

	Bulletin of Scientific Contribution GEOLOGY Fakultas Teknik Geologi UNIVERSITAS PADJADJARAN homepage: http://jurnal.unpad.ac.id/bsc p-ISSN: 1693-4873; e-ISSN: 2541-514X	 Volume 22, No.1 April 2024
---	---	---

PENYELIDIKAN STABILITAS RENCANA PIT TAMBANG DENGAN ANALISIS KEMANTAPAN LERENG MAJEMUK DI DESA MEKAR JAYA, KECAMATAN SEBULU

Hendra Santoso^{1*,2}, Roni Marudut Situmorang²

¹Program Studi Teknik Geologi, Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur

²PT Primacon Explorindo, Samarinda Utara, Samarinda

*Korespondensi: hendrasantoso@umkt.ac.id

ABSTRACT

One of the areas that has become the focus of mining activities is Mekar Jaya Village, Sebulu District, Kutai Kartanegara Regency, East Kalimantan. Mekar Jaya Village has lithology classified as weak rock, which increases the potential for slope failure. Therefore, a careful analysis of slope stability is very important to design the optimal mine PIT slope design for the research area. The landslide safety factor for planning the opening of a mining pit requires optimal mine plan design calculations to ensure the stability of the slopes of the mining area. This research aims to ensure the stability of the slopes of the mining PIT area using a deterministic (static) and probabilistic (dynamic) approach. The required data, such as topographic conditions, geological structure, and physical and mechanical properties of slope-forming materials, will be obtained through geotechnical drilling activities. This research will refer to the regulatory standards of Minister of Energy and Mineral Resources Decree No. 1827 of 2018 concerning Guidelines for Implementing Good Mining Engineering Principles. The results of the analysis show recommendations for mine slope design, namely: (1) GT03: categorized as stable with a lithology of calculus, shale, claystone and coal with a height of 47-61 m, static FK value point 3.26-3.73, dynamic FK 2.2-2.54, and PK 0% (2) GT 04 is based on a high slope design with claystone, siltstone and shalestone lithology of a maximum of 50.7 meters with a maximum static FK of 1.3, and based on a stable dynamic FK at a maximum height of 50.8 meters and an overall slope angle of 41-48° and Dynamic FK 1.19-1.25, and PK 0%. Deterministic and probabilistic analyzes provide almost the same recommendations in determining the optimal height and slope angle of the PIT slope design.

Keywords: Slope Stability, Geotechnical, Safety Factor, Deterministic, Probabilistic

ABSTRAK

Salah satu daerah yang telah menjadi fokus aktivitas pertambangan yaitu Desa Mekar Jaya, Kecamatan Sebulu, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. Desa Mekar Jaya memiliki litologi berklasifikasi batuan lemah, yang meningkatkan potensi terjadinya kelongsoran lereng. Oleh karena itu, analisis yang cermat terhadap kemantapan lereng menjadi sangat penting untuk merancang desain lereng PIT tambang yang optimal daerah penelitian tersebut. Faktor keamanan kelongsoran untuk Perencanaan pembukaan PIT Tambang memerlukan perhitungan desain rencana tambang optimal untuk menjamin kestabilan lereng wilayah pertambangan. Penelitian ini bertujuan untuk memastikan kestabilan lereng wilayah PIT tambang dengan menggunakan pendekatan deterministik (statis) dan probabilistik (dinamis). Data-data yang diperlukan, seperti kondisi topografi, struktur geologi, serta sifat fisik dan mekanik material pembentuk lereng, akan diperoleh melalui kegiatan pemboran geoteknik. Penelitian ini akan merujuk pada standar peraturan Kepmen ESDM No.1827 tahun 2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik. Hasil analisis menunjukkan rekomendasi untuk desain lereng tambang, yaitu: (1) GT03: dikategorikan stabil dengan litologi batukalkarenit, batuserpih, batulempung dan batubara dengan tinggi 47-61 m, titik nilai FK statis 3.26-3.73, FK dinamis 2.2-2.54, dan PK 0% (2) GT 04 berdasar desain lereng tinggi dengan litologi batulempung, batulanau, dan batuserpih maksimal 50.7 meter dengan FK statis maksimal 1,3, dan berdasar FK dinamis stabil pada ketinggian maksimal 50,8 meter dan sudut lereng keseluruhan 41-48° dan FK dinamis 1,19-1,25, dan PK 0%. Analisis deterministik dan probabilistik memberikan rekomendasi yang

hamper sama dalam menentukan rencana pembuatan ketinggian dan sudut kemiringan desain rencana lereng PIT yang optimal.

Kata Kunci: Kestabilan Lereng, Geoteknik, PIT, Deterministik, Probabilistik

Pendahuluan

Industri pertambangan memiliki peran vital dalam perekonomian global, menyediakan sumber daya yang penting untuk berbagai keperluan manusia (Moran dkk., 2014). Namun, aktivitas pertambangan juga membawa risiko lingkungan dan keamanan yang signifikan, terutama terkait dengan kelongsoran lereng. Desain lereng tambang yang optimal menjadi kunci untuk meminimalkan risiko tersebut dan memastikan operasi tambang berjalan secara aman dan efisien (Amrullah dkk, 2019). Studi ini bertujuan untuk melakukan analisis kemantapan lereng majemuk dengan pendekatan deterministik (statis) dan probabilistik (dinamis) untuk merancang desain lereng PIT tambang yang optimal (Steffen dkk, 2008). Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan dari pembuatan desain rencana lereng tambang optimal berupa lereng jalan hauling untuk kegiatan penambangan di daerah penelitian ini menggunakan Data GT01 dan GT02 (Situmorang dan Santoso, 2023) (lihat Gambar 1).

Analisis deterministik berdasarkan pada asumsi bahwa semua parameter dan variabel yang mempengaruhi perilaku tanah dan struktur adalah nilai pasti (statis) dan diketahui dengan tepat dan tidak mempertimbangkan ketidakpastian yang mungkin ada dalam parameter geoteknik (Phoon dkk, 2022). Sementara itu, analisis probabilistik memperhitungkan ketidakpastian (dinamis) dalam parameter dan variabel geoteknik (Juang dkk, 2019). Analisis probabilistik berdasar pada distribusi probabilitas dari parameter yang memungkinkan variasi dan ketidakpastian di akomodasi dalam analisis (Phoon dkk, 2016). Dapat disimpulkan bahwa analisis deterministik lebih sederhana dan langsung, cocok digunakan ketika data yang tersedia cukup pasti dan konsisten (Schweiger dkk, 2001). Sedangkan, analisis probabilistik memberikan pemahaman yang lebih lengkap tentang variasi dan risiko yang terkait dengan hasil analisis, tetapi memerlukan pengetahuan yang lebih besar tentang ketidakpastian dalam parameter. Kedua metode ini sangat bafus digunakan untuk mengevaluasi faktor keamanan secara bersamaan karena sangat mudah untuk dibandingkan dan dipahami (Reale dkk, 2015).

Penyebab kelongsoran pada suatu lereng seringkali terkait dengan keberadaan bidang gelincir. Konsep kesetimbangan batas

menyatakan bahwa kemantapan lereng ditentukan oleh keseimbangan antara gaya penggerak dan gaya penahan pada bidang gelincir tersebut (Komadja dkk, 2021). Analisis faktor keamanan kelongsoran di daerah Sebulu menjadi penting untuk memastikan kemantapan lereng terutama dalam lingkungan dengan litologi klasifikasi *very weak rock* (Martin & Stacey, 2018). Menurut Hoek & Bray (1981), analisis kemantapan lereng dapat dilakukan dengan mempertimbangkan jenis kelongsoran yang terjadi, yang sering direpresentasikan dalam bentuk bidang gelincir. Material yang membentuk lereng tambang di lokasi penambangan meliputi variasi lithologi. Pada setiap titik bor, lithologi batuan digunakan sebagai sampel untuk analisis *Index Properties & Engineering Properties* di laboratorium mekanika tanah dan batuan (Wroth & Wood, 1978; Kormu dkk, 2022). Hasil analisis laboratorium ini kemudian digunakan sebagai parameter untuk menganalisis kemantapan lereng (Duncan dkk, 2014).

Parameter geoteknik yang diperlukan mencakup sifat fisik dan mekanik batuan yang membentuk material penutup overburden, interburden, serta batuan dasar. Informasi ini penting untuk menentukan tinggi dan sudut lereng yang stabil untuk keperluan penambangan dan penimbunan (Gurocak dkk, 2008; Azizi dkk, 2013). Diharapkan hasil dari penelitian ini akan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik lereng PIT tambang pada litologi weak rock menggunakan analisis deterministik dan probabilitas dan memberikan rekomendasi desain lereng tambang yang optimal untuk memastikan kestabilan lereng dan mengurangi risiko kelongsoran. Hal ini akan berkontribusi pada peningkatan keselamatan operasi pertambangan serta mempromosikan keberlanjutan industri pertambangan, khususnya dalam rancangan tambang terbuka (Fenton, 1997; Martin & Stacey, 2018).

Tinjauan Pustaka

2.1 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Kajian geoteknik pada penambangan batubara terbuka bertujuan untuk menelaah sifat fisik dan mekanik batuan yang menyusun material penutup (*overburden*), *interburden*, batuan dasar dan lapisan batubara (Singh dan Porter, 2017). Parameter geoteknik yang diperlukan selama proses pengkajian yaitu sifat fisik dan mekanik

batuan yang hasilnya diperlukan untuk menentukan tinggi dan sudut lereng yang mantap pada saat proses penambangan dan penimbunan (Igwe dan Chukwu, 2018). Parameter sifat fisik meliputi berat isi tanah (jenuh, kering dan natural), porositas, ukuran butir, batas-batas *atterberg* (meliputi batas plastis, batas elastis dan indeks plastisitas) (Nugroho dkk, 2012). Berat isi yang dimaksud adalah satuan gaya per satuan volume dengan menggunakan satuan kN/m^3 . Persamaan untuk berat isi yaitu:

$$\gamma = \frac{\text{berat material}}{\text{volume material}}$$

Parameter sifat mekanik yang dianalisis adalah kuat tekan, kohesi (kPa) dan sudut geser dalam (derajat). Sifat mekanik suatu material ini didapat dari hasil uji triaksial. Kohesi yang dimaksud adalah kemampuan tarik menarik antar partikel atau ukuran daya Tarik antar partikel, sehingga untuk memisahkannya diperlukan suatu gaya. Semakin besar kohesi maka material tersebut akan semakin tahan akan gerakan. Sudut geser dalam merupakan sudut rekahan yang dibentuk karena suatu material diberi gaya terhadapnya melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan dari luar (Rusni dkk, 2019). Penggunaan parameter ini terutama dalam desain tambang terbuka (Martin & Stacey, 2018), adalah untuk menganalisis kemantapan lereng dengan menggunakan metode kesetimbangan batas dan probabilitas kelongsoran (Fenton, 1997).

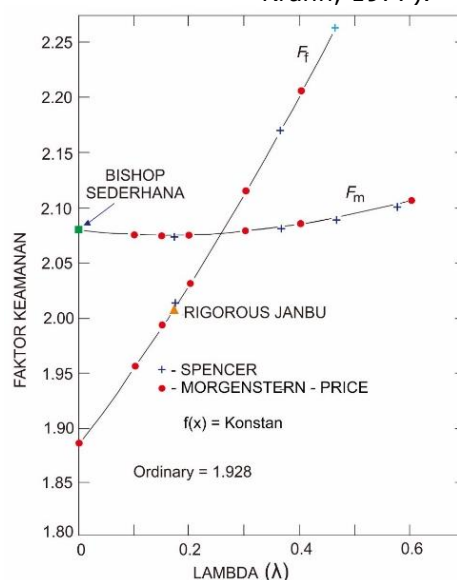
2.2 Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

Metode kesetimbangan batas merupakan metode yang menggunakan kondisi kesetimbangan statik dan mengabaikan hubungan tegangan-regangan pada lereng dimana dalam analisisnya menggunakan perbandingan gaya pendorong dan gaya penahan lereng (Khodijah dkk, 2022). Metode kesetimbangan batas karena kesederhanaan dan akurasi menjadi metode ini merupakan metode paling umum dalam menyelidiki stabilitas kelongsoran. Faktor keamanan dalam metode kesetimbangan batas menggunakan perbandingan atau rasio dari gaya penahan (resisten) terhadap gaya pendorong pada lereng geser potensial (Johari & Mousavie, 2019). Persamaan dalam Faktor Keamanan yaitu:

$$FK = \frac{\sum \text{Gaya Penahan}}{\sum \text{Gaya Pendorong}}$$

$$FK = \frac{c \cdot L + \tan \phi \cdot \sum W \cos \alpha}{W \sin \alpha}$$

Metode kesetimbangan batas menganggap bidang geser sebagai tubuh kaku (Cheng dan Zhou, 2015; Zhou dan Cheng 2013). Berbagai metode dalam kesetimbangan batas dapat dibandingkan dengan memplot faktor keamanan vs. λ (Gambar 1). Metode Bishop yang disederhanakan memenuhi kesetimbangan momen keseluruhan dengan $\lambda = 0$. Metode Spencer memiliki λ yang sama dengan garis singgung sudut antara gaya antar irisan horizontal dan resultan gaya antar irisan. Faktor keamanan Janbu dapat ditempatkan di sepanjang garis kesetimbangan gaya untuk memberikan indikasi nilai λ yang setara (Fredlund dan Krahn, 1977).



Gambar 1. Perbandingan dari irisan Metode Kesetimbangan Batas (Disalin dari: Fredlund dan Krahn, 1977).

Indeks reabilitas Metode Bishop sederhana (β : 0,9427) memiliki nilai peluang reabilitas terbaik dalam mengurangi risiko lereng longsor dibanding metode-metode kesetimbangan batas lainnya (Tabel 1), yaitu: metode Janbu (β : 0,4850), Spencer (β : 0,8463) dan Morgen-Price (β : 0,8576) (Johari dan Mousavie, 2019). Reabilitas yang dimaksud adalah probabilitas suatu peristiwa terjadi atau probabilitas hasil positif dan dapat diartikan sebagai probabilitas kegagalan. Menghitung reabilitas

memberikan cara untuk menilai tingkat ketidakpastian yang terlibat dalam perhitungan geoteknik (Zafar, 2020). Semakin rendah indeks reabilitas maka semakin rentan mengalami kelongsoran. Oleh karena itu, Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Metode Bishop sederhana. Metode Bishop digunakan untuk lapisan penutup yang terdiri dari berbagai material dengan sifat yang berbeda.

Tabel 1. Perbandingan indikasi reliabilitas dari 4 metode Kesetimbangan Batas (Johari dan Mousavie, 2019)

Metode	Bishop Sederhana	Janbu	Spencer	Morgenstern-Price
Indeks Reliabilitas (β)	0,9427	0,4850	0,8463	0,8576

Metode Penelitian

Adapun penelitian dimulai dengan pengeboran geoteknik menggunakan Jacro 200 (lihat Gambar 2) dengan teknik pengeboran Full Coring dan menggunakan SOP pengeboran geoteknik yang sesuai standar. Selanjutnya, dilakukan pengujian laboratorium berupa sampling pengujian kekerasan batuan. Tujuan penelitian ini untuk menentukan geometri lereng yang stabil dalam bentuk tinggi dan sudut kemiringan lereng. Analisis ini dilakukan pada dua lokasi desain rencana lereng tambang untuk PIT di Desa Mekar Jaya, Kecamatan Sebulu, Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur periode Februari – Maret 2023. Adapun dua lokasi tersebut telah dilakukan kegiatan *geotechnical drilling* serta sampling pengujian kekerasan batuan. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak *rockscience Slide V.6.0* untuk mempermudah analisis. Perhitungan dilakukan untuk mengkaji lereng tunggal, lereng penggalan keseluruhan, dan lereng timbunan.

Metode kesetimbangan batas yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode Bishop sederhana. Metode analisis stabilitas lereng yang digunakan dalam penelitian ini

menggunakan analisis deterministik dan analisis probablistik. Metode deterministik didasarkan atas analisis stabilitas lereng dengan memperhatikan faktor aman dari lereng tersebut (Pramudianti dan Hadmoko, 2013). Analisis stabilitas metode probablistik digunakan untuk dapat memperkecil ketidakpastian nilai FK karena memperhitungkan variasi-variasi nilai yang dimiliki setiap variabel acak baik sifat fisik ataupun mekanik dari batuan. Variabel acak diolah dengan sistem statistik dimana akan diketahui tipe distribusi dari persebaran data tersebut, sehingga kita dapat mengetahui *Probabilistik of Failure* (Purwaningsih dkk, 2020).

Standar ambang batas nilai faktor keamanan (FK) pada metode deterministik (FK statis), metode probablistik (FK dinamis) serta probabilitas kelongsoran, berdasar Kepmen ESDM No. 1827 tahun 2018, dimana untuk lereng keseluruhan dengan keparahan longsor tinggi, batas nilai FK statis 1.3, nilai FK dinamis minimal 1.1, dan stabilitas PK maksimal 5%. Berikut merupakan kriteria Nilai FK dan PK Standar Kementerian ESDM No. 1827 Tahun 2018.

Tabel 2. Standard faktor keamanan statis, dinamis dan probabilitas longsor Keputusan Menteri ESDM No. 1827 Tahun 2018

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (<i>Consequences of Failure/CoF</i>)	Kriteria dapat diterima		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (Min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (Min)	Probabilitas Longsor (<i>Probability of Failure</i>) PoF ($FK \leq 1$) (Max.)
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%

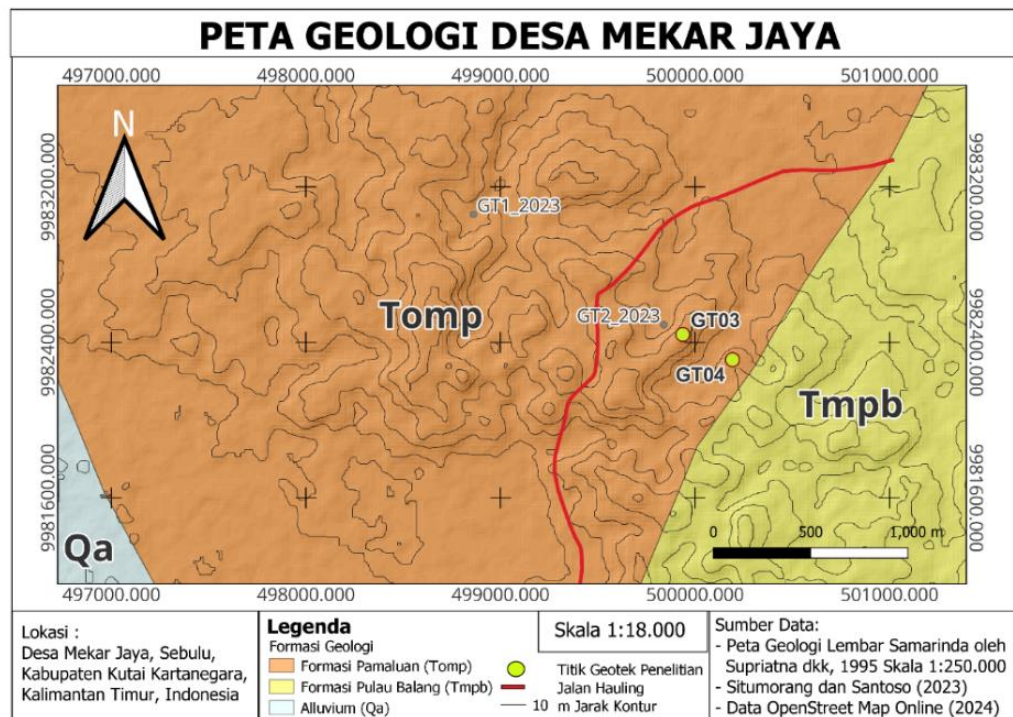
Lereng keseluruhan	Rendah	1.2-1.3	1.0	10%
	Menengah	1.3	1.05	10%
	Tinggi	1.3-1.5	1.1	5%

KONDISI GEOLOGI DAN GEOLOGI TEKNIK

Berdasarkan Peta Geologi Regional lembar Samarinda Kalimantan Supriatna dkk (1995) bahwa dua titik lokasi penelitian (GT03 dan GT04) masuk dalam formasi batuan, Pamaluan (Tomp) (lihat gambar 1). Hasil pengeboran geoteknik yang telah dilakukan, daerah penelitian memiliki litologi batulempung, batulanau, batuserpih dan Sebagian kecil batu kalkarenit dan batubara dengan struktur sedimen dominan laminasi. Pemilihan lima titik tersebut pada formasi

Pamaluan dimaksud agar dapat menganalisis stabilitas lereng pada formasi yang sama.

Secara geologi Teknik, daerah penelitian terbagi atas tanah, batu lempung, batu serpih, batu pasir lanauan, batu pasir *greywacke*, batu gamping kalkarenit dan batubara. Pembagian tersebut berdasarkan pada karakteristik kekerasan batuan, dimana kekuatan batuan di daerah penelitian beragam mulai dari S1 (*very soft clay*) hingga R2 (*weak rock*). Batuan di daerah penelitian didominasi kekuatan *weak rock*.



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian (Sumber: Situmorang dan Santoso, 2023; Data Openstreet Map Online, 2024)

Titik GT03 termasuk dalam satuan morfologi Perbukitan Denudasional (D1) mempunyai sudut kemiringan lereng 4 % – 6 % (Landai) dengan ketinggian 81 m dapl. Litologi disekitar titik GT03 didominasi Perbukitan yang terlihat telah mengalami denudasi sehingga terbentuk puncak perbukitan (antiklinal) yang puncaknya hampir datar memanjang dari utara ke selatan. Litologi disekitar titik GT03 didominasi litologi batu lempung yang berlaminasi dengan batu serpih, batu lanau, batu pasir dan kalkarenit. Terdapat nodul

napal pada litologi batuan yang massive. Pada beberapa kedalaman ditemukan batuan kaya karbon dengan ditandai dengan warna abu-abu kegelapan (Gambar 2). Tidak terdapat aliran sungai di titik GT03, titik GT03 berdekatan dengan punggung utama dari perbukitan terkikis. Punggungan utama pada titik GT03 akan digunakan sebagai *highwall* dari rencana PIT yang berada di sebelah timur dari titik GT03 hingga desain rencana lereng tambang pada titik GT04.



Gambar 2. Kondisi Lokasi Titik GT03. Garis coklat, kemiringan lereng dari utara ke selatan.

Titik GT04 (Gambar 3.5) termasuk dalam satuan morfologi Lereng kaki (D7) mempunyai sudut kemiringan lereng 6 % – 7 % (Landai) dengan ketinggian 76 m dpal. Litologi disekitar titik GT03 didominasi lereng hampir datar yang terlihat sebagai wilayah tebing lembah (sinklinal). Berdasarkan analisis pada peta rupa bumi dan pengamatan di lapangan, lokasi GT04 secara umum termasuk kedalam klasifikasi bentuklahan Verstappen (1975) yaitu bentuklahan asal denudasional (D), lebih detail titik GT04 termasuk kedalam Lereng kaki (D7) dari

Perbukitan Denudasional. Litologi disekitar titik GT04 didominasi litologi batu lempung yang berlaminasi dengan batu serpih, batu lanau, batu pasir, batu bara (59 cm), calcarenite dan packstone. Terdapat nodul napal pada litologi batuan yang massive. Pada beberapa kedalaman ditemukan batuan kaya karbon dengan ditandai dengan warna abu-abu kegelapan. Pengeboran pada titik ini ditunjukkan untuk menyelidiki stabilitas rencana penambangan PIT X. Analisis yang dilakukan menggunakan metode deterministik dan probabilistik.



Gambar 3. Kondisi Lokasi Titik GT04

Proses pelapukan di area ini tidak berkembang dengan baik, ditandai dengan beberapa litologi batuan yang masih segar tersedia dilapangan. Tidak ada aliran sungai di area titik GT04, sungai terdekat berada pada jarak 120 meter ke arah barat laut, dengan orde 1, merupakan pola pengaliran Subdendritik. Pola ini dipengaruhi oleh bentuk

morfologi dari titik GT04 yang menunjukkan bentuk lembah perbukitan.

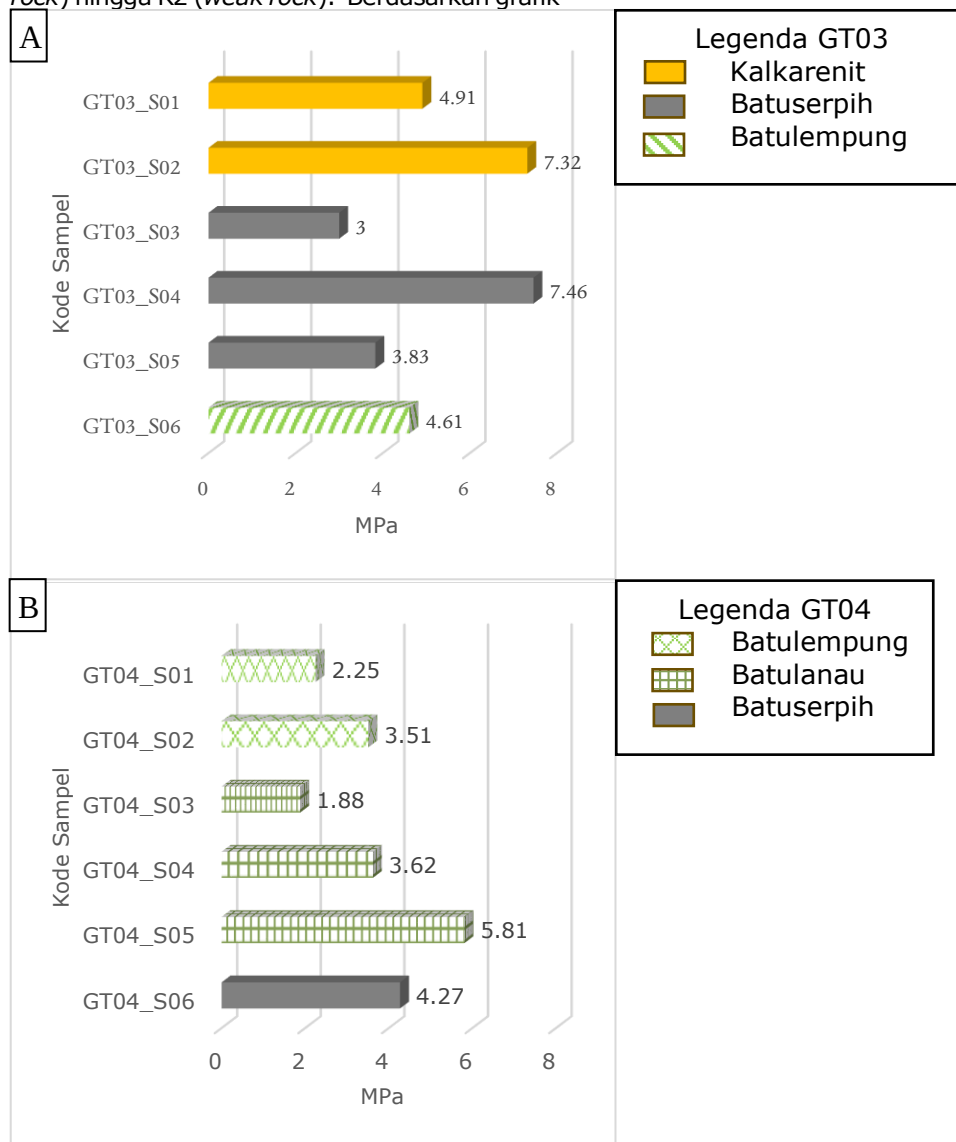
HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai Kuat Tekan Batuan Utuh

Pengambilan sampel pada kedua titik dilakukan menggunakan Pengeboran Geoteknik yang tersebar dari kedalaman 0-50 meter. Sampel

yang diambil harus mewakili dari setiap litologi batuan yang ada dari setiap rentang kedalaman. Litologi batuan di daerah penelitian secara berurutan didominasi oleh batulempung, batupasir, batulanau dan batuserpih, dengan beberapa lapisan kalkarenit dan batubara. Struktur batuan dari lapisan atas hingga ke bawah memiliki pola laminasi, perlapisan, hingga masif. Kemiringan batuan berdasarkan pengamatan visual dari struktur geologi yang terlihat pada bor inti (sambungan, bidang kontak atau bidang perlapisan) berkisar antara 10° hingga 25° . Batuan di daerah penyelidikan berdasarkan pengujian kuat tekan batuan utuh berada pada kisaran 1.88 – 7.46 MPa. Batuan terkeras adalah batupasir lanauan pada Sampel GT03_S04 (7,46 MPa) dan terlunak adalah batulanau berwarna abu-abu terang pada kedalaman 21,99-22,39 meter titik bor GT04 (1.88 MPa) (Gambar 4). Batuan pada daerah penelitian termasuk kategori R1 (*very weak rock*) hingga R2 (*weak rock*). Berdasarkan grafik

kedalaman dan nilai kuat tekan batuan utuh (Tabel 3) diketahui bahwa faktor tingkat kekerasan batuan pada daerah penelitian tidak dipengaruhi oleh kedalaman batuan. Secara garis besar sampel batu di GT04 memiliki nilai kuat tekan batuan utuh lebih rendah dibanding sampel batu di GT03. Hal ini dikarenakan, batu Kalkarenit yang memiliki sementasi yang kuat dari karbonat, serta batuserpih pada GT03 merupakan hasil dari perselingan laminasi antara kalkarenit dan batu lempung yang menyerpih setiap 1-2 cm. Sedangkan, titik GT04 didominasi oleh batulanau yang memiliki kekerasan batuan sangat lemah yaitu 1.88 – 5.81 MPa dan tidak terdapat litologi yang butirannya tersemenkan oleh karbonat. Batu serpih di GT04 merupakan hasil perselingan dari batulanau dan batulempung yang menyerpih setiap 1-2 cm. Secara nilai kuat tekan batuan utuh, GT03 memiliki dasar litologi penahan longsor yang lebih kuat dibanding GT04.



Gambar 4 Hasil pengujian kuat tekan batu utuh di Titik GT 03 (A) dan titik GT04 (B).

Hasil pengujian sampel sebagaimana di laboratorium yang dituangkan di dalam tabel 3 menunjukkan kekuatan massa tanah dan batuan berkisar 1,88 Mpa – 7,46 Mpa yang artinya kondisi massa batuan sangat lemah. Berdasarkan klasifikasi metode penggalian dalam hubungannya dengan kekerasan dan kekuatan batuan (Dessureault

2006), maka sistem penggalian yang dapat dilakukan pada material dengan kekerasan 1,88 – 5 MPa adalah penggaruan ringan, sedangkan material yang memiliki kekerasan 5 – 7,46 MPa harus dilakukan penggaruan berat. Untuk efisiensi pemberaian batuan dapat disarankan melakukan peledakan.

Tabel 3. Hasil Pengujian Unconfined Compressive Strength pada Titik GT03 dan GT04

No	Kode Sampel	Litologi	Kedalaman		UCS	Kekerasan
			Dari (m)	Ke (m)	(MPa)	
1	GT03_S01	Kalkarenit	6,83	7,23	4,91	R1
2	GT03_S02	Kalkarenit	15,5	15,9	7,32	R2
3	GT03_S03	Batuserpih	24,1	24,5	3	R1
4	GT03_S04	Batuserpih	32,7	33,1	7,46	R2
5	GT03_S05	Batuserpih	39,2	39,6	3,83	R1
6	GT03_S06	Batulempung	49,6	50	4,61	R1
7	GT04_S01	Batulempung	4	4,4	2,25	R1
8	GT04_S02	Batulempung	15,4	15,8	3,51	R1
9	GT04_S03	Batulanau	21,99	22,39	1,88	R1
10	GT04_S04	Batulanau	32,33	32,73	3,62	R1
11	GT04_S05	Batulanau	39,28	38,68	5,81	R2
12	GT04_S06	Batuserpih	48,13	48,53	4,27	R1

Hasil uji kuat tekan utuh pada sampel GT03 dan GT04, diketahui bahwa litologi batuserpih merupakan batuan penyusun utama, dimana pada titik GT03 berada diantara kedalaman 24,1-39,6 m dengan UCS antara 3-7,46 MPa, sedangkan pada GT04 berada pada kedalaman 48,13 meter kebawah dengan UCS 4,27 MPa. Batulanau merupakan batu dengan kekuatan UCS terlemah yang terdapat di GT04 pada kedalaman 21-39 m dengan nilai UCS 1,88-5,81 MPa. Semakin dalam batulanau pada titik GT04 diketahui berbanding lurus dengan semakin kerasnya kekuatan batulanau.

Analisis Kestabilan Lereng

Berikut merupakan pendekatan dan asumsi untuk analisis kemantapan lereng, yaitu: model lereng terdiri dari batulempung, batupasir, batulanau dan kalkarenit; metode perhitungan menggunakan analisis dinamis *Limit Equilibrium Method* dengan tinggi muka airtanah mengikuti tinggi permukaan lereng; nilai karakteristik rata-rata digunakan untuk setiap lapisan material berdasarkan hasil pengujian laboratorium; hanya perlapisan batuan yang diperhitungkan dalam struktur geologi; *disturbance factor* (D) dianggap 1 (Li dkk, 2011), dengan mempertimbangkan kegiatan peledakan di sekitar lereng; koefisien gempa menggunakan data PGA lokasi pengeboran; pembebanan di atas lereng didistribusikan secara merata dan

triangular dengan beban maksimal 500 kPa; ketinggian lereng yang dimodelkan maksimal 55 meter. Analisis lereng timbunan yang digunakan pendekatan berdasarkan jenis litologi, kedalaman, serta sifat fisik dan mekanik yang memiliki variasi yang relatif kecil. Lereng timbunan diasumsikan berada dalam keadaan setengah jenuh.

Estimasi dalam permukaan airtanah dari pengukuran analisis stabilitas lereng pada penelitian ini yaitu 2 meter dengan asumsi terjadi penurunan muka airtanah selama pembukaan lubang tambang. Bidang longsoran yang akan terjadi adalah longsoran busur untuk lapisan batuan yang memiliki kekuatan massa batuan keras hingga sangat keras. Faktor pengontrol yang dapat menyebabkan longsoran non busur adalah adanya bidang-bidang diskontinyu (Martin dan Stacey, 2018). Bidang-bidang diskontinyu dari hasil pemboran tidak dapat diketahui secara persis mengingat akurasi dari pembacaan hasil pemboran yang tidak akurat. Peristiwa ini akibat proses mekanis selama pemboran dan pengambilan sampel dari *core barrel* yang dapat menyebabkan sampel menjadi patah bahkan hancur (Withtaker, 1985). Perhitungan bidang diskontinyu pada analisis kestabilan lereng hanya bidang perlapisan antar batuan.

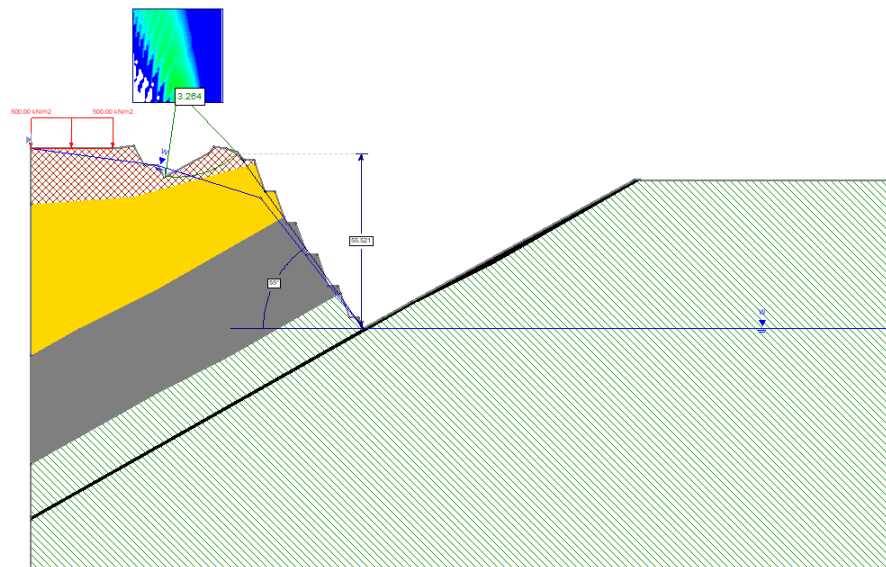
Analisis Deterministik

Pengeboran geoteknik pada titik GT03 diambil untuk dapat mewakili data geoteknik pada daerah PIT X. Parameter kuat geser tanah dan batuan yang digunakan yaitu parameter residual pada kondisi batuan lapuk. Lima tipe material penyusun dari hasil pengeboran dititik GT03 yaitu: tanah, kalkarenit, batuserpih, batulempung dan batubara. Berdasarkan pada hasil parameter-parameter yang digunakan untuk analisis deterministik (lihat Tabel 4), diketahui Kohesi batu kalkarenit di GT03 merupakan yang tertinggi yaitu 606,53 kPa, disusul batuserpih dengan 344,44 kPa. Sudut geser tertinggi di GT03 yaitu dari batulempung yaitu 39,93°.

Berdasar hasil dari pengolahan parameter tersebut diketahui lereng geometri yang direncanakan pada ketinggian 47-61 m dengan sudut lereng keseluruhan sebesar 40-63° menghasilkan FK Statis yang aman yaitu pada nilai 3,26-3,73. Hasil analisis deterministik pada titik GT03 menunjukkan bahwa lereng memiliki kohesi dan sudut geser yang kuat untuk membuat geometri lereng yang diinginkan dari rencana yang ditawarkan pada ketinggian 47-61 meter (lihat Tabel 6). Gambar 5 merupakan hasil analisis yang memperlihatkan geometri lereng terhadap daerah PIT X di sebelah barat titik pengeboran.

Tabel 4. Parameter analisis deterministik titik bor GT03

Tipe Material	Simbol	Bobot isi (kN/m ³)	Kohesi (kPa)	Sudut geser (Derajat)
Tanah		22,21	55,3	18,35
Kalkarenit		22,21	606,53	39,26
Batuserpih		22,93	344,44	37,21
Batulempung		22,27	240,03	39,93
Batubara		16	40,0	24



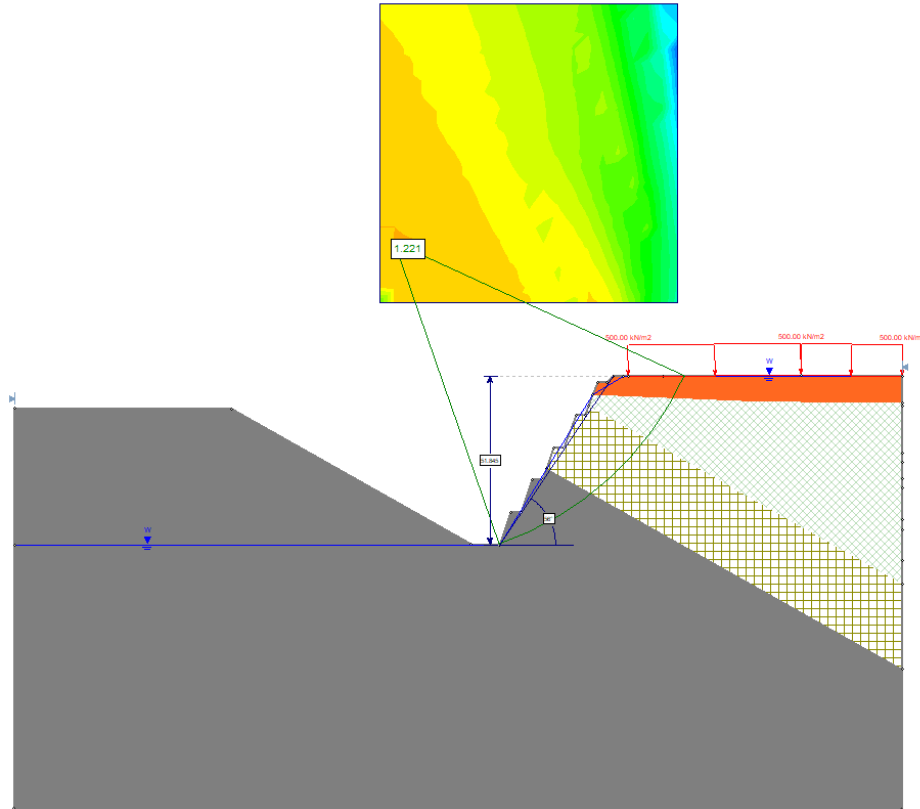
Gambar 5. Analisis deterministik lereng GT03

Pengeboran pada titik GT04 bertujuan untuk menyelidiki stabilitas rencana penambangan Pit Y. Parameter untuk analisis deterministik di titik GT04 menggunakan input data litologi batuan, bobot isi, kohesi dan sudut geser yang terdapat pada Tabel 5. Batulanau merupakan penyusun batuan utama pada titik GT04 dengan kohesi dan sudut geser terendah pada penelitian ini yaitu masing-masing 192,55 kPa dan 37,21°. Hasil analisis

deterministik pada tabel 5 menunjukkan bahwa lereng hanya stabil pada ketinggian maksimal 51,7 meter dengan kemiringan lereng keseluruhan sebesar 48° yang mana FK lereng maksimal 1,3. Berdasarkan analisis deterministik, lereng GT04 untuk lereng tambang pit Y pada sudut lereng tunggal 70-80° tidak termasuk kedalam kriteria aman (lihat Tabel 6), batas aman sudut lereng tunggal maksimal di titik GT04 yaitu 60°.

Tabel 5. Parameter analisis deterministik titik bor GT04

Tipe Material	Simbol	Bobot isi (kN/m ³)	Kohesi (kPa)	Sudut geser (Derajat)
Tanah		13,73	55,3	18,35
Batulempung		22,73	219,57	39,26
Batulanau		22,74	192,55	37,21
Batuserpih		22,98	281,81	39,93



Gambar 6. Analisis deterministik lereng GT04

Tabel 6. Geometri lereng optimal berdasarkan variasi tinggi dan kemiringan lereng yang menghasilkan FK statis 1,00 – 3,73

Kode	Tinggi (m)	Slope (°)	Overall slope (°)	FK Statis
GT03	47	50	40	3,73
	52	60	49	3,26
	55	70	55	3,26
	61	80	63	3,43
GT04	50,88	50	41	1.39
	51,7	60	48	1.30
	51,8	70	56	1.22
	51,88	80	63	1.00

*warna merah muda menunjukkan lereng tidak memenuhi kriteria aman

Analisis Probabilistik

Analisis probabilistik pada penelitian ini menggunakan tipe keruntuhan kriteria *Mohr-Coloumb* untuk batuan lemah dan tanah (Rafiei Renani dan Martin 2020, Hoek, 1990). Hasil analisis probabilistik pada lereng GT03

dengan parameter kuat geser yang digunakan sebagaimana yang tercantum pada Tabel 8. Secara keseluruhan, Kohesi dan sudut geser pada Titik GT03 merupakan yang tertinggi yaitu 408,89 kPa dan 39,35°. Analisis probabilistik pada titik GT03 pada

rencana lereng PIT X (gambar 7a) keseluruhan pilihan geometri lereng yang menunjukkan bahwa lereng sepenuhnya aman dengan kriteria FK dan PK pada tersedia (lihat Tabel 7).

Tabel 7 Parameter masukan yang digunakan pada analisis probabilistik titik GT03 dan GT04

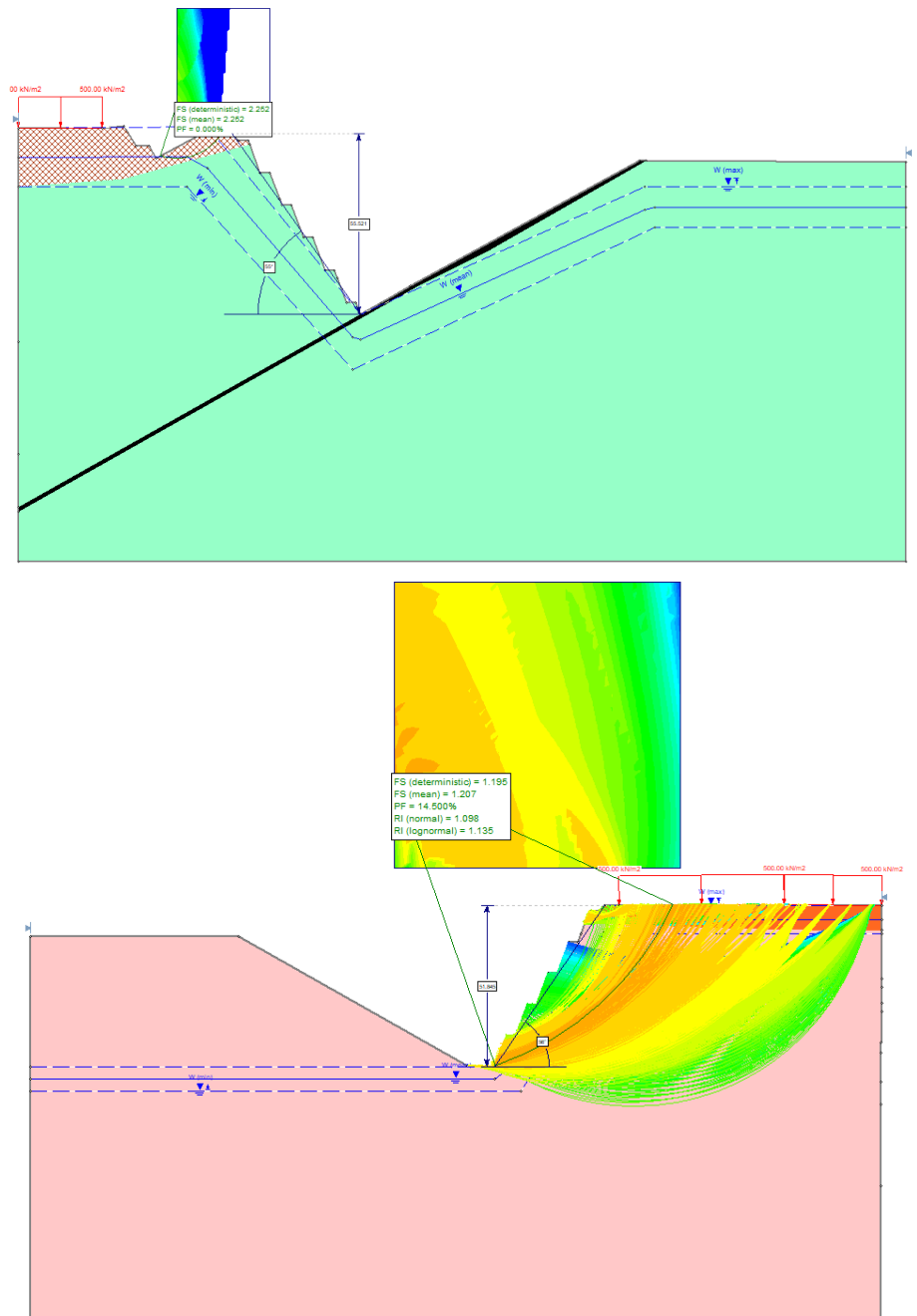
Titik GT03				
Tipe Material	Simbol	Bobot isi (kN/m ³)	Kohesi (kPa)	Sudut geser (Derajat)
Tanah		22,21	55,3	18,35
Batubara		16	40	24
Keseluruhan		22,79	408,89	39,53
Titik GT04				
Tipe Material	Simbol	Bobot isi (kN/m ³)	Kohesi (kPa)	Sudut geser (Derajat)
Tanah		13,73	55,3	18,35
Keseluruhan		22,77	216,43	38,35

Analisis probabilistik yang dilakukan pada lereng GT04 dengan parameter kuat geser sebagaimana yang tercantum pada tabel 7. Nilai parameter kuat geser yang digunakan adalah kuat geser residual. Hasil analisis probabilistik pada titik GT04 diketahui, Lereng tidak aman pada ketinggian lebih dari 51,8 meter dimana pada penelitian ini diketahui dengan ketinggian 51,8 meter dengan sudut lereng keseluruhan berkisar 56° diketahui FK dinamis 1,20 namun memiliki Probabilitas Kelongsoran (PK) 14,5%. Sedangkan, pada ketinggian 51,88 meter dengan kemiringan keseluruhan 63 °

memiliki nilai FK dinamis dibawah standar yaitu 1,07 dengan Probabilitas Kelongsoran 31,9%. Dari hasil perhitungan ini yang akan digunakan sebagai rekomendasi dari analisis probabilistik adalah yang memiliki Probabilitas Kelongsoran dengan nilai 0%. Dengan demikian, dapat diketahui bahwa ketinggian geometri lereng dengan kondisi lereng stabil untuk pembuatan rencana lereng Pit Y (Gambar 7b) yaitu pada ketinggian 50,88-51,7 meter dan sudut lereng keseluruhan berkisar 41-48° dimana FK lereng berkisar 1,19-1,25, sedangkan probabilitas kelongsoran 0%.

Tabel 8 Geometri lereng optimal berdasarkan variasi tinggi dan kemiringan lereng titik GT03 dan GT04

Kode	Tinggi (m)	Slope (°)	Overall slope (°)	FK Dinamis	PK (%)
GT03	47	50	41	2,54	0
	52	60	48	2,27	0
	55	70	55	2,25	0
	61	80	63	2,2	0
GT04	50,88	50	41	1,25	0
	51,7	60	48	1,19	0
	51,8	70	56	1,20	14,5
	51,88	80	63	1,07	31,9



Gambar 7. Perhitungan faktor keamanan dinamis dan probabilitas kelongsoran pada (a) GT03 dan(b) GT04

KESIMPULAN

Berdasarkan pengambilan sampel dari pengeboran titik GT03 diketahui bahwa litologi batuan tersusun atas dominasi kalkarenit, batuserpih dan batulempung. Rencana pembuatan geometri lereng pada titik GT03 dirancang untuk menjadi highwall PIT X. Pada titik GT03 Kohesi dari batukalkarenit merupakan yang terkuat yaitu 606,53 kPa dan sudut geser dari batulempung dan kalkarenit yang besar, masing-masing 39,93° dan 39,26 ° sangat berpengaruh terhadap hasil analisis perencanaan lereng tambang Pit X yang aman, hal ini karena semakin besar kohesi maka

material tersebut akan semakin tahan akan gerakan, sedangkan semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan dari luar. Berdasarkan pengambilan sampel dari pengeboran titik GT04 diketahui bahwa litologi batuan tersusun atas dominasi batuserpih, batulanau, dan batulempung. Rencana pembuatan geometri lereng pada titik GT04 dirancang untuk menjadi highwall PIT Y. Batulanau merupakan batuan dengan nilai kohesi terendah yaitu 192,55 kPa dan sudut geser rendah yaitu 37,21. Nilai tersebut berpengaruh terhadap rendahnya nilai total

keseluruhan tipe material pada analisis probabilistik titik GT04, yaitu nilai Kohesi 216,43 kPa. Berdasarkan analisis deterministik dan probabilistik, Titik GT04 masih aman menggunakan desain perencanaan tambang dengan rincian: tinggi lereng 50,88-51,7 meter dan sudut lereng tunggal 50-60°, sudut lereng keseluruhan 41-48° dengan nilai FK statis 1.3-1.39, FK dinamis 1.19-1.25 dan Probabilitas Kelongsoran 0%.

Batuan kalkarenit pada titik GT03 merupakan batuan dengan kohesi terkuat merupakan alasan utama dari kuatnya rencana geometri lereng tambang Pit X. Batuserpih yang ada dibawahnya merupakan selingan dari batulempung dan kalkarenit yang menyerpih, dimana memiliki sementasi karbonat antar laminasi yang mempengaruhi kohesi di titik GT03. Sedangkan batuserpih di titik GT04 merupakan perselingan dari batulempung dan batulanau yang menyerpih tetapi tidak memiliki sementasi yang kuat antar laminasinya. Hal inilah yang menyebabkan nilai kohesi batuserpih di titik GT04 lebih rendah dibanding batuserpih di titik GT03.

Kasus hasil analisis pada Titik GT04 merupakan kasus yang baik untuk mengetahui pentingnya peran analisis Deterministik, Analisis Probabilistik dan Probabilitas Kelongsoran dalam penelitian geoteknik. Seperti yang diketahui, Batas FK Statis minimal yaitu 1,3, Batas FK dinamis minimal yaitu 1,1 dan PK maksimal yaitu 5%. Sedangkan, rencana geometri lereng titik GT04 pada variasi tinggi 51,8 meter, sudut lereng tunggal 70°, dan sudut lereng keseluruhan 56° diketahui memiliki nilai FK dinamis diatas nilai standar yaitu 1,20, dimana nilai ini masih aman, namun nilai Probabilitas Kelongsoran dibawah standard yaitu 14,5%. Dari hasil ini dapat diketahui bahwa nilai FK dinamis atau hasil faktor keamanan dari analisis probabilistik harus divalidasi dengan nilai persentase probabilitas kelongsoran. Sedangkan, secara nilai Faktor Keamanan Statis titik GT04 dengan tinggi 51,8 m memiliki nilai dibawah standar yaitu 1,22. Agar hasil dalam melakukan penyelidikan stabilitas rencana Pit Tambang menjadi maksimal perlu menggunakan ketiga parameter batas nilai faktor keamanan statis, dinamis dan probabilitas kelongsoran secara bersamaan untuk mendapatkan hasil perencanaan desain tambang yang akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2001). *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley & Sons.
- Arif, I. I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama.
- Azizi, M. A., Kramadibrata, S., Wattimena, R. K., & Sidi, I. D. (2013). Probabilistic analysis of physical models slope failure. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 411-418.
- Cheng, H., & Zhou, X. (2015). A novel displacement-based rigorous limit equilibrium method for three-dimensional landslide stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(12), 2055-2066.
- Dessureault, S. (2006). *Rock Excavation*. University of Arizona: Mining and Geological Engineering.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Gurocak, Z., Alemdag, S., & Zaman, M. M. (2008). Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapikaya dam site, Turkey. *Engineering Geology*, 96(1-2), 17-27.
- Fenton, G. A. (1997). *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, ASCE GeoLogan, 97.
- Fredlund, D. G., & Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian geotechnical journal*, 14(3), 429-439.
- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock slope engineering*. CRC press.
- Hoek, E. (1990). Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 27, No. 3, pp. 227-229). Elsevier BV.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267-273.
- Igwe, O., & Chukwu, C. (2018). Evaluation of the mechanical properties and critical slope parameters of mine tailings at Enyigba, South eastern, Nigeria. *International Journal of Geo-Engineering*, 9, 1-25.
- Johari, A., & Mousavi, S. (2019). An analytical probabilistic analysis of slopes based on limit equilibrium methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 4333-4347.
- Juang, C. H., Zhang, J., Shen, M., & Hu, J. (2019). Probabilistic methods for unified treatment of geotechnical and geological uncertainties in a geotechnical analysis. *Engineering geology*, 249, 148-161.
- Khodijah, S., Monica, U. S., Ersyari, J., Khairullah, N., & Sophian, R. I. (2022). Analisis Kestabilan Lereng Menggunakan Metode Kesetimbangan Batas Dalam Kondisi Statis Dan Dinamis Pada Pit X, Tanjung Enim, Sumatra Selatan. *Geoscience Journal*, 6(4), 1030-1037.

- Komadja, G. C., Pradhan, S. P., Oluwasegun, A. D., Roul, A. R., Stanislas, T. T., Laïbi, R. A., ... & Onwualu, A. P. (2021). Geotechnical and geological investigation of slope stability of a section of road cut debris-slopes along NH-7, Uttarakhand, India. *Results in Engineering*, 10, 100227.
- Kormu, S., Sorsa, A., & Amena, S. (2022). Correlation of unconfined compressivestrength (UCS) with compaction characteristics of soils in Burayu Town. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- Li, A. J., Merifield, R. S., & Lyamin, A. V. (2011). Effect of rock mass disturbance on the stability of rock slopes using the Hoek–Brown failure criterion. *Computers and Geotechnics*, 38(4), 546-558.
- Martin, D., & Stacey, P. (Eds.). (2018). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO PUBLISHING.
- Moran, C. J., Lodhia, S., Kunz, N. C., & Huisin, D. (2014). Sustainability in mining, minerals and energy: new processes, pathways and human interactions for a cautiously optimistic future. *Journal of Cleaner Production*, 84, 1-15.
- Morgenstern, N. U., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79-93.
- Phoon, K. K., Prakoso, W. A., Wang, Y., & Ching, J. (2016). Uncertainty representation of geotechnical design parameters. In *Reliability of geotechnical structures in ISO2394* (pp. 67-106). CRC Press.
- Phoon, K. K., Cao, Z. J., Ji, J., Leung, Y. F., Najjar, S., Shuku, T., ... & Ching, J. (2022). Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making. *Soils and Foundations*, 62(5), 101189.
- Pramudianti, E., & Hadmoko, D. S. (2013). Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Model Deterministik untuk Zonasi Rawan Longsorlahandi Sub-das Gintung, Kab. Purworejo. *Jurnal Bumi Indonesia*, 1(3).
- Purwaningsih, R., Sophian, R. I., Mulyo, A., & Firdiansyah, T. (2020). Desain Lereng Stabil Dengan Menggunakan Metode Probabilistik Pada Low Wall Pit Y, PT. Pamapersada Nusantara Site Kideco, Kalimantan Timur. *Geoscience Journal*, 4(4), 283-291.
- Rafiei Renani, H., & Martin, C. D. (2020). Slope stability analysis using equivalent Mohr–Coulomb and Hoek–Brown criteria. *Rock mechanics and rock engineering*, 53(1), 13-21.
- Reale, C., Xue, J., Pan, Z., & Gavin, K. (2015). Deterministic and probabilistic multi-modal analysis of slope stability. *Computers and Geotechnics*, 66, 172-179.
- Rusni, S. O., Sophian, R. I., & Zakaria, Z. (2019). Probabilitas Longsor Pada Lereng Tambang Batubara Terbuka Sisi Sidewall Selatan Pit X, Kalimantan Selatan. *Geoscience Journal*, 3(5), 389-396.
- Schweiger, H. F., Thurner, R., & Pöttler, R. (2001). Reliability analysis in geotechnics with deterministic finite elements—Theoretical concepts and practical application. *International Journal of Geomechanics*, 1(4), 389-413.
- Singh, R. N., & Porter, I. (2017). The role of geotechnics in surface mining operations and post-mining site development. In *Geomechanics and Water Engineering in Environmental Management* (pp. 297-324). Routledge.
- Situmorang, R. M., & 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.
- Steffen, O. K. H., Contreras, L. F., Terbrugge, P. J., & Venter, J. (2008, June). A risk evaluation approach for pit slope design. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-08). ARMA.
- Whittaker, A. (1985). Retrieval and Sampling of Cores. In *Coring Operations: Procedures for Sampling and Analysis of Bottomhole and Sidewall Cores* (pp. 51-90). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Wroth, C. P., & Wood, D. M. (1978). The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(2), 137-145.
- Zhou, X. P., & Cheng, H. J. E. G. (2013). Analysis of stability of three-dimensional slopes using the rigorous limit equilibrium method. *Engineering Geology*, 160, 21-33.