



**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 18, No.3  
Desember 2020**

**OPTIMASI LERENG *HIGHWALL* TAMBANG BATU BARA TERBUKA ASAM ASAM PIT "X"  
BERDASARKAN MOHR–COULOMB *FAILURE CRITERION***

**Aditya Bayu Prajnanta<sup>1</sup>, Felix Sihombing<sup>1</sup>, Urwatul Wusqa<sup>1</sup>, Teten Risyana<sup>2</sup>, Prima Laksana Bramantyo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Program Studi Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Depok, 16424, Indonesia

<sup>2</sup> Engineering Department, PT. Arutmin Indonesia, Jl. Jenderal Sudirman No.86, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur 76114

Corresponding author: [felix.sihombing@ui.ac.id](mailto:felix.sihombing@ui.ac.id)

**ABSTRAK**

Kestabilan lereng merupakan aspek yang perlu diperhatikan dalam tambang batubara terbuka Asam Asam untuk mencegah terjadinya kelongsoran. Kestabilan lereng dapat dipelajari menggunakan analisis kesetimbangan batas yang didasarkan dari teori Mohr–Coulomb *Failure Criterion* untuk mengetahui respons dari material batuan terhadap suatu gaya yang diberikan. Dari analisa tersebut tingkat kestabilan di lereng pertambangan dapat dikuantifikasi dengan mengukur nilai faktor keamanan (FK) dari sebuah lereng. Pada penelitian ini, penulis melakukan analisis kestabilan lereng pada tiga desain lereng highwall tambang batu Bara terbuka Asam Asam di Pit "X" yang dioperasikan oleh PT. Arutmin Indonesia, dengan bantuan perangkat lunak Geostudio SLOPE/W dan metode perhitungan nilai kesetimbangan batas Morgenstern–Price. Analisis pada ketiga lereng menunjukkan bahwa faktor keamanan dari desain lereng masih relatif tinggi dibanding standar perusahaan, sehingga penulis dapat memberi rekomendasi berupa optimasi desain. Optimasi desain lereng tambang bertujuan mengurangi jumlah material yang tidak diinginkan namun masih memperhatikan nilai standar faktor keamanan dari tiap lereng. Penulis menemukan bahwa memungkinkan dilakukan optimasi dari ketiga lereng dengan mengurangi lebar bench tiap lereng dari 10 meter menjadi 7 meter, sehingga pengurangan lebar bench membuat sudut keseluruhan masing-masing lereng menjadi semakin tegak dengan kenaikan sudut sebesar 4°. Dengan dilakukannya optimasi, maka pihak perusahaan dapat mengurangi jumlah material yang tidak diinginkan dalam proses pengupasan, sehingga dapat mengurangi waktu dan biaya yang dibutuhkan dalam kegiatan ekstraksi batu bara.

**Kata Kunci:** kestabilan lereng; faktor keamanan; kesetimbangan batas; Mohr–Coulomb *failure criterion*; optimasi lereng.

**ABSTRACT**

*Slope stability is an important aspect that need to be understood to avoid the possibility of a slope failure in Asam Asam open-pit coal mine Slope stability could be studied by using the limit equilibrium method which uses the Mohr–Coulomb Failure Criterion to understand the reaction of rock under external forces and pressure. By using the limit equilibrium analysis, the safety of a slope could be quantified into a value called the factor of safety (FoS). In this research, the slope stability of three highwall slope from Pit "X" of Asam Asam open-pit mining area operated by PT. Arutmin Indonesia are analyzed with the help of Geostudio SLOPE/W software, using Morgenstern–Price limit equilibrium calculation method. Analysis of the slopes shows that the factor of safety of the three slopes still far exceeded the standard that are set by PT. Arutmin Indonesia. The writer recommends that the three slope designs are to be optimized further. The purpose of this design optimization is to modify the slope design so the amount of unwanted material or overburden could be further reduced with respect to the safety standards of the slope. By reducing the length of the slope bench from 10 meters to 7 meters, the slope overall angle rose by 4°, becoming more upright. This new optimized design will have less amount of unwanted material that are included during the coal extraction process; therefore, the extraction time and operating cost would be reduced.*

**Keywords:** slope stability; factor of safety; limit equilibrium; Mohr–Coulomb failure criterion; slope optimization.

**PENDAHULUAN**

Ketidakstabilan lereng merupakan salah satu potensi bahaya yang dapat terjadi di daerah

pertambangan batu bara terbuka. Lereng menjadi tidak stabil dikarenakan sifat dari massa batuan beserta faktor eksternal yang

mempengaruhinya (Pantelidis, 2009). Semakin dalamnya kegiatan penambangan maka massa batuan pada lereng dapat berkurang kestabilannya yang dapat menimbulkan kegagalan pada lereng yaitu terjadinya bencana longsor.

Stabilitas lereng dapat dipelajari menggunakan analisis kesetimbangan batas (*limit equilibrium*). Analisis ini didasarkan oleh keseimbangan gaya dalam massa batuan di lereng dengan menggunakan teori Mohr-Coulomb *Failure Criterion* mengenai respons material batuan terhadap suatu gaya yang diberikan (Renani et al, 2019). Dari analisa tersebut potensi longsor di lereng pertambangan dapat dikuantifikasi dengan mengukur nilai faktor keamanan (FK) dari sebuah lereng (Chu et al, 2019).

Terdapat beberapa metode perhitungan yang dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan dari sebuah lereng, salah satu metode yang digunakan adalah metode kesetimbangan batas oleh Morgenstern dan Price (1965) yang mempertimbangkan momen gaya dan gaya normal yang bekerja pada lereng. Dari nilai faktor keamanan sebuah lereng, peneliti dapat mengetahui apakah desain dari sebuah tambang yang diciptakan cukup stabil untuk dilakukan kegiatan penambangan.

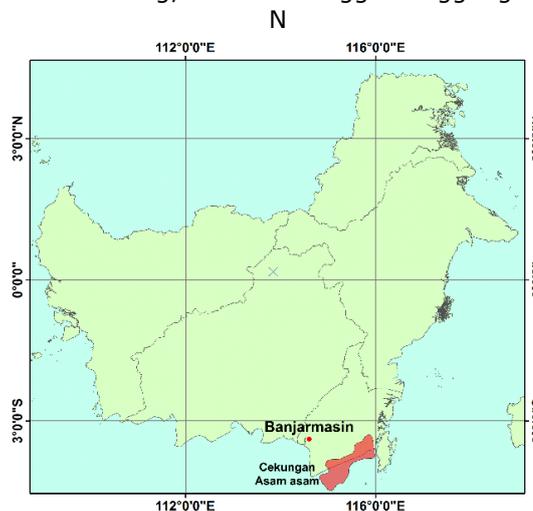
Informasi mengenai faktor keamanan berguna untuk memberi rekomendasi optimasi desain. Desain lereng tambang yang optimal adalah desain lereng yang di buat seekonomis mungkin dalam perancangannya untuk mengurangi jumlah material yang tidak diinginkan (*waste*) dalam proses operasi penambangan (Contreras, 2015). Dengan berubahnya nilai komoditas batu bara seiring waktu dan meningkatnya biaya penambangan, optimasi lereng tambang menjadi kegiatan yang dinilai semakin penting (Evin et al, 2015). Dikarenakan pengambilan material yang tak diinginkan berkurang, maka

desain lereng menjadi lebih ekonomis, dan pihak penambang dapat menghemat waktu dan biaya dalam proses jalannya penambangan.

Daerah penelitian terletak pada Tambang Asam Asam Pit "X", Kabupaten Tanah Laut, Provinsi Kalimantan Selatan. Pada tambang ini sudah sering dilakukan kegiatan optimasi lereng, namun umumnya digunakan data litologi dari pengeboran. Pada studi ini peneliti akan melakukan optimasi berdasarkan data litologi yang diperoleh dari kegiatan pemetaan permukaan. Kegiatan pemetaan permukaan ini diharapkan akan menunjukkan variasi litologi dan ketebalan yang berbeda dari data hasil pengeboran. Dari data pemetaan, peneliti akan membuat sebuah model penampang yang dapat dianalisis kestabilan lerengnya, lalu peneliti akan membuat rekomendasi optimasi berdasarkan data pemetaan yang telah diperoleh.

### TINJAUAN TEORITIS

Lokasi penelitian secara geologi terletak di Cekungan Asem-asem, Kalimantan Selatan, yang termasuk ke dalam Lembar Balikpapan dalam Peta Geologi Regional Indonesia. Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Balikpapan oleh Sikumbang dan Heryanto (1994) dan Indonesia Basin Summaries oleh LEMIGAS (2006), formasi yang dapat ditemukan di Cekungan Asem-asem pada daerah penelitian adalah Formasi Warukin dan Endapan Alluvium. Cekungan Asem-asem merupakan cekungan asimetris dengan tren timur laut - barat daya yang terletak sebelah tenggara dari Pegunungan Meratus. (LEMIGAS, 2006). Cekungan terletak di bagian selatan Pegunungan Meratus, bagian tenggara dari Cekungan Barito. Pada timur cekungan, terdapat patahan normal mayor dengan eksten dari bagian utara menuju selatan melalui bagian barat dari Pulau Laut hingga Punggungan Laut (*Laut Ridge*).



**Gambar 1.** Lokasi Cekungan Asem-asem. (Badan Geologi, 2009 dengan modifikasi)

Untuk mengetahui nilai sifat fisik dan mekanik batuan, dalam penelitian dilakukan dua jenis pengujian, yaitu uji kuat geser langsung (*direct shear test*) dan uji sifat fisik (*physical properties test*). Uji kuat geser langsung dilakukan untuk mendapatkan nilai sifat mekanik batuan berupa kuat geser dan sudut geser dalam, dan uji sifat fisik untuk mendapat nilai sifat fisik dari batuan berupa berat jenis batuan. Nilai-nilai yang didapat dari pengujian ini akan digunakan pada tahap analisis kestabilan, dikarenakan sifat mekanik dan sifat fisik dari sebuah batuan mempengaruhi respons batuan dalam sebuah lereng yang akan mempengaruhi kestabilannya.

Uji kuat geser langsung atau juga dikenal sebagai *direct shear test* merupakan pengujian untuk parameter kuat geser paling tua dan paling sederhana. Uji ini didasarkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) nomor 2813:2008 mengenai "Cara uji kuat geser langsung tanah terkonsolidasi dan terdrainase" dan SNI 2824:2011 mengenai "Cara uji geser langsung batu". Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat *shear box*.

Alat pengujian *shear box* terpisah menjadi dua bagian. Gaya normal diberikan di bagian atas *shear box*, sedangkan gaya geser (*shear force*) diberikan dengan menggerakkan kedua bagian *box* yang terpisah, dimana setengah bagian digerakkan secara berlawanan arah satu sama lain hingga terjadi kehancuran pada sampel. Dalam uji kuat geser langsung pengujian dapat dikontrol oleh tegangan maupun regangan sesuai dengan perangkat yang digunakan. Pada pengujian yang dikontrol oleh tegangan, tegangan geser diberikan secara bertahap hingga sampel mengalami kegagalan (*failure*). Kegagalan akan terjadi di bidang pemisah di alat *shear box*. Setelah setiap kali pemberian beban selesai akan diukur perpindahan geser. Perubahan ketinggian mengindikasikan adanya perubahan volume, dan perubahan ini dapat diukur oleh alat *horizontal dial gauge* yang mengukur perubahan vertikal. Pada pengujian sampel yang dikontrol oleh regangan, perpindahan geser diberikan secara konstan pada setengah bagian dari *box* oleh sebuah mesin penggerak. Perpindahan geser diperlihatkan oleh alat *horizontal dial gauge*, sedangkan gaya geser diperlihatkan oleh alat *horizontal proving ring* atau *load cell*. Pengujian kuat geser langsung dilakukan berulang terhadap sampel dengan pemberian tegangan normal yang berbeda-beda. Tegangan normal dan kuat geser puncak (*peak shear strength*) dan kuat geser sisa (*residual shear strength*) didapat dari pengujian yang berulang akan digambarkan menjadi sebuah grafik untuk menentukan

parameter kuat geser. Berdasarkan Das & Sobhan (2016) perhitungan tegangan dalam pengujian DS dapat dilihat pada Persamaan 1 dan 2.

#### Tegangan normal ( $\sigma_n$ )

$$\frac{\text{Gaya normal}}{\text{Luas sampel}} = \frac{W \cos \phi_g}{A} \quad (1)$$

#### Tegangan geser ( $\tau_f$ )

$$\frac{\text{Gaya geser}}{\text{Luas sampel}} = \frac{W \sin \phi_g}{A} \quad (2)$$

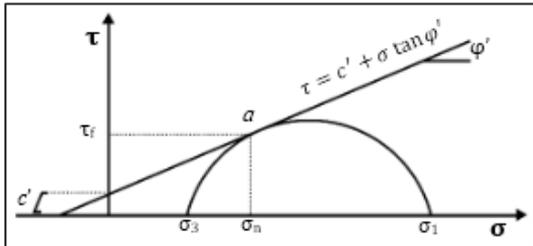
Selain pengujian kuat geser langsung, dilakukan juga uji sifat fisik batuan. Uji sifat fisik batuan merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui nilai densitas dan berat jenis batuan. Uji ini didasarkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) 1964:2008 mengenai "Cara Uji Berat Jenis Tanah". Untuk mengetahui densitas batuan perlu dihitung berat sampel dalam kondisi-kondisi tertentu. Sampel batuan ditimbang untuk diketahui berat alaminya ( $W_n$ ) lalu kemudian diletakkan dalam kondisi lingkungan tersaturasi dengan merendamnya dalam air di alat pendingin *dessicator*. Setelah sampel batuan ditinggal selama 24 jam akan ditimbang ulang dalam air dan didapat nilai berat tersaturasi ( $W_s$ ) dan sampel yang ditimbang tanpa air digunakan untuk mendapat nilai berat jenuh ( $W_w$ ). Untuk mendapat nilai berat sampel dalam keadaan kering, sampel dimasukkan ke oven dan ditinggal selama 24 jam dengan temperatur konstan 90°. Setelah pengeringan selesai maka cawan dapat ditimbang untuk mendapat nilai berat kering ( $W_o$ ).

Setelah perhitungan berat sampel selesai maka nilai densitas dapat diketahui dengan melakukan perhitungan densitas. Pada penelitian ini digunakan nilai densitas alami atau *natural density*, untuk merepresentasikan kondisi yang ada di lapangan. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) mengenai cara uji berat jenis tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2008) perhitungan densitas alami dijelaskan dalam Persamaan 3.

$$\text{Densitas alami} = \frac{W_n}{(W_w - W_s)} \quad (3)$$

Dalam analisis yang dilakukan dalam penelitian, analisis akan mengacu pada teori Mohr-Coulomb *Failure Criterion*. Teori ini menjelaskan kondisi dimana sebuah material isotropis akan mengalami kegagalan (*failure*) saat diberikan tegangan tertentu (Labuz dan Zang, 2012). Hubungan antar kuat geser dan tegangan normal (*principal stress*) dalam sebuah material dapat direpresentasikan dalam sebuah lingkaran Mohr. Pada sebuah lingkaran Mohr, batas-batas dalam sumbu tegangan normal ( $\sigma$ ) dalam sebuah sumbu x diwakilkan oleh nilai tegangan  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$ . Mohr-Coulomb *failure criterion* merupakan garis yang dibentuk bersinggungan dengan lingkaran Mohr dalam titik *a*. Garis ini memisahkan kondisi material dalam kondisi

utuh dan kondisi dalam kegagalan atau *failure*. Jika lingkaran melebihi garis tersebut, maka material dalam kondisi *failure*. Kemiringan dari garis ini diwakilkan nilai sudut geser dalam (*internal friction angle*) dalam  $\phi'$ , dan garis *failure criterion* memotong kuat geser dalam sebuah sumbu y di nilai  $c$ , yaitu nilai kohesi dari suatu material.



**Gambar 2.** Mohr-Coulomb *failure criterion* (Hamdan, 2012 dengan modifikasi)

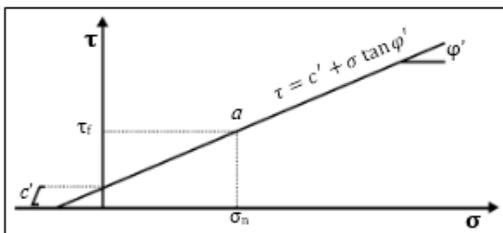
$$\tau = c' + \sigma \tan \phi'$$

(4)

$$\tau = c' + \frac{W \cos \phi_p \tan \phi}{A}$$

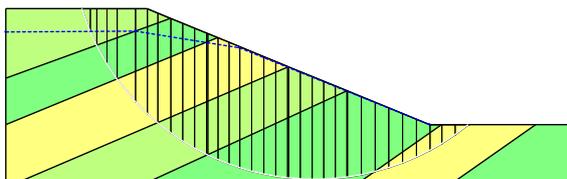
(5)

Pada metode kuat geser langsung, tidak terdapat nilai  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$  sehingga tidak terbentuk lingkaran pada grafik, sehingga grafik akan terbentuk seperti Gambar 3.



**Gambar 3.** Pada uji kuat geser langsung, Mohr-Coulomb *failure criterion* tidak mengandung nilai  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$  (Wyllie dan Mah, 2004 dengan modifikasi)

Analisis kesetimbangan batas atau *limit equilibrium* merupakan analisis yang paling umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng. Pada analisis ini, lereng diasumsikan terbagi menjadi beberapa bagian menjadi sebuah sayatan-sayatan (*slice*). Jika nilai keseimbangan pada tiap sayatan memadai, maka disimpulkan bahwa bidang gelincir juga akan seimbang (Wyllie dan Mah, 2004). Ilustrasi pembagian sayatan dalam lereng dapat dilihat pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Ilustrasi pembagian sayatan dalam analisis kesetimbangan batas pada perangkat lunak Geostudio SLOPE/W

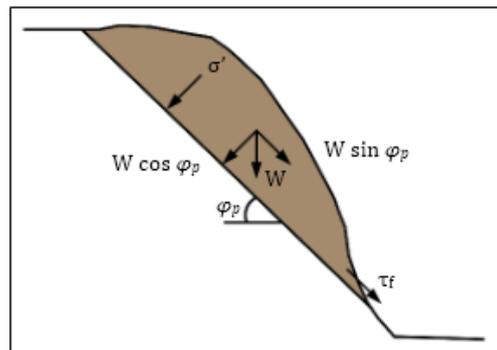
Berdasarkan diagram gambar 2, garis *failure envelope* dapat di deskripsikan sebagai sebuah persamaan kuat geser ( $\tau$ ) (Hamdan,2012) pada Persamaan 4. Nilai  $\sigma$  disubstitusikan dengan nilai tegangan normal pada Persamaan 1, sehingga menghasilkan Persamaan 5.

Tingkat kestabilan dapat dikuantifikasi menjadi sebuah koefisien yang disebut dengan faktor keamanan (FK). Berdasarkan Wyllie dan Mah (2004) secara sederhana faktor keamanan dari sebuah lereng merupakan perbandingan kuat geser yang menahan bidang gelincir atau disebut gaya penahan (*resisting forces*), dan gaya resultan yang bekerja pada sebuah bidang gelinci yang disebut gaya penggerak (*driving forces*). Gaya penahan dalam perhitungan kestabilan lereng merupakan gaya kuat geser yang menahan bidang gelincir dalam menghambat pergerakan di bidang, dengan perhitungan persamaan kuat geser seperti Persamaan 5. Gaya penggerak merupakan resultan yang bekerja memberi gaya ke arah bidang gelincir, yang dijelaskan dengan persamaan tegangan geser seperti Persamaan 2. Persamaan sederhana ini dapat dilihat pada Persamaan 6, dan ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada lereng dapat dilihat pada Gambar 5.

**Faktor Keamanan (FK)**

$$\frac{\text{Gaya penahan}}{\text{Gaya penggerak}} = \frac{cA + W \cos \phi_p \tan \phi}{W \sin \phi_p}$$

(6)



**Gambar 5.** Gaya yang bekerja pada lereng (Sumber: Wyllie dan Mah, 2004 dengan modifikasi)

Terdapat berbagai pilihan metode perhitungan faktor keamanan, antara lain Metode Fellenius (1927), Metode Bishop (1955), Metode Janbu (1968), Metode Spencer (1967), Metode *Corps of Engineers* (1970) dan Metode Morgenstern dan Price (1965). Secara konsep, semua metode mirip dikarenakan perhitungan nilai faktor keamanan mengikuti konsep persamaan 6. Yang membedakan setiap metode adalah seperti jenis gaya yang diperhitungkan dalam persamaan, yaitu gaya

momen, gaya normal, atau keduanya, bentuk dari sayatan, dan hubungan tegangan normal dan geser antar sayatan.

Metode kesetimbangan batas oleh Morgenstern dan Price (1965) merupakan metode yang memperhitungkan kesetimbangan gaya normal atau juga disebut gaya horizontal ( $F_f$ ) dan momen gaya ( $F_m$ ) yang bekerja di tiap sayatan. Morgenstern dan Price mendasarkan persamaan perhitungannya dari *general limit equilibrium formulation* (GLE) dimana digunakan dua fungsi persamaan faktor keamanan untuk mengetahui rentang nilai gaya normal dan gaya geser pada sebuah sayatan. Satu fungsi akan mengalkulasi momen kesetimbangan ( $F_m$ ) dan fungsi yang lain akan mengalkulasi momen gaya horizontal ( $F_f$ ). Persamaan secara matematis menurut metode Morgenstern dan Price (1965) diekspresikan dalam Persamaan 7.

$$X = E \times \lambda \times f(x) \quad (7)$$

Dimana  $f(x)$  merupakan nilai dari fungsi yang digunakan,  $\lambda$  adalah nilai perbandingan dari dua kurva,  $E$  merupakan gaya normal antar sayatan, dan  $X$  merupakan gaya geser antar sayatan.

Setelah analisis kestabilan sebuah lereng selesai, peneliti dapat memberi rekomendasi untuk mengoptimasi kembali desain dari lereng. Desain lereng tambang yang optimal adalah desain lereng yang di buat seekonomis mungkin dalam perancangannya untuk mengurangi jumlah material yang tidak diinginkan (*waste*) dalam proses operasi penambangan (Contreras, 2015). Dengan berubahnya nilai komoditas batu bara seiring waktu dan meningkatnya biaya penambangan, optimasi lereng tambang menjadi kegiatan yang dinilai semakin penting (Evin et al, 2015).

Sebuah desain lereng dapat dioptimasi dengan cara menegakkan sudut keseluruhan dari desain lereng. Dengan menegakkan desain sebuah lereng, jumlah material tak diinginkan (*waste*) yang terambil dalam proses ekstraksi akan semakin berkurang. Berkurangnya material yang tidak di inginkan akan mempengaruhi *stripping ratio*, yaitu perbandingan jumlah *waste* dengan batu bara yang diambil. Dengan berkurangnya *stripping ratio*, maka biaya dan waktu akan berkurang, sehingga desain lereng akan lebih ekonomis. Namun optimasi dengan menegakkan desain lereng akan menimbulkan peningkatan resiko kegagalan lereng, sehingga diperlukan batasan dalam penegakan sudut lereng supaya optimasi masih memperhatikan kestabilan lereng.

Berdasarkan Contreras (2015), terdapat tiga jenis pendekatan yang dapat digunakan sebagai batasan optimasi, yaitu pendekatan dengan faktor keamanan (*factor of safety*

*approach*), pendekatan dengan probabilitas kegagalan (*probability of failure approach*) dan pendekatan melalui analisis resiko (*risk analysis approach*). Pada penelitian ini, pendekatan yang digunakan adalah berdasarkan faktor keamanan (FK). Nilai FK yang dikategorikan stabil dalam penelitian ini didasarkan oleh *standard operating procedure* Sistem Manajemen Geoteknik (SMG) PT. Arutmin Indonesia mengenai Pemodelan Lereng Dengan Program Komputer, dimana nilai FK standar yang dikategorikan stabil yaitu lebih dari 1,25.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan referensi-referensi yang dibutuhkan untuk keperluan penelitian. Referensi yang dikumpulkan adalah kondisi geologi regional, meliputi litologi, stratigrafi dan struktur pada daerah penelitian, penelitian terdahulu, serta teori *Mohr-Coulomb Failure Criterion*, dan metode analisis kesetimbangan batas oleh Morgenstern-Price (1965).

Untuk mendapatkan nilai sifat fisik dan mekanik yang akan digunakan dalam kalkulasi kestabilan lereng, dibutuhkan pengujian laboratorium sehingga didapat data nilai sifat-sifat tersebut. Pengujian yang dilakukan adalah uji *direct shear* untuk mendapat nilai sifat mekanik dan uji sifat fisik untuk mendapat nilai sifat fisik. Pengujian laboratorium dilakukan pada sebuah sampel batuan utuh atau *intact rock*, yang kondisi batuan mungkin berbeda dengan batuan yang ditemukan di lereng, yang disebut batuan massa atau *rockmass*. Perbedaan dari *intact rock* dan *rockmass* terletak pada kondisi fisik batuan, dimana *intact rock* merupakan sampel batuan yang diperoleh dari pengeboran, dengan kondisi batuan yang segar dan utuh tanpa diskontinuitas. Batuan yang ditemukan di lapangan selama kegiatan pemetaan merupakan *rockmass*, dimana batuan bisa ditemukan sudah dalam kondisi lapuk, dan mengandung diskontinuitas di tubuh batuan seperti kekar dan kekar berpasangan. Dalam penelitian ini penulis mengasumsikan bahwa *intact rock* yang digunakan sebagai sampel pengujian laboratorium, memiliki nilai sifat fisik dan mekanik yang sama dengan *rockmass* yang ditemukan di lapangan.

Dikarenakan pada Pit "X" tidak ada alat *piezometer* untuk mengetahui muka air tanah maka dibuat perasumsian terhadap ketinggian muka air tanah, dimana air tanah dibuat secara konseptual, dengan kondisi muka air tanah tidak jenuh (*half saturated*). Kondisi tidak jenuh ini digambarkan dengan tinggi muka air tanah berada pada setengah tinggi lereng dan membentuk kurva parabolik

ke dalam lereng hingga  $\frac{3}{4}$  tinggi lereng dan dilanjutkan mendatar.

Pada penelitian ini digunakan tipe analisis Morgenstern-Price dengan fungsi *half-sine*, serta kondisi perhitungan tekanan muka air tanah berdasarkan *piezometric line* dan adanya koreksi freatik. Bidang gelincir di analisis menggunakan opsi *entry and exit*, tanpa menggunakan *tension crack*.

Sifat fisik dan mekanik dari masing-masing litologi diperoleh dari hasil uji laboratorium. Nilai-nilai yang didapatkan dari tahap uji laboratorium, seperti berat jenis, kohesi, dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) akan dimasukkan pada opsi sifat material. Dalam analisis penelitian ini digunakan model Mohr-Coulomb.

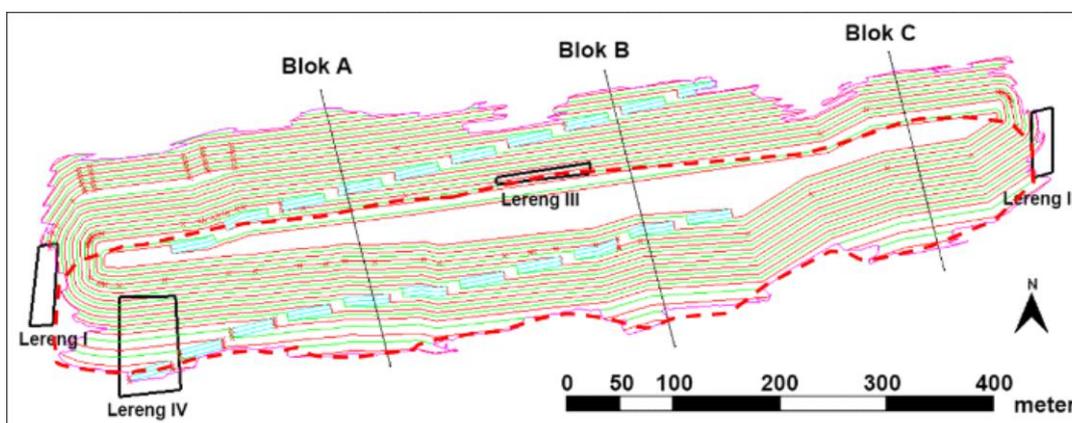
Tahap berikutnya merupakan tahap pemetaan, dimana penulis akan mengamati lereng di lapangan dan memulai proses pengambilan data, yaitu memetakan batuan dengan menggunakan metode *measuring section* (MS) dan mencatat orientasi *strike* dan *dip* dari perlapisan. Alat dan bahan yang dibutuhkan di tahap ini adalah kompas geologi, komparator batuan sedimen, penggaris, meteran tancap, tali dengan panjang 100 meter, tongkat kayu sebagai alat penancap, dan alat tulis. Selama jalannya penelitian, litologi yang ditemukan hampir seluruhnya merupakan batuan sedimen silisiklastik, sehingga peneliti menggunakan klasifikasi ukuran butir berdasarkan Wentworth (1922) untuk penamaan litologi.

Peneliti memasukkan data koordinat seam *roof* dan *floor* batu bara yang diperoleh menggunakan receiver GNSS. Setelah analisis kestabilan menggunakan data pemetaan selesai, peneliti akan memberi rekomendasi mengenai desain akhir tambang PT. Arutmin Indonesia dengan melakukan optimasi. Dalam penelitian ini, optimasi lereng akan dilakukan dengan mengurangi lebar *bench* dari desain lereng melalui *trial and error* hingga mendekati nilai standar yang ditentukan oleh PT. Arutmin Indonesia.

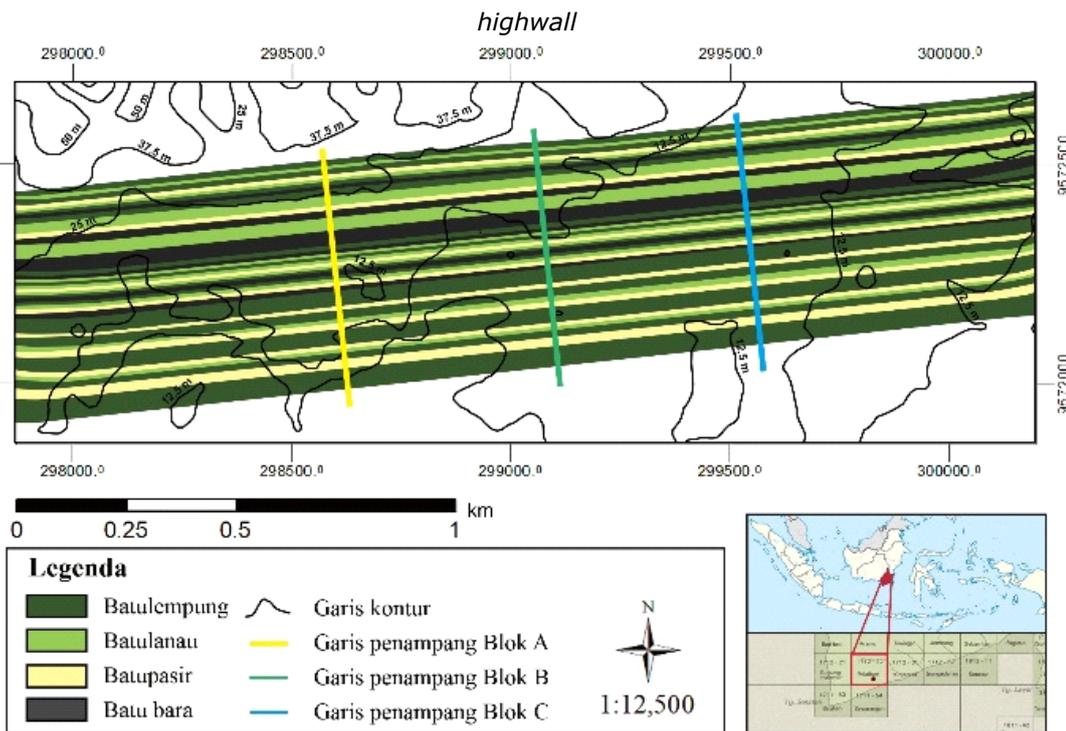
### HASIL PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan menganalisis kestabilan model berdasarkan data pemetaan permukaan. Gambar 6 menunjukkan lokasi pemetaan permukaan serta garis penampang yang dinamakan sebagai Blok A, Blok B, dan Blok C, dan Gambar 7 menunjukkan peta geologi yang telah dibuat berdasarkan *scanline* di lapangan. Ketiga penampang blok tersebut merupakan lokasi dilakukannya analisis kestabilan lereng di zona *highwall*.

Pada tahap pemetaan, penulis menemukan berbagai diskontinuitas berupa kekar dan kekar berpasangan yang terdapat pada batuan di lereng. Namun analisis dengan teori Mohr-Coulomb tidak mempertimbangkan diskontinuitas dalam perhitungan kestabilan lereng, sehingga penulis tidak memuat data kekar dalam penelitian ini.



**Gambar 6.** Lokasi persebaran daerah pemetaan. Daerah dalam garis putus menandakan



**Gambar 7.** Peta geologi berdasarkan pemetaan *scanline* daerah penelitian

#### Blok A

Desain akhir PT. Arutmin Indonesia di lereng *highwall* blok A memiliki ketinggian lereng 90 meter, lebar lereng secara keseluruhan sebesar 175 meter, dengan sudut lereng keseluruhan (*overall slope angle*) sebesar  $27^\circ$ . Elevasi tertinggi berada pada RL10 dan elevasi terendah pada elevasi RLM80. Jalan *hauling* terletak diantara RLM20 dan RLM30. Perhitungan menggunakan data pemetaan menunjukkan nilai FK dari lereng yaitu 1,298 pada blok A.

Proses optimasi pada lereng *highwall* blok A dilakukan dengan mengurangi lebar bench dari 10 meter menjadi 7 meter, sehingga menghasilkan lereng dengan nilai FK sebesar 1,256. Pengoptimasian ini menghasilkan ketinggian lereng sebesar 90 meter dengan lebar lereng secara keseluruhan sebesar 145 meter, dengan elevasi tertinggi terletak di RL10 dan elevasi terendah pada RLM80. Sudut keseluruhan dari lereng (*overall slope angle*) setelah dioptimasi lebih tegak dibanding sudut desain akhir, dimana sudut sebelumnya memiliki nilai,  $27^\circ$  berubah menjadi  $31^\circ$  setelah dioptimasi. Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 8.

#### Blok B

Desain akhir PT. Arutmin Indonesia di lereng *highwall* blok B memiliki ketinggian lereng 90 meter, lebar lereng secara keseluruhan sebesar 170 meter, dan sudut lereng keseluruhan (*overall slope angle*) sebesar  $27^\circ$ . Elevasi tertinggi adalah RL10 dan elevasi

terendah adalah RLM80. Lokasi jalan *hauling* terletak di antara RLM60 dan RLM70. Analisis kestabilan lereng blok B menunjukkan nilai FK 1,305.

Pengoptimasian pada lereng *highwall* blok B dengan mengurangi lebar *bench* dari 10 meter menjadi 7 meter menunjukkan nilai FK sebesar 1,258. Ketinggian lereng terukur sebesar 90 meter, dengan lebar lereng secara keseluruhan sebesar berkurang menjadi 140 meter, dengan elevasi tertinggi terletak di RL0 dan elevasi terendah pada RLM80. Sudut keseluruhan dari lereng (*overall slope angle*) berubah menjadi semakin tegak, dari  $28^\circ$  menjadi  $31^\circ$ . Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 8.

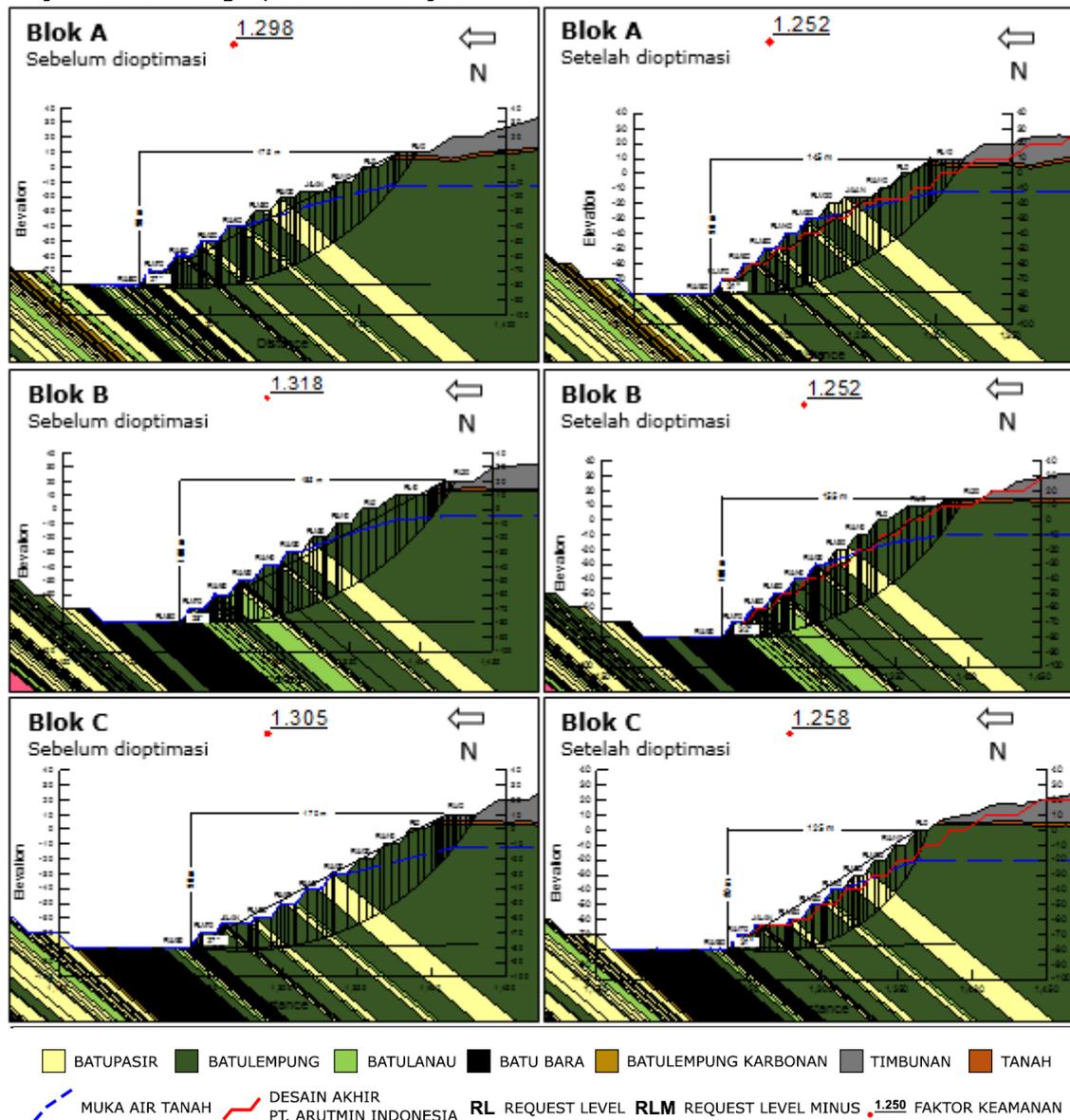
#### Blok C

Desain akhir PT. Arutmin Indonesia di lereng blok C memiliki ketinggian lereng 100 meter, lebar lereng secara keseluruhan sebesar 185 meter, dan sudut lereng keseluruhan (*overall slope angle*) sebesar  $28^\circ$ . Elevasi tertinggi adalah RL20 dan elevasi terendah adalah RLM80. Di desain blok ini tidak ditemukan jalan *hauling*. Perhitungan FK blok C dengan data pemetaan menunjukkan nilai FK 1,318.

Optimasi pada lereng *highwall* blok C dilakukan dengan mengurangi lebar bench dari 10 meter menjadi 7 meter sehingga menunjukkan nilai FK sebesar 1,252. Ketinggian lereng terukur sebesar 100 meter, dengan lebar lereng secara keseluruhan 155 meter. Elevasi tertinggi terletak di RL20 dan elevasi terendah pada

RLM80. Sudut keseluruhan dari lereng (*overall slope angle*) setelah dioptimasi menjadi semakin tegak, dari 28° menjadi

32°. Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 8.



**Gambar 8.** Hasil desain lereng sebelum dioptimasi (kiri) dan setelah dioptimasi (kanan). Nilai faktor keamanan (FK) setelah dioptimasi masih dikategorikan stabil berdasarkan SOP PT. Arutmin Indonesia, yaitu >1,25.

### KESIMPULAN

Nilai FK dari lereng blok A sebelum dioptimasi adalah 1,298, pada blok B 1,305, dan pada blok C 1,318. Ketiga nilai FK dari tiap lereng dinilai stabil dan nilai FK masih cukup jauh dari standar Sistem Manajemen Geoteknik PT. Arutmin Indonesia (>1,25) sehingga penulis dapat mengoptimasi kembali desain lereng. Optimasi yang di rekomendasikan adalah pengurangan lebar tiap *bench* dari 10 meter menjadi 7 meter, sehingga menghasilkan penegakan sudut kemiringan keseluruhan semua blok menjadi 4° lebih tegak, namun nilai ketiga lereng masih dikategorikan stabil berdasarkan standar PT.

Arutmin Indonesia, yaitu 1,252 pada blok A, 1,258 pada blok B, dan 1,252 pada blok C. Dengan melakukan optimasi melalui penegakan lereng, jumlah material tak diinginkan yang terambil akan berkurang. Berkurangnya material tak diinginkan akan membuat desain lereng memiliki nilai ekonomis yang lebih dikarenakan pengupasan tidak dilakukan sebanyak desain lereng jangka panjang yang dibuat oleh Tim Perencanaan Tambang Jangka Panjang PT. Arutmin Indonesia.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih sebesar-besarnya diucapkan kepada seluruh pihak dari PT. Arutmin Indonesia yang selalu membantu dan membimbing penulis dalam pengambilan dan penyusunan data.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aksoy, C. O., Uyar, G. G., & Ozcelik, Y. (2016). Comparison of Hoek-Brown and Mohr-Coulomb failure criterion for deep open coal mine slope stability. *Structural Engineering and Mechanics*, 60(5), 809–828. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.60.5.809>
- Anonim. (2013). *Standard Operating Procedure (SOP) Pemodelan Lereng dengan Program Komputer*.
- Aryal, K., Sandven, R., & Nordal, S. (2005). Slope stability evaluation by limit equilibrium and finite element methods. In *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnology in Harmony with the Global Environment* (Vol. 4).
- Badan Geologi. (2009). *Peta Cekungan Sedimen Indonesia Berdasarkan Data Gaya Berat dan Geologi*. Bandung: Badan Geologi.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 1964:2008 Cara uji berat jenis tanah*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 2813:2008 Cara uji kuat geser langsung tanah terkonsolidasi dan terdrainase*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 2824:2011 Cara uji geser langsung batu*.
- Bell, F. G. (2007). *Engineering Geology* (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Chu, Xuesong., Li, Liang., Cheng, Yung-ming. (2019). Risk Assessment of Slope Failure Using Assumption of Maximum Area of Sliding Mass and Factor of Safety Equal to Unit. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6268079>
- Contreras, L. F. (2015). An economic risk evaluation approach for pit slope optimization. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(7), 607–622. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n7a7>
- Das, B. M. (2019). *Advanced Soil Mechanics, 5th Edition*. <https://doi.org/10.1201/9781351215183>
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering, 9th Edition*. 819.
- De Freitas, M. H., Hack, H. R. G. K., Higginbottom, I. E., Knill, J. L., & Maurenbrecher, M. (2009). *Engineering geology: Principles and practice*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68626-2>
- Evin, G., Henriquez, F., & Ugorets, V. (2015). Pit slope optimization based on hydrogeologic inputs. *Proceedings of the 24th International Mining Congress of Turkey, IMCET 2015*, 588–597.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2015). *Stability Modeling with SLOPE/W An Engineering Methodology*.
- Hamdhan, I. N. (2012). Slope stability analysis with finite element method. *Advanced Materials Research*, 538–541, 819–822. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.819>
- Hamdhan, I. N., & Engineering, F. (2012). *A Contribution to Slope Stability Analysis with the Finite Element Method Dissertation*.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1968). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 18(1), 92–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1968.18.1.92>
- Pantelidis, L. (2009). Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2008.06.003>
- Renani, H.R., & Martin, C. D. (2019). *Slope Stability Analysis using Equivalent Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01889-3>
- Sikumbang, N., Heryanto, R. (1994). *Peta Geologi Lembar Banjarmasin, Kalimantan*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Singh, B., & R.K., G. (2011). *Engineering Rock Mass Classification*. Waltham: Butterworth-Heinemann.
- Taha, M. R., Khajezadeh, M., & El-Shafie, A. (2010). Slope stability assessment using optimization techniques: An overview. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15 R(May 2014), 1901–1915.
- Tim Laboratorium Geoteknik PT. Arutmin Indonesia. (2012). *Standard Operating Procedure (SOP) Penyiapan Sample Uji Geser Langsung (Direct Shear)*.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2017). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1201/9781315274980>

