

**KAJIAN GEOTEKNIK UNTUK OPTIMALISASI DESAIN TAMBANG BATUBARA
MENGUNAKAN *LIMIT EQUILIBRIUM METHOD*¹⁾**

Luqmanul Hakim Maulana²⁾ dan Jerry Dwi Fajar S.T.³⁾

²⁾ Mahasiswa Teknik Pertambangan, Universitas Islam Bandung,

³⁾ PT BANTI INDONESIA, Balikpapan regency, Balikpapan, KALTIM.

ABSTRAK

PT XYZ sebagai salah satu perusahaan yang bergerak dibidang pertambangan batubara yang terletak di Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Telah merencanakan pembuatan pit dan timbunan di suatu lahan yang belum dibuka. Oleh karena itu diperlukan studi geoteknik untuk menganalisa geometri lereng bukaan tambang serta timbunan yang telah direncanakan oleh pihak perusahaan.

Kegiatan penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data primer yang diperoleh dari pengeboran geoteknik, pengukuran muka air tanah dari 9 titik yang dianggap mewakili karakteristik massa tanah atau batuan dari beberapa pit. Lapisan batuan penyusun lereng tambang didominasi oleh batupasir dan batulempung, dijumpai pula batu lanau, carbon disamping batubara yang akan ditambang. Tanah atau batuan di lokasi penelitian termasuk kriteria batuan sedang sampai lemah, dibuktikan oleh pendekatan indeks kekuatan geologi dan sifat mekanik batuan. Pengukuran muka air tanah di daerah penelitian termasuk dalam kondisi jenuh dengan kedalaman MAT 0,88 - 11,975 meter.

Penelitian dilakukan dengan jumlah pit sebanyak 7 pit, dan 13 penampang (section) yaitu penampang A-A' sampai dengan penampang N-N', yang merepresentasikan bentuk dari tiap pit penambangan batubara meliputi *highwall* dan *lowwall*. Kemantapan lereng untuk rencana desain tambang awal pada penampang A-A' sampai dengan penampang N-N' untuk lereng *highwall* dan *lowwall* faktor keamanannya terdapat yang sudah stabil namun masih dapat dioptimalkan, stabil dan tidak stabil, sehingga untuk lereng yang berada dalam kondisi stabil yang dapat dioptimalkan dilakukan desain ulang dengan kemiringan lereng yang curam dari sebelumnya, kemudian untuk lereng yang tidak stabil dilakukan desain ulang dengan kemiringan lereng yang landai dari sebelumnya. Rekomendasi lereng untuk penampang A-A' lereng *highwall* yaitu *overall slope angle* 33° dan tinggi lereng 69,665 m serta untuk lereng *lowwall* yaitu *overall slope angle* 13° dan tinggi lereng 48,105 m, penampang B-B' lereng *highwall* yaitu *overall slope angle* 29° dan tinggi lereng 34,139 m serta untuk lereng *lowwall* yaitu *overall slope angle* 22° dan tinggi lereng 40,109 m, penampang C-C' lereng *highwall* yaitu *overall slope angle* 30° dan tinggi lereng 97,900 m serta untuk lereng *lowwall* yaitu *overall slope angle* 15° dan tinggi lereng 69,284 m, penampang D-D' lereng *highwall* yaitu *overall slope angle* 49° dan tinggi lereng 77,023 m serta untuk lereng *lowwall* yaitu *overall slope angle* 7° dan tinggi lereng 132,16 m.

Kata Kunci: Kestabilan Lereng, *Highwall*, *Lowwall*, *Sidewall*, Metode Kesetimbangan Batas

ABSTRACT

PT XYZ as one of the companies engaged in coal mining located in Kutai Kartanegara Regency, East Kalimantan Province. Planned construction of pits and waste dump on land that has not been cleared. Therefore a geotechnical study is needed to analyze the geometry of the mine opening slope and the pile planned by the company.

Research activities carried out by collecting primary data obtained from geotechnical drilling, groundwater level measurements from 9 points that are considered to represent the characteristics of the soil mass or rock from several pits. Rock layers making up the mine slope are dominated by sandstone and claystone, silt stone, carbon in addition to the coal to be mined. The soil or rocks at

the study site are of moderate to weak rock criteria, evidenced by the geological strength index approach and rock mechanical properties. Based on ground water level measurements in the study area included in saturated conditions with a MAT depth of 0.88 - 11.975 meters from the surface. The study was conducted with a total of 7 pits, and 13 section sections, namely A-A section to N-N section, which represent the shape of each coal mining pit including highwall and lowwall. Slope stability for the initial mine design plan on cross sections A-A 'to N-N cross sections for highwall and lowwall slopes there are safety factors that are already stable but can still be optimized, stable and unstable, so for slopes that are in stable conditions that are can be optimized redesigned with a steep slope from the previous, then for unstable slopes redesigned with a safety slope from the previous. Recommended slopes for cross section A-A 'highwall slopes are overall slope angle 330 and slope height 69,665 m and for lowwall slopes are overall slope angle 130 and slope height 48,105 m, cross section B-B' highwall slopes are overall slope angle 290 and slope height 34,139 m and for lowwall slopes namely overall slope angle 220 and slope height 40,109 m, cross section C-C 'highwall slope is overall slope angle 300 and slope height 97,900 m and for lowwall slopes are overall slope angle 150 and slope height 69,284 m, cross section D-D 'highwall slope is 490 overall slope angle and 77.023 m slope height and lowwall slope angle 70 overall and 132.16 m slope height.

Key Word: Slope Stability, Highwall, Lowwall, Sidewall, Limit Equilibrium Method

A. PENDAHULUAN

Aktivitas penambangan pada umumnya melakukan kegiatan penggalian serta penimbunan material yang berkaitan dengan lereng baik itu berupa lereng kerja (*working slope*) maupun lereng akhir (*final slope*). Lereng-lereng tersebut harus dianalisis kemantapannya untuk mencegah bahaya kelongsoran yang dapat terjadi sewaktu-waktu, karena berhubungan dengan keselamatan pekerja dan keamanan peralatan. Pada kegiatan penambangan, seperti penggalian pada suatu lereng akan menyebabkan terjadinya perubahan besarnya gaya yang bekerja pada lereng tersebut yang mengakibatkan terganggunya kestabilan lereng.

Melakukan optimalisasi geometri lereng desain pit guna mendukung rencana penambangan batubara dan memaksimalkan cadangan batubara yang bisa ditambang. Kemiringan dan tinggi suatu lereng sangat mempengaruhi stabilitas lereng, semakin besar kemiringan dan tinggi suatu lereng, maka stabilitas lerengnya semakin kecil. Berdasarkan keterdapatannya pergerakan tanah di salah satu pit menjadi salah satu hal perlu dilakukan evaluasi serta kajian kembali desain lereng tambang yang telah di buat. Selain itu ada rencana pembuatan *pit* dan timbunan di suatu lahan yang belum dibuka. Oleh karena itu untuk menjaga kestabilan lereng yang aman maka diperlukan kajian geoteknik untuk mengoptimalkan geometri lereng bukaan tambang serta timbunan yang telah direncanakan oleh pihak perusahaan.

Tanah atau batuan di lokasi penelitian termasuk kriteria batuan sedang sampai lemah, dibuktikan oleh pendekatan indeks kekuatan geologi dan sifat mekanik batuan dengan nilai UCS 0,18 mpa sampai 13,09 mpa sehingga kemungkinan jenis longsor yang terjadi adalah longsor busur. Umumnya kondisi seperti itu dilakukan analisis menggunakan metode kesetimbangan batas atau (*limit equilibrium method*) yang mempertimbangkan kesetimbangan gaya dalam arah vertical dan kesetimbangan momen pada pusat lingkaran bidang glicir. Metode ini digunakan pada longsor busur dengan material penyusun lereng memiliki karakteristik yang tidak homogen sepanjang lereng dan longsor busur tidak melewati kaki lereng dan. Dalam metode ini gaya geser antar bidang diasumsikan nol. Memastikan bahwa tegangan normal efektif pada dasar setiap bidang irisan selalu positif, pengaruh tegangan perlu diperhitungkan dalam analisis.

Tujuan dari kajian geoteknik ini adalah untuk melakukan analisis kemantapan lereng guna mendukung rencana penambangan batubara pada pit 1, 4, 7, 8, 9, 10, dan 11, kemudian mengkaji lereng tunggal serta mengkaji kemantapan lereng timbunan.

B. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu tahap persiapan, pengambilan data dan pengolahan data.

B.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan ini penulis melakukan studi literatur mencari bahan pustaka yang menunjang, diperoleh dari badan dinas terkait, laporan perusahaan, laporan penelitian terdahulu dan buku-buku penunjang mengenai kajian kemantapan lereng pada tambang batubara sistem terbuka.

B.2 Pengambilan Data

Penyelidikan ini dilakukan untuk mendapatkan faktor internal dan faktor eksternal yang mempengaruhi pemodelan dan analisis geoteknik. Kegiatan utama dalam penyelidikan geoteknik untuk mendukung desain tambang terbuka adalah “Pengeboran Geoteknik”. Hal ini dilakukan pada area yang belum tersingkap maupun yang sudah tersingkap atau terbuka, seiring dengan akan dibuka penggalian penambangan, pengeboran geoteknik permukaan bertujuan untuk mendapatkan data informasi tambahan tentang kondisi massa batuan di lapangan sehingga diketahui input parameter kekuatan batuan yang nanti akan digunakan ketika pemodelan dan analisis geoteknik.

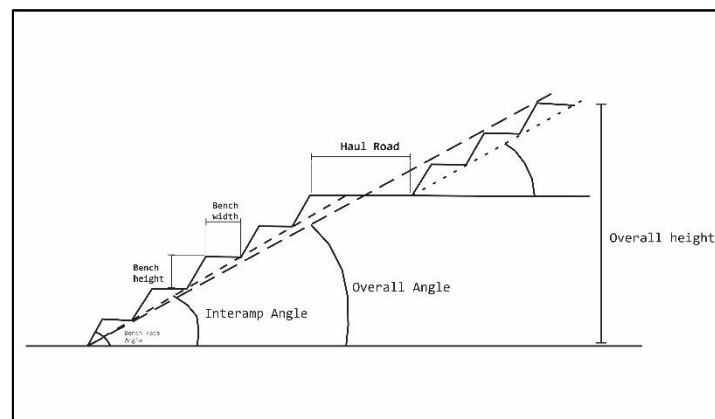
Pengambilan data primer dilakukan dengan observasi lapangan melakukan pengeboran geoteknik yang bertujuan untuk mendapatkan informasi batuan penyusun lereng tambang baik berupa *sample core*, kemudian perekaman informasi logbor yang mewakili data lokasi penelitian hasil dari tim geologis serta tim geoteknik, mengukur kedalaman muka air tanah, kemudian dari sample core hasil pengeboran dilakukan uji laboratorium untuk mengetahui data sifat fisik dan sifat mekanik batuan yang mewakili kondisi batuan di lokasi penyelidikan.

Pengambilan data sekunder diantaranya data yang diperoleh dari kegiatan eksplorasi seperti peta topografi serta model geologi bawah permukaan di lokasi penelitian, kemudian mengetahui data rencana design akhir rencana penambangan batubara, mengetahui data getaran gempa dari peta zonasi gempa yang dikeluarkan oleh kementerian pekerjaan umum, serta data getaran peledakan yang pernah dilakukan dari tim teknis.

B.3. Pengolahan Data

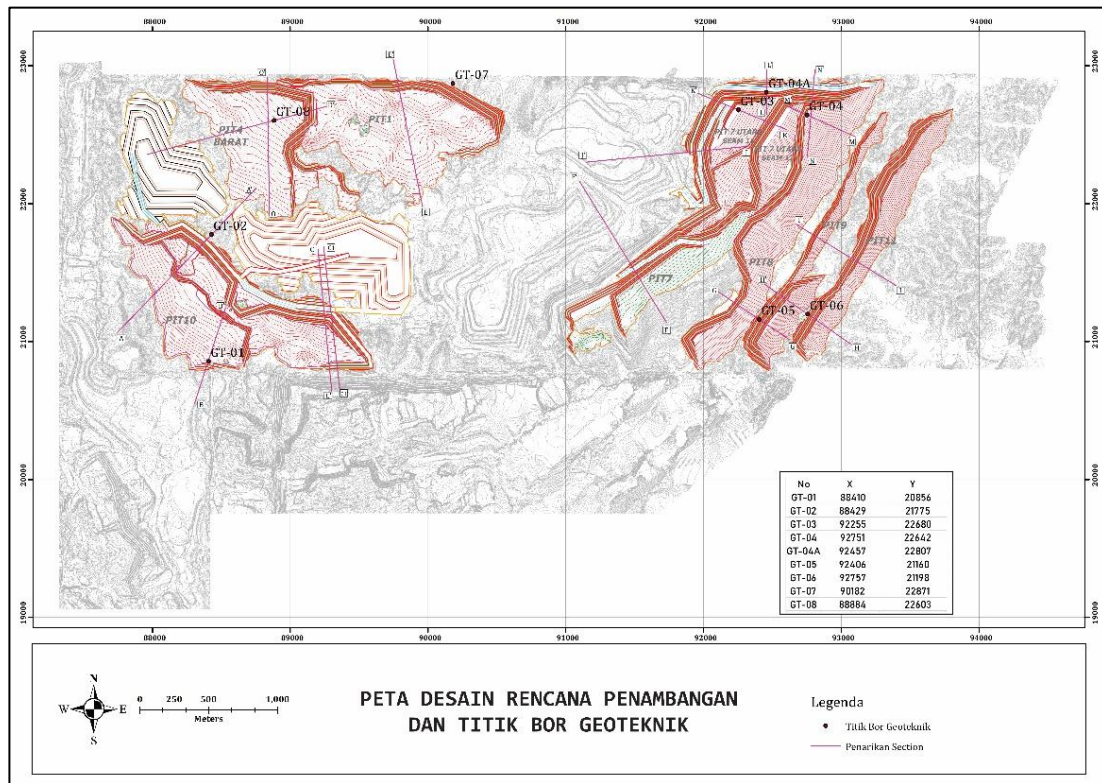
B.3.1 Pemodelan Lereng

Pemodelan lereng adalah representasi alamiah lereng bukaan tambang (Gambar 1.) yang akan dianalisis dengan memasukkan faktor internal dan faktor eksternal, sehingga dapat menggambarkan dan mewakili keadaan lereng bukaan tambang mendekati keadaan sebenarnya di lapangan. Dalam studi geoteknik ini, pemodelan dan analisis kemantapan lereng akan menggunakan pemodelan numerik metode kesetimbangan batas.



Gambar 1. Geometri lereng pada tambang terbuka (Hoek dan Bray, 1981)

Analisis kemantapan lereng bertujuan untuk mengetahui kondisi stabilitas lereng bukaan tambang yang akan terbentuk sesuai dengan rencana penambangan (*pit plan*) yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Rencana Penambangan

B.3.2 Hasil Uji Laboratorium

Sampel (*Undisturbed Sample*) yang telah diambil dari pengeboran geoteknik yang dilakukan di 9 titik berbeda yang tersebar di 7 pit akan dilakukan pengujian sampel di Laboratorium Geomekanika untuk mengetahui nilai sifat fisik (berat natural, berat jenuh, porositas dan *void ratio*) dan sifat mekanik (kuat tekan, kuat tarik dan *point load*) dari batuan penyusun pada lereng tambang yang akan dibuka. Berikut adalah contoh tabel hasil pengujian sampel di Laboratorium Geomekanika (Tabel 1.)

Tabel 1. Contoh Hasil uji laboratorium sampel titik bor GT-06

No	Sample ID/Hole No	Unit	GT06/01	GT06/03	GT06/04	GT06/05	GT06/06
			01,70 - 02,70	11,50 - 15,00	15,60 - 16,50	22,00 - 23,30	28,80 - 29,80
	Depth (m)		Carbon	Sandstone	Sandstone	Sandstone	Claystone
1	Natural Water Content	%	21,3	20,8	19,46	18,17	15,97
2	Spesific Gravity		2,69	2,66	2,67	2,68	2,66
3	Unit Weight Natural State	gr/cm ³	1,72	1,99	2,07	2,07	2,14
4	Dry Unit Weight	gr/cm ³	1,42	1,65	1,73	1,75	1,85
5	Degree Saturation	%	63,52	90,4	96,15	92,21	96,16
6	Natural Porosity	%	47,46	37,98	35,09	34,53	30,67
7	Natural Void Ratio		0,9	0,61	0,54	0,53	0,44
10	Triaxial UU						
	Int. Fric Angle	degree	8,19	24,56	31,68	31,96	18,09
	Cohesion	kPa	58,68	166,51	86,51	339,78	374,99
	Ultimate Strength	Mpa	0,06	0,37	0,96	1,21	0,76
11	UCS						
	Poisson's Ratio		0,13	0,31	0,34	0,26	0,4
	Modulus Elasticity	MPa	1,3	13,5	34,3	58,00	30,3
12	Tensile Strength (Brazilian Test)	ot					
		kg/cm ²	6,05	6,88	7,89	7,84	7,67
13	Ultrasonic	E					
		kg/cm ²	1362,44	4786,6	7759,07	11910,02	11033,03
		μ	0,46	0,58	0,47	0,47	0,45

B.3.3 Input Parameter Yang Digunakan Untuk Pemodelan Geoteknik Pit Tambang

Dalam kajian ini, pemodelan dan *analysis* kemandapan lereng *High-wall*, *Side-wall* serta *Low-wall* berdasarkan desain rencana akhir tambang, Analisis lereng ini akan menggunakan pendekatan analisis sebagai berikut :

- **Beban dinamik**
 Beban dinamik yang dimaksudkan dalam pemodelan ini gaya luar berupa faktor kegempaan dengan satuan *g* (*gravity*) yang didasarkan pada Peta Zonasi Gempa Indonesia. Untuk lokasi penelitian memiliki beban dinamik sebesar 0,093 *g* mengambil nilai maksimum dari faktor gempa. Untuk pemodelan geometri lereng tambang dan lereng timbunan yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan percepatan getaran peledakan yang dihasilkan oleh perusahaan yaitu 0,15 *g*.
- **Karakteristik material**
 Input parameter pemodelan geoteknik (sifat fisik dan sifat mekanik) batuan untuk semua lapisan pembentuk model lereng ditentukan berdasarkan karakterisasi massa batuan hasil dari uji laboratorium. Database salah satu dari beberapa hasil uji laboratorium geomekanik yang dilakukan dengan beberapa penyesuaian dapat dilihat pada Tabel 2 :

Tabel 2. Input parameter penampang pemodelan geoteknik pit 10

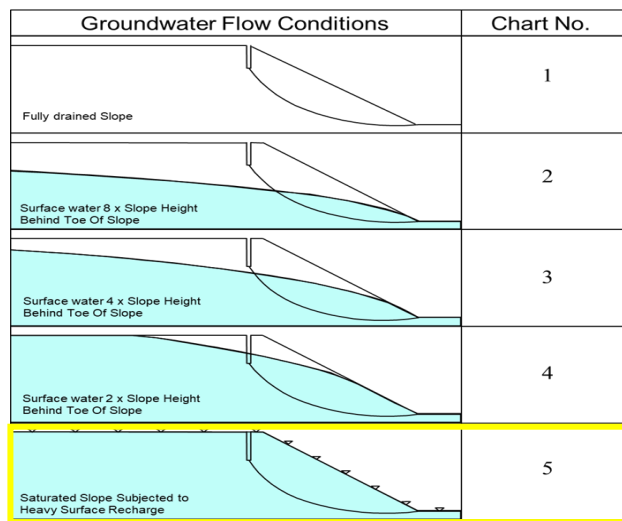
No	Lithology	Unit Weight (kN/m ³)	Int. Fric Angle (°)	Cohesion (kPa)
1	Claystone	20.20	18.56	79.12
2	Claystone	19.50	35.15	400.00
3	Carbon	17.80	15.96	142.75
4	Sandstone	22.87	35.79	10.00
4	Soil	20.30	15.96	55.27
5	Claystone	19.20	19.27	92.47
6	Sandstone	22.90	35.79	375.66
7	Sandstone	21.43	41.91	388.13
8	Sandstone	21.06	43.23	378.55
9	Claystone	21.35	37.32	314.28
10	Waste Dump	16.90	19.20	50.00
11	Coal	12.60	34.13	120.00

- **Muka air tanah**
 Untuk mengetahui pengaruh air, dalam model direpresentasikan dengan garis muka air tanah. Efek dari keberadaan air dalam massa batuan adalah menambah massa jenis batuan sehingga beban yang harus ditahan oleh lereng bertambah. Di sisi lain juga air menyebabkan menurunnya kekuatan massa batuan karena menimbulkan tekanan pori. Dari

hasil pengukuran ketinggian MAT yang hampir mendekati permukaan maka diasumsikan bentuk muka air tanah berdasarkan gambar kondisi air oleh Hoek & Bray (Gambar 3) Dalam pemodelan lereng ini menggunakan asumsi muka air tanah sesuai kondisi MAT nomor 5 atau keadaan jenuh.

B.3.4 Input Parameter Yang Digunakan Untuk Pemodelan Geoteknik Timbunan

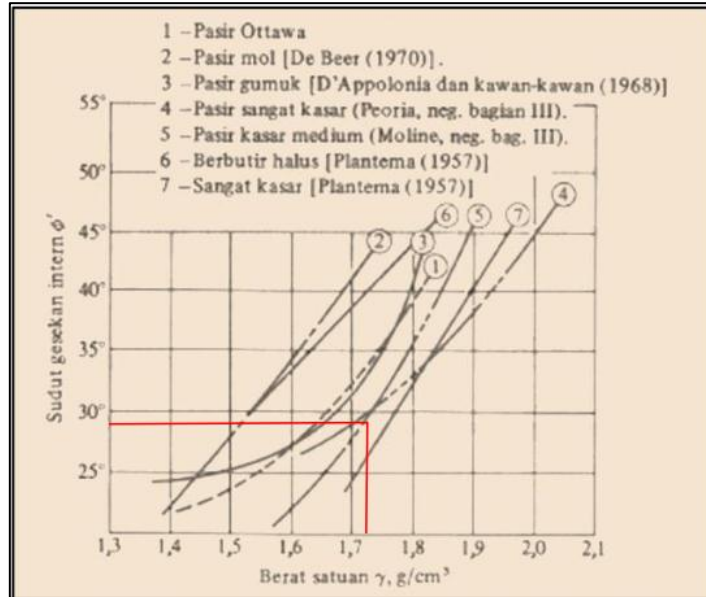
Parameter geoteknik material timbunan ditentukan dengan cara pendekatan, yaitu dengan memperkirakan suatu parameter ekuivalen yang mewakili campuran material tersebut, yang didasarkan atas data bor. Densitas rata-rata batulempung dan batupasir berturut-turut adalah; 2,14 dan 2,17 gr/cm³. Densitas material in-situ ekuivalen = (55% x(2,14) + 45% x(2,17)) = 2,153 gr/cm³. Density material in-situ ekuivalen = 2,153 gr/cm³. Swell Factor material campuran diperkirakan (umumnya) ~ 80%. Sehingga, density material timbunan (lepas) = 2,153 gr/cm³ x 80% = 1,723 gr/cm³. Jadi, bobot isi (unit weight) tanah timbunan ekuivalen = 1723 kg/m³ x 9,81 m/dt² = 16.902 N/m³ = 16,902 kN/m³.



Gambar 3. Kondisi muka air tanah yang digunakan (E. Hoek & J. W. Bray, 1981)

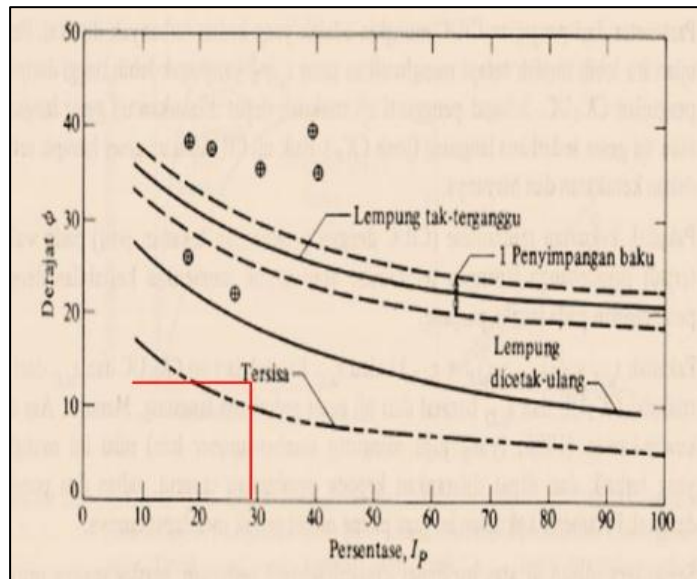
Parameter kekuatan material timbunan ekuivalen terdiri dari kohesi (c) dan sudut gesek-dalam (φ), ditentukan dengan menggunakan kurva, sebagai berikut:

- Kurva hubungan densitas dan sudut gesek-dalam material waste (untuk timbunan yang dominan bersifat pasiran), atau
- Kurva hubungan antara IP (*index plasticity*) dan sudut gesek-dalam material waste (untuk timbunan yang dominan lempungan).



Gambar 4. Kurva hubungan sudut gesek dalam dengan densitas material timbunan

Dari kurva pada Gambar 4.6 dapat ditentukan sudut gesek dalam material timbunan ekuivalen, $\phi_{waste} = 28^\circ$. Dari kurva pada Gambar 4.7, dapat ditentukan sudut gesek dalam material timbunan ekuivalen (umumnya $\sim IP$ (material clay) = 15% – 25%, diambil = 20%), adalah $\phi_{waste} = 12^\circ$.



Gambar 5. Kurva hubungan sudut gesek dengan IP material timbunan

Sehingga sudut gesek dalam material timbunan ekuivalen = $(12)(55\%) + (28)(45\%) = 19,2$ derajat. Dengan demikian, parameter geoteknik material timbunan untuk desain ditentukan sebagai berikut :

- Bobot isi (unit weight) = $16,902 \text{ kN/m}^3$
- Kohesi (cohesion) = 50 kPa
- Sudut gesek-dalam = $19,2^\circ$

B.3.5 Kriteria Kemantapan

Analisis ini akan menggunakan $FK \geq 1,1$ untuk menyatakan bahwa lereng dalam keadaan stabil dengan nilai probabilitas kelongsoran maksimal 5%, sesuai kriteria faktor keamanan yang dianjurkan KepMen ESDM nomor 1827, 2018. Jika hasil simulasi mempunyai $FK < 1,1$ dan nilai probabilitas kelongsoran $> 5\%$, maka lereng dinyatakan belum stabil.

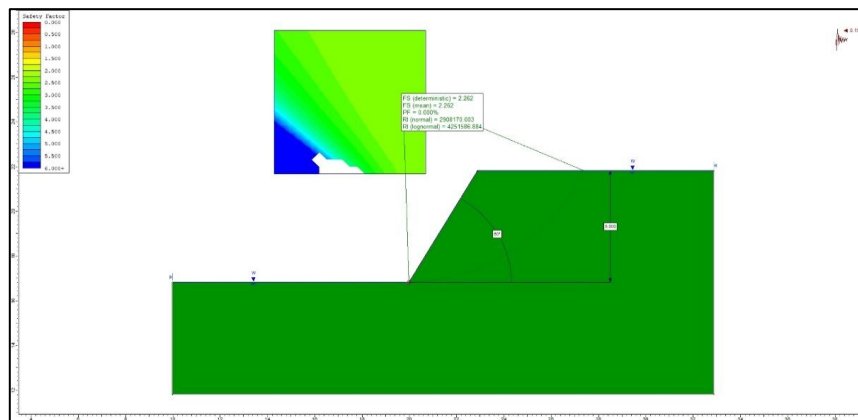
Tabel 3. Kriteria faktor keamanan (Kepmen ESDM 1827 : 2018)

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 ($FK \leq 1$))
Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1,1	Tidak Ada	25-50%
	Rendah	1,14-1,2	1,0	25%
Inter-ramp	Menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
Lereng Keseluruhan	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

C.1 Pemodelan dan Analisis Kemantapan Lereng Tunggal

Analisis kestabilan untuk lereng tunggal (*single slope*) dilakukan untuk menentukan tinggi dan sudut lereng tunggal, dengan cara memvariasikan tinggi dan kemiringan lereng sampai diperoleh geometri lereng yang stabil dan aman. Hasil simulasi lereng tunggal menggunakan variasi sudut dan ketinggian yang berbeda-beda untuk menunjukkan bahwa semua model yang disimulasikan diharapkan dapat digunakan dalam kondisi yang stabil. adapun contoh dari beberapa hasil simulasi lereng dapat dilihat pada (Gambar 6. dan Tabel 4.)



Gambar 6. Contoh simulasi lereng tunggal litologi *claystone* ($H = 5 \text{ m}$, $\alpha = 60^\circ$, $SF = 2,26$, $PF = 0\%$)

Tabel 4. Rekapitulasi hasil simulasi lereng tunggal

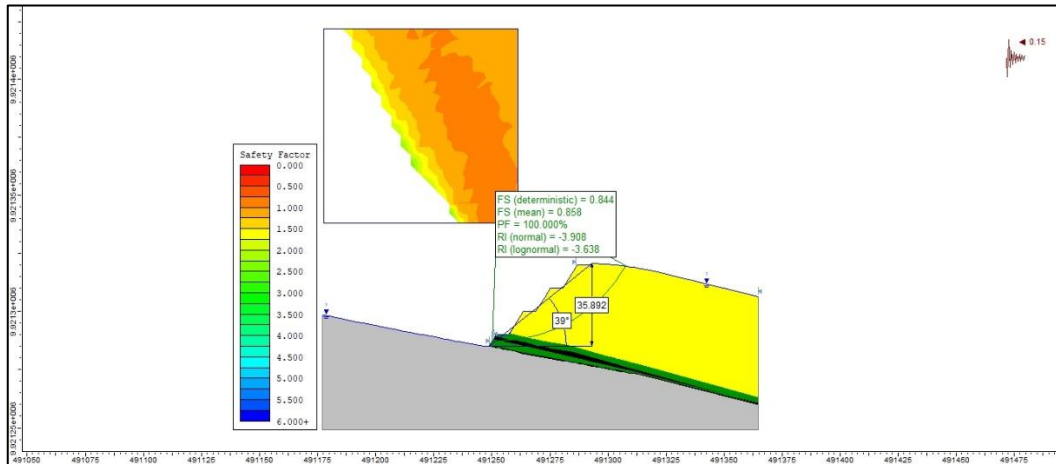
Location	GT Lithology	H = 5m								H = 10m							
		SF	PF	SF	PF	SF	PF	SF	PF	SF	PF	SF	PF	SF	PF		
		55°	60°	65°	70°	55°	60°	65°	70°	55°	60°	65°	70°	55°	60°		
PIT 01	Coal	4.14	0.00	4.01	0.00	3.80	0.00	3.72	0.00	2.05	0.00	1.97	0.00	1.89	0.00	1.81	0.00
	Claystone	8.52	0.00	8.29	0.00	8.04	0.00	7.75	0.00	4.33	0.00	4.20	0.00	4.06	0.00	3.93	0.00
	Sandstone	8.22	0.00	8.01	0.00	7.76	0.00	7.48	0.00	4.17	0.00	4.05	0.00	3.92	0.00	3.79	0.00
	Soil	2.50	0.00	2.43	0.00	2.34	0.00	2.25	0.00	1.29	0.00	1.24	0.00	1.19	0.00	1.15	0.00
PIT04	Coal	4.14	0.00	4.01	0.00	3.80	0.00	3.70	0.00	2.05	0.00	1.97	0.00	1.89	0.00	1.81	0.00
	Claystone	7.43	0.00	7.21	0.00	6.97	0.00	6.71	0.00	3.82	0.00	3.69	0.00	3.55	0.00	3.42	0.00
	Sandstone	8.83	0.00	8.57	0.00	8.29	0.00	7.98	0.00	4.53	0.00	4.38	0.00	4.22	0.00	4.02	0.00
	Soil	2.19	0.00	2.11	0.00	2.01	0.00	1.92	0.00	1.16	0.00	1.10	0.00	1.03	0.00	0.96	100.00
PIT 09	Carbon	8.63	0.00	8.39	0.00	8.11	0.00	7.81	0.00	4.33	0.00	4.19	0.00	4.03	0.00	4.47	0.00
	Claystone	7.23	0.00	7.02	0.00	6.78	0.00	6.52	0.00	3.70	0.00	3.57	0.00	3.43	0.00	3.78	0.00
	Siltstone	6.58	0.00	6.38	0.00	6.17	0.00	5.93	0.00	3.38	0.00	3.26	0.00	3.13	0.00	3.44	0.00
	Sandstone	8.28	0.00	8.04	0.00	7.77	0.00	7.48	0.00	4.23	0.00	4.08	0.00	3.93	0.00	3.76	0.00
PIT 10	Coal	4.14	0.00	4.01	0.00	3.87	0.00	3.72	0.00	2.05	0.00	1.97	0.00	1.89	0.00	1.80	0.00
	Carbon	3.57	0.00	3.47	0.00	3.36	0.00	3.24	0.00	1.81	0.00	1.76	0.00	1.69	0.00	1.62	0.00
	Claystone	2.35	0.00	2.26	0.00	2.16	0.00	2.06	0.00	1.24	0.00	1.18	0.00	1.11	0.00	1.03	0.00
	Sandstone	9.73	0.00	9.45	0.00	9.15	0.00	8.81	0.00	5.05	0.00	4.83	0.00	4.66	0.00	4.47	0.00

C.2 Pemodelan dan Analisis Kestabilan Lereng Pit

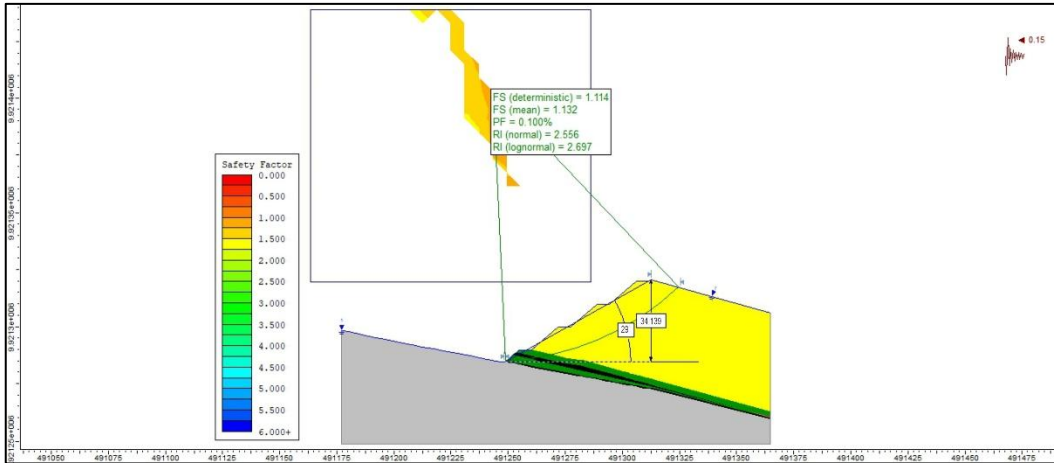
Analisis kestabilan lereng keseluruhan bertujuan untuk menentukan tingkat faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran suatu lereng dengan membuat model lereng pada sudut dan tinggi tertentu. Hasil dari analisis yang dilakukan pada 7 pit tersebut adalah rekomendasi tinggi dengan sudut lereng tertentu yang diijinkan berdasarkan (Kepmen. 1827) atau (Stacey, 2009). Adapun beberapa pemodelan yang telah dilakukan sebagai berikut :

- Penampang B-B' untuk pit 10 (*highwall*)

Hasil pemodelan lereng *highwall* pada penampang B-B' menunjukkan rencana geometri lereng bukaan akhir tambang dengan tinggi lereng 35,892 meter dan sudut kemiringan lereng 39° menunjukkan desain lereng yang tidak aman, sehingga agar lereng menjadi aman maka lereng dilakukan desain ulang geometri lereng dengan menurunkan sudut kemiringan 39° menjadi 31°, sehingga nilai FK = 0,844 dan PK= 100% menjadi FK = 1,131 dan PK = 0% (Gambar 7 dan Gambar 8).

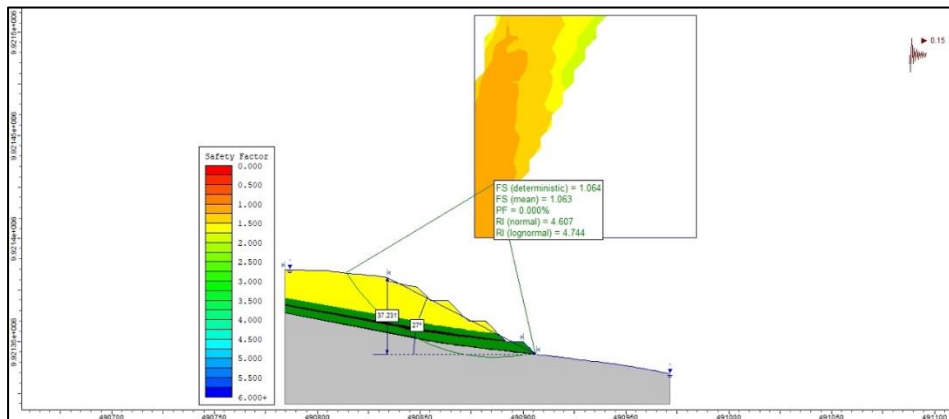


Gambar 7. Simulasi *highwall* penampang B-B' (desain awal) (H = 35,892 m, $\alpha = 39^\circ$, FK = 0,844 , PK = 100%)

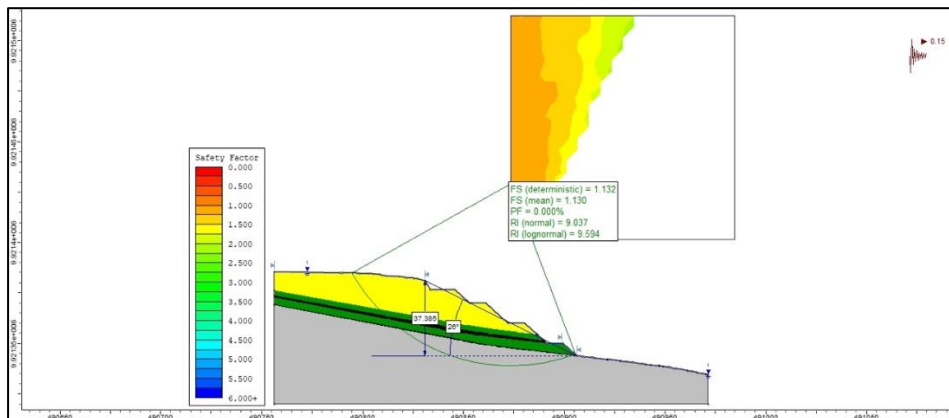


Gambar 8. Simulasi *highwall* penampang B-B' (Rekomendasi)
($H = 35,892$ m, $\alpha = 29^{\circ}$, FK = 1,114, PK = 0,1 %)

- Penampang B-B' untuk pit 10 (*lowwall*)
 Hasil pemodelan lereng *lowwall* pada penampang B-B' menunjukkan rencana geometri lereng bukaan akhir tambang dengan tinggi lereng 37,321 meter dan sudut kemiringan lereng 27° menunjukkan desain lereng yang kritis, sehingga agar lereng menjadi aman maka lereng dilakukan desain ulang geometri lereng dengan menurunkan sudut kemiringan 27° menjadi 22° , sehingga nilai FK = 1,064 dan PK = 0% menjadi FK = 1,132 dan PK = 0% (Gambar 9 dan Gambar 10).

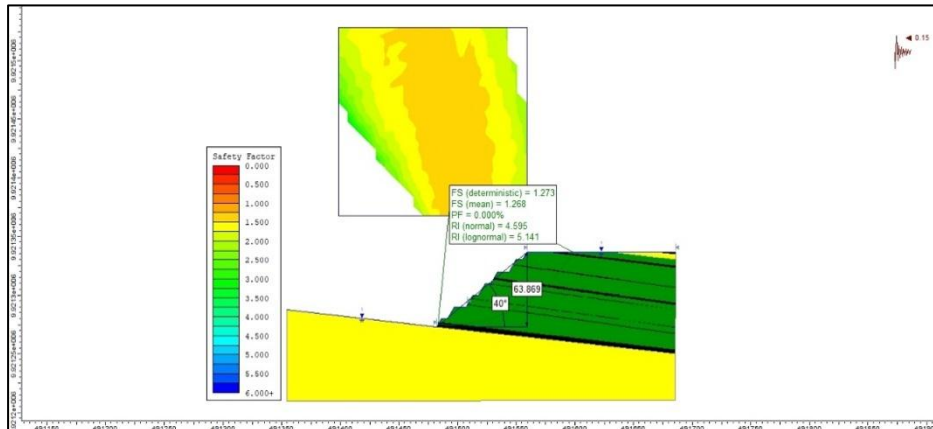


Gambar 9. Simulasi *lowwall* penampang B-B' (desain awal)
($H = 37,231$ m, $\alpha = 27^{\circ}$, FK = 1,064, PK = 0%)

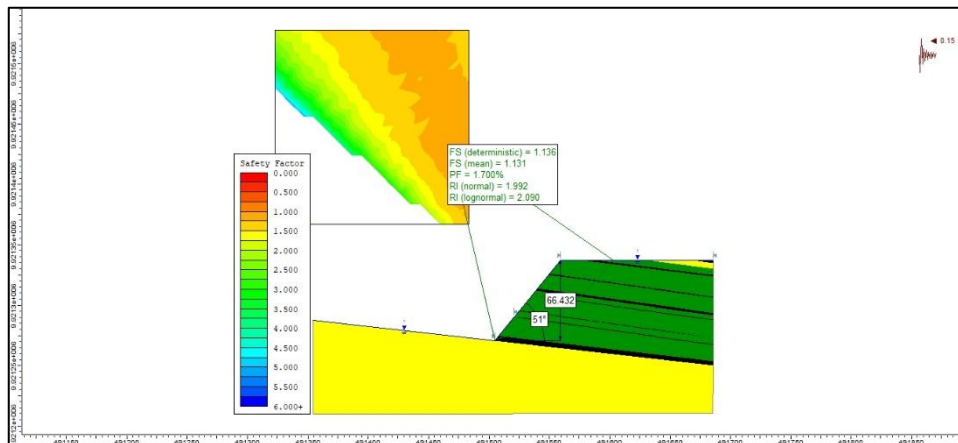


Gambar 10. Simulasi *lowwall* penampang B-B' (Rekomendasi)
($H = 37,385$ m, $\alpha = 26^\circ$, FK = 1,132, PK = 0%)

- Penampang O-O' untuk pit 4 (*sidewall*)
Hasil pemodelan lereng *sidewall* pada penampang O-O' menunjukkan rencana geometri lereng bukaan akhir tambang dengan tinggi lereng 63,869 meter dan sudut kemiringan lereng 40° menunjukkan desain lereng yang aman, sehingga agar lereng lebih optimal tidak banyak mengeruk *overburden* maka dilakukan desain ulang geometri lereng dengan menaikkan sudut kemiringan 40° menjadi 51° , sehingga nilai FK = 1,273 dan PK= 0% menjadi FK = 1,136 dan PK = 1,7% (Gambar 11 dan Gambar 12).



Gambar 11. Simulasi *lowwall* penampang B-B' (desain awal)
($H = 63,869$ m, $\alpha = 40^\circ$, FK = 1,273, PK = 0%)



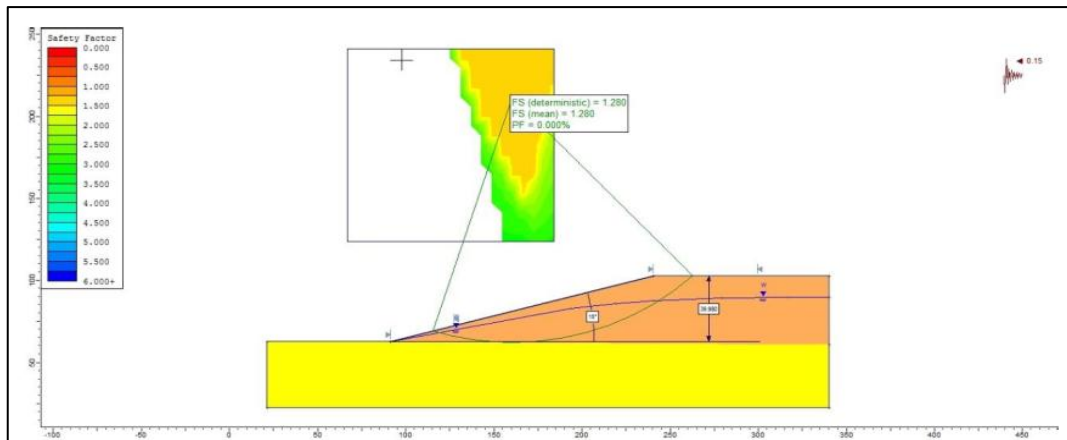
Gambar 12. Simulasi *lowwall* penampang B-B' (desain awal)
($H = 66,432$ m, $\alpha = 27^\circ$, FK = 1,136, PK = 1,7%)

C.3 Pemodelan dan Analisis Kestabilan Lereng Timbunan

Menurut jenis material yang akan ditimbun, waste dump akan dibentuk oleh timbunan yang terdiri dari atau campuran dua jenis batuan, yaitu batulempung dan batupasir, dengan perbandingan komposisi campuran 55% : 45% (data log bor geoteknik).

Analisis kestabilan lereng untuk timbunan (*waste dump slope*) dilakukan dengan metode keseimbangan batas. Simulasi lereng timbunan menggunakan variasi sudut dan ketinggian lereng yang berbeda-beda untuk menunjukkan bahwa semua model yang disimulasikan diharapkan dapat digunakan dalam kondisi yang stabil dengan menggunakan acuan faktor keamanan (FK) ~ 1,20 dan

memperhitungkan faktor getaran sebesar 0,15 g, contoh simulasi dapat dilihat pada gambar 11 dan rekapitulasi hasil pemodelan dan analisis keamanan lereng dapat dilihat pada tabel 6.



Gambar 13. Simulasi lereng timbunan di luar pit (OPD)
($H=40\text{m}$, $\alpha= 15^{\circ}$, $SF=1,28$, $PF=0,00$)

Tabel 5. Rekapitulasi hasil

PIT	Penampang	Lereng	Elevasi Terendah (mdpl)	Tinggi (m)	Kemiringan (°)	SF	PF (%)	Keterangan	
10	A-A'	High-wall		69,665	33	1,344	0	Desain Awal	
		High-wall	-30	76,245	48	1,209	4,9	Rekomendasi	
		Low-wall		48,105	13	1,298	0	Desain Awal	
		High-wall 2		31,422	32	1,040	14,98	Desain Awal	
		High-wall 2	-20	31,184	32	1,118	0	Rekomendasi	
		Low-wall 2		38,591	11	1,331	0	Desain Awal	
	B-B'	High-wall		35,892	39	0,844	100	Desain Awal	
		High-wall	-15	34,139	29	1,131	0	Rekomendasi	
		Low-wall		37,231	27	1,082	0	Desain Awal	
		Low-wall		40,109	22	1,132	0	Rekomendasi	
		High-wall	-30	97,900	30	1,137	0	Desain Awal	
		Low-wall		69,284	15	1,124	1,5	Desain Awal	
4 Barat	C1-C1'	Low-wall	-30	31,533	28	1,218	0	Desain Awal	
		Gantung							
	D-D'	High-wall		73,083	36	1,321	0	Desain Awal	
		High-wall	-40	77,023	49	1,09	0	Rekomendasi	
	O-O'	Low-wall		132,165	7	1,375	0	Desain Awal	
		Side-wall	-40	63,869	40	1,273	0	Desain Awal	
	1	E-E'	Side-wall		66,432	51	1,136	1,7	Rekomendasi
			High-wall		65,424	38	1,476	0	Desain Awal
		F-F'	High-wall	-10	66,679	43	1,100	0	Rekomendasi
			Low-wall		89,936	7	1,406	0	Desain Awal
		J-J'	High-wall		141,228	29	1,022	10	Desain Awal
			High-wall	-80	135,305	26	1,103	0	Rekomendasi
7		K-K'	Low-wall		44,401	14	1,109	0	Desain Awal
			High-wall	-50	95,000	31	1,124	0	Desain Awal
		L-L'	High-wall		88,262	27	1,584	0	Desain Awal
			High-wall		89,631	34	1,223	1,7	Rekomendasi
		M-M'	High-wall 2	-55	69,549	40	1,089	10,5	Desain Awal
			High-wall 2		68,285	38	1,147	2,2	Rekomendasi
	G-G'	Low-wall		54,463	16	1,362	0	Desain Awal	
		Side-wall	-70	69,549	28	1,387	0	Desain Awal	
	8	N-N'	Side-wall		68,285	34	1,133	0	Rekomendasi
			Low-wall	-55	54,463	18	1,457	0	Desain Awal
		M-M'	High-wall		36,456	34	2,145	0	Desain Awal
			High-wall	0	42,868	51	1,123	0,3	Rekomendasi
G-G'		Low-wall		45,854	19	1,348	0	Desain Awal	
		High-wall		40,000	43	1,222	3,4	Desain Awal	
M-M'		Low-wall	-90	115,826	19	1,021	29,1	Desain Awal	
		Low-wall		90,000	19	1,102	0,2	Rekomendasi	
9		N-N'	Side-wall	-90	124,703	39	1,088	3,5	Desain Awal
			Side-wall		123,182	36	1,106	0,1	Rekomendasi
		G-G'	High-wall		80,000	41	1,145	0	Desain Awal
			Low-wall	-40	63,305	25	1,282	0	Desain Awal
	I-I'	High-wall		30,468	41	1,544	0	Desain Awal	
		High-wall	-5	30,470	49	1,245	0,3	Rekomendasi	
	H-H'	Low-wall		30,079	26	1,248	0	Desain Awal	
		High-wall		57,973	42	1,136	0	Desain Awal	
	I-I'	Low-wall	-30	51,770	25	1,289	0	Desain Awal	
		High-wall		50,000	38	1,118	0,6	Desain Awal	
	I-I'	Low-wall	-20	44,589	24	1,364	0	Desain Awal	

simulasi dan analisis kemandapan lereng pit tambang

Tabel 6. Rekapitulasi hasil pemodelan dan analisis kemandapan lereng timbunan

Tinggi Lereng Timbunan (meter)	Sudut kemiringan lereng timbunan (derajat)													
	5		10		15		20		25		30		35	
	SF	PF	SF	PF	SF	PF	SF	PF	SF	PF	SF	PF	SF	PF
20							1,46	0,00	1,32	0,00	1,22	0,00	1,14	0,00
30					1,31	0,00	1,25	0,00	1,20	0,00	1,11	0,00	0,92	100,00
40			1,55	0,00	1,28	0,00	1,23	0,00	1,07	0,00	0,98	100,00	0,87	100,00
50	1,76	0,00	1,39	0,00	1,22	0,00	1,07	0,00	0,95	100,00	0,87	100,00		
60	1,46	0,00	1,25	0,00	1,02	0,00	0,90	100,00	0,80	100,00	0,70	100,00		
70	1,26	0,00	1,11	0,00	0,91	100,00	0,82	100,00						

D. KESIMPULAN

Perhitungan menggunakan metode kesetimbangan batas secara dua dimensi dapat memberikan pendekatan awal mengenai kondisi stabilitas lereng dengan jenis longsoran busur yang ditunjukkan oleh nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran. Hasil simulasi dan analisis geoteknik ketika didapati kondisi lereng tidak aman, maka agar lebih mudah dalam *redesign* geometri lerengnya perlu mengetahui dulu kemandapan lereng tunggal yang nantinya akan diterapkan pada lereng keseluruhan sehingga dapat memiliki acuan nilai geometrinya (tinggi dan sudut kemiringan lereng. Simulasi dan analisis geoteknik yang telah dilakukan pada lereng tunggal, lereng keseluruhan (*highwall*, *sidewall*, *lowwall*) serta lereng timbunan didapati beberapa kesimpulan sebagai berikut :

D.1 Lereng Tunggal

Hasil simulasi lereng tunggal menggunakan variasi sudut (50, 100, 150, 200, 250, 300, dan 350) dengan ketinggian (20, 30, 40, 50, 60 dan 70 m). Variasi sudut dan ketinggian yang disimulasikan berada dalam kondisi yang stabil dengan kriteria SF (Stacey, 2009), sehingga dalam merencanakan geometri lereng bukaan tambang dapat menggunakan model mana saja setelah mempertimbangkan faktor produktivitas alat peledakan serta hal lainnya.

D.2 Lereng Keseluruhan

Simulasi dan analisis untuk lereng keseluruhan yang dilakukan pada beberapa pit menghasilkan kondisi yang aman serta adapula yang tidak aman, berikut adalah hasil simulasi dan analisis desain awal rencana tambang :

- Lereng *highwall* yang tidak aman terdapat 1 lereng pada pit 10, 2 lereng pada pit 7. Kemudian lereng *highwall* yang aman terdapat 2 lereng pada pit 10, 1 lereng pada pit 4, 1 lereng pada pit 1, 2 lereng pada pit 7, 2 lereng pada pit 8, 2 lereng pada pit 9, serta 2 lereng pada pit 11.
- Lereng *lowwall* yang tidak aman terdapat 1 lereng pada pit 10, 1 lereng pada pit 8. Kemudian lereng *lowwall* yang aman terdapat 3 lereng pada pit 10, 1 lereng pada pit 4, 1 lereng pada pit 1, 3 lereng pada pit 7, 1 lereng pada pit 8, 2 lereng pada pit 9, 2 lereng pada pit 11.
- Lereng *sidewall* yang tidak aman terdapat 1 lereng pada pit 8. Kemudian lereng *sidewall* yang aman terdapat 1 lereng pada pit 4 serta 1 lereng pada pit 7.

Dari hasil simulasi dan analisis geoteknik pada desain awal rencana tambang maka dilakukan desain ulang geometri lereng *highwall*, *lowwall* dan *sidewall* sampai tercapainya lereng keseluruhan yang aman dan optimal.

D.3 Timbunan

Hasil simulasi dan analisis kemantapan lereng timbunan di luar pit menggunakan beberapa variasi sudut (55°, 60°, 65° dan 70°) dengan ketinggian (5 dan 10 m). Dengan menggunakan acuan SF>1,20 dan memperhitungkan faktor getaran sebesar 0,15 g, maka direkomendasikan geometri lereng timbunan di luar pit adalah :

- tinggi 30 m, kemiringan 25°
- tinggi 40 m, kemiringan 20°
- tinggi 50 m, kemiringan 15°
- tinggi 60 m, kemiringan 10°
- tinggi 70 m, kemiringan 5°

E. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kami ucapkan kepada Bapak Maryanto, atas ide dan sarannya, kemudian kami ucapkan termikasih kepada Bapak Harry yang telah memberikan dukungan kepada kami untuk menulis, serta tak lupa penulis ucapkan terimakasih kepada kawan seperjuangan Ekky S. , Lusitania Hsr, Ridho Qurniawan, Afdal Muhajir dan Arbi Pramuji dalam menyelesaikan tulisan dengan judul “Kajian Geoteknik Untuk Optimalisasi Desain Tambang Batubara Menggunakan *Limit Equilibrium Method*”.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, Irwandy, 2016, *Geoteknik Tambang*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Astawa Rai, Made. Suseno K.D. dan Ridho K. Wattimena., 2013, *Mekanika Batuan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Bieniawski, Z. T., 1984, *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Bishop, A.W. 1955. *The Use the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. Geotechnique, Vol. 5, No. 1, hal 7-17.
- Das, M. Braja, 2006, *Principles Of Geotechnical Engineering*, Stamford, Cengage Learning
- Hoek, E. & J. W. Bray, 1981. *Rock Slope Engineering*, Revised Third Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Sulistijo, Budi, 2002, *Analisis Kemantapan Lereng Batuan*, Kursus Singkat, Geoteknik Terapan Untuk Tambang Terbuka, Departemen Teknik Pertambangan ITB, Bandung.

