Analisis Kestabilan Lereng dan Rekomendasi Desain Lereng Penambangan Batubara Pada Zona Sesar

Alieftiyani Paramita Gobel[1]*, Ramadhan[2], Diana Purbasari[3], Muhammad Qistan Hafits[4]
[1,2,3]Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia
[4]Departement of Geotechnical, PT. Bukit Asam Tbk , Tanjung Enim, South Sumatera, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : *alieftiyani@ft.unsri.ac.id*

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981
ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin
https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada
Vol. 04, No. 10 Oktober, 2026
Page: 7057-7070

DOI:
https://doi.org/10.55681/armada.v4i10.4745

Article History:
Received: Agustus 11, 2026
Revised: September 06, 2026
Accepted: Oktober 19, 2026

Abstract : *The design of a safe and productive pit is a fundamental aspect of open pit mining operations. Teh main challange in this study is the identification of a normal fault that causes a coal seam elevation difference of up to approximately 40 m, which potentially forms a slip surface and reduces slope stability. The initial design of the southern sidewall in the coal mining area usues a single slope configuration, which poses a risk of slope failure. Therefore, this study aims to analyze slope stability and recomended a safe slope design, both technically and economically, for the coal mining area located within the faults zone. The analysis was conducted using the Limit Equilibrium Method (LEM) with the Mohr-Coloumb failure criterion and referred to the Indonesian Minister of Energy and Mineral Resources Decree No. 1827 K/30/MEM/2018. The data used include existing slope geometry, material properties, staurated groundwater conditions, seismic loading factors and ground pressure. The results show that the exixting slope design in the fault zone does not meet the slope stability criteria because the factor of safety remains below the acceptable limit. Redesigning the slope geometry using a multi bench method was able to increase the factor of safety so that it meets the technical and economic safety criteria, since the striping ratio (SR) remains the same that of the exixting mine slope design, namely 1;4.*

Keywords : *Slope Stability, Coal Mining, Faults Zone, Factor Of Safety, Multi-Bench Design*

Abstrak : Perencanaan desain pit yang aman dan produktif merupakan aspek fundamental dalam operasi tambang terbuka. Tantangan utama penelitian ini adanya identifikasi keberadaan sesar normal yang menyebabkan perbedaan elevasi seam batubara hingga ±40 m, sehingga berpotensi membentuk bidang gelincir dan menurunkan kestabilan lereng. Desain awal pada bagian sidewall selatan penambangan batubara menggunakan single slope yang berisiko menimbulkan longsor. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng dan merekomendasikan desain lereng yang aman secara teknis dan ekonomis pada area penambangan batubara yang berada di zona sesar tersebut. Analisis dilakukan menggunakan metode Limit Equilibrium Method (LEM) dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb serta mengacu pada standar Keputusan Menteri ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Data yang digunakan meliputi data geometri lereng eksisting, material properties, kondisi muka air tanah (saturated condition), faktor kegempaan dan ground pressure. Hasil

menunjukkan bahwa desain lereng eksiting pada area sesar belum memenuhi kriteria kestabilan lereng karena faktor keamanan masih berada dibawah batas aman. Perancangan kembali geometri lereng dengan metode multi bench mampu meningkatkan nilai faktor keamanan sehingga memenuhi kriteria keamanan secara teknis dan ekonomis karena nilai Striping Ratio (SR) yang sama dengan desain lereng penambangan eksisting yaitu 1:4.

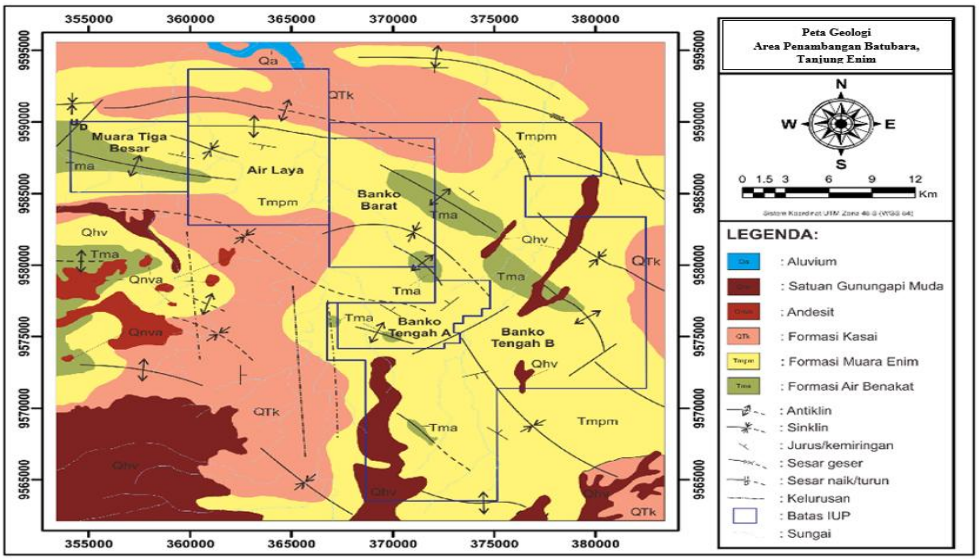
Kata Kunci : Kestabilan Lereng, Penambangan Batubara, Zona Sesar, Faktor Keamanan, Desain Multi-Bench

PENDAHULUAN

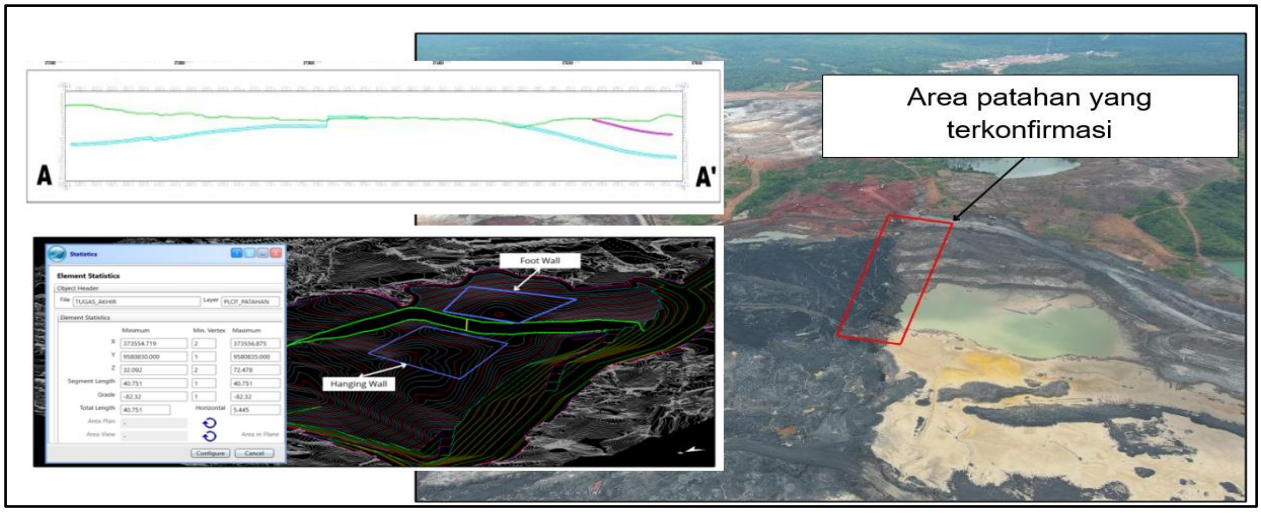
Rancangan awal dan evaluasi pada desain lereng penambangan batubara merupakan aspek fundamental dalam menjamin keselamatan dan efektivitas produksi. Lereng tambang yang tidak stabil dapat mengalami kelongsoran atau kegagalan, sehingga menimbulkan risiko terhadap pekerja, alat, infratruktur dan keberlanjutan operasi penambangan (Jalil et al., 2022), (Anggara & Wijaya, 2025). Kestabilan lereng pada kegiatan penambangan sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi dan geoteknik, terutama keberdaan bidang diskontinuitas, struktur geologi, sifat fisik-mekanik batuan, geometri lereng dan kondisi air tanah (Pasole et al., 2020), (Saputro et al., 2022), (Amanda, 2025). Selain itu, faktor eksternal seperti curah hujan, getaran peledakan dan gempa bumi juga dapat mempercepat penurunan kestabilan lereng (Ardhi et al., 2017)(Chadarisman & Herdianto, 2025), (Amanda et al 2023), (Amanda, 2025).

Pada area tambang terbuka yang berada di zona struktur geologi kompleks, pengaruh sesar dan lipatan menjadi sangat penting untuk dilakukan pemantauan secara berkala. Sesar merupakan bidang diskontinuitas yang dapat mempengaruhi kontinuitas massa batuan, membentuk zona lemah, meningkatkan permebilitas serta menjadi bidang gelincir potensial terjadinya longsoran. Keberadaan sesar pada lereng tambang juga dapat menimbulkan perubahan orientasi bidang dan distribusi tegangan pada batuan sehingga dapat menurunkan nilai faktor keamanan lereng. Dalam penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa lereng yang berasosiasi dengan sesar memiliki kerentanan tinggi terhadap kegagalan/kelongsoran, terutama jika orientasi sesar tidak menguntungkan terhadap arah kemiringan lereng (Amanda, 2025), (Amanda et al., 2023). Oleh karena itu, penilaian kestabilan lereng pada area sesar menjadi sangat penting dalam perencanaan geoteknik tambang.

Kondisi lokasi penelitian, dijumpai struktur geologi berupa antiklin dan sesar normal yang berpengaruh terhadap kontinuitas lapisan (seam) batubara (Gambar 1). Anomali posisi seam batubara yang saling bersebrangan mengindikasikan adanya deformasi geologi kompleks yang menyebabkan pergeseran massa batuan secara vertikal. Kondisi ini menimbulkan perbedaan elevasi seam batubara antara blok barat sebagai *hanging wall* pada elevasi $\pm$ 32 meter dan blok timur sebagai *footwall* pada elevasi $\pm$ 72 meter (Gambar 2). Selisih hingga $\pm$40 meter menunjukkan bahwa area penelitian berada pada zona struktur aktif yang berpotensi menjadi bidang gelincir dan menyebabkan ketidakstabilan lereng serta dapat menyulitkan pengaturan geometri lereng yang aman dan ekonomis untuk kegiatan operasi produksi penambangan.



Gambar 1. Struktur Geologi Daerah Penelitian



Gambar 2. Kondisi Strukur Geologi Pada Lokasi Penelitian

Dalam analisis kestabilan lereng, penggunaan metode Limit Equilibrium Method (LEM) dapat memberikan estimasi factor of safety (FoS) secara langsung dan relatif efisien dari sisi data masukkan (Pasole et al., 2020), (Chen et al., 2023), (Komadja et al., 2021). Metode ini sesuai untuk kondisi tambang terbuka yang memiliki keterbatasan data geoteknik secara rinci, namun memerlukan evaluasi kestabilan yang representatif (Komadja et al., 2021), (Irianto & Afasedanya, 2025). Pada sisi lain, pendekatan numerik seperti Finite Element Method (FEM) juga banyak digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng namun membutuhkan parameter material yang lebih detail dan proses komputasi yang lebih kompleks (Saputro et al., 2022), (Komadja et al., 2021), (Ardhi et al., 2017). Dalam konteks lereng tambang batubara dengan material penyusun yang heterogen, metode LEM menjadi pendekatan yang praktis untuk menilai kondisi eksisting lereng dan menyusun rekomendasi desain lereng yang aman (Jalil et al., 2022), (Parissing et al, 2024).

Selain itu, kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng karena mampu mempresentasikankekuatan geser massa batuan melalui parameter kohesi dan sudut geser dalam (Saputro et al., 2022), (Alemayehu et al., 2025), (Putra & Anggara, 2026). Pada area overburden maupun batuan sedimen yang terdeformasi, pendekatan ini cukup relevan untuk menilai pengaruh litologi, air tanah dan struktur geologi terhadap kestabilan lereng. Dengan mengkombinasikan parameter geometri lereng, sifat fisik-mekanik, material, serta kondisi struktur

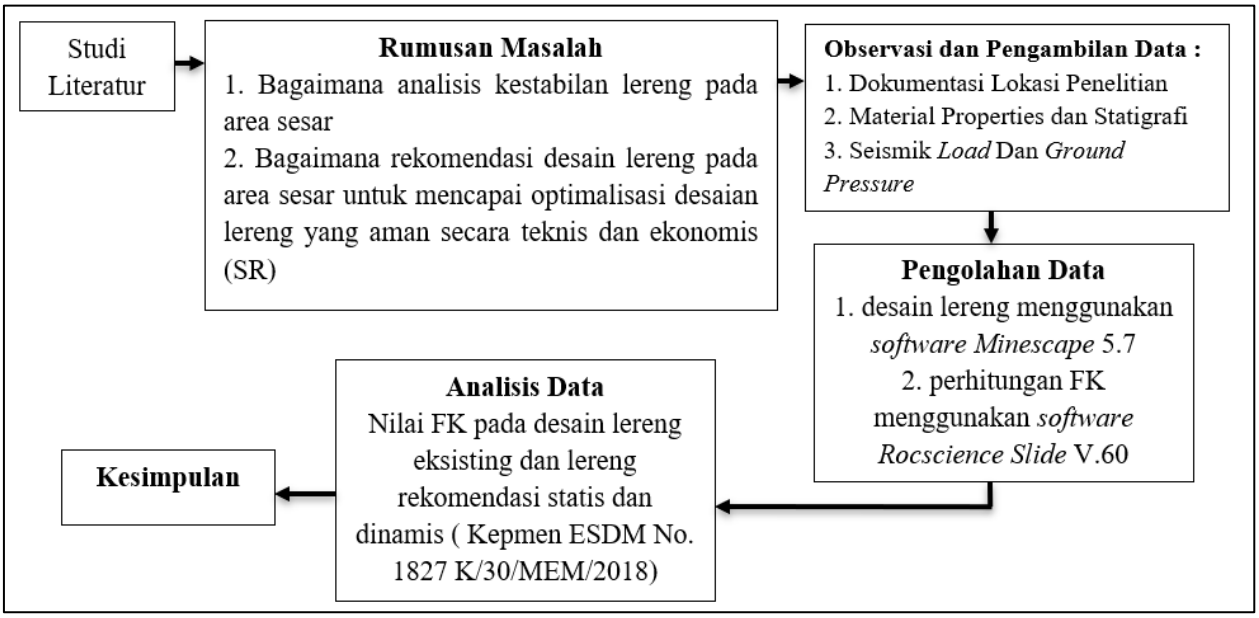
geologi lokal dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi kestabilan lerengn eksisting (Jalil et al., 2022), (Saputro et al., 2022), (Amanda, 2025).

Walaupun dalam banyak penelitian telah membahas kestabilan lereng tambang batubara, namun masih terdapat gap penelitian yang secara spesifik menghubungkan struktur sesar normal dan antiklin sebagai kontrol utama terhadap kestabilan lereng pada area penambangan batubara. Sebagian penelitian lebih banyak berfokus pada geometri lereng, muka air tanah atau sifat mekanik material, sedangkan pengaruh struktur geologi kompleks terhadap desain lereng tambang masih relatif terbatas (Amanda, 2025), (Amanda et al., 2023). Oleh karena itu, dengan adanya sesar di lokasi penelitian diperlukan analisis yang mampu mengevaluasi kondisi eksisting secara lebih spesifik serta memberikan rekomendasi geometri lereng yang optimal secara teknis dan ekonomis.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat kebaharuan sederhana dari penelitian ini terletak pada evaluasi kestabilan lereng tambang batubara yang dipengaruhi oleh keberadaan struktur geologi antiklin dan sesar normal sehingga desain lereng secara rill mempresentasikan kondisi struktur geologi setempat. Selain itu, penelitian ini tidak hanya menilai kestablian lereng eksisting tetapi juga menyusun rekomendasi desainlereng yang mempertimbangkan aspek keselamatan dan keekonomian tambang. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar teknis dalam pengambilan keputusan desain lereng pada area sesar yang sensitif terhadap deformasi geologi. Adapun tujuan penelitian ini adalah menganalisis kestabilan lereng eksisting pada area sesar dan merekomendasikan geometri lereng yang optimal secara teknis dan ekonomis untuk keberlanjutan operasi penambangan batubara.

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian front penambangan batubara yang terletak di kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Metode penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan yang meliputi studi literatur, observasi lapangan, pengambilan data (data primer dan sekunder) kemudian dilanjutkan dengan pengolahan dan analisis data (Gambar 3).



Gambar 3. Diagram alir penelitian

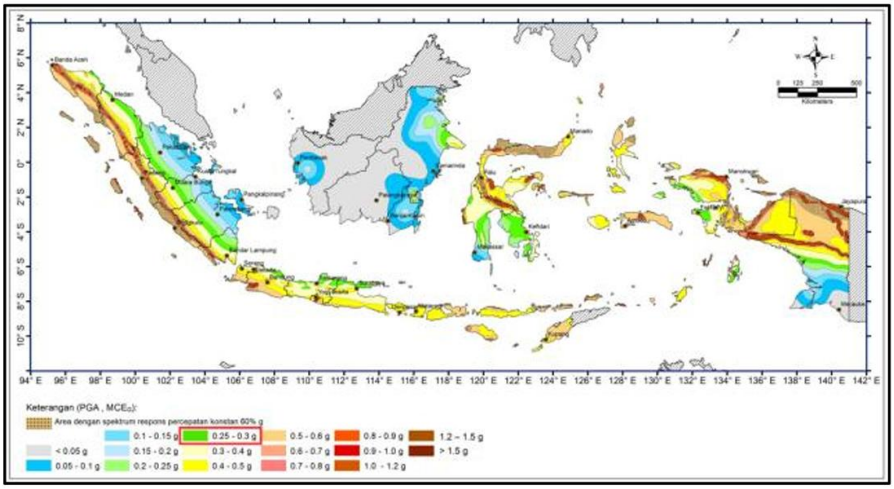
Analisis kinematika untuk mengidentifikasi potensi tipe keruntuhan, serta kondisi kestabilan lereng diukur menggunakan metode kesetimbangan batas yang harus memenuhi kriteria standar keamanan mengacu pada kriteria kestabilan lereng berdasarkan Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 (Tabel 1).

Tabel 1. Nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor lereng tambang

Jenis Lereng	Keparahan longsor	Kriteria dapat diterima		
		Faktor keamanan (FK) statis (min)	Faktor keamanan (FK) dinamis (min)	Probabilitas longsor (maks) PoF (FK≤1)
Lereng Tunggal	Rendah s.d. tinggi	1,1	Tidak ada	25-50%
Inter-ramp	Rendah	1,15 – 1,2	1,0	25%
	Menengah	1,2 – 1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2 – 1,3	1,1	10%
Lereng keseluruhan	Rendah	1,2 – 1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3 – 1,5	1,1	5%

Kestabilan lereng dianalisis menggunakan Faktor Keamanan (FK), yaitu rasio antara total gaya penahan dan total gaya pendorong (Ma'rief et al., 2022). Lereng tambang berpotensi mengalami keruntuhan apabila gaya pendorong melebihi gaya penahan. Salah satu upaya perbaikan geometri lereng adalah metode penjenjangan (benching), yaitu pemotongan material untuk mengurangi gaya pendorong melalui perubahan kemiringan dan ketinggian lereng. Berdasarkan prinsip tersebut, metode stabilisasi lereng meliputi pengurangan gaya pendorong, peningkatan gaya penahan, dan perlindungan lereng (slope protection) (Hoek & Bray, 1981). Analisis kekuatan massa batuan dilakukan berdasarkan empat sayatan desain lereng pada pit eksisting menggunakan software Minescape 5.7. Karakteristik fisik dan mekanik material penyusun lereng ditentukan berdasarkan parameter kuat geser dengan kriteria Mohr-Coulomb, yang meliputi kohesi, tegangan normal, dan sudut geser dalam (Hoek & Bray, 1981; Siswanda et al., 2024).

Analisis kestabilan lereng selanjutnya dilakukan menggunakan software Rocscience Slide V.6.0 dengan metode Morgenstern-Price, yaitu metode kesetimbangan batas yang mempertimbangkan keseimbangan gaya horizontal, gaya vertikal, dan momen pada setiap irisan bidang longsor (Morgenstern & Price, 1965; Khodijah et al., 2022). Parameter geoteknik yang digunakan meliputi kohesi, sudut geser dalam, bobot isi material, elevasi muka air tanah, dan koefisien beban seismik berdasarkan nilai Peak Ground Acceleration (PGA) lokasi penelitian sebesar 0,24–0,30 g. Analisis dilakukan dengan mengasumsikan bidang gelincir berbentuk melingkar (circular) pada lereng keseluruhan (overall slope), menggunakan data sekunder sifat material dari hasil pengujian laboratorium geoteknik perusahaan, serta mempertimbangkan kondisi muka air tanah jenuh (saturated) untuk mengevaluasi kondisi kritis lereng. Nilai Faktor Keamanan yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan kriteria kestabilan lereng berdasarkan Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 sebagai dasar penilaian tingkat keamanan lereng tambang.



Gambar 5. Peta *Peak Ground Acceleration* (PGA) di Indonesia

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Faktor Keamanan (FK) Desain Lereng Eksisting

Untuk menentukan nilai kestabilan lereng pada desain pit eksiting dilakukan dengan menganalisis parameter material properties dari hasil pengujian laboratorium dari tim geoteknik seperti sudut geser dalam (φ), kohesi (c), berat isi kering (γ) (Tabel 2).

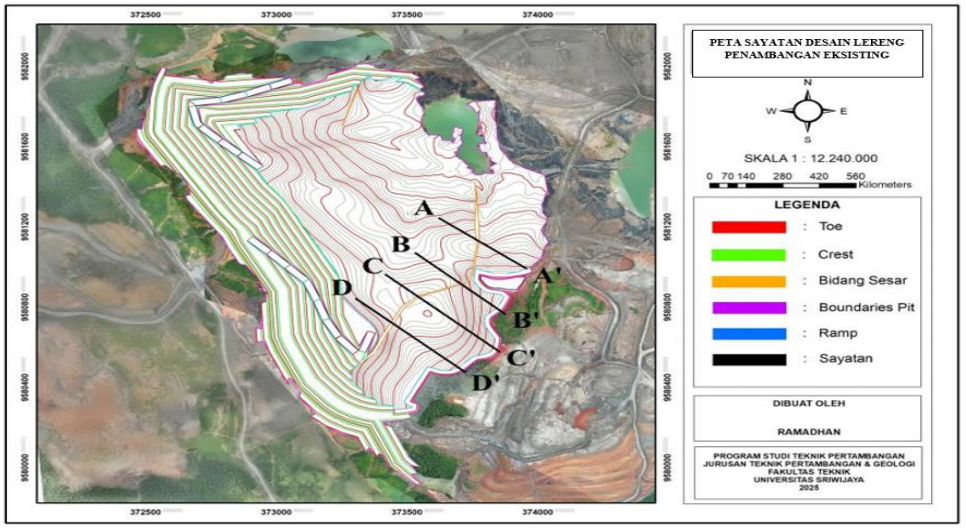
Tabel 2. Material Properties Area Sesar Dilokasi Penelitian

Stratigrafi	Unit Weight (kN/m^3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (derajat)
Coal	11,73	Mohr-Coulomb	100,25	21,87
Overburden x	20,72	Mohr-Coulomb	129,49	25,77

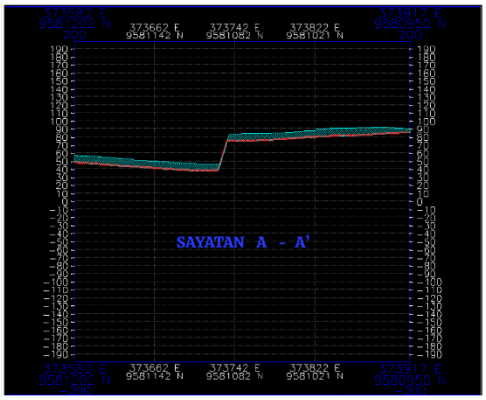
Sumber : Data penelitian, 2025

Secara umum, kombinasi nilai unit weight, kohesi, dan sudut geser dalam Tabel 2 akan sangat menentukan hasil analisis faktor keamanan lereng pada setiap sayatan. Overburden dengan berat isi yang cukup tinggi berpotensi meningkatkan gaya penggerak lereng, tetapi nilai kohesi dan sudut geser dalam yang lebih besar dapat memberikan resistansi terhadap kelongsoran. Pada kondisi ini, penggunaan model Mohr-Coulomb menjadi tepat karena dapat merepresentasikan hubungan linier antara tegangan normal dan kuat geser material, sehingga sesuai untuk analisis awal maupun desain teknis lereng overburden tambang batubara [10]. Jika dikaitkan dengan proses optimasi lereng, parameter-parameter pada tabel ini dapat digunakan sebagai input dalam pemodelan Limit Equilibrium Method (LEM) untuk menghitung faktor keamanan pada berbagai skenario geometri lereng statis dan dinamis. Dengan mengetahui nilai kohesi dan sudut geser dalam dari batubara maupun overburden, penelitian ini dapat mengevaluasi perubahan sudut lereng, tinggi jenjang, atau lebar jenjang masih berada dalam batas aman. Selain itu, karena overburden merupakan material yang lebih rentan terhadap perubahan kadar air dan gangguan pembongkaran, maka hasil analisis juga perlu mempertimbangkan kondisi lapangan aktual agar desain yang dihasilkan tidak terlalu konservatif maupun terlalu terjal.

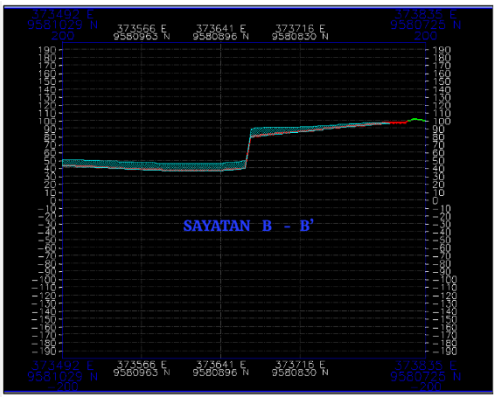
Selanjutnya untuk analisis kestabilan lereng eksisting diawali melalui garis penampang melintang (cross section) yang berada disekitar area sesar *sidewall* selatan desain pit awal yang ditandai dengan sayatan A-A', B-B', C-C', dan D-D' (Gambar 6). Pemilihan sayatan ini bertujuan agar hasil faktor keamanan lereng yang berada disekitar sesar dapat terwakilkan. Hasil sayatan A-A', B-B', C-C'.dan D-D' menunjukkan bahwa desain lereng eksisting masih mengikuti struktur geologi asli berupa sesar, sehingga kemiringan dan ketinggian lereng tersebut mengikuti kemiringan sesar normal yang terbentuk. Kondisi lereng di area sesar pada masing-masing sayatan menunjukkan adanya desain lereng tunggal secara keseleruhan dengan ketinggian lereng serta kemiringan lereng yang curam. Pada sayatan A-A' tinggi lereng 37m dan kemiringan lereng 73°, sayatan B-B' tinggi lereng 40m dan kemiringan lereng 80°, sayatan C-C' tinggi lereng 40m dan kemiringan lereng 80°, sayatan D-D' tinggi lereng 34m dan kemiringan lereng 69°. Kondisi ini akan berpotensi menimbulkan pergerakan sesar sebagai bidang gelincir mengakibatkan kelongsoran dengan volume yang besar dan bahaya *rockfall*.



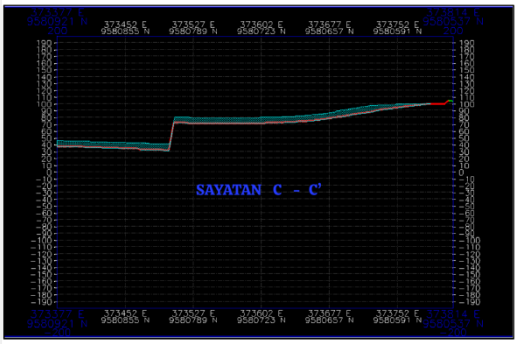
(a)



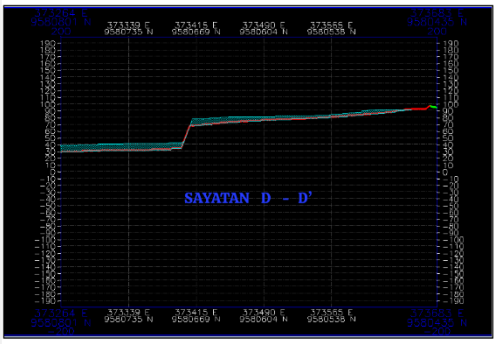
(b)



(c)



(d)

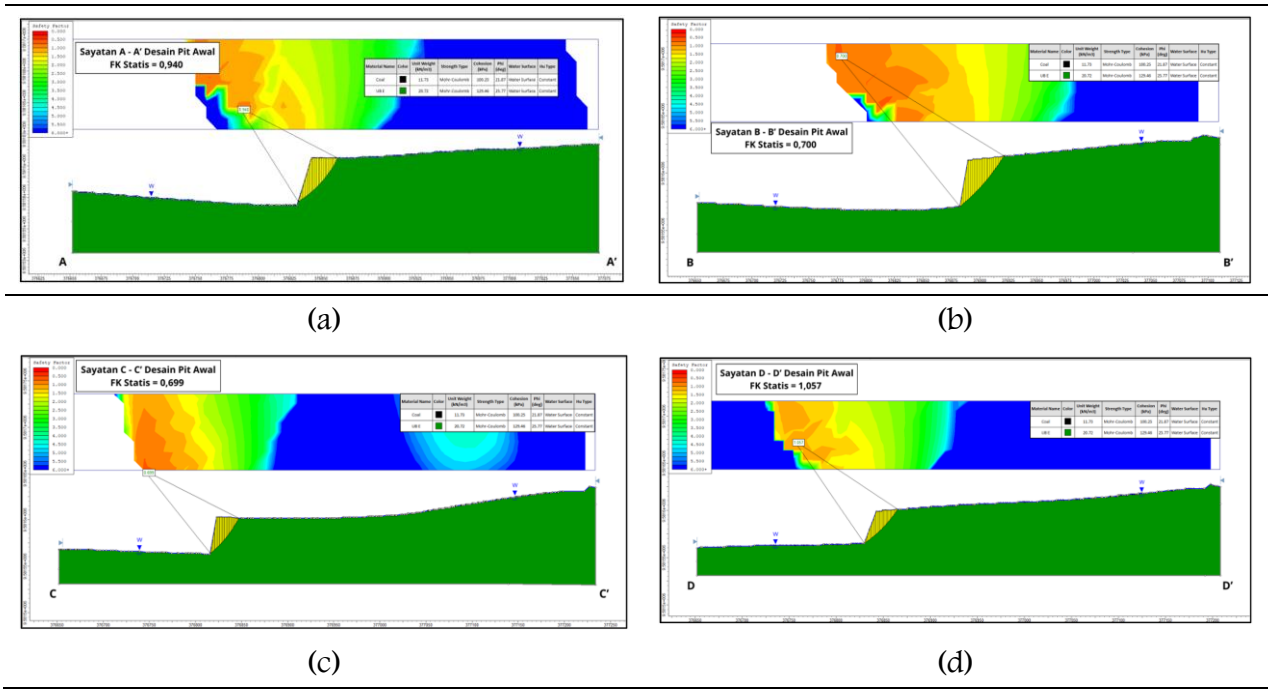


(e)

Keterangan :
biru kehijauan (cyan) : lapisan seam batubara, merah (red) : desain pit eksisting tahunan 2025 hijau (green) : topografi

Gambar 5. Kondisi desain pit penambangan eksisting untuk pada tahun 2025 berada pada area sesar (a) Peta Sayatan (cross section) Desain Pit Eksisting, (b) Desain lereng sayatan pada sayatan A-A', (c) Desain lereng sayatan pada sayatan B-B', (d) Desain lereng sayatan pada sayatan C-C', (e) Desain lereng sayatan pada sayatan D-D'

Hasil analisis faktor keamanan statis lereng keseluruhan (overall slope) area sesar pada desain penambangan batubara menunjukkan bahwa lereng dalam kondisi tidak aman pada kondisi statis (Gambar 6). Faktor keamanan (FK) statis pada keempat sayatan yaitu sayatan A-A' memperoleh FK= 0,94, sayatan B-B' memperoleh FK= 0,70, sayatan C-C' memperoleh FK= 0,69, dan sayatan D-D' memperoleh FK= 1,05. FK yang tidak stabil disebabkan oleh geometri lereng yang curam dan jika dilanjutkan maka akan berisiko menimbulkan risiko geoteknik. Secara umum, kestabilan lereng dipengaruhi oleh keseimbangan antara gaya pendorong dan gaya penahan, semakin curam sudut lereng maka gaya pendorong semakin besar dan FK akan menurun maka potensi longsor akan meningkat (Jalil et al., 2022), (Pasole et al., 2020), (Amanda et al., 2023), (Alemayehu et al., 2025). Kondisi tidak stabil pada area sesar ini dipengaruhi oleh kemiringan dan ketinggian lereng yang tidak ideal untuk kestabilan jang panjang, sehingga perancangan kembali geometri diperlukan agar lereng lebih aman secara teknis.



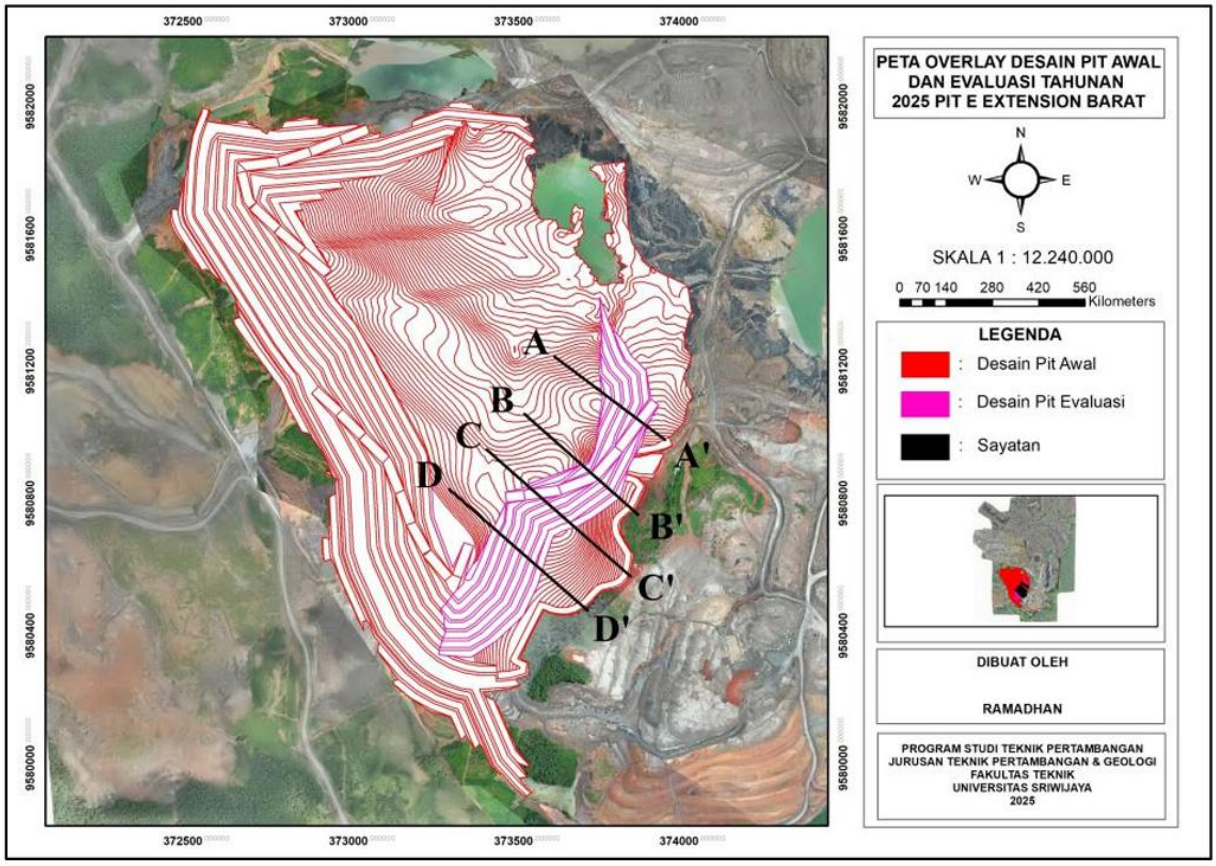
Gambar 6. Analisis faktor keamanan statis lereng keseluran pada setiap sayatan di area sesar, (a) Faktor keamanan lereng sayatan A-A', (b) Faktor keamanan lereng sayatan B-B', (c) Faktor keamanan lereng sayatan C-C', (d) Faktor keamanan lereng sayatan D-D'

Perancangan ulang desain tahunan dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak Minescape 5.7 dengan menerapkan beberapa jenjang (multi bench) pada area sesar dan pembuatan akses jalan inter ramp untuk mengakomodir pengangkutan *overburden* ke area disposal. Perubahan desain ini difokuskan pada bagian selatan, tepat dibawah zona sesar, untuk membagi *single slope* dengan metode *multi bench* agar dapat meningkatkan kestabilan lereng dan membuat area operasional penambangan menjadi lebih aman dan efektif dalam operasional penambangan (Gambar 7). Perubahan geometri dengan melakukan pelandaian sudut lereng, pengaturan tinggi jenjang dan optimasi lebar bench merupakan strategi teknis untuk meningkatkan kestabilan secara nyata (Jalil et al., 2022), (Chadarisman & Herdianto, 2025)(Alemayehu et al., 2025), (Anggara & Wijaya, 2025). Pembuatan desain dengan *multi bench* mengacu pada rekomendasi geometri jenjang dan dimensi jalan angkut (ramp) berdasarkan kondisi material properties dan KEPMEN ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Pada lereng akan dilakukan perbaikan geometri lereng dengan skema tegangan dinamis, dengan mempertimbangkan faktor ekternal seperti kondisi muka air tanah yang jenuh (saturated) jika curah hujan tinggi, beban ground pressure sebesar 1278,97 kN/m^2, dan getaran gempa sebesar 0,1225. Beban alat yang akan melintas dan beroperasi disekitar lereng *front*

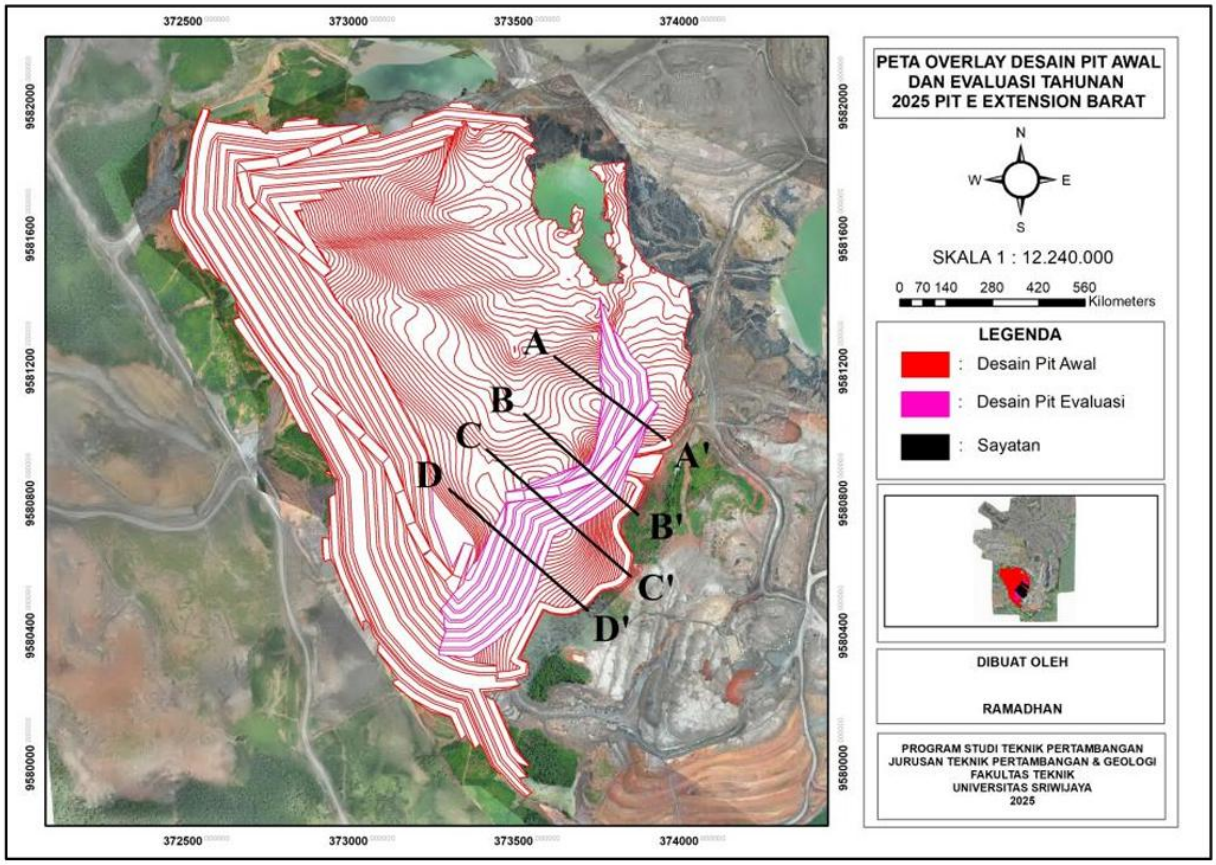
penambangan memiliki nilai *ground pressure* sebesar 1278,97 kN/m² berdasarkan penelitian sebelumnya mengenai perhitungan beban yang diberikan oleh alat Komatsu HD 785-7 dan Caterpillar OHT 777 (Wita & Wijaksana, 2024). Selanjutnya nilai PGA gempa maksimum pada lokasi penelitian adalah 0,22g untuk batas bawah dan 0,27g untuk batas atas.

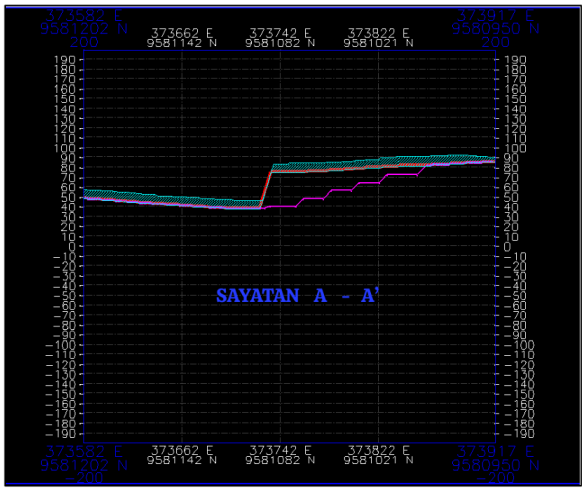
Tabel 2. Rekomendasi geometri jenjang dan *ramp*

Parameter		Nilai	Satuan
Single *Bench*	Tinggi	8	Meter
	Lebar	20	Meter
	Kemiringan	45	Degrees (°)
Inter-Ramp	Lebar	30	Meter
	Grade	8	Percent (%)

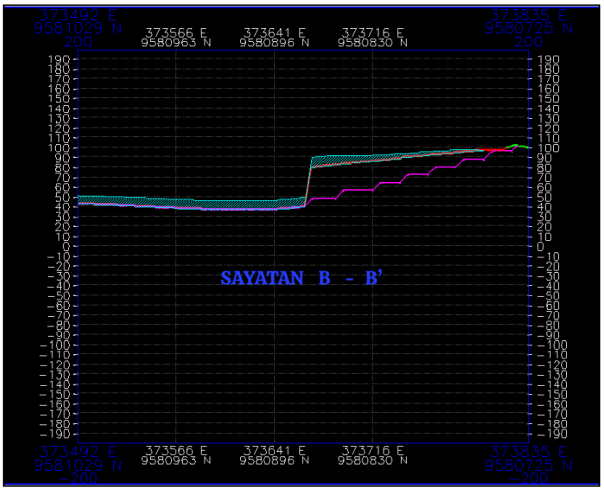


(a)

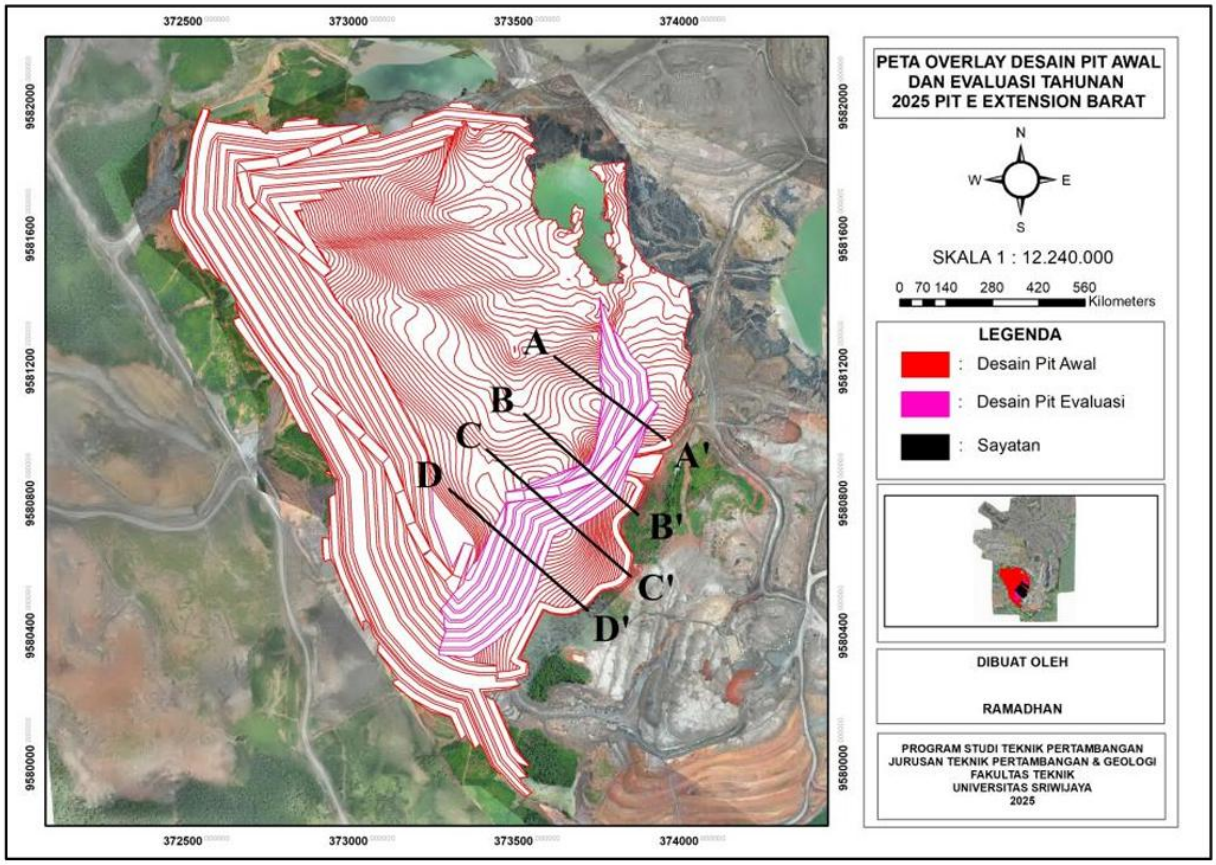

PETA OVERLAY DESAIN PIT AWAL
DAN EVALUASI TAHUNAN
2025 PIT E EXTENSION BARAT
N
W
E
S
SKALA 1 : 12.240.000
0 70 140 280 420 560
Kilometers
LEGENDA
: Desain Pit Awal
: Desain Pit Evaluasi
: Sayatan
DIBUAT OLEH
RAMADHAN
PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN
JURUSAN TEKNIK PERTAMBANGAN & GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2025
A
A'
B
B'
C
C'
D
D'
372500
373000
373500
374000
9582000
9581600
9581200
9580800
9580400
9580000

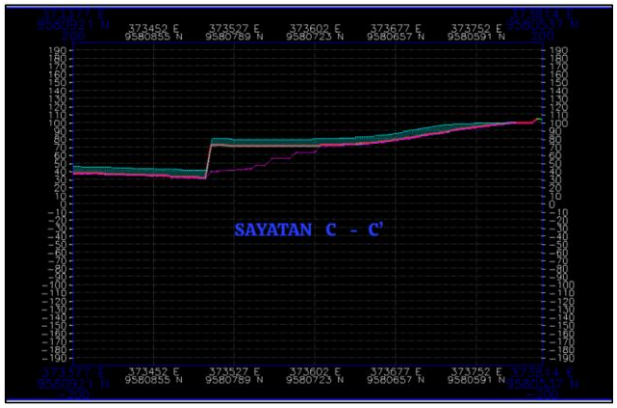

SAYATAN A - A'

(b)


SAYATAN B - B'

(c)





(d)

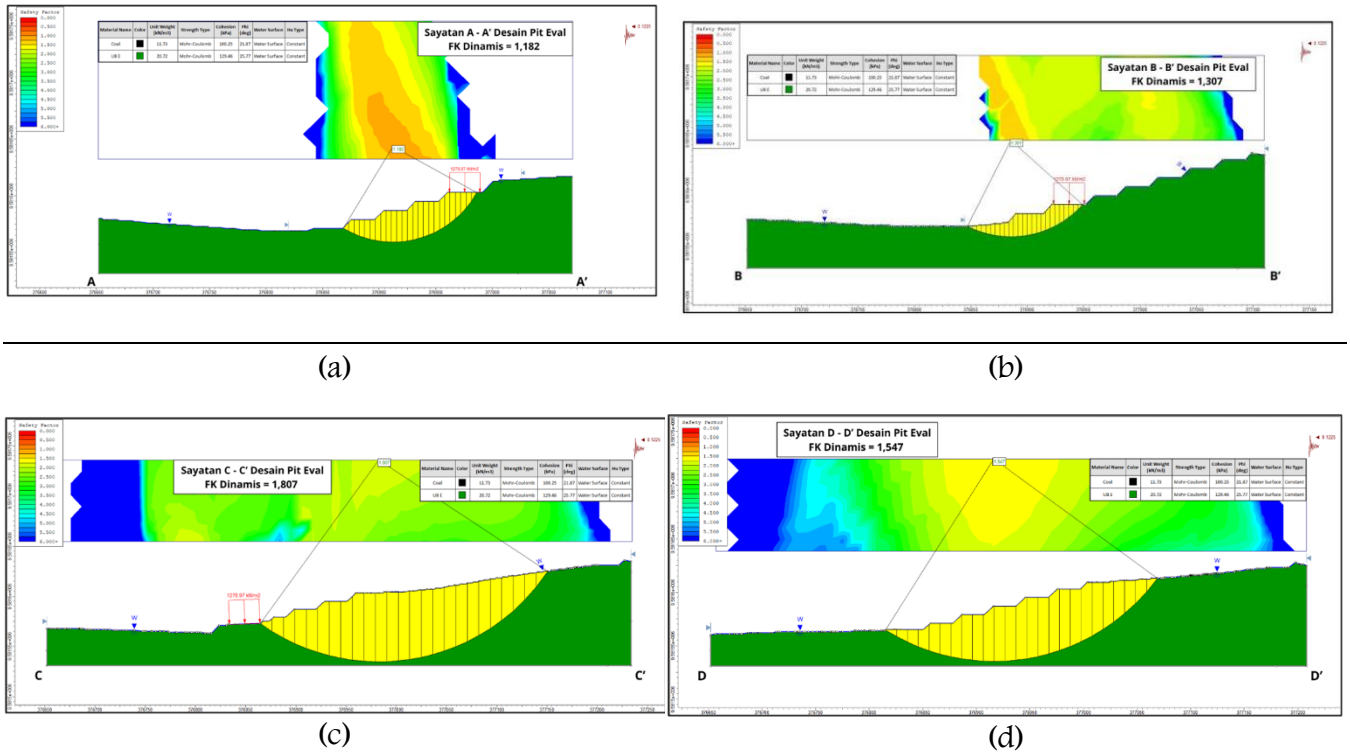


(e)

Keterangan warna :
Biru kehijauan (cyan) : lapisan seam batubara
Merah (red) : Desain pit awal dengan single slope
Merah muda keunguan (magenta) : Desain pit penambangan dengan metode *multi bench*
Hijau (green) : Topografi

Gambar 7. Desain pit penambangan yang telah dievaluasi menjadi *multi bench* pada kondisi eksisting area sesar (a) Tampak sayatan (cross section) pada desain *multi bench*, (b) Tampak lereng pada sayatan A-A', (c) Tampak lereng pada sayatan B-B', (d) Tampak lereng pada sayatan C-C', (e) Desain lereng sayatan pada sayatan D-D'

Berdasarkan Gambar 7 pada masing-masing sayatan dianalisis faktor keamanan untuk memastikan bahwa desain yang direkomendasikan memenuhi kriteria keamanan berdasarkan aturan teknis yang berlaku. Hasil faktor keamanan lereng dinamis yang terendah pada area sesar yang sudah dievaluasi menunjukkan bahwa lereng dalam kondisi yang aman dengan faktor keamanan (FK) pada sayatan A-A' memperoleh FK= 1,18, sayatan B-B' memperoleh FK= 1,30, sayatan C-C' memperoleh FK= 1,80, dan sayatan D-D' memperoleh FK= 1,54 (Gambar 8). Penggunaan metode LEM dalam studi ini relevan karena pada penelitian ini mekanisme longsir belum dapat dipastikan secara tunggal di lapangan (Pasole et al., 2020), (Komadja et al., 2021), (Parissing et al., 2024). Dari berbagai penelitian, hasil analisis kesetimbangan batas LEM sering menunjukkan perbedaan nilai yang tidak terlampau jauh dengan metode elemen hingga, meskipun FEM kadang memberikan FK lebih rendah (Saputro et al., 2022), (Parissing et al., 2024). Selain itu, dalam evaluasi kestabilan lereng, parameter kohesi dan sudut geser dalam sangat menetukan nilai FK. Dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb umumnya digunakan karena hubungan tegangan normal dan kuat geser material dapat direpresentasikan secara linier, sehingga cocok untuk analisis awal dengan desain lereng tambang terbuka (Putra & Anggara, 2026).



Gambar 8. Analisis faktor keamanan lereng statis lereng pada setiap sayatan di area sesar, (a) Faktor keamanan lereng sayatan A-A', (b) Faktor keamanan lereng sayatan B-B', (c) Faktor keamanan lereng sayatan C-C', (d) Faktor keamanan lereng sayatan D-D'

Dalam evaluasi geometri lereng, perubahan dari hasil reserve antara desain pit awal dengan desain pit evaluasi yang didapatkan yaitu volume *overburden* meningkat sebesar 1.654.586,30 BCM dan tonase batubara meningkat sebesar 3.323,76 ton. Hal ini dipengaruhi oleh rekomendasi lereng yang tetap mempertimbangkan keseimbangan antara keselamatan dan keekonomian. Hal ini sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa rekomendasi desain lereng harus didasarkan pada analisis stabilitas yang memadai sekaligus mempertimbangkan kebutuhan operasional penambangan (Saputro et al., 2022), (Chadarisman & Herdianto, 2025), (Parissing et al., 2024).

Tabel 4.3 Perolehan hasil *reserve* desain lereng eksisting dan desain lereng rekomendasi

Desain	*Overburden* (BCM)	Batubara (ton)	SR (BCM/ton)
Desain *Pit* Awal	29.303.802,21	7.326.919,18	4
Desain *Pit* Evaluasi	30.958.388,51	7.330.242,94	4.22
Perubahan	(+) 1.654.586,30	(+) 3.323,76	(+) 0.22

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, kestabilan lereng pada area sesar dipengaruhi oleh geometri lereng, karakteristik massa batuan, dan keberadaan struktur geologi yang berpotensi menjadi bidang lemah. Pada desain eksisting dengan geometri lereng yang curam, nilai Faktor Keamanan (FK) belum memenuhi kriteria kestabilan yang dipersyaratkan sehingga berpotensi meningkatkan risiko kegagalan lereng. Penerapan rekomendasi desain dengan metode multi-bench menunjukkan peningkatan nilai FK hingga memenuhi kriteria kestabilan lereng. Selain meningkatkan aspek keselamatan geoteknik, perubahan geometri tersebut juga memberikan potensi keuntungan ekonomis melalui penambahan volume overburden dan tonase batubara. Dengan demikian, evaluasi kondisi lereng eksisting dan perancangan geometri alternatif pada area sesar diperlukan untuk mendukung kegiatan penambangan yang aman, efektif, dan berkelanjutan.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis kestabilan lereng dinamis, analisis sensitivitas terhadap parameter geoteknik, serta evaluasi pengaruh variasi muka air tanah guna memperoleh gambaran risiko kegagalan lereng yang lebih komprehensif. Bagi praktisi pertambangan, hasil evaluasi ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam merancang geometri lereng, dengan tetap melakukan pemantauan kondisi lereng dan memperbarui parameter geoteknik berdasarkan data lapangan. Pada tingkat kebijakan operasional, perusahaan pertambangan perlu memastikan bahwa desain lereng memenuhi kriteria keselamatan yang berlaku, disertai evaluasi berkala terhadap perubahan kondisi geologi, hidrologi, dan aktivitas penambangan. Keputusan penerapan desain multi-bench juga perlu mempertimbangkan keseimbangan antara faktor keamanan, volume pengupasan batuan penutup, dan perolehan batubara agar keselamatan kerja tetap menjadi prioritas tanpa mengabaikan efisiensi operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesmpatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak Univeristas Sriwijaya yang telah memberikan hibah penelitian sesuai dengan SK Rektor Nomor: 0027/UN9/SK.LPPM.PT/2025 Tanggal 17 September 2025 dan kepada pihak perusahaan PT. Bukit Asam Tbk. yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian bersama di area penambangan.

DAFTAR PUSTAKA

Alemayehu, E., Chala, T., C., Jilo, N., Z., T., & Moges, B. (2025). *Optimizing Design And Stability Of Open Pit Slopes In Tolay Coal Mine , Ethiopia. Scientific Reports*, *15*(1570), 1–19. https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-025-86034-7

Amanda, R.,R., Ibrahim, E.,Komar. S. (2023). Analisis Kestabilan Lereng Highwall Terhadap Pengaruh Sesar Di Pit Suban Jerji Selatan, PT. Bukit Asam. *Jurnal Pertambangan*, *7*(4), 175–181.

Amanda, R. R. (2025). Studi Literatur Pengaruh Sesar Geologi terhadap Kestabilan Lereng Tambang Batubara di Indonesia. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, *3*(5), 188–204. https://doi.org/https://doi.org/10.61132/venus.v3i5.1195

Anggara, R., Wijaya, R. A. E. (2025). Analisis Kestabilan Lereng Pit X pada Lereng Highwall Metode Limited Equilibirium, Musi Banyuasin, South Sumatra. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, *25*(1), 26–32.

Ardhi, H., A., Azizi, M., A., Marwanza, I., & Hartami, P.,N., Nugroho.,B., Saptono., S. (2017). Perbandingan Analisis Stabilitas Lereng Metode Kesetimbangan Batas Dengan Metode Elemen Hingga Menggunakan Pendekatan Probabilistik (Comparison Of Limit-Equilibrium Method Slope Stability Analysis With Finite Element Method Using Probabilistic Aproach). *Proceeding Seminar Nasional Geomekanika IV*, *Oktober*, 179–186.

Chadarisman, A., & Herdianto, T.,C.,N. (2025). *Landslide Emergency Response Preparedness in Mining Areas : Early Warning System Implementation*. The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health, 14(2), 190–200. https://doi.org/10.20473/ijosh.v14i2.2025.190-200.Received

Chen, T., Shu, J., Han, L., Tovele, G. S. V, & Li, B. (2023). *Landslide Mechanism And Stability Of An Open-Pit Slope : The Manglai Open-Pit Coal Mine*. Earth Science, (January), 1–20. https://doi.org/10.3389/feart.2022.1038499

Irianto.,Afasedanya, M.,M.,T. (2025). Stabilitas Lereng Tambang Terbuka Menggunakan Metode Limit Equilibrium Dan Analisis Risiko Untuk Menunjang Perencanaan Infrastruktur Tambang. *Intan : Penelitian Tambang*, *8*(5), 35–41.

Jalil, A., & Nagara, B. D., Wicaksono, E. (2022). Kajian dan evaluasi Geoteknik Pada Tambang Terbuka Batubara PT . Dizamtra Powerindo Kecamatan Merapi Barat „. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi XVII Tahun 2022 (ReTII)*, *2022*(November), 145–153. Retrieved from http://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII

Komadja, G.,C.,Pradhan.,S.,P., Oluwasegun, A.,D., Roul, A.R., Stanislas, T.,T., Laibi, R.,A., Adebayo, B., Onwualu, A.,P. (2021). *Geotechnical and geological investigation of slope stability of a section of road cut debris-slopes along NH-7 , Uttarakhand , India Gb*. *Results in Engineering*, *10*(May). https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100227

Ma'rief, A.,A.,F.,Hedianto, Okviyani,N.,Mahyuni, E.T., Affan, A. (2022). Analisis Stabilitas Lereng Tambang Batubara Dengan Menggunakan Metode Limit Equilibrium Pada PT . Kalimantan Prima Nusantara. *Jurnal Geocelebes*, *6*(2), 117–125. https://doi.org/10.20956/geocelebes.v6i2.17903

Parissing, V., Hariyadi,S.,Saptono, S., Dwinagara, B., Koesnaryo, S. (2024). Evaluasi Analisis Kestabilan Lereng Pada Tambang Terbuka Batubara Pit North West Pt Anak Tambang Indonesia Job Site PT. Adimitra Baratama Nusantara, Kalimantan Timur. *Indonesian Mining Professionals Journal*, *6*(1), 7–16. https://doi.org/https://doi.org/10.36986/impj.v6i1.128

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.

Putra, I.,D.,P.,G.,W.,A., Anggara, R. (2026). Perbandingan Penggunaan Kriteria Mohr-Coulomb dan Hoek- Brown terhadap Analisis Kestabilan Lereng Batu Gamping. *JIM : Jurnal Ilmu Multidisiplin*, *5*(1), 733–744. https://doi.org/https://doi.org/10.38035/jim.v5i1

Saputro, A., Wardana, N. K., & Isjudarto, Ag. (2022). Analisis Kestabilan Lereng Tambang Batubara Berdasarkan Limit Equilibrium Method dan Finite Element Method di PT . Marunda Graha Mineral Kecamatan Laung Tuhup , Kabupaten Murung Raya , Provinsi Kalimantan Tengah. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi XVII Tahun 2022 (ReTII)*, *2022*(November), 394–405.

Wita, R., Z., & Wijaksana, I.,K. (2024). Kajian Desain Jalan Tambang Pengangkutan Batubara dari Pit Menuju Stockpile. *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, *4*(1), 9–20.