



Analisis Stabilitas Lereng pada Penambangan Terbuka Batubara di Paleo-Delta Mahakam

Hendra Santoso¹, Roni Marudut Situmorang^{2*}

¹Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur, Samarinda, Indonesia

²Primacon Explorindo, Samarinda, Indonesia

Abstrak

Kegiatan pertambangan di Kecamatan Anggana memiliki tingkat risiko yang tinggi karena wilayahnya berada di lingkungan pengendapan Delta Mahakam Purba. Penelitian ini bertujuan untuk merancang kemiringan tambang terbuka batubara di permukaan tua Delta Mahakam menggunakan Metode Elemen Hingga. Metodologi penelitian melibatkan metode kesetimbangan batas dan probabilitas kelongsoran. Material geologi di daerah penelitian meliputi tanah pucuk, batupasir kerikilan, batulanau, batulempung, dan batubara. Hasil penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Pengujian mekanika tanah di laboratorium menunjukkan nilai kohesi material berkisar antara 10 kPa (batupasirlempungan) hingga 314 kPa (batulanau), sedangkan sudut geser dalam (ϕ) berkisar antara 10,48° hingga 34,8°; (2) Hasil rekomendasi penentuan geometri lereng keseluruhan dari desain rencana tambang yaitu: rekomendasi *Highwall* dengan tinggi lereng 63 m dan sudut lereng maksimal 29°, FK 1,13 dan PK 4,5%; *Lowwall* direkomendasikan kemiringan 20° dan tinggi 17 m, FK 1,3 dan PK 4,1%; *Sidewall* utara direkomendasikan sudut lereng tunggal 30° dan tinggi maksimum 25 m, FK 1,21 dan PK 3,9%; *Sidewall* selatan dengan maksimal tinggi 21,6 m, kemiringan lereng tunggal 35°, memiliki rekomendasi Beban diatas lereng 100 kPa dengan FK 2,6 dan PK 1,2%, sedangkan pada kondisi *non circular failure* (tanpa pembebanan) hasil FK 2,06 dan PK 0%, dan pada kondisi *circular failure* (tanpa pembebanan) hasil FK 2,92 dan PK 0%. Hasil analisis stabilitas lereng pada tambang di Anggana ini sangat dipengaruhi kondisi geologi lingkungan pengendapan sistem delta di *lower delta plain* yang sangat terpengaruh air laut, sehingga kemiringan lereng dan tinggi lereng masuk kategori rendah untuk sebuah rencana pit tambang terbuka.

Kata kunci: kestabilan lereng; geoteknik; faktor keamanan

Abstract

Mining activities in Anggana District pose high-risk levels due to the area's location within the ancient Mahakam Delta deposition environment. This study aims to design the slope of an open-pit coal mine on the ancient surface of the Mahakam Delta using the Finite Element Method. The research methodology involves the limit equilibrium method and the probability of slope failure. Geological materials in the study area include topsoil, gravelly sandstone, siltstone, claystone, and coal. The results of this study are as follows: (1) Laboratory soil mechanics tests indicate material cohesion values ranging from 10 kPa (clayey sand) to 314 kPa (siltstone), while the internal friction angle (ϕ) ranges from 10.48° to 34.8°; (2) Recommended geometry for the overall slope design of the mine plan is: Highwall with a slope height of 63 m and a maximum slope angle of 29°, FS 1.13, and PF 4.5%; Lowwall is recommended to have a slope angle of 20° and height of 17 m, FS 1.3, and PF 4.1%; Northern Sidewall is recommended with a single slope angle of 30° and a maximum height of 25 m, FS 1.21, and PF 3.9%; Southern Sidewall with a maximum height of 21.6 m, a single slope angle of 35°, is recommended to support a load of 100 kPa with FS 2.6 and PF 1.2%. In non-circular failure conditions

* Korespondensi: hendrasantoso@umkt.ac.id

Diajukan : 11 November 2024

Diterima : 29 Januari 2025

Diterbitkan : 29 Agustus 2025

(without loading), the FS is 2.06, and PF is 0%; and in circular failure conditions (without loading), the FS is 2.92, and PF is 0%.

Keywords: slope stability; geotechnical; safety factor

PENDAHULUAN

Desain lereng pada tambang terbuka merupakan elemen kunci dalam menjamin stabilitas dan keselamatan operasional tambang (Situmorang & Santoso, 2023), terutama kondisi geologi yang kompleks seperti di lingkungan pengendapan Paleo-Mahakam Delta. Lingkungan pengendapan delta memiliki karakteristik tanah jenuh air dan lapisan sedimen yang bervariasi (Coleman & Prior, 1982; Zavala dkk, 2024), sehingga membutuhkan perhatian khusus dalam kajian geoteknik untuk mendesain lereng yang optimal (Mi dkk., 2023).

Kecamatan Anggana merupakan Kecamatan yang terletak di Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur, Indonesia. Lokasi ini merupakan wilayah Tingkat Kerawanan Sedang (Pratiknyo, 2012), sehingga kajian geoteknik harus mengantisipasi potensi ketidakstabilan lereng yang jika tidak dikelola dengan baik, dapat berujung pada longsor dan gangguan operasional tambang (Santoso & Situmorang, 2024). Metode *Finite Element Method* (FEM) digunakan untuk memodelkan kondisi tanah yang bervariasi dan mengintegrasikan faktor-faktor kompleks seperti tekanan air pori dan distribusi tegangan (Brinkgreve dkk, 2015; Mebrahtu dkk, 2022).

Kerentanan ini muncul dari kondisi akuifer dominan di lokasi rencana penambangan batubara, dengan sebagian wilayah tertutup oleh litologi batuan yang sangat lemah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng pada penambangan terbuka batubara di wilayah litologi Delta Mahakam Purba.

METODOLOGI

Tahapan dalam penelitian ini yaitu: Studi pendahuluan, Penyelidikan Geoteknik dan Pemodelan Lereng. Studi pendahuluan dilakukan untuk mengidentifikasi penelitian-penelitian sebelumnya terkait geologi dan stratigrafi unit pada wilayah penelitian. Analisis Geoteknik yang dilakukan mencakup karakterisasi lapisan tanah dan batuan di area penyelidikan, penentuan kekuatan batuan, dan kajian kemantapan lereng melalui pendekatan *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan FEM. Untuk mempermudah, kajian kemantapan dilakukan dengan bantuan perangkat

lunak *rockscience Slide V.6.0*. Perhitungan dilakukan untuk mengkaji lereng tunggal, lereng penggalian keseluruhan dan lereng timbunan.

Kajian kemantapan lereng pada penelitian ini menggunakan konsep kesetimbangan batas. Prinsip dasarnya adalah gaya geser yang diperlukan untuk mempertahankan kemantapan akan dibandingkan dengan gaya yang menyebabkan kelongsoran. Dasar penilaian pada kemantapan lereng dalam keadaan mantap untuk lereng tunggal adalah $FK \geq 1,20$ dan untuk lereng keseluruhan $FK \geq 1,30$ (CANMET, 1979). Tabel faktor keamanan dapat dilihat pada Tabel 1.

Metode analisis stabilitas lereng yang digunakan adalah *Morgenstrain Price*. Kelebihan dari metode ini adalah pada proses analisisnya mempertimbangkan kesetimbangan gaya yang bekerja pada sumbu vertikal dan horisontal serta keseimbangan momen. Tipe keruntuhan yang digunakan adalah *Mohr Coulomb* untuk material batuan lemah dan tanah sedangkan pada batuan sedang hingga sangat keras digunakan *Generalized Hoek Brown*.

Pendekatan dan asumsi-asumsi yang digunakan dalam analisis kemantapan lereng adalah: Analisis dilakukan pada model lereng dengan kondisi material yang tersusun oleh batulempung, batupasir dan batulanau; analisis dinamis LEM dengan tinggi muka airtanah dianggap mengikuti tinggi permukaan lereng; hasil pengujian laboratorium berdasarkan jenis litologi, kekuatan massa batuan, dan kedalamannya untuk nilai karakteristik rerata setiap lapisan material; struktur geologi yang diperhitungkan hanya perlapisan batuan;

Tabel 1. Faktor keamanan minimum kemantapan lereng (CANMET, 1979).

Pendekatan	I	II
Parameter kuat geser puncak	1.5	1.3
Parameter kuat geser sisa	1.3	1.2
Memasukkan faktor gempa bumi	1.2	1.1
Keterangan:		
I :	Longsor dianggap akan mengakibatkan kerusakan berat	
II :	Longsor dianggap tidak akan mengakibatkan kerusakan berat	

Disturbance factor (D) yang digunakan adalah 1, dimana di dalam perhitungan *Generalized Hoek Brown* pada lereng yang dianalisis mempertimbangkan kegiatan peledakan di sekitar lereng; Koefisien gempa berdasarkan data Manual Aplikasi RSA (2021) menunjukkan PGA (*Peak Ground Acceleration*) daerah penelitian adalah 0,09 (tanah lunak). Koefisien gempa yang dimasukkan dalam analisis kestabilan lereng adalah 0,1; Pembebanan di atas lereng yang terdistribusi secara merata dan triangular dengan beban maksimal 500 kPa; Ketinggian lereng majemuk yang dimodelkan adalah maksimal 50 m.

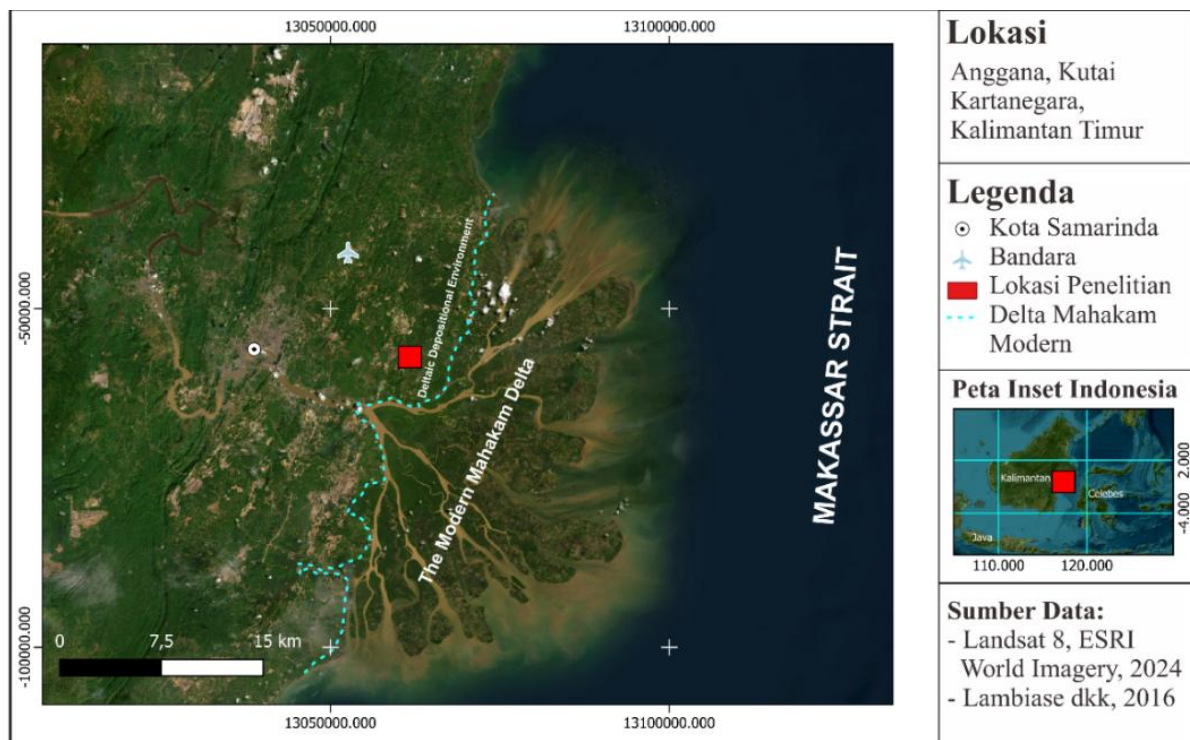
Pendekatan-pendekatan yang digunakan dalam analisis lereng timbunan adalah sebagai berikut: *properties* material timbunan yang digunakan adalah kohesi dan sudut geser dalam residual; *properties* yang digunakan sebagai pondasi/*basement* berdasarkan jenis litologi dan kedalaman dan sifat fisik, kohesi dan sudut geser dalam puncak; dan lereng timbunan dianggap berada dalam keadaan setengah jenuh.

GEOLOGI DAN STRATIGRAFI

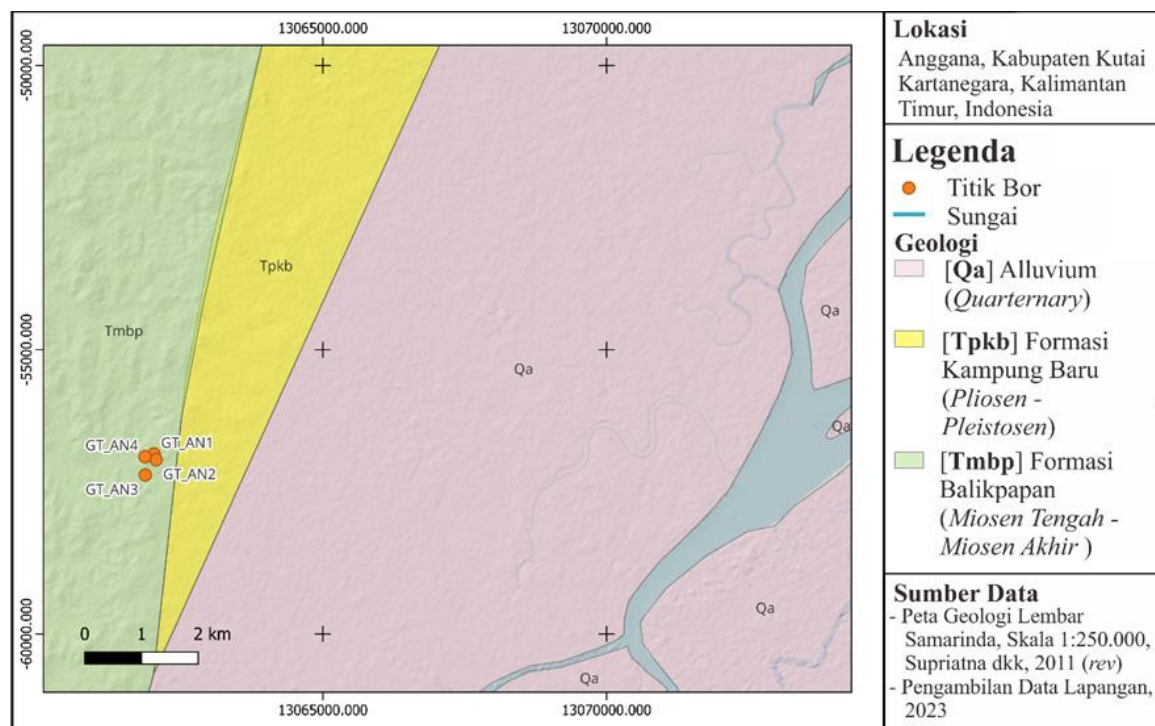
Wilayah penelitian terletak di Kecamatan Anggana, Kabupaten Kutai Kartanegara,

Kalimantan Timur, Indonesia. Lokasi ini terletak cukup dekat dengan Endapan Delta Mahakam Modern (Husein & Lambiase, 2013; Lambiase & Husein, 2015; Lambiase dkk., 2016) (Gambar 1). Secara regional, area studi ini merupakan bagian dari zona fisiografi Cekungan Kutai (Santoso & Indrawan, 2022) dan termasuk dalam lingkungan pengendapan delta dan alluvial (Lambiase dkk., 2016; Permana dkk., 2018) (Gambar 1). Berdasarkan peta geologi regional, area penelitian berada pada Formasi Balikpapan (Gambar 2). Adapun Formasi Balikpapan merupakan formasi yang dominan berasal dari Paleo-Mahakam Delta (Lambiase dkk., 2016; Permana dkk., 2018). Ciri-ciri tersebut telah didapatkan melalui riset yang telah banyak dilakukan di sekitar lokasi penelitian (Storms dkk., 2005; Lambiase dkk., 2016; Permana dkk., 2018), dengan pencocokan data pada saat pengeboran geoteknik secara terperinci.

Sebagian besar wilayah pertambangan terdiri atas satuan batupasir, batulempung, batulanau, dan batubara. Satuan termuda yang diendapkan kemudian adalah satuan endapan delta. Satuan ini diendapkan dari kala Kuartar hingga masa kini. Komposisi khas dari endapan delta adalah batupasir lepas, campuran batulumpur dan



Gambar 1. Peta Daerah Penelitian



Gambar 2. Peta Geologi Anggana

batulempung, serta batulempung yang lunak. Identifikasi fisiografi lokasi dilakukan karena geoteknik sangat terpengaruh oleh sumber airtanah dan media lingkungan aliran airtanahnya (Koike dkk., 1996).

Berdasarkan empat hasil pengeboran geoteknik yang ada di lapangan, diketahui bahwa lokasi pengambilan memiliki stratigrafi litologi sebagai berikut:

GT_AN1

Titik pengeboran GT_AN1 dilakukan hingga kedalaman 30 m (lihat Gambar 3). Hasil analisis mengungkapkan, litologi terdiri dari fasies: (1) *Delta plain (distributary channel)*, pada kedalaman 0-11,4 m berupa batupasir halus hingga sedang; (2) *Fluvial channel* pada kedalaman 11,4-12,9 m berupa campuran batupasir tekstur kasar dan kerikil halus uk. 2-3 mm; (3) *Delta front mud* pada kedalaman 12,9-17,4 m berupa perselingan batupasir lempungan dan batupasir tekstur sedang; (4) *Fluvial channel* pada kedalaman 17,4-21,9 m berupa batupasir tekstur kasar dan endapan batukerikil halus uk. 2-3 mm; (5) *Delta front mud* pada kedalaman 21,9 - 24,9 m berupa batulumpur berwarna abu-abu didominasi lempung; (6) *Delta plain (distributary channel)* pada kedalaman 24,9 - 30 m berupa batupasir tekstur halus hingga sedang.

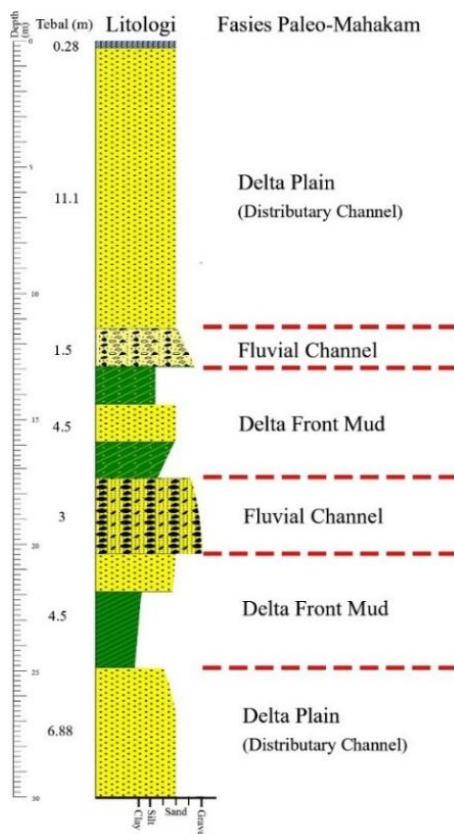
GT_AN2

Titik pengeboran GT_AN2 dilakukan hingga kedalaman 60 m (lihat Gambar 4). Hasil analisis mengungkapkan, litologi terdiri dari fasies: (1) *Fluvial channel* pada kedalaman 0-7,4 m dengan perselingan batupasir tekstur halus, batupasir tekstur sedang dan batukerikil; (2) *Delta front mud* pada kedalaman 7,4-16 m berupa endapan batulempungpasiran, batulempung dan batulanau; (3) *Delta plain (distributary channel)* berupa batupasirlanauan pada kedalaman 16-19 m dan berupa batupasir tekstur halus hingga sedang pada kedalaman 19-32 m; (4) *Delta front mud* ditandai dengan fasies batupasir-batupasirlempungan dengan tren menebal keatas pada kedalaman 32-35,4 m dan batulempung pada kedalaman 35,4-36,9 m; (5) *Delta plain (distributary channel)* pada kedalaman 36,9 - 44,4 m berupa batupasir halus hingga sedang berbutir *subrounded*; (6) *Delta front mud* berupa endapan batupasir lempungan pada kedalaman 44,4-45,9 m dan endapan batulanau pasiran pada kedalaman 45,9-48,9 m; (7) *Delta plain (distributary channel)* berupa endapan batupasir tekstur kasar hingga sedang pada kedalaman 48,9-53,4 m; (8) *Delta front mud* berupa endapan batulempungpasiran yang didominasi batulempung lunak pada kedalaman 53,4-54,9 m; dan (9) *Delta plain (distributary*

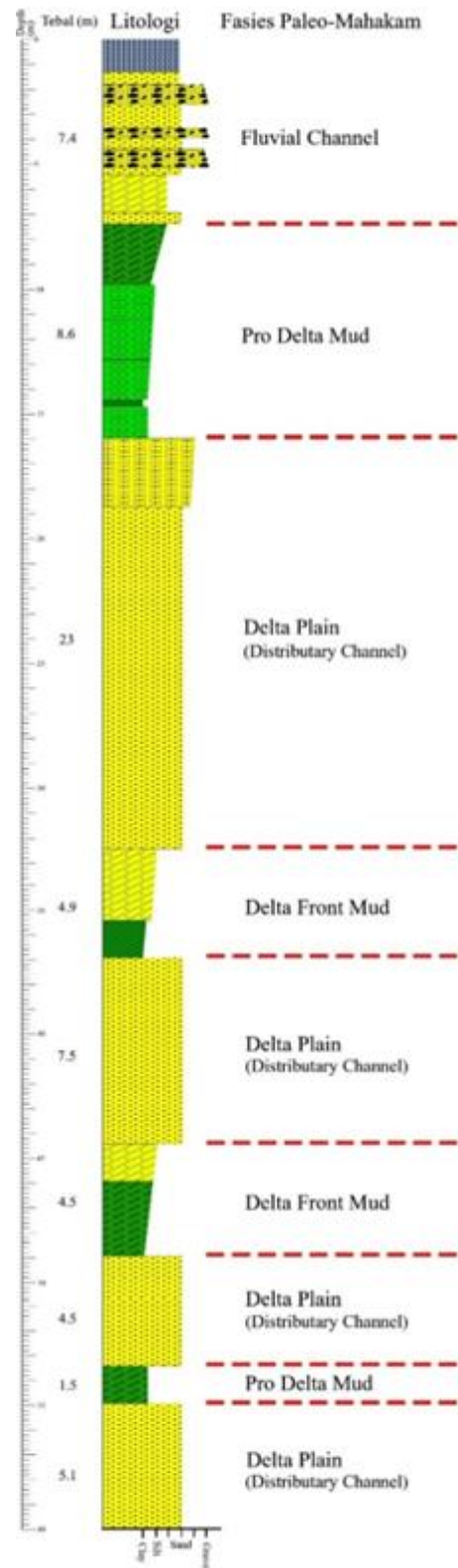
channel) berupa endapan batupasir bertekstur kasar hingga sedang pada kedalaman 54,9-60 m.

GT_AN3

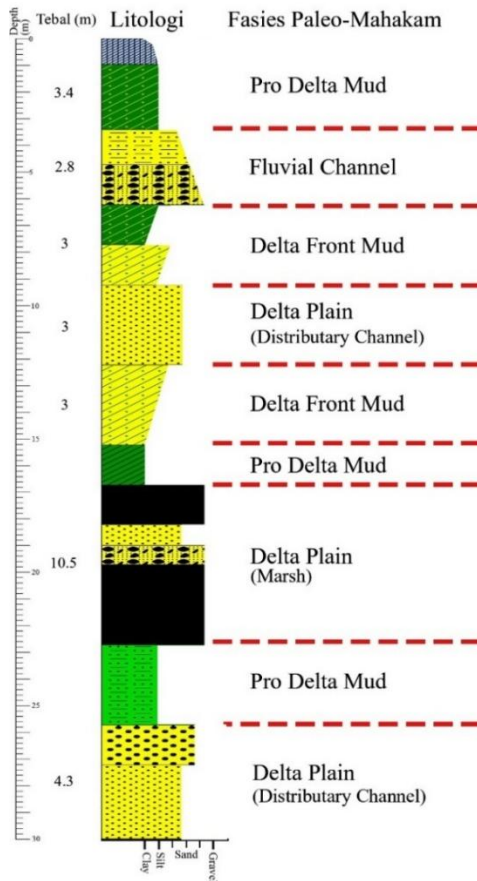
Titik pengeboran GT_AN3 memiliki kedalaman 30 m dengan hasil analisis sebagai berikut: (1) *Pro delta mud* pada kedalaman 0-3,43 m berupa batulumpur didominasi teksur lempungan; (2) *Fluvial channel* pada kedalaman 3,43-6,23 m dengan litologi batulanaupasiran (3,43-4,7 m) serta kerikil dan batupasir kasar (4,7-6,23 m); (3) *Delta front mud* pada kedalaman 6,23-7,73 m berupa endapan batulempung pasiran, kemudian pada kedalaman 7,73-9,23 m diketahui hasil pengeboran geoteknik bergradasi semakin dalam semakin kasar dengan litologi batupasir lempungan; (4) *Delta plain (distributary channel)* dari kedalaman 9,23-12,23 m berupa litologi berupa batupasir kuarsa halus dan lepas; (5) *Pro delta mud* dari kedalaman 12,23-15,23 m dengan batupasir tekstur halus



Gambar 3. Hubungan litologi dan fasies GT_AN1



Gambar 4. Hubungan litologi dan fasies GT_AN2



Gambar 5. Hubungan litologi dan fasies GT_AN3

terlamina batulempung; (6) *Delta plain (marsh)* pada kedalaman 15,23-25,73 m terdapat lapisan batulempung, batupasir, dan batubara; (7) Pro delta mud pada kedalaman 25,73-27,23 m dengan endapan batulanau, dan; (8) *Delta plain (distributary channel)* pada kedalaman 25,73-30 m ditandai dengan litologi batupasir sedang (25,73-27,23 m) dan batupasir lepas tekstur halus-sedang pada kedalaman 27,23- 30 m (lihat Gambar 5).

GT_AN4

Titik pengeboran GT_AN3 dilakukan hingga kedalaman 30 m. Hasil analisis mengungkapkan, litologi terdiri dari fasies: (1) *Pro delta mud* pada kedalaman 0-3,4 m dengan dominasi litologi batulempung dan batupasirlempungan; (2) *Delta plain (distributary channel)* pada kedalaman 3,4-6,4 m merupakan endapan masif batupasir tekstur halus hingga sedang; (3) *Fluvial channel* pada kedalaman 6,4-7,9 m dengan endapan batupasir yang bercampur dengan batukerikil berukuran 5-

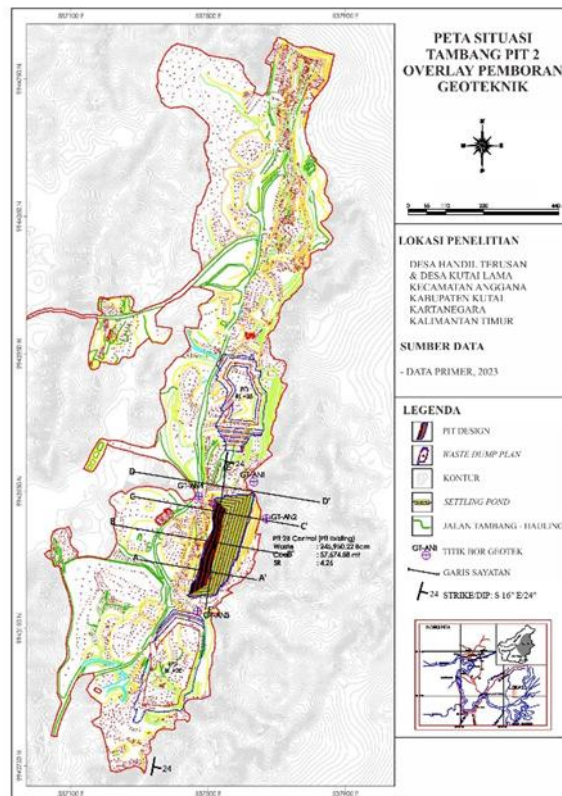
15 mm; (4) *Delta plain (distributary channel)* pada kedalaman 7,9-12,4 m berupa batupasir bertekstur halus hingga sedang; (5) *Delta plain (marsh)* pada kedalaman 12,4-16,4 m dengan litologi batupasir lempungan (12,4-13,9 m dan 15,4-16,4 m) dan batubara (13,9-15,4 m); (6) *Pro delta mud* pada kedalaman 16,4-19,9 m dengan perselingan batulempunglanau dan batulanau; (7) *Delta front mud* pada kedalaman 19,9-24,2 m dicirikan dengan perselingan batupasirlempungan, batulanau, dan batulempung dengan ketebalan antara 20 – 100 cm, dan; (7) *Delta plain (distributary channel)* pada kedalaman 24,2-30 m berupa endapan batupasir tekstur halus hingga sedang.

Lingkungan pengendapan titik GT_AN1, GT_AN2, GT_AN3 dan GT_AN4 berada pada lingkungan pengendapan yang sama, yaitu *lower delta plain*, area delta yang lebih dekat ke laut. Lingkungan ini sangat dipengaruhi pasang surut ditandai dengan endapan batupasir yang lepas dan adanya bentanglahan *delta front mud* yang diendapkan dibagian depan delta, dengan lingkungan pengendapan *fluvial-deltaic systems*. Berdasarkan hasil analisis diketahui asosiasi fasies: *fluvial channel*, *delta plain (distributary channel)*, *delta plain (marsh)*, yaitu tempat pengendapan batubara), *pro delta mud*, dan *delta front mud*. Ciri-ciri ini sama pada Formasi Balikpapan di Loa Janan dan Sungai Kunjang (Permana dkk., 2018) dan penelitian terkait Paleo-Mahakam delta (Lambiase dkk., 2016).

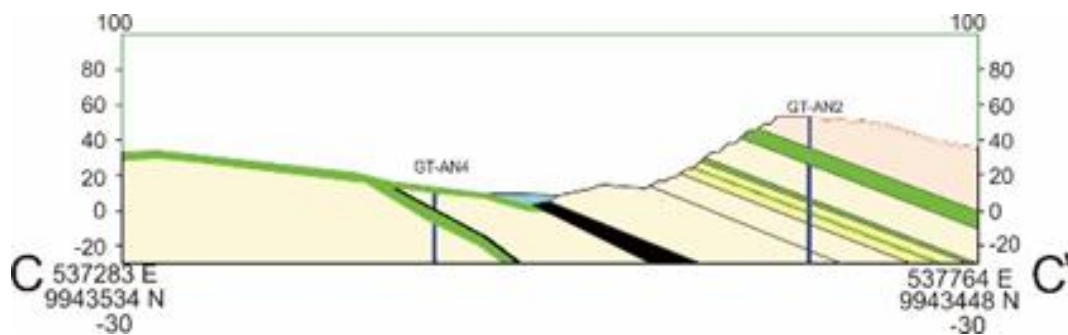
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Lereng Existing

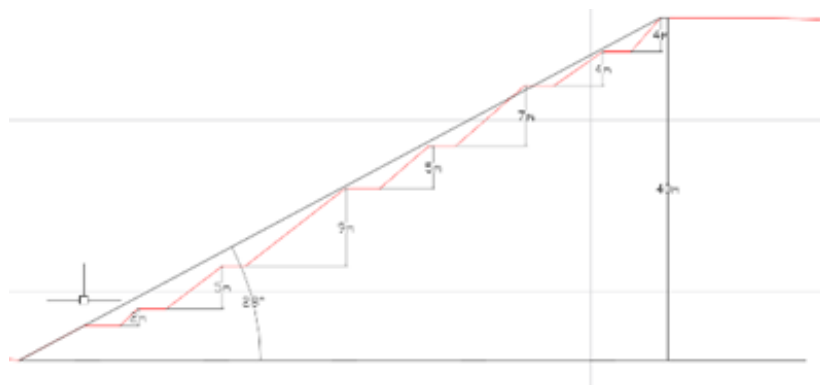
Penelitian ini dilakukan berdekatan dengan lereng bekas penambangan yang telah terbuka (Gambar 6) lebih dari 1 tahun ini memiliki tinggi 40 m dengan sudut lereng keseluruhan 28-30° (Gambar 7, 8, 9, 10). Kondisi lereng pada saat kegiatan penyelidikan berlangsung telah mengalami sedikit kerusakan yang disebabkan oleh erosi permukaan (*gully*). Jenis litologi sebagian besar disusun oleh material batupasirlempungan dan beberapa lapisan batupasir dan batulempung kekerasan sedang. Sketsa variasi litologi yang menyusun lereng dan sekitar lereng berdasarkan hasil pemboran (lihat Gambar 7) profil penampang C maupun penampakan visual (lihat Gambar 11).



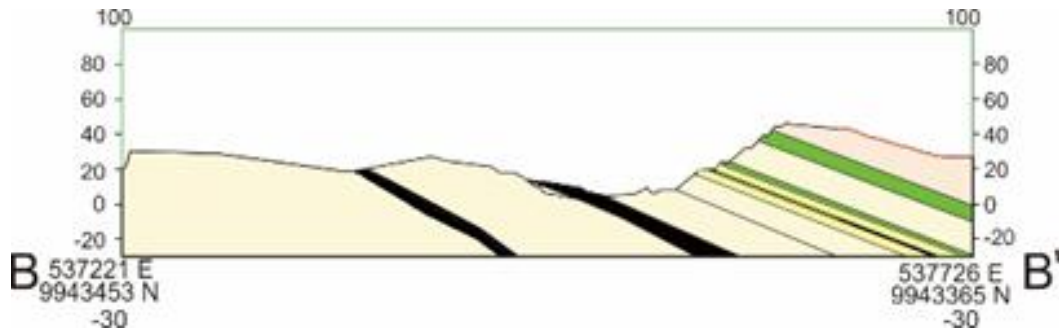
Gambar 6. Peta situasi tambang overlay pemboran geoteknik



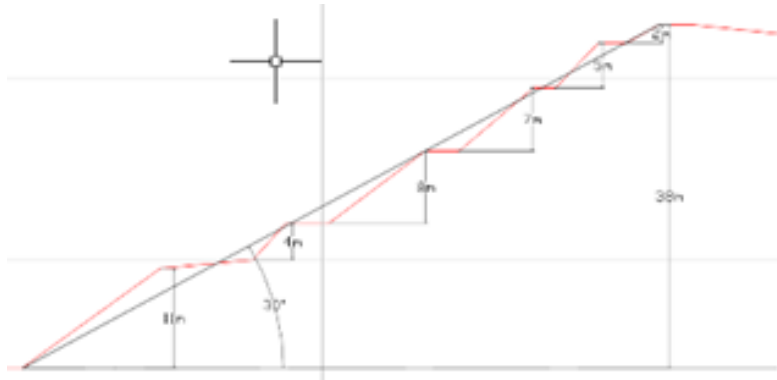
Gambar 7. Profil penampang stratigrafi sayatan



Gambar 8. Geometri lereng sayatan C



Gambar 9. Profil penampang stratigrafi sayatan B



Gambar 10. Geometri lereng sayatan B



Gambar 11. Kondisi Lereng Keseluruhan

Analisis Balik

Analisis Balik yang dimaksud adalah memasukkan nilai parameter yang telah diketahui, dalam kasus ini lereng dianggap homogen sehingga hanya akan menggunakan 1 parameter *properties*. Berdasarkan kondisi lereng eksisting saat ini, secara umum dimana lereng masih cukup stabil walaupun dengan hanya terdapat sedikit erosi permukaan yang disebabkan oleh aliran air hujan. Terhadap kondisi tersebut maka asumsi faktor keamanan lereng yang ditetapkan adalah 1,25 (Bowles, 1989).

Material penyusun lereng sebagian besar terdiri atas material non-kohesif yang terdiri atas batupasir dan batupasirlempungan, sehingga kohesi dapat bernilai sangat rendah. Dapat diperkirakan nilai kohesi tanah berada pada kisaran 0-50 kPa (Lambe dan Whitman, 1991). Nilai kohesi yang rendah ini merupakan bagian terlemah dari beberapa lapisan tanah penyusun lereng. Untuk mendapatkan nilai terdekat yang menghasilkan $FK=1,25$ dilakukan analisis sensitivitas sebagaimana yang terlihat pada Gambar 12.

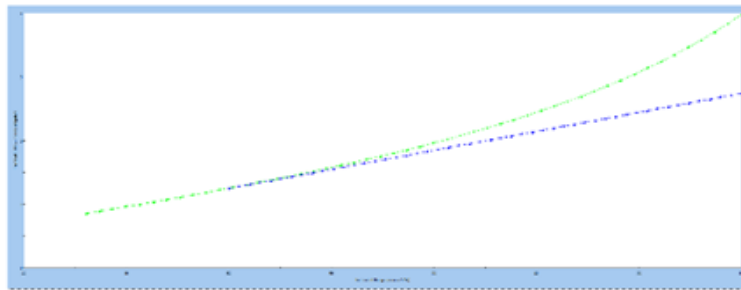
Parameter kohesi tanah dan sudut geser dalam dihubungkan dengan nilai FK. Nilai FK 1,25 pada

gambar 14 terjadi apabila nilai kohesi dan sudut geser dalam berada pada 50 % dari kisaran rata-rata. Berdasarkan Histogram nilai phi rata-rata sampel adalah sebesar $26,02^\circ$ dan kohesi sebesar 13,97 kPa. Hasil analisis parameter ini yaitu FK sebesar 1,3. Nilai ini masih lebih tinggi dari nilai yang diharapkan yakni sebesar 1,25. Oleh karena itu, dilakukan proses penyesuaian kembali dimana digunakan nilai kohesi sebesar 10 kPa dan Phi sebesar 26° . Hasil FK dengan menggunakan parameter tersebut didapatkan FK sebesar 1,25 (Gambar 13).

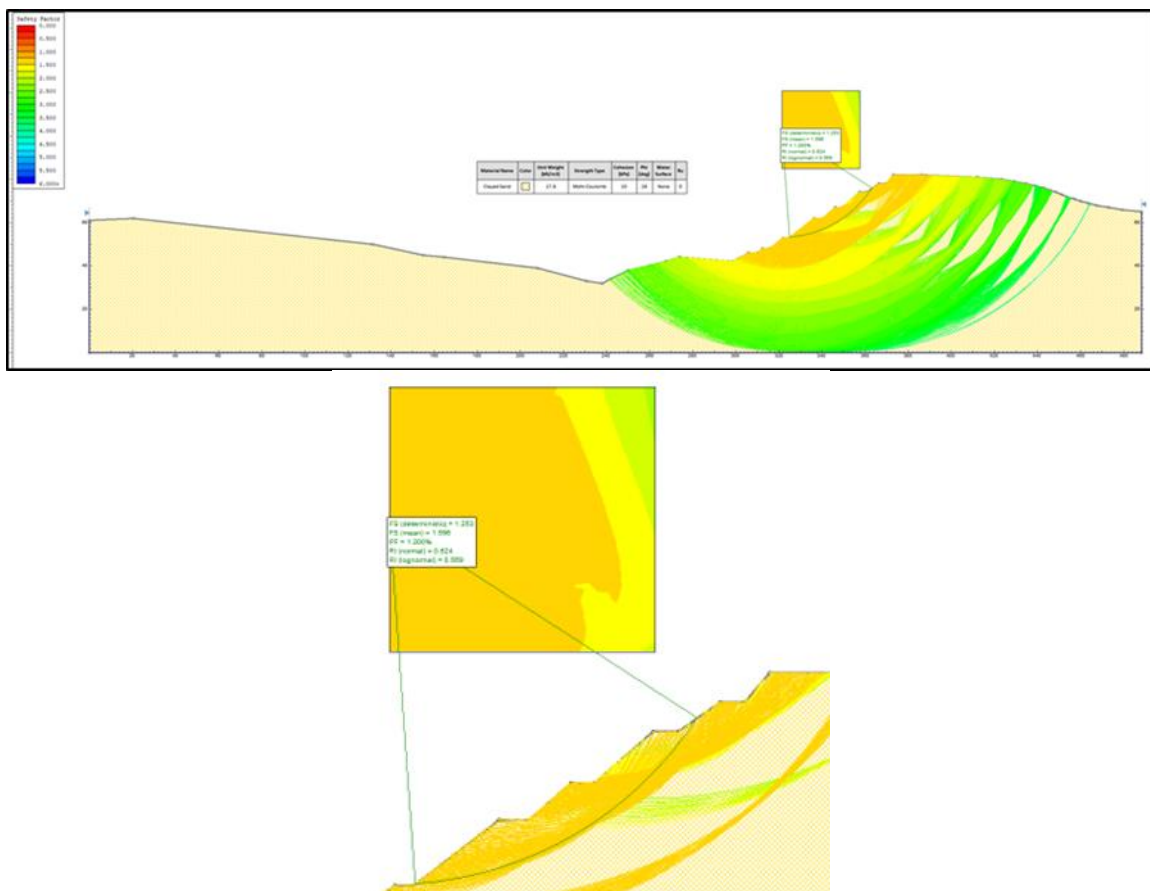
Berdasarkan perhitungan analisis balik yang menghasilkan FK 1,25 tersebut, maka nilai

kohesi yang menjadi masukan parameter nantinya dalam *forward analysis* adalah sebesar 10 kPa sedangkan sudut geser dalam sebesar 26° . Parameter bobot isi asli tanah adalah sebesar $17,8 \text{ kN/m}^3$ yang merupakan hasil rata-rata sampel terganggu yang diambil dari lereng.

Parameter *properties* material yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng ini bersumber dari hasil pengujian sifat fisik dan mekanik tanah dan batuan yang diambil dari kegiatan pengeboran inti dan bor tangan kemudian dilakukan determinasi karakteristik material sebagaimana yang ditampilkan pada Tabel 2. Parameter deterministik dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 12. Grafik sensitivitas hubungan kohesi sudut geser dalam terhadap FK lereng



Gambar 13. Perhitungan lereng *existing*

Tabel 2. Parameter kuat geser material dan asumsi muka airtanah

Tipe Material	Simbol	Bobot isi (kN/m ³)	Kohesi (kPa)	Sudut geser (Derajat)	Permukaan Air
Tanah		17	50	26	Garis <i>Piezometric</i> 1
Batupasir berkerikil		15,9	10	26	Garis <i>Piezometric</i> 1
Batulanau		19,77	223,71	20,7	Garis <i>Piezometric</i> 1
Batupasirlempungan		17,8	10	26	Garis <i>Piezometric</i> 1
Batubara		11,93	850,78	39,62	Garis <i>Piezometric</i> 1

Tabel 3. Parameter statistik material batupasirlempungan

No	Nama Material	Propertis	Distribusi	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Maks.
1	Batupasirlempungan	Kohesi	Normal	10	5	0	50
2	Batupasirlempungan	Phi	Normal	26	2	10	36
3	Batupasirlempungan	Berat Jenis	Normal	17.8	18	17	38,2

Tabel 4. Hasil analisis geometri lereng akhir
Highwall metode probabilitas

No	Tinggi (m)	Overall slope (°)	FK	PK (%)
1	50	28	1,27	18,8
2	50	28	1,29	5,5
3	63	29	1,13	4,5

Parameter statistik utama yang dimasukkan dalam perhitungan adalah sebagaimana tertera pada tabel 3. Berdasarkan limitasi data, asumsi muka airtanah yang mengalir di bawah lereng adalah pada kondisi akuifer tertekan. Pembebanan di atas lereng yang ditentukan dalam perhitungan analisis ini menggunakan prinsip kehati-hatian, artinya penerapan beban yang dimasukkan adalah beban maksimal yang terdistribusi secara konstan dan merata. Sebagaimana data dari PUPR (2021), nilai p_g gempa maksimum adalah sebesar 0,07. Berdasarkan SNI 8460: 2017 tentang persyaratan desain geoteknik pada lereng, nilai PGA yang dimasukkan adalah setengah dari PGA gempa maksimum. Pada perhitungan dimasukkan nilai 0,05 dengan mempertimbangkan kondisi kegempaan terkini di propinsi Kalimantan Timur dan sekitarnya.

Analisis Maju (Forward Analysis)

Tujuan dari forward analysis ini adalah untuk mengetahui dan memberikan rekomendasi sejauh mana tingkat stabilitas lereng tambang apabila akan dilakukan penggalian tambahan hingga

turun 30 m ke bawah level permukaan saat ini. Metode forward analysis ini menggunakan metode deterministik dan probabilistik. Jenis analisis berdasarkan pengaruh gaya-gaya eksternal adalah menggunakan pendekatan statis dan dinamis. Parameter kuat geser yang digunakan adalah perpaduan antara hasil back analysis dan hasil pengujian terhadap sampel tidak terganggu (undisturbed sample) dari kegiatan pemboran yang telah dilaksanakan.

Analisis yang dilakukan akan menentukan geometri lereng yang optimal yang dapat diterapkan di area rencana penambangan di pit Anggana. Stabilitas lereng dengan memasukkan seluruh jenis litologi dan parameter deterministik sesuai dengan tabel 4, didapatkan $FK = 1,4$ yang artinya lereng stabil. Dengan menggunakan analisis probabilistik, lereng eksisting memiliki $FK = 1,27$ dan probabilitas kelongsoran 18,8% yang artinya lereng ini masih memiliki kemungkinan longsor walaupun secara FK aman.

Highwall

Kondisi lereng bukit akhir pada penambangan dengan ketinggian 63 m dan sudut lereng maksimal 29° didapatkan FK sebesar 1,13 dengan probabilitas kelongsoran 4,5%. Hasil analisis *finite element* dengan parameter yang sama, didapatkan FK sebesar 1,31. Pada kondisi eksisting diperkirakan maksimal akan terjadi deformasi dengan nilai maksimum displacement sebesar 0,27 m. Titik kritis tersebut berada pada kedalaman 15 m dari *crest Highwall*.

Lowwall

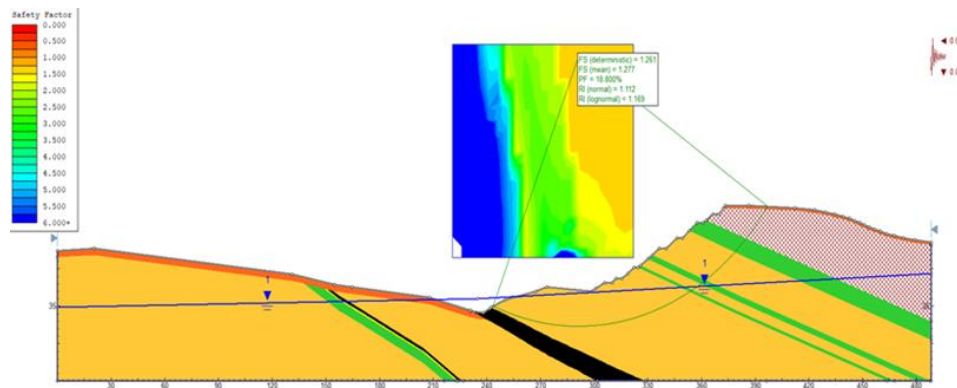
Pada lereng dengan kemiringan 20° dan tinggi 17 m dan dengan memasukkan parameter *properties* yang sama pada perhitungan *Highwall* sebelumnya, pada bagian *Lowwall* lereng aman dengan FK lereng sebesar 1,3 dan PK sebesar 4,1% dengan asumsi jenis longsor busur, namun apabila sebaliknya maka FK lereng sebesar 1.5 dan PK 0% (lihat Gambar 16 dan 17).

Sidewall Utara

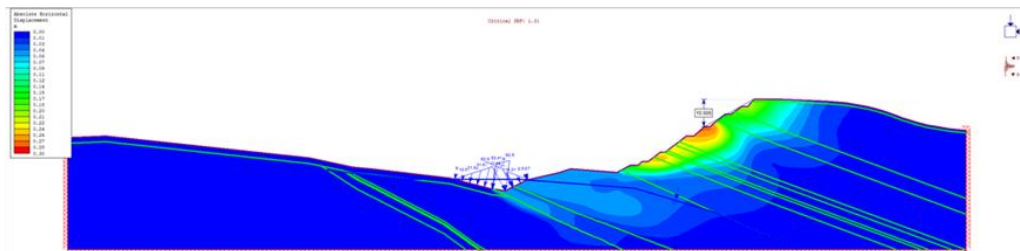
Sidewall utara termasuk bagian kritis yang harus mendapatkan perhatian mengingat terdapat kolam yang terisi dengan air (lihat Gambar 18). Pada saat pit Anggana (lubang selatan) dilakukan pemompaan maka secara otomatis level air yang

berada di lubang utara akan mengalami penurunan melalui rembesan menuju lubang Pit Anggana. Sebagaimana sifat hidrolika dimana air mengalir dari head yang tinggi menuju yang rendah, perubahan penurunan muka airtanah ini akan menimbulkan depresurisasi material lereng, untuk itu dilakukan analisis stabilitas lereng.

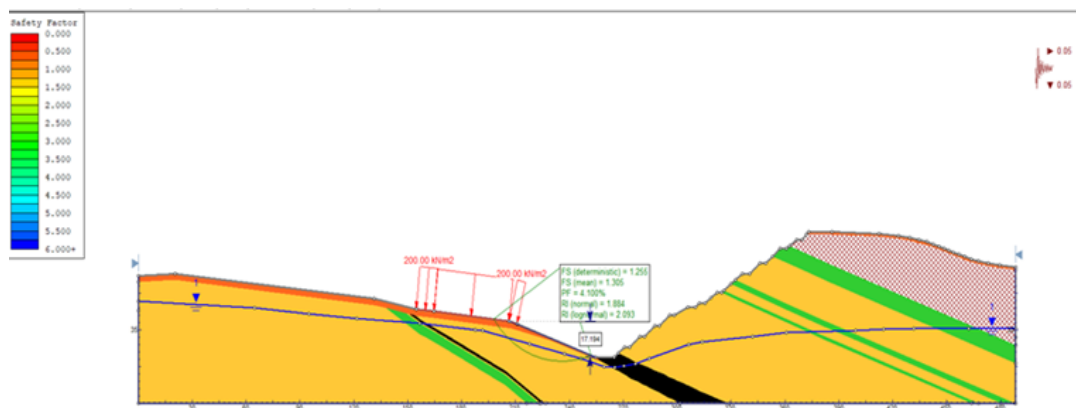
Berdasarkan desain awal yang diajukan dimana sudut lereng keseluruhan adalah sebesar 34° dengan total ketinggian *Sidewall* sebelah utara adalah 26 m, FK lereng adalah 1,13 sebagaimana gambar di bawah ini. Nilai FK tersebut masih terlampaui rendah hingga perlu untuk menurunkan kemiringan lereng keseluruhan.



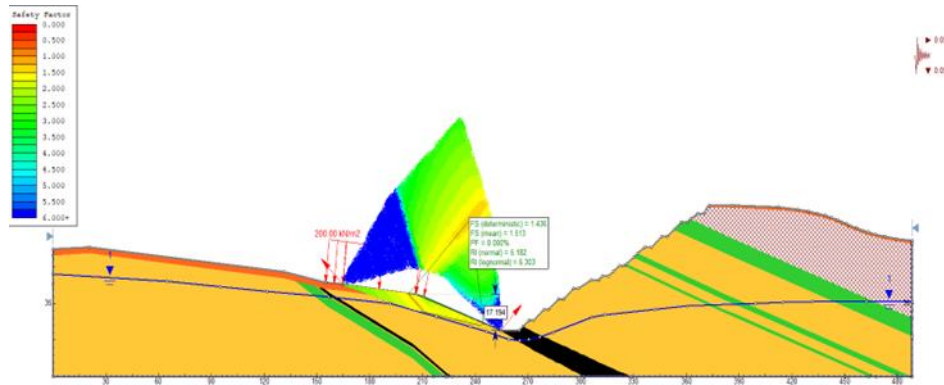
Gambar 14. Analisis stabilitas lereng *Highwall* metode probabilitas



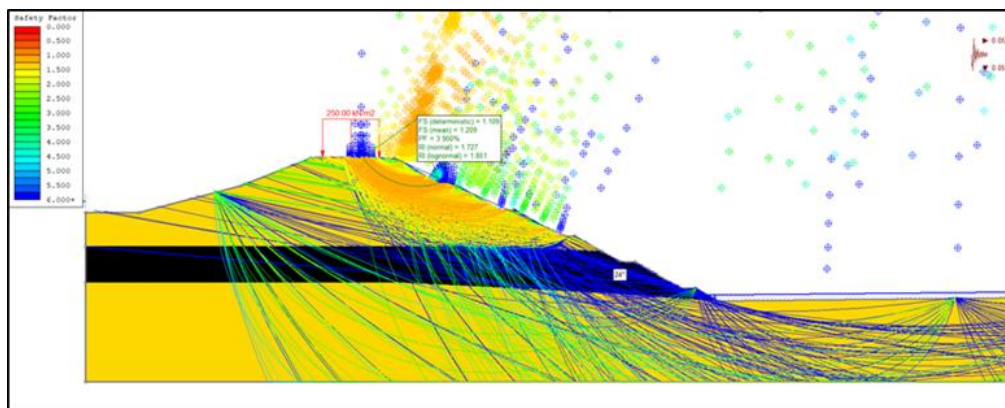
Gambar 15. Analisis stabilitas lereng *Highwall* metode *finite element*



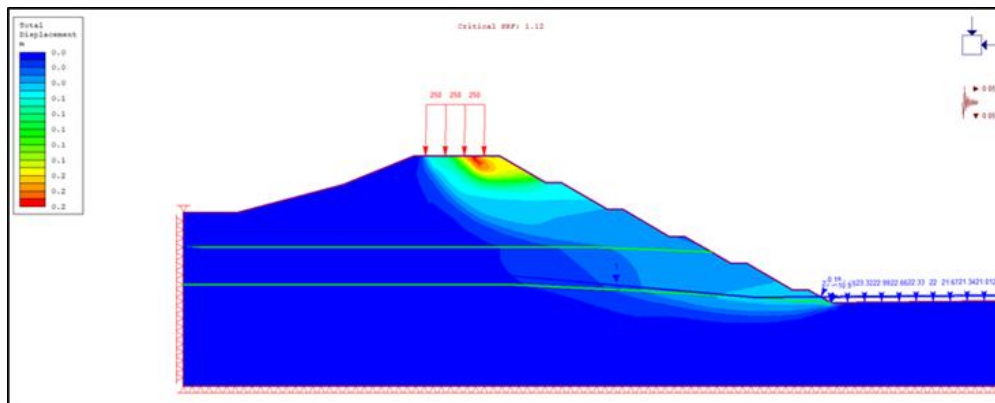
Gambar 16. Analisis lereng *Lowwall* asumsi bidang longsor busur



Gambar 17. Analisis lereng *Lowwall* asumsi bidang longsor planar



Gambar 18. Analisis stabilitas lereng *Sidewall* utara metode probabilitas



Gambar 19. Analisis stabilitas lereng *Sidewall* utara metode *finite element*

Tabel 4. Hasil analisis geometri lereng akhir *Highwall* metode probabilitas

Tinggi (m)	Slope (°)	Overall slope (°)	FK	PK (%)
25	45	34	1,03	42,8
25	40	30	1,1	13,6
25	35	27	1,04	34,9
25	30	24	1,21	3,9

Analisis deformasi dilakukan dengan metode *finite element* pada dimensi lereng *Sidewall* utara

dengan sudut lereng tunggal 30° dan tinggi maksimal 25 m dan asumsi beban di atas lereng maksimal 250 kPa dengan distribusi merata. Hasilnya adalah SRF lereng sebesar 1,12 dengan nilai maksimal total displacement sebesar 0,2 m yang berada pada posisi lantai *crest* lereng.

Sidewall Selatan

Desain awal yang direncanakan pada lokasi *sidewall* sebelah selatan meliputi: Sudut lereng individual adalah 42° dan tinggi 5 masing-masing 5 m sedangkan lereng keseluruhan maksimal

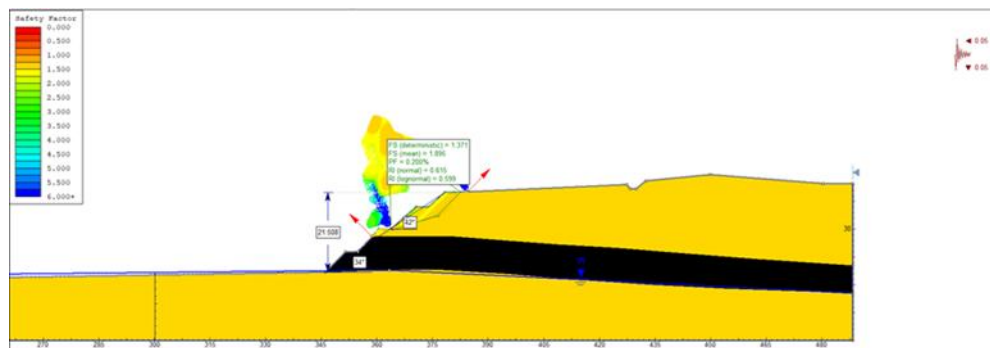
adalah 15 m dengan sudut lereng keseluruhan adalah sebesar 34° . Berdasarkan analisis dinamis dengan memasukkan koefisien gempa, pembebanan maksimal 100 kPa di atas lereng dan juga airtanah berada di bawah lereng, FK lereng adalah sebesar 1,1 dengan probabilitas kelongsoran sebesar 26% sehingga dapat dikatakan lereng belum aman.

Faktor keamanan lereng dan angka probabilitas kelongsoran menjadi pertimbangan dimensi lereng *Sidewall* selatan yang paling memungkinkan adalah dengan sudut tunggal 35° sudut lereng keseluruhan 27° dan tinggi maksimal

21,6 m dan asumsi beban di atas lereng maksimal 100 kPa dengan distribusi merata. Analisis deformasi dilakukan dengan metode *finite element* pada dimensi lereng *Sidewall* selatan dengan sudut lereng tunggal 35° dan tinggi maksimal 21,6 m dan asumsi beban di atas lereng maksimal 100 kPa dengan distribusi merata. Berdasarkan hasil analisis, diketahui SRF lereng sebesar 1,1 dengan nilai maksimal total displacement sebesar 0,1 m yang berada pada posisi *crest* lereng.

Tabel 5. Faktor keamanan lereng dan probabilitas kelongsoran lereng akhir *Sidewall* selatan

Tinggi (m)	Slope ($^\circ$)	Overall slope ($^\circ$)	Beban di atas lereng 100 kPa (Circular failure)		Non Circular Failure (tanpa pembebanan)		Circular Failure (Tanpa pembebanan)	
			FK	PK (%)	FK	PK (%)	FK	PK (%)
21,5	45	34	26,8	1,1	1,89	0,2	1,78	0,5
21,23	40	30	22,6	1,1	1,89	0,2	1,89	0,7
21,6	35	27	2,6	1,2	2,06	0	2,92	0
21,9	30	24	0,1	1,3	2,28	0	2,19	0



Gambar 20. Analisis stabilitas lereng *Sidewall* selatan metode probabilitas

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis stabilitas lereng yang telah dilakukan pada *Highwall*, *Lowwall*, *Sidewall* utara, dan *Sidewall* selatan dapat diketahui bahwa baik metode probabilitas dan finite element menyimpulkan bahwa rekomendasi kemiringan lereng keseluruhan cukup rendah dari 20° dan tinggi 16 m di *Lowwall*, 24° dan tinggi 25 meter di *Sidewall* utara, 27° dan tinggi 21,6 m di *Sidewall* selatan dan sudut maksimal 29° dan tinggi maksimum 63 m di *Highwall* merupakan kemiringan lereng dan tinggi yang masuk kategori rendah untuk sebuah rencana pit tambang terbuka.

Hasil analisis stabilitas lereng pada tambang di Anggana dengan kemiringan sudut rata-rata maksimal kurang dari 30° , sangat dipengaruhi kondisi geologi lingkungan pengendapan sistem delta di *lower delta plain* yang sangat terpengaruh air laut, sehingga berlimpahnya litologi batupasir lepas, batupasirlempungan dan hanya sedikit yang kompak sebagai batulumpur di endapan *pro delta mud*. Hasil ini dapat digunakan sebagai rekomendasi studi pendahuluan di area lokasi penambangan dengan stratigrafi yang menunjukkan fasies *lower delta plain* Mahakam Purba di sekitar Kecamatan Anggana, namun pada saat akan membuka pit baru, tetap harus

dilakukan kajian geoteknik karena lokasi yang sangat berdekatan dengan Formasi Kampungbaru dan Endapan Aluvial Kuarter.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Primacon Explorindo atas pendanaan penelitian ini dan publikasinya. Kami berharap studi ini memberikan wawasan berharga bagi penelitian geoteknik di wilayah lingkungan pengendapan delta yang berisiko.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J. E. (1989). Closure to "Elastic Foundation Settlements on Sand Deposits" by Joseph E. Bowles (August, 1987, Vol. 113, No. 8). *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(3), hal.427-429. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:3\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:3(4)).
- Brinkgreve, RBJ., Burg, M., Andreykiv, A., & Lim, JL. (2015). Beyond the finite element method in geotechnical analysis. In s.n. (Ed.), *Proceedings of the workshop "Numerische Methoden in der Geotechnik"* (BAW-Mitteilungen; Vol. 98, hal.91-102.
- Canada Center for Mineral and Energy Technology (CANMET) (1979). *Pit Slope Manual: Chapter 9 – Waste Embankments*, Mining Research Laboratories, Departement of Energy, Miner, and Resources, Canada.
- Coleman, J. M. dan Prior, D. B. (1982). *Deltaic environments of deposition in M31: Sandstone Depositional Environment*. AAPG: hal.139-178.
- Husein, S. dan Lambiase, J. J. (2013). Sediment dynamics and depositional systems of the Mahakam Delta, Indonesia: ongoing delta abandonment on a tide-dominated coast. *Journal of Sedimentary Research*. 83(7), hal.503-521. <https://doi.org/10.2110/jsr.2013.42>
- Koike, K., Minta, T., Ishizaka, S. dan Ohmi, M. (1996). Hydrogeological and ground-water resource analysis using a geotechnical database. *Nonrenewable Resources*, 5, hal.23-32. <https://doi.org/10.1007/BF02259067>
- Lambe, T. W., dan Whitman, R. V. (1991). *Soil mechanics (Vol. 10)*. John Wiley & Sons.
- Lambiase, J. J. dan Husein, S. (2015). The Modern Mahakam Delta: An Analogue for Transgressive--Phase Deltaic Sandstone Reservoirs On Low Energy Coastlines. *The Society for Organic Petrology (TSOP)*: 32.
- Lambiase, J. J., Riadi, R. S., Nirsal, N. dan Husein, S. (2017). Transgressive successions of the Mahakam Delta province, Indonesia. *Sedimentology of Paralic Reservoirs: Recent Advances*, <https://doi.org/10.1144/SP444.2>.
- Landsat 8. (2024). *ESRI World Imagery (XYZ Tiles)* Quantum GIS, 2024. Sumber URL: https://services.arcgisonline.com/arcgis/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/%7Bz%7D/%7By%7D/%7Bx%7D.
- Manual Aplikasi RSA (2021). *Aplikasi Spektrum Respons Desain Indonesia 2021*. PuSGeN, DBTPP, Ditjen Cipta Karya, Kementerian PUPR Requirement. Sumber URL: <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>.
- Mebrahtu, T. K., Heinze, T., Wohnlich, S. dan Alber, M. (2022). Slope stability analysis of deep-seated landslides using limit equilibrium and finite element methods in Debre Sina area, Ethiopia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(10), 403. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02906-6>
- Mi, N. V. A., Thongchart, S. dan Mairaing, W. (2023). Geological dan geotechnical properties of Mekong Delta Clay as comparison with Bangkok Clay. *GEOMATE Journal*, 24(101), hal.22-32.
- Permana, A. K., Sendjaja, Y. A., Panggabean, H., dan Fauzely, L. (2018). Depositional Environment and Source Rocks Potential of the Miocene Organic Rich Sediments, Balikpapan Formation, East Kutai Sub Basin, Kalimantan. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 19(3), hal.171-186. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v19i3.407>.
- Pratiknyo, P. (2012). Kerawanan longsor di Kabupaten Kutai Kartanegara Kalimantan Timur. *Prosiding Simposium dan Seminar Geomekanika ke-1 Tahun 2012: Menggagas Masa Depan Rekayasa Batuan & Terowongan di Indonesia*. 4, hal. 28-36.
- PUPR (2021). *Layanan Online Data Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan dalam Desain Spektra Indonesia*. <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>
- Santoso, H. dan Indrawan, I. G. B. (2022). Predicting the volume of slope failure material using the 2-dimensional limit equilibrium method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1071, 1, 012009,

- hal.1-14. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1071/1/012009>
- Santoso, H., dan Situmorang, R. M. (2024). Penyelidikan Stabilitas Rencana PIT Tambang dengan Analisis Kemantapan Lereng Majemuk di Desa Mekar Jaya, Kecamatan Sebulu. *Bulletin of Scientific Contribution: Geology*, 22, 1 p.51-64 . DOI: <https://doi.org/10.24198/bsc%20geology.v22i1.53231>
- Situmorang, R. M. dan Santoso, H. (2023). Desain Lereng Tambang Optimal Menggunakan Metode Keseimbangan Batas di Kecamatan Sebulu, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. *Ophiolite: Jurnal Geologi Terapan*, 5(2), 62-69. <https://doi.org/10.56099/ophi.v5i2.p62-69>
- SNI. (2017). Persyaratan perancangan geoteknik. SNI 8460: 2017.
- Storms, J. E., Hoogendoorn, R. M., Dam, R. A., Hoitink, A. J. F. dan Kroonenberg, S. B. (2005). Late-holocene evolution of the Mahakam delta, East Kalimantan, Indonesia. *Sedimentary Geology*, 180(3-4), hal.149-166. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.08.003>.
- Zavala, C., Arcuri, M., Zorzano, A., Trobbiani, V., Torresi, A. dan Irastorza, A. (2024). Deltas: New paradigms. The Depositional Record. <https://doi.org/10.1002/dep2.266>