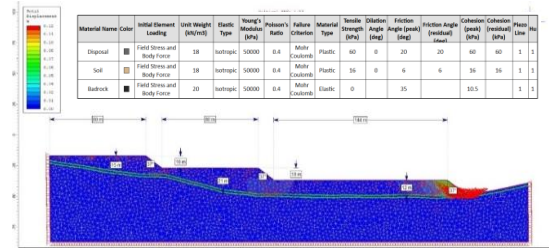
Penelitian ini menunjukkan bahwa lereng tidak stabil setelah analisis pada pembahasan di atas, sehingga diperlukan desain ulang untuk mendapatkan nilai faktor keamanan (FK) yang aman dan optimal. Desain optimal mempertimbangkan efisiensi teknik dan ekonomi, serta memastikan kestabilan dan keamanan lereng. Metode analisis yang digunakan termasuk metode Bishop, Morgenstern-Price, dan Metode Elemen Hingga, yang semuanya membantu mengidentifikasi desain lereng yang aman dan efisien. Desain ulang dilakukan dengan membuat *Cross Section* baru (Gambar 11), diikuti pemodelan dan analisis menggunakan *software* berbeda yaitu *Slide* dan *Phase 2*. Hasil desain ulang menunjukkan panjang *bench* 144 m, tinggi *slope* 12 m, dan sudut kemiringan 37°, yang kemudian dianalisis untuk mendapatkan nilai FK yang optimal.

Setelah pemodelan ulang dengan geometri yang berbeda, analisis dilakukan untuk kondisi kering dan basah menggunakan metode Bishop. Hasil menunjukkan nilai faktor keamanan (FK) sebesar 3,932 dalam kondisi kering dan 3,532 dalam kondisi basah, keduanya lebih besar dari 1.1 sesuai dengan standar KEPMEN 1827/K/30/MEM/2018.



Gambar 11. Cross section pemodelan ulang

Desain ulang menghasilkan panjang *bench* 144 m, tinggi lereng 12 m, dan sudut kemiringan 37°, dengan lubang sisa setinggi 12 m dan panjang 67 m. Desain ini memastikan kestabilan lereng yang optimal. Selanjutnya dilakukan analisis kembali dalam kondisi kering dan basah untuk menentukan nilai faktor keamanan (FK) dengan menggunakan metode Morgenstern-Price.



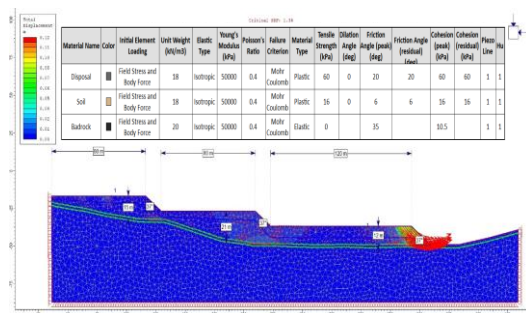
Gambar 12. Pemodelan ulang lereng timbunan pada Metode FEM kondisi kering

Hasil menunjukkan nilai FK sebesar 3,930 dalam kondisi kering dan 3,532 dalam kondisi basah, yang lebih besar dari 1.1 dan dianggap aman sesuai dengan standar KEPMEN 1827/K/30/MEM/2018. Pemodelan ulang ini menghasilkan panjang *bench* 144m, tinggi lereng 12m, dan sudut kemiringan 37°, dengan lubang sisa setinggi 12m dan panjang 67m. Desain ini memastikan kestabilan dan keamanan lereng.

Analisis dilanjutkan dengan metode FEM, dan hasil yang didapatkan yaitu lereng mengalami longsor dan mengharuskan dilakukan pemodelan ulang untuk mendapatkan nilai SRF yang aman dan optimal. Hal pertama yang harus dilakukan yaitu meng-*import* file dari *software Slide* dengan format *sli* atau *slim* ke *software Phase2*, tahap selanjutnya mengubah *restrain* dari XY ke *restrain X* pada

bagian kanan dan kiri model serta *restrain* bagian bawah menggunakan *restrain XY*. Setelah itu mengubah jenis *mesh* menjadi *mesh* seragam, dengan tipe elemen segitiga 6 simpul (Gambar 4).

Analisis FEM menemukan faktor pengurangan kekuatan terkecil dimanapun dalam model. Oleh karena itu, area yang diteliti ditentukan oleh area pencarian SSR (SRF) pada model sebagai fokus dari fenomena penelitian ini. Selanjutnya diinterpretasikan pemodelan tersebut lalu model dikomputasikan maka akan didapati hasil nilai perhitungan SRF dalam kondisi kering sebesar 1,530 (Gambar 12) dan kondisi basah dengan nilai SRF sebesar 1,370 (Gambar 13). Nilai SRF setelah pemodelan ulang dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 13. Pemodelan ulang lereng timbunan pada Metode FEM kondisi basah

Implikasi kebijakan dan rekomendasi operasional

Berdasarkan temuan penelitian, terdapat beberapa rekomendasi operasional yang dapat diterapkan untuk meningkatkan stabilitas lereng. Untuk mitigasi getaran peledakan, disarankan untuk membatasi jarak peledakan minimal 340m dan menggunakan bahan peledak *low-vibration* seperti *emulsion explosives*. Dalam manajemen alat berat, perlu diterapkan sistem rotasi operasi untuk mengurangi akumulasi beban dinamis serta implementasi sensor IoT untuk pemantauan tekanan roda secara *real-time*.

Untuk kontrol air tanah, rekomendasi meliputi instalasi *wick drains* guna mengurangi tekanan pori dan pemasangan piezometer otomatis untuk memantau kelembaban tanah secara berkala. Temuan ini memberikan dampak signifikan terhadap regulasi industri pertambangan. Studi ini merekomendasikan revisi terhadap standar KEPMEN ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 dengan mengintegrasikan analisis kombinasi beban (dinamis dan hidrogeologis) dalam desain lereng serta mewajibkan penggunaan metode FEM untuk lereng dengan kondisi geoteknik yang kompleks.

Revisi ini diharapkan dapat meningkatkan standar keamanan dalam operasi penambangan.

Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat pada penelitian ini yaitu: Stabilitas lereng di area timbunan dipengaruhi oleh beban dari alat angkut sebesar 135,68 kN/m² untuk tiga jenis alat angkut, mengikuti teori beban dinamis AASHTO LRFD 2014. Beban peledakan menggunakan parameter a_{max} yaitu nilai untuk getaran transversal 0,166g dan 0,086g untuk getaran vertikal. Tekanan air tanah digambarkan menggunakan garis piezometer pada kedalaman 2m dengan nilai tekanan air pori (μ) sebesar 0,9, di mana campuran material tanah lempung berpasir dan batuan. Perhitungan nilai FK dan pemodelan lereng timbunan menunjukkan bahwa metode Bishop dan Morgenstern-Price menghasilkan nilai FK sebesar 0,853 setelah mempertimbangkan beban tambahan. Kedua metode ini menggunakan pendekatan kesetimbangan batas, sehingga memberikan hasil identik bila kondisi fisik dan mekanik sama. Sementara itu, pada metode FEM menghasilkan nilai SRF sebesar 0,520.

Berdasarkan Peraturan KEPMEN ESDM 1827 K/30/MEM/2018, diperlukan pemodelan ulang lereng timbunan agar mencapai nilai FK yang aman dan optimal sebesar 1,1. Setelah pemodelan ulang, didapatkan panjang bench 144 m, tinggi *slope* 12 m, dan sudut kemiringan 37°. Dalam kondisi kering, nilai FK dari metode Bishop adalah 3,932, Morgenstern-Price 3,930, dan FEM 1,570. Dalam kondisi basah, nilai FK dari metode Bishop dan Morgenstern-Price adalah 3,523, dan dari metode FEM adalah 1,370. Nilai-nilai ini dianggap aman sesuai dengan peraturan KEPMEN ESDM 1827 K/30/MEM/2018.

Daftar Pustaka

- Ahangari Nanekharan, Y., Pusatli, T., Chengyong, J., Chen, J., Cemiloglu, A., Azarafza, M., & Derakhshani, R. (2022). Application of machine learning techniques for the estimation of the safety factor in slope stability analysis. *Water*, 14(22), 3743.
- Alok, A., Burman, A., Samui, P., R. Kaloop, M., & Eldessouki, M. (2024). A Generalized Limit Equilibrium-Based Platform Incorporating Simplified Bishop, Janbu and Morgenstern-Price Methods for Soil Slope Stability Problems. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1), 3053923.
- Arif, I. I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama.

- Caterpillar Tractor Company. (1984). *Caterpillar Performance Handbook*. The Company.
- Chai, S., Wang, L., Wang, P., Pu, X., Xu, S., Guo, H., & Wang, H. (2022). Failure mechanism and dynamic response characteristics of loess slopes under the effects of earthquake and groundwater. *Frontiers in Earth Science*, 10, 814740.
- He, J., Wang, S., Liu, H., Nguyen, V., & Han, W. (2021). The critical curve for shallow saturated zone in soil slope under rainfall and its prediction for landslide characteristics. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(3), 1927-1945.
- Huang, Z., Shi, H., Zhang, W., Ma, S., Gao, F., & Ma, M. (2022). Expansive soil embankment filling and cutting treatment Technology: a systematic review. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 4045620.
- Imani Kalehsar, R., Khodaei, M., Dehghan, A. N., & Najafi, N. (2022). Numerical modeling of effect of surcharge load on the stability of nailed soil slopes. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1), 499-510.
- Jin, Y. (2021). Slope Stability Analysis Based on the Limit Equilibrium Method and Strength Reduction Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 631(1), 012048.
- Kolapo, P., Oniyide, G. O., Said, K. O., Lawal, A. I., Onifade, M., & Munemo, P. (2022). An overview of slope failure in mining operations. *Mining*, 2(2), 350-384.
- Komatsu, S. (2003). Specifications and application handbook.
- Lu, J., Zhang, J., Ren, X., & Deng, Y. (2021). Application of double strength reduction factor method in the stability analysis of rock slopes. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(1), 3363496.
- Malik, B. A., & Koner, R. (2024). Comprehensive review of the monitoring and sensing system in slopes with a special focus on the mining sector. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(59), 66588-66614.
- Matsuo, M. (1984). Geotechnical Engineering-Concept and Practice of Reliability-based Design. *Gihodo Shuppan, Ltd.*
- Ningrum, M. F., Laesanpura, A., Suhendi, C., & Mahartadika, Y. A. (2019). Estimasi Pengaruh Vibrasi Pergerakan Transportasi Alat Berat pada Kestabilan Low-wall, Studi Kasus pada Aktivitas Pertambangan Batubara Site Asam-Asam, Kalimantan Selatan. *Jurnal Fisika*, 1-13.
- Pasole, D., Patanduk, J., & Wong, I. L. K. (2020). Analisis Stabilitas Lereng Disposal Menggunakan Metode Bishop, Janbu, dan Ordinary. *Paulus Civil Engineering Journal*, 2(3), 144-153.
- Princessca, C., Manar, M. H., Sophian, I., & Zakaria, Z. (2020). Pengaruh Getaran Peledakan Terhadap Kestabilan Lereng Pit Central Tutupan, Pt Adaro Indonesia, Kalimantan Selatan. *Geoscience Journal*, 4(3), 243-251.
- Rembah, R., Salu, S. P., & Kadar, M. I. (2023). Pengaruh Koefisien Seismic Load Terhadap Faktor Keamanan Lereng Pada Penambangan Nikel Di Kecamatan Palangga Selatan Kabupaten Konawe Selatan. *Mining Science And Technology Journal*, 2(1), 82-90.
- Risky, A. M., & Raimon, D. (2021). Analisis Kestabilan Lereng Pada Rencana Lereng Akhir Penambangan Dengan Tinggi 55 m PT. Atika Tunggal Mandiri, Kecamatan Pangkalan Koto Baru, Sumatera Barat. *Jurnal Bina Tambang*, 6(4), 136.
- Upomo, T. C., Aryanti, D. E., & Kusumawardani, R. (n.d.). Simulasi Kenaikan Tekanan Air Pori Akibat Beban Timbunan Saat Fase Konstruksi Pembangunan Tanggul. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 28(2), 292-299.
- Vernay, M., Morvan, M., & Breul, P. (2020). Evaluation of the degree of saturation using Skempton coefficient B. *Geomechanics and Geoengineering*, 15(2), 79-89.
- Wu, B., Ni, W., & Wang, H. (2022). Stability Analysis of Loess High Slope under Dynamic Compaction Based on Matrix Discrete Element Method. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 9089652.
- Zhu, Y., Shi, W., Liang, F., Tao, T., & Yu, L. (2025). Deformation and failure mechanism of a mining slope under mining blasting and rainfall. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(6), 267.