

Analisis Kestabilan Lereng Tambang Batubara dengan Metode Kesetimbangan Batas di PT Bukit Makmur Mandiri Utama Jobsite Geo Energy Group “Kapuas Coal Project”, Blok Maharu, Kecamatan Kapuas Tengah, Kabupaten Kapuas, Provinsi Kalimantan Tengah
Slope Stability Analysis on Coal Mine Using Limit Equilibrium Method PT Bukit Makmur Mandiri Utama Jobsite Geo Energy Group “Kapuas Coal Project” Maharu Block, Middle Kapuas Sub-district, Kapuas District, Central Borneo Province

¹Ricky Tubagus Wardani, ²Maryanto, ³Rian Amukti

^{1,2,3}Prodi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Islam Bandung,
Jl. Tamansari No.1 Bandung 40116

email: ¹rickytubagus10@gmail.com, ²maryanto_geo@yahoo.com, ³rian.amukti87@gmail.com

Abstract. Geo Energy Group is one of the companies that engaged on coal mining in South Borneo in the name of PT Sungai Danau Jaya has coal mining operations using open pit system. In 2018, coal prices have increased, so Geo Energy Group expand and explore new territory with coal exist in Middle Kapuas, Central Borneo and plans to operate new coal mine with 6 pits at once, that is Maharu, Tambaan, Nusa, CBP South, Manis and Karokos. The first block to be mined is Maharu, in order to optimum mining operations, it must be planned properly and effective, one of that is slope stability. The slope stability must be controlled in order to prevent landslides that can occur in the near future. The constituent rock in Maharu’s Block is sedimentary rocks, with sandstone and claystone dominated, some found siltstone, carbonaceous claystone, and shale coal, beside coal that mined. The existing rocks in Maharu’s block including rocks with the criteria of weak to moderate strength, proved by geological strength index method and mechanical properties of rocks. Based on groundwater condition in Maharu’s block including in saturated conditions, which is at 0 – 0.53 meter depth from surface. Design of pit that has planned for high wall and low wall safety factor is not stable, so they must be redesigned with decrease overall slope angle. The recommended geometry for safety factor of high wall slope is within 118.067 meters of height, and overall slope angle 40° with single bench 10 meters and single slope 60°. The recommended geometry for safety factor of low wall slope is within 47.454 meters of height, and overall slope angle 30° with single bench 10 meters and single slope 50°.

Keywords: High Wall, Low Wall, Safety Factor, Limit Equilibrium Method.

Abstrak. Geo Energy Group sebagai salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan batubara di Kalimantan Selatan dengan PT Sungai Danau Jaya telah membuka tambang batubara dengan sistem tambang terbuka. Tahun 2018 terjadi peningkatan harga batubara, sehingga Geo Energy Group mengekspansi dan melakukan eksplorasi wilayah yang mempunyai potensi batubara di Kapuas Tengah, Kalimantan Tengah dan berencana untuk membuka tambang baru di daerah tersebut dengan 6 pit sekaligus, yakni Maharu, Tambaan, Nusa, CBP South, Manis dan Karukus. Blok yang pertama akan ditambang yaitu Maharu, agar operasi penambangan berjalan optimal maka harus direncanakan dengan tepat dan efektif, salah satunya mengenai kestabilan lereng. Lereng yang akan dibuat harus dijaga kestabilannya agar mencegah longsoran yang dapat terjadi kemudian hari. Batuan penyusun pada Blok Maharu adalah batuan sedimen, yang didominasi oleh batupasir dan batulempung, dijumpai pula batulanau, *carbonaceous claystone*, dan *shale coal*, disamping batubara yang akan ditambang. Batuan yang ada di blok Maharu termasuk kriteria batuan lemah hingga sedang, dibuktikan dari pendekatan nilai indeks kekuatan geologi dan sifat mekanik batuan. Berdasarkan pengukuran muka air tanah di daerah Maharu termasuk dalam kondisi jenuh, dimana berada pada kedalaman 0 – 0,53 meter dari permukaan. Desain pit awal untuk lereng *high wall* dan *low wall* faktor keamanannya tidak stabil, sehingga dilakukan desain ulang dengan kemiringan yang lebih landai dari sebelumnya. Rekomendasi lereng yang digunakan untuk lereng *high wall* yaitu dengan tinggi 118,067 m dan *overall slope angle* (selanjutnya disebut OSA) 40° dengan lereng tunggal berdimensi tinggi 10 m dengan sudut 60°. Rekomendasi lereng yang digunakan untuk lereng *low wall* yaitu dengan tinggi 47,454 m dan OSA 30° dengan lereng tunggal berdimensi tinggi 10 m dengan sudut 50°.

Kata Kunci: High wall, Low Wall, Faktor Keamanan, Metode Kesetimbangan Batas.

A. Pendahuluan

Geo Energy Group adalah salah satu grup usaha pertambangan

khususnya tambang batubara telah mempunyai anak perusahaan bernama PT Sungai Danau Jaya yang berlokasi di Tanah Bumbu, Kalimantan Selatan. Dengan adanya peningkatan harga batubara di tahun 2018 ini, Geo Energy Group berencana membuka tambang baru untuk meningkatkan tingkat produksinya. Sebelum dilakukan penambangan, banyak kajian yang harus direncanakan dengan matang yang meliputi perencanaan tambang dan perancangan tambang. Salah satu hal yang harus direncanakan dengan baik dalam tambang terbuka batubara yaitu mengenai kestabilan lereng. Lereng yang akan dibuat harus dijaga kestabilannya agar longsoran tidak terjadi dikemudian hari.

Dalam menentukan tingkat kestabilan lereng, dikenal istilah faktor keamanan (*safety factor*). Kestabilan lereng dipengaruhi oleh geometri lereng, sifat fisik dan mekanik batuan penyusun lereng, ketersediaan air yang mengalir di permukaan maupun di bawah permukaan, bidang lemah batuan, tegangan alamiah dalam massa batuan, konsentrasi tegangan lokal, aktivitas tektonik, dan pengaruh termik. Longsoran yang dapat terjadi di lapangan memang diakibatkan oleh faktor-faktor tersebut, sehingga perlu dipertimbangkan agar kondisi lereng akan tetap stabil.

PT Bukit Makmur Mandiri Utama sebagai perusahaan jasa pertambangan salah satunya di bidang geoteknik yang bekerja untuk Geo Energy Group sebagai salah satu perusahaan tambang batubara yang menerapkan *safety healthy environment* tentu mengharapkan agar terciptanya kesehatan keselamatan kerja dalam produksinya. Analisis kestabilan lereng dilakukan agar tidak terjadi longsoran yang menyebabkan kerugian.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan

masalah dalam penelitian ini sebagai berikut: “Bagaimana kriteria aman lereng tunggal dan lereng keseluruhan?”. Selanjutnya, tujuan dalam penelitian ini diuraikan dalam pokok-pokok sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui jenis litologi yang ada di daerah penelitian.
2. Untuk mendapatkan data sifat fisik dan sifat mekanik dari hasil pemboran inti.
3. Untuk mengetahui kondisi muka air tanah pada daerah penelitian.
4. Untuk merekomendasikan geometri lereng yang optimal sesuai rekomendasi.

B. Landasan Teori

Pada kegiatan penambangan akan selalu dihadapkan dengan masalah kestabilan lereng, terutama pada tambang terbuka, tempat penimbunan material buangan, penimbunan batubara, bendungan, infrastruktur lainnya seperti jalan, jembatan, dan lereng disekitar fasilitas penambangan (suyartono, 2003). Apabila lereng yang terbentuk merupakan sarana penunjang operasi penambangan itu tidak stabil, kegiatan produksi dapat terhenti dan mengakibatkan kerugian. Oleh karena itu analisis pemantapan lereng, baik pada tahap perancangan maupun tahapan penambangan dan pasca tambang merupakan suatu bagian yang penting dan harus dilakukan untuk mencegah terjadinya gangguan-gangguan terhadap kelancaran produksi serta bencana fatal yang akan berakibat pada keselamatan pekerja dan peralatan (Harries dkk, 2009).

Dilihat dari jenis material penyusunnya, terdapat dua macam lereng, yaitu lereng tanah dan lereng batuan, walaupun kenyataan yang dijumpai pada lereng tambang selalu merupakan gabungan dari material tanah dari batuan batuan. Dalam analisi dan penentuan jenis pengamanannya,

lereng tanah tidak sama dengan lereng batuan karena parameter material dan jenis penyebab longsor pada kedua material pembentuk lereng tersebut sangat jauh beda (Romana, 1992). Dalam keadaan alamiah, tanah dan batuan umumnya berada dalam keadaan seimbang dalam gaya gaya yang bekerja padanya baik gaya dari dalam maupun dari luar. Jika tanah dan batuan mengalami perubahan keseimbangan akibat pengangkatan, penurunan, penggalian, penimbunan, erosi atau aktivitas lain, tanah dan batuan tersebut secara alami akan berusaha untuk mencapai keseimbangan yang baru. Proses ini biasanya berupa degradasi atau pengurangan beban, terutama dalam bentuk perpindahan dengan besaran tertentu sampai pada bentuk longsor atau gerakan gerakan lain, sampai tercapai keseimbangan.

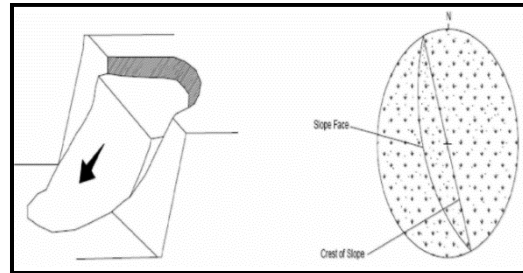
Berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik tercantum nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor sebagai berikut (Tabel 1):

Tabel 1. Nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (Consequences of Failure / Cof)	Kriteria Dapat Diterima (Acceptance Criteria)		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (min)	Probabilitas Longsor (Probability of Failure) (maks PoF (FK≤1))
Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1,1	Tidak Ada	25-50%
Inter-ramp	Rendah	1,15-1,2	1,0	25%
	Menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

Lereng tambang yang tidak stabil akan mengalami longsor, jenis longsor yang sering terjadi pada tambang adalah longsor busur, terutama pada batuan yang lunak (tanah) (Gambar 1). Pada batuan yang

keras longsor busur hanya terjadi jika batuan tersebut sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidang-bidang lemah (rekahan) yang sangat rapat dan tidak dapat dikenali lagi kedudukannya. Pada longsor bidang dan baji, kelongsoran dipengaruhi oleh struktur bidang perlapisan dan kekar yang membagi tubuh batuan kedalam massa diskontinuitas.

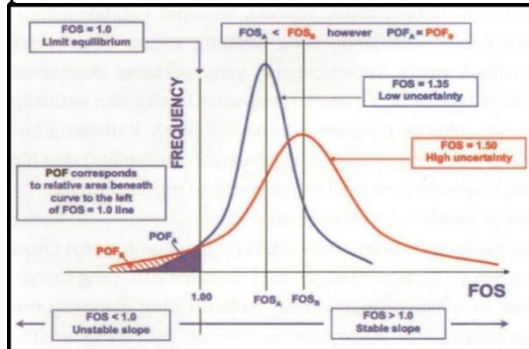


Gambar 1. Longsor Busur

Metode kesetimbangan batas merupakan metode yang sangat populer untuk digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng tipe gelinciran translasional dan rotasional. Metode ini relatif sederhana, mudah digunakan, serta telah terbukti keandalannya dalam praktik rekayasa selama bertahun-tahun.

Pada metode ini, perhitungan analisis kestabilan lereng hanya menggunakan kondisi kesetimbangan statik dan mengabaikan adanya hubungan tegangan-regangan pada lereng. Asumsi lainnya, yaitu geometri lereng dari bidang runtuh, harus diketahui dan ditentukan terlebih dahulu. Stabilitas suatu lereng secara sederhana diindikasikan dengan nilai Faktor Keamanan (FK) yang merupakan rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak. Dalam ranah probabilitas, kedua input parameter, baik gaya penahan maupun gaya penggerak, merupakan fungsi dari variabel acak yang berdistribusi probabilitas. Dengan menggabungkan, probabilitas longsor akan didapatkan. Pada (Gambar 2) dibahas konsep sederhana dari probabilitas (kemungkinan) longsor suatu lereng dengan menggambarkan FK

sebagai fungsi variabel acak yang berdistribusi probabilitas. Probabilitas kelongsoran (PK) dihitung sebagai rasio antara area pada distribusi $FK < 1$ dibagi dengan total area pada kurva distribusi probabilitas.



Gambar 2. Konsep Probabilitas Kelongsoran

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Pemboran Geoteknik

Dalam penelitian ini dilakukan pemboran geoteknik di Blok Maharu dengan 3 titik pemboran, yakni titik GT301, GT302, dan GT303. Kegiatan pemboran dimulai pukul 08.00 – 16.00 WIB dan hanya berlaku 1 shift kerja. Pemboran dilakukan dengan menggunakan alat bor Jacro 240 (Gambar 3), dengan metoda *rotary drilling* secara *down to hole* (pemboran inti), dilengkapi dengan *wireline* sehingga pemboran lebih cepat, *casing* berdiameter HQ (diameter inti : 63,5 mm) dan PQ (diameter inti : 85 mm), setiap *running* mampu mengeluarkan *core* sepanjang 1,5 m. Perekaman inti bor meliputi pendeskripsian dari tanah maupun batuan, struktur batuan, keadaan butir (bentuk dan ukuran), kondisi pelapukan, indeks kekuatan, RQD (Rock Quality Designation), informasi bidang diskontinuitas dan lainnya. Perekaman inti bor dilakukan untuk mengetahui litologi yang ada dibawah permukaan dan korelasi antar titik bor.



Gambar 3. Alat Bor Jacro 240

Berdasarkan data pengamatan lapangan litologi yang dominan di blok penelitian adalah batupasir, ditemukan ukuran butir pasir kasar hingga pasir sangat halus, dari kekuatan *low* to *medium*. Pada litologi batupasir ini juga ditemukan mineral ikutan seperti pirit dan kuarsit. Litologi yang dominan juga yaitu batulempung, seringkali dijumpai karbonan sebelum litologi batubara. Batubara pada blok ini bersifat *bright coal*, banyak dijumpai resin pada permukaan inti bor, menurut data singkapan mempunyai kemiringan 8° – 13° , mempunyai arah 110° – 130° NE, batubara ditemukan berselingan dengan *shally coal*. *Shally coal* mempunyai karakteristik yang mirip dengan batubara, dimulai dari warna hingga goresnya, yang membedakan yaitu berat materialnya.

Batupasir merupakan litologi yang mendominasi penyusun lereng dan batulempung, sehingga dilakukan pengambilan sampel batupasir yang lebih banyak daripada sampel yang lain. Sebagaimana diketahui, *pit* Maharu hanya berada dalam satu formasi yaitu formasi Tanjung, dan lebar *pit* hanya 676 meter, sehingga pengambilan sampel dilakukan berdasarkan kemenerusan lapisan, dibuktikan dengan penampang. Batulempung merupakan litologi yang mendominasi kedua setelah batupasir, batulempung dijumpai paling tebal di GT301, dan ini menjawab litologi apa

setelah *carbonaceous claystone* di titik GT302. Sampel batubara hanya dapat diambil pada titik GT302, dikarenakan hampir seluruh inti bor batubara hancur (*broken core*), kemudian sampel batubara juga dilakukan pengujian untuk mengetahui kualitas batubara tersebut sehingga tidak banyak sampel batubara yang dapat diambil untuk kebutuhan pengujian geoteknik. Sampel batubara yang diambil hanya 22 cm, sehingga hanya dapat dilakukan pengujian sifat fisik dan juga uji kuat geser.

Analisis Kestabilan Lereng

Dalam pengolahan data, dilakukan analisis kestabilan lereng menggunakan metode kesetimbangan batas, hal ini dikarenakan kondisi batuan di Blok Maharu termasuk batuan sedimen dengan kekuatan yang lemah, sehingga metode kesetimbangan batas diyakini sebagai metode yang tepat untuk menganalisis kestabilan lereng. Simulasi yang dilakukan yakni longsor busur, hal ini dikarenakan pada hasil inti bor banyak dijumpai bidang diskontinuitas berupa kekar, kekar yang ada menyebabkan batuan lemah dan mudah hancur. Data input parameter kekuatan batuan yang digunakan berasal dari uji laboratorium (Tabel 2), meliputi data berat jenis alami, kohesi dan sudut gesek dalam (puncak).

Tabel 2. Input Parameter Kekuatan Batuan

Sample Id	Lithology	Unit Weight (KN/m ³)	Direct Shear (Peak)	
			C (KN/m ²)	Phi (°)
GT-301-01	Claystone	20,60	194,57	26,57
GT-301-02	Sandstone	20,98	262,93	25,05
GT-301-03	Claystone	21,77	186,82	28,56
GT-301-04	Carbonaceous Clay	15,01	228,90	29,45
GT-302-01	Soil	18,98	-	-
GT-302-02	Very Fine sandstone	22,36	125,53	30,37
GT-302-03	Claystone	20,12	280,48	25,71
GT-302-04	Very Fine Sandstone	20,39	209,48	30,16
GT-302-05	Fine Sandstone	23,44	150,24	24,77
GT-302-06	Coal	12,45	374,82	35,04
GT-302-07	Medium Sandstone	23,53	198,59	29,70
GT-303-01	Soil	17,46	-	-
GT-303-02	Sandstone	22,46	242,04	26,42
GT-303-03	Siltstone	20,89	246,74	20,31

Karakteristik batuan penyusun menurut klasifikasi kekuatan batuan berdasarkan nilai uniaxial compressive strength (Wyllie dan Mah, 2004), yaitu :

1. Batupasir mempunyai nilai kuat tekan 0,960 – 6,582 MPa, maka termasuk batuan lemah hingga lemah sekali.
2. Batulempung mempunyai nilai kuat tekan 0,362 – 1,340 MPa, maka termasuk batuan sangat lemah hingga lemah sekali.
3. Batulanau mempunyai nilai kuat tekan 5,940 MPa, maka termasuk batuan lemah.
4. *Carbonaceous claystone* nilai kuat tekan 0,981 MPa, maka termasuk batuan lemah sekali.

Dalam simulasi analisis kestabilan lereng, dilakukan pemodelan lereng tunggal dan lereng keseluruhan (*high wall* dan *low wall*). Kemiringan yang disimulasikan berpatokan pada desain sebelumnya. Berikut dimensi lereng yang dipergunakan dalam permodelan :

1. Lereng tunggal dibuat dengan tinggi jenjang 5, 10, dan 15 meter dengan kemiringan 45°, 50°, 55°, 60°, 65° dan 70° untuk litologi batupasir dan batulempung.
2. Lereng keseluruhan *high wall* dibuat dengan tinggi jenjang hingga menyentuh seam utama dengan kemiringan keseluruhan 35°, 36°, 37°, 38°, 39°, 40°, 41°, 42°, 43°, dan 44°.
3. Lereng keseluruhan *low wall* dibuat dengan tinggi jenjang hingga menyentuh seam utama dengan kemiringan keseluruhan 25°, 26°, 27°, 28°, 29°, 30°, 31°, 32°, 33°, dan 34°.

Data muka air tanah yang digunakan yaitu dari data aktual di lapangan yang diambil seminggu setelah dilakukan pemboran dan diukur menggunakan alat water level meter.

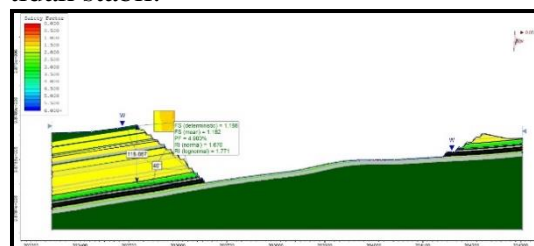
Berikut data air tanah yang digunakan :

1. Lereng keseluruhan (*high wall* dan *low wall*) digunakan data aktual lapangan, yaitu GT 301 di kedalaman 0,53 m dan GT302 sejajar dengan permukaan. Karena dua data tersebut hampir mendekati jenuh, maka dimodelkan dalam kondisi jenuh.
2. Lereng tunggal disimulasikan dengan kondisi jenuh atau air tanah sama dengan permukaan, diasumsikan kondisi jenuh merupakan kondisi paling kritis untuk pengujian kestabilan lereng.

Pembebanan yang digunakan dalam pemodelan hanya berasal dari data kegempaan daerah penelitian. Secara umum, daerah penelitian yang berlokasi di Kecamatan Kapuas Tengah merupakan daerah bukan jalur gempa secara umum. Menurut peta zonasi gempa Indonesia yang dibuat oleh Kementerian Pekerjaan Umum tahun 2010, daerah penelitian berada di zona peak ground acceleration 0,05 – 0,1 g, sehingga pada pemodelan digunakan nilai PGA 0,05 g (nilai terkecil).

Simulasi untuk lereng *highwall* dibuat dengan tinggi lereng mencapai *seam* utama batubara dengan ketebalan hampir 5 meter, dilakukan analisis kestabilan dengan *overall slope angle* lebih landai desain awal dengan diharapkan tercapainya nilai faktor keamanan yang stabil. Lereng awal yang direncanakan menggunakan sudut lereng keseluruhan 45° mempunyai nilai faktor keamanan 0,907 dengan probabilitas kelongsoran 81,400%, ini berarti lereng yang direncanakan tidak stabil. *Overall slope angle* yang disimulasikan yaitu dari sudut 35° sampai dengan 44°. Dari hasil analisis kestabilan lereng dengan metode kesetimbangan batas didapatkan tiga kategori yaitu stabil, kritis dan tidak

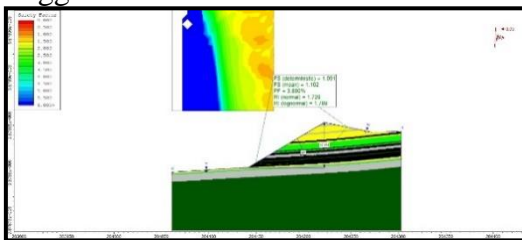
stabil (*longsor*). Kriteria faktor keamanan untuk lereng keseluruhan dengan resiko tinggi dan lereng dinamis faktor keamanan yang stabil yaitu $FK > 1,1$. Sudut lereng keseluruhan dari 35° hingga 38° mempunyai nilai $FK > 1,2$ dan $PK = 0,000\%$, lereng yang dibuat terlalu stabil dan terlalu landai sehingga relative lebih banyak *overburden* yang harus dikupas. Sudut lereng keseluruhan 39° mempunyai $FK = 1,195$ dengan $PK 2,600\%$ dan sudut lereng keseluruhan 40° mempunyai $FK = 1,182$ dengan $PK = 4,900\%$. PK yang masih diperbolehkan yaitu $< 5\%$, sehingga sudut lereng keseluruhan yang direkomendasikan yaitu 40° daripada 39° (Gambar 4). Sudut lereng keseluruhan 41° mempunyai $FK = 1,142$ dengan $PK = 12,000\%$ dan sudut lereng keseluruhan 42° mempunyai $FK = 1,127$ dengan $PK = 14,900\%$, apabila dilihat dari nilai faktor keamanan masih memenuhi kriteria yang diperbolehkan, namun probabilitas kelongsorannya tidak memenuhi kriteria, sehingga lereng dianggap kritis. Sudut lereng keseluruhan 43° dan 44° menghasilkan nilai $FK < 1,1$, sehingga lereng tersebut tidak stabil.



Gambar 4. Rekomendasi Lereng *High Wall*

Simulasi lereng *low wall* dibuat dengan model tinggi jenjang hingga menyentuh *seam* utama batubara, dengan sudut yang lebih landai dari desain awal yaitu desain awal menggunakan sudut 35°, untuk analisis dilakukan sudut 25° hingga 34° dengan menggunakan kriteria stabil $FK > 1,1$ dengan kondisi lereng dinamis dan PK yang diperbolehkan $< 5\%$.

Sudut lereng keseluruhan yang direkomendasikan untuk lereng *low wall* yakni 30° dengan nilai $FK = 1,102$ dan $PK = 3,800\%$ (Gambar 5). Besaran sudut ini dipilih karena sudut keseluruhan dimulai dari 25° hingga 29° mempunyai nilai FK yang terlalu stabil dan sudut yang terlalu landai, kemudian sudut keseluruhan 32° , 33° dan 34° faktor keamanan yang dihasilkan tidak termasuk kriteria stabil dengan probabilitas kelongsoran yang sangat tinggi.



Gambar 5. Rekomendasi Lereng *Low Wall*

Lereng tunggal dibuat dengan berbagai variasi sudut dengan *range* 5° , lereng tunggal dibuat dengan tinggi jenjang 5, 10, dan 15 meter dengan kemiringan 45° , 50° , 55° , 60° , 65° dan 70° untuk litologi batupasir dan batulempung. Dilakukan analisis lereng tunggal pada kedua litologi tersebut karena batupasir dan batulempung merupakan litologi dominan dalam penyusun lereng, dikatakan dominan karena ketebalannya sangat tebal dibandingkan dengan litologi batulanau, *carbonaceous claystone* dan juga *shale coal*. Dari hasil penelitian didapatkan $FK > 2$, walaupun lereng tunggal dibuat dengan kemiringan yang sangat curam tetap menghasilkan faktor keamanan yang stabil dan probabilitas kelongsoran 0%. Lereng tunggal yang sering digunakan oleh perusahaan yakni 10 m dan sudut 70° .

D. Kesimpulan

Dari kegiatan analisis kestabilan lereng blok maharu, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Batuan penyusun lereng yaitu sandstone, claystone, carbonaceous claystone, siltstone, shally coal, dan coal.
2. Sandstone mempunyai unit weight $22,19 \text{ KN/m}^3$, nilai kohesi $198,14 \text{ KPa}$, sudut gesek dalam $27,75^\circ$ dan kuat tekan $4,178 \text{ MPa}$. Claystone mempunyai unit weight $20,83 \text{ KN/m}^3$, nilai kohesi $220,62 \text{ KPa}$, sudut gesek dalam $26,95^\circ$ dan kuat tekan $0,896 \text{ MPa}$. Siltstone mempunyai unit weight $20,89 \text{ KN/m}^3$, nilai kohesi $246,74 \text{ KPa}$, sudut gesek dalam $20,31^\circ$ dan kuat tekan $5,904 \text{ MPa}$. Coal mempunyai unit weight $12,45 \text{ KN/m}^3$, nilai kohesi $374,82 \text{ KPa}$ dan sudut gesek dalam $35,04^\circ$. Carbonaceous claystone mempunyai unit weight $15,01 \text{ KN/m}^3$, nilai kohesi $228,90 \text{ KPa}$ dan sudut gesek dalam $29,45^\circ$ dan kuat tekan $0,981 \text{ MPa}$.
3. Muka air tanah pada daerah penelitian relatif dekat dengan permukaan atau jenuh, terutama di titik GT302 dipastikan jenuh karena muka air tanah berada di permukaan, titik GT301 kedalaman muka air tanah hanya 58 cm , dan titik GT303 di kedalaman $9,63 \text{ m}$ dari permukaan.
4. Analisis kestabilan lereng tunggal dilakukan dengan tinggi 5, 10, dan 15 meter dengan kemiringan 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , dan 65° untuk litologi batupasir dan batulempung secara keseluruhan didapatkan nilai $FK > 2$ (stabil). Lereng highwall dibuat dengan tinggi lereng $114,93 - 120,728 \text{ meter}$

dengan overall slope angle yang disimulasikan yaitu dari sudut 35° sampai dengan 44° didapatkan nilai FK = 1,379 – 0,984. Lereng low wall dibuat dengan tinggi jenjang 46,840 – 48,555 meter, untuk analisis dilakukan dengan sudut 25° hingga 34° didapatkan nilai FK = 1,289 – 1,002. Rekomendasi untuk lereng high wall yaitu tinggi 118,067 m dan OSA 40°. Rekomendasi untuk lereng low wall yaitu tinggi 47,454 m dan OSA 30°.

E. Saran

Dari hasil analisis terhadap lereng *high wall* dan *low wall*, disarankan pula dibandingkan dengan *section* yang lain untuk mewakili *pit*, sehingga rekomendasi lebih tepat dan mewakili.

Daftar Pustaka

- Australian Geomechanics Society, 2000. *Landslide Risk Management Concepts and Guidelines*, Australia.
- Baecher, G. B., and J. T. Christian, 2003. *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Wiley, Chicester, UK.
- Bieniawski, Z. T., 1984. *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. John Wiley and Sons, Canada.
- Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineering and Geologist in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. Wiley-Interscience.
- Bishop, A. W. and Mogenstern, N. R., 1960. *Stability Coefficient for Earth Slopes*. Soil Found.
- Brown, E. T., 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*. Pergamon Press, New York.
- Chiwaye, H. T., 2010. *A Comparison of the Limit Equilibrium and Numerical Modelling Approaches to Risk Analysis for Open Pit Mine Slope*. South African.
- Chowdhury, R. N. and Xu, D., 1984. *Recent Development in Land-slide Studies: Probabilistic Method – State of Art Report*. Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides, Toronto, Vol. 1, pp. 209-228.
- Eberhardt., 2003. *Rock Slope Stability Analysis – Utilization of Advanced Numerical Techniques*. Earth and Ocean Sciences at UBC. Canada.
- Giani, G. P. 1992. *Rock Slope Stability Analysis*. A.A. Balkem Publishers, Old Post Road, Brookfield, USA.
- Harries, N., Noon, D., 2009. *Slope Stability Radar for Managing Rock Fall Risk in Open Cut Mines*. Proceeding of the 3rd Canus Rock Mechanics, Toronto.
- Hoek, Evert and John Bray., 1995. *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy. London.
- Karl Terzaghi, Ralph B. Peck and Gholomreza Mesri, 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice, Third Edition*. John Wiley and Sons, New York.
- Prof. Dr. Ir. Irwandy Arif, M. Sc., 2016. *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Romana, M. 1993. *A Geomechanical Classification for Slope: Slope Mass Rating, dalam Comprehensive Rock Engineering. Volume 3*. Hudson.
- Tapia, A., Contreras, L.F., 2007. *Risk Evaluation Slope Failure at Chuquicamata Mine*. Australian Centre for Mechanics. Perth.