



OPTIMISASI KESTABILAN LERENG TUNGGAL LAPISAN OVERBURDEN RENCANA TAMBANG MAHAYUNG DENGAN PENDEKATAN PROBABILISTIK

Moch. Faishal Amrullah^{1*}, Zufialdi Zakaria¹, R. Irvan Sophian¹, Joko Tunggal²

¹ Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran, Bandung.

² PT. Bukit Asam, Tbk.

*Korespondensi: moch14003@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Mahayung merupakan area pada wilayah izin usaha pertambangan Tambang Air Laya milik PT. Bukit Asam Tanjung Enim, Sumatera Selatan. Area Mahayung memiliki lapisan *overburden* yang cukup tebal, hal ini akan berpengaruh terhadap rencana penambangan. Produktivitas dalam kegiatan penambangan dan keamanan erat hubungannya dengan kestabilan lereng pada tambang terbuka. Aktivitas tambang terbuka (*open pit*) berhubungan dengan pengupasan tanah atau batuan penutup yang dapat merubah kondisi alami dan berpotensi menyebabkan bahaya seperti lereng yang tidak stabil dan kelongsoran. Penelitian ini dilakukan untuk mendapat desain lereng yang aman dan optimal dengan pendekatan probabilistik dengan simulasi Monte Carlo, sehingga mendapatkan nilai probabilitas kelongsoran dalam rangka mengurangi ketidakpastian dalam kajian stabilitas lereng. Perhitungan kestabilan lereng menggunakan metode *Limit equilibrium* dengan metode Bishop, dan penggunaan metode Anderson-Darling dalam memvalidasi fungsi distribusi yang paling cocok untuk variabel acak. Hasil penelitian menunjukkan variabel acak yang paling sensitif terhadap faktor keamanan adalah kohesi. Untuk lereng *High risk slope* (ambang batas PK=25%), sudut lereng yang aman terdiri atas H10 meter $\leq 90^\circ$; H 15 meter $\leq 80^\circ$; H 20 meter $\leq 70^\circ$; dan H 25 meter $\leq 60^\circ$. Untuk lereng *Low risk slope* (ambang batas PK=50%), maka hasil optimasi keamanan lereng bisa mencapai tinggi lereng 25 meter dengan sudut kemiringan lereng hingga 60° . Metode probabilistik merupakan alternatif yang memperkuat nilai FK dengan indikator nilai probabilitas kelongsoran (PK).

Kata kunci: Kestabilan Lereng; Probabilitas kelongsoran; Overburden; Optimal

ABSTRACT

Mahayung is an area of Air Laya Mine owned by PT. Bukit Asam Tanjung Enim, South Sumatra. Productivity and safety in mining is closely related to the stability of the slopes in open pit mines. This research was conducted to get a safe and optimal slope design with probabilistic analysis using Monte Carlo simulation to get the value of probability of failure. Calculation of slope stability using Bishop method, and use of Anderson-Darling (AD) method to fit the distribution function of random variables. The results show that the most sensitive random variable to the factor of safety is cohesion. For slopes with a High-risk slope condition (Acceptable POF = 25%), safe slope angle consists of H10 meters $\leq 90^\circ$; H 15 meters $\leq 80^\circ$; H 20 meters $\leq 70^\circ$; and H 25 meters $\leq 60^\circ$. For Low-risk slope condition (Acceptable POF = 50%), the optimization result of stable slope can reach a height of 25 meters slope with slope angle up to 60° . The probabilistic method is an alternative that reinforces the factor of safety value with the indicator of the probability of failure (POF).

Keywords: Slope stability, Probability of failure, Overburden, Optimize

1. PENDAHULUAN

Suatu lereng alami maupun buatan yang tersusun oleh tanah dan batuan pada dasarnya akan selalu mencari kondisi stabilnya terhadap gaya gaya yang timbul dari dalam maupun dari luar, adapun longsoran merupakan suatu proses alami yang terjadi untuk mendapatkan kondisi kestabilan lereng yang baru (keseimbangan baru), dimana gaya penahannya memiliki nilai yang lebih besar dibanding gaya penggerakannya. Kegiatan penambangan yang melibatkan pemotongan lereng akan mengganggu kestabilan lereng tersebut, ditambah lagi dengan faktor pemicu seperti proses pelapukan, erosi, transportasi, infiltrasi dan sedimentasi.

Ketidakpastian yang terkait dengan sifat material geoteknik dan perhatian besar yang harus diambil dalam memilih nilai yang tepat untuk analisis telah mendorong beberapa penulis untuk menyarankan bahwa metode deterministik tradisional analisis stabilitas lereng harus diganti dengan metode probabilistik (Imam & Brown (1983), McMahan (1975), Vanmarcke (1980), Morriss & Stoter (1983), Read and Lye (1983). Probabilistik adalah suatu cara untuk menentukan nilai faktor keamanan suatu sistem rekayasa dengan memperlakukan nilai masukan sebagai variabel acak, dengan demikian nilai faktor keamanan sebagai rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak merupakan juga variabel acak. Pada proses ini nilai parameter masukan dan faktor keamanan akan dikarakterisasi distribusi nilai masing-masing. Di samping itu juga pendekatan ini dapat melihat faktor yang paling mempengaruhi kestabilan lereng melalui analisis sensitivitas perubahan nilai setiap parameter masukan terhadap nilai faktor keamanan (Azizi, 2011).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Geologi Regional

Daerah penelitian termasuk dalam peta geologi lembar Lahat (Gafoer dkk., 1986) terletak pada *back arc basin* Sumatera bagian Selatan. Geologi daerah penelitian disusun oleh Formasi Air Benakat yang berumur Miosen Tengah-Miosen Akhir, Formasi Muaraenim yang berumur Miosen Akhir-Pliosen Awal dan Formasi Kasai Pliosen Akhir-Plistosen. Struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian berupa antiklinorium.

Daerah Tanjung Enim dan sekitarnya tersusun dari tua sampai dengan yang muda atas Formasi Air Benakat, Formasi Muara Enim dan Formasi Kasai.

a) Formasi Air Benakat

Litologi satuan ini adalah serpih gampingan yang kaya akan foraminifera di bagian bawahnya, makin ke atas dijumpai batupasir yang mengandung glaukonit. Pada puncak satuan ini pasirnya meningkat, kadang dijumpai sisipan tipis batubara atau sisa – sisa tumbuhan. Formasi ini diendapkan pada lingkungan neritik yang berangsur – ansur menjadi laut dangkal dan prodelta. Diendapkan selaras di atas Formasi Gumai pada miosen tengah hingga miosen akhir dengan ketebalan kurang dari 60 meter.

b) Formasi Muara Enim

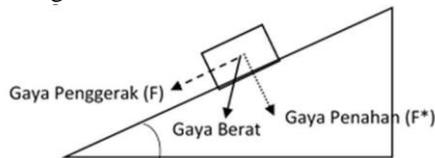
Merupakan indikasi yang mengandung batubara (*coal measure*) dicirikan dengan adanya batulempung, batulanau dan batupasir yang dominan. Di daerah Air Laya, Formasi Muara Enim tertinggi oleh endapan Sungai Tua secara tidak selaras. Endapan sungai – sungai yang berumur kuartar ini belum mengalami pemadatan secara sempurna.

c) Formasi Kasai

Formasi ini dicirikan oleh tufa yang berwarna putih, seperti yang tersingkap di daerah Suban maupun Klawas. Terdiri dari interbed tuff, batupasir tufaan, batu lanau tufaan, batulempung tufaan dan batubara tipis. Lingkungan pengendapannya dari darat sampai transisi dengan ketebalan 500 – 1000 meter.

Kesetimbangan Batas

Kestabilan lereng baik alami maupun buatan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yang dinyatakan secara sederhana sebagai gaya penahan dan gaya penggerak yang bertanggung jawab terhadap kestabilan lereng tersebut.



Gambar 2.1 Faktor Keamanan Sederhana (Romana, 1993)

Metode kesetimbangan batas membagi massa bidang gelincir menjadi n irisan-irisan kecil. Gaya-gaya geser yang bekerja pada n irisan diasumsikan mewakili seluruh bagian yang sama dari kuat geser batuan dimana gaya-gaya tersebut bekerja. Pada metode ini perhitungan analisis kestabilan lereng hanya menggunakan kondisi kesetimbangan statik dan mengabaikan adanya hubungan tegangan-regangan pada lereng (Arif, 2016). Untuk menyatakan nilai (tingkat) kestabilan suatu lereng dikenal apa yang disebut dengan nilai Faktor Keamanan (*Safety Factor*), yang merupakan hasil perbandingan antara besarnya gaya penahan terhadap gaya penggerak longsor, dan dinyatakan sebagai berikut:

$$FS = \frac{\sum \text{Gaya Penahan}}{\sum \text{Gaya Penggerak}}$$

Secara teoritis nilai $FK > 1,0$ berarti gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak dinyatakan sebagai lereng stabil, nilai $FK = 1,0$ dinyatakan sebagai batas kritis lereng stabil, dan nilai $FK < 1,0$ berarti gaya penggerak lebih besar dari gaya penahan dinyatakan sebagai lereng labil.

Metode Bishop

Metode bisop merupakan pengembangan dari metode sebelumnya, yaitu felenius. Metode ini merupakan metode yang sangat populer dalam analisis

kestabilan lereng dikarenakan perhitungannya yang sederhana, cepat dan memberikan hasil perhitungan faktor keamanan yang cukup teliti. Kesalahan metode ini apabila dibandingkan dengan metode lainnya yang memenuhi semua kondisi kesetimbangan seperti Metode Spencer atau Metode Kesetimbangan Batas Umum, jarang lebih besar dari 5%. Metode ini sangat cocok digunakan untuk pencarian secara otomatis bidang runtuh kritis yang berbentuk busur lingkaran untuk mencari faktor keamanan minimum.

Metode Bishop dipakai untuk menganalisis permukaan gelincir (*slip surface*) yang berbentuk lingkaran. Dalam metode ini diasumsikan bahwa gaya-gaya normal total berada/bekerja dipusat alas potongan dan bisa ditentukan dengan menguraikan gaya-gaya pada potongan secara vertikal atau normal. Persyaratan keseimbangan dipakai pada potongan-potongan yang membentuk lereng tersebut. Metode Bishop menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal (Bishop, 1955). Berikut adalah rumus metode Bishop :

$$FS = \frac{\sum \left[\frac{c' \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha + (W - \mu \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha) \cdot \tan \varphi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \cdot \tan \varphi) / FS} \right]}{\sum W \cdot \sin \alpha}$$

Keterangan :

FS = nilai faktor keamanan

α = sudut kemiringan lereng (o)

$c = c'$ = kohesi (kPa)

μ = tekanan air pori (kPa)

Δl = panjang tiap segmen (m)

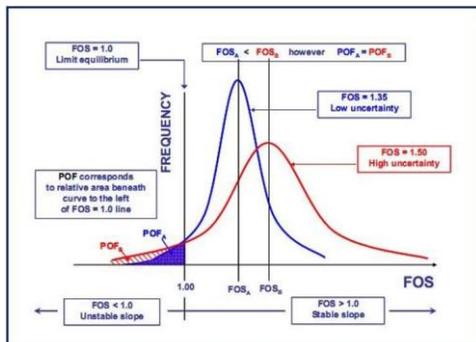
$\varphi = \varphi'$ = sudut geser dalam (o)

W = berat tiap segmen (kN)

Duncan and Wright (1980) menggarisbawahi bahwa untuk lereng yang mempunyai bidang longsor kritis membentuk busur lingkaran, angka keamanannya dapat dicari dengan menggunakan metode Bishop yang disederhanakan dengan hasil yang memuaskan dan dapat dipercaya.

Analisis Probabilistik

Probabilistik merupakan alternatif yang memperkuat nilai FK dengan indikator nilai probabilitas kelongsoran (PK). Dalam analisis probabilistik, nilai masukan sebagai variabel acak, dengan demikian nilai faktor keamanan sebagai rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak merupakan juga variabel acak. Cara ini lebih merepresentasikan nilai variasi alami yang dimiliki masing-masing parameter masukan mengingat dalam pengambilan data parameter masukan tersebut sangatlah minim dengan pertimbangan biaya uji yang mahal (Azizi, 2011). Probabilitas Kelongsoran (PK) dihitung sebagai rasio antara area pada distribusi FK < 1 dibagi dengan total area pada kurva distribusi probabilitas.



Gambar 2.2 Konsep Probabilitas Kelongsoran (Steffen, dkk 2008)

Simulasi Monte Carlo

Prinsip metode ini adalah dapat memperbanyak variasi nilai FK mengikuti jenis distribusi yang diasumsikan atau ditentukan.

Tahapan perhitungan probabilitas kelongsoran dengan metode Monte Carlo menurut Wyllie & Mah (2004) dalam Arief, 2016 adalah sebagai berikut :

1. Estimasi distribusi probabilitas pada setiap variabel acak input parameter kestabilan lereng (misalnya normal, lognormal)
2. Men-generate nilai acak (random) untuk setiap parameter jika berdistribusi uniform menggunakan

interval 0 dan 1 yang dikalikan dengan range tiap parameter (range antara nilai maksimum dan minimum). Untuk setiap fungsi yang lain diperlukan distribusi kumulatif pada setiap variabel acaknya.

3. Menghitung masing-masing nilai gaya penahan dan penggerak, kemudian menghitung berapa (M) kali kemunculan nilai gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak.
4. Ulangi proses tersebut sebanyak N-kali (N>100) kemudian hitung probabilitas kelongsoran dengan persamaan sebagai berikut :

$$PK = \frac{N - M}{N}$$

Dimana:

- PK = Nilai probabilitas longsor (probability of failure)
- (N-M) = Jumlah nilai yang tidak memenuhi asumsi FS>1
- M = Jumlah nilai yang memenuhi asumsi FS>1
- N = Jumlah uji yang dilakukan

Beberapa keuntungan metode Monte Carlo yakni sederhana, lebih fleksibel dalam menggabungkan suatu varietas distribusi probabilitas yang cukup besar tanpa banyak penafsiran, dan kemampuan untuk memodelkan korelasi di antara variabel dengan mudah (Hammah & Yacoub, 2009).

Pendekatan FK dan Probabilitas Kelongsoran

Umumnya analisis kestabilan lereng dilakukan dengan pendekatan FK sebagai indikatornya. FK tersebut didefinisikan sebagai rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak. Pendekatan ini merupakan metode deterministik yang menggunakan nilai rata-rata sebagai estimasi nilai yang mewakili parameter masukan.

Berbeda dengan FK, pendekatan probabilitas kelongsoran merupakan suatu pendekatan yang mempertimbangkan seluruh variasi parameter masukan yang

menghasilkan nilai FK tertentu. Hal ini didasarkan bahwa nilai seluruh parameter masukan acak tersebut memiliki peluang yang sama dalam menghasilkan FK tertentu akibat adanya ketidakpastian dari seluruh parameter masukan (Azizi, 2012).

Dalam penentuan tingkat kestabilan lereng diperlukan ambang batas (*acceptance criteria*) nilai PK. SRK 2010 mengeluarkan nilai ambang batas PK lereng bagi beberapa kategori lereng, yang dapat dijadikan acuan dalam desain lereng (Tabel 2.1). Pada penelitian ini, kategori lereng yang dimaksud adalah lereng tunggal, sehingga ambang batas PK yaitu 25-50%, yang mengartikan bila nilai PK yang didapatkan diatas ambang batas, maka lereng tersebut dikatakan tidak stabil.

Tabel 2. 1 Ambang Batas Nilai FK & PK Lereng Tambang Terbuka (SRK 2010)

Jenis Lereng	Dampak/Longsoran	FK (min) (Statik)	FK _{max} (Dinamik)	PK _{max} P[FK<1]
Tunggal/Jenang (<i>Bench</i>)	Low-High	1.1	NA	25-50%
Multi Jenjang (<i>Interramp</i>)	Low	1.15-1.2	1.0	25%
	Medium	1.2	1.0	20%
	High	1.2-1.3	1.1	10%
Keseluruhan (<i>Overall</i>)	Low	1.2-1.3	1.0	15-20%
	Medium	1.3	1.05	5-10%
	High	1.5	1.1	≤5%

3. METODE

Penelitian diawali dengan studi pustaka mengenai kondisi geologi daerah penelitian. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data hasil uji laboratorium yang meliputi sifat fisik dan mekanik material penyusun.

Tahapan selanjutnya berupa pencocokan fungsi distribusi dari parameter masukan dengan *Anderson-Darling* (A-D) dibantu dengan *software minitab*. Metode ini akan menghasilkan nilai parameter statistik. Nilai parameter yang paling kecil mencerminkan fungsi distribusi terbaik.

Hipotesis dari Anderson Darling Test:

H0: Data mengikuti sebaran tertentu

H1: Data tidak mengikuti sebaran tertentu

Formulasi untuk menghitung nilai parameter dengan A-D yakni :

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]$$

Dimana :

n = ukuran sampel,

F(x) = CDF untuk distribusi tertentu,

Tahapan selanjutnya yaitu simulasi kestabilan lereng tunggal menggunakan metode Bishop dengan parameter yang telah dikarakterisasi, serta analisis probabilistik monte carlo dengan bantuan software slide. Variasi geometri yang digunakan diantaranya variasi

- a. Tinggi lereng : 10, 15, 20, 25
- b. Sudut Kemiringan lereng : 50-80 derajat.

Selain itu, simulasi kestabilan lereng dilakukan pada kondisi *seismic load* 0,05 g, beban alat 621 kPa sebagai beban dari truck bellaz, dan asumsi ketinggian muka air tanah berdasarkan PT Bukit Asam. Selanjutnya dilakukan *plotting* hasil probabilitas terhadap setiap kondisi dan ditentukan optimisasi yang dapat diterapkan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Geologi dan Geoteknik

Litologi Penyusun

Lapisan tanah penutup (*overburden*) dicirikan dengan dominasi batulempung dan sedikit batupasir. Pada lapisan ini juga ditemukan lapisan batubara gantung (*hanging seam*). Berdasarkan hasil deskripsi core pada lapisan overburden terdapat batulempung lanauan abu-abu gelap, kaku, keras, batulempung abu-abu terang – gelap, padat- menyerpih, agak keras, dijumpai cerat-cerat batupasir halus tebal 1-2 cm, segar-lapuk merupakan lapisan yang mendominasi. Batulempung karbonatan berwarna coklat kehitaman, padat menyerpih, mudah diremas – agak keras, dijumpai pengotor karbonan, segar. Seam gantung batubara berwarna hitam

gelap, kusam, kompak-hancur sebagian, agak keras, sisipan batulempung. Sandstone warna abu-abu terang – gelap, butir halus-sedang, padat, agak keras-keras, agak membundar-menyudut tanggung, sortasi buruk ketebalan 3,5 m, dijumpai cerat-cerat batulanau tebal 1-2 cm. Batulanau berwarna abu-abu gelap, padat, agak keras, tebal berkisar 0,76-3 m, dijumpai cerat-cerat batupasir halus. Secara umum berdasarkan nilai rata-rata UCS menurut penelitian sebelumnya, material *overburden* memiliki nilai UCS 2,34 yang termasuk kedalam *very weak rock*.

Parameter sifat fisik dan mekanik

Parameter sifat fisik dan mekanik material didapat dari pengujian laboratorium terhadap sampel batuan hasil pemboran geoteknik. Nilai parameter yang akan menjadi masukan dalam kestabilan lereng diantaranya nilai bobot isi tanah/batuan (γ_w) dengan satuan kN/m³, nilai kohesi (C) dengan satuan kPa, dan nilai sudut geser dalam ϕ dengan satuan derajat.

Hasil pencocokan distribusi, menunjukkan distribusi untuk parameter masukan yang paling cocok adalah distribusi normal, dengan nilai *Anderson - Darling* yang terangkum dalam Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Pencocokan distribusi parameter.

Parameter Masukan	Pencocokan Distribusi		
	normal	lognormal	gamma
Unit Weight	0,119	0,165	0,144
Cohesi	0,421	0,575	0,534
Phi	0,252	0,295	0,277

Parameter statistik yang dibutuhkan dalam analisis probabilistik diantaranya mean, standard deviasi, rel max dan rel min. Berikut adalah hasil pengolahan statistik untuk masing masing parameter masukan.

Tabel 4. 2 Parameter statistik sifat fisik dan mekanik

Parameter Statistik	γ (kN/m ³)	C (kPa)	Phi (°)
Mean	20,26	87,71	16,22
StDev	1,155	12,26	2,066
rel max	2,938	18,966	4,382
rel min	2,962	27,224	4,118

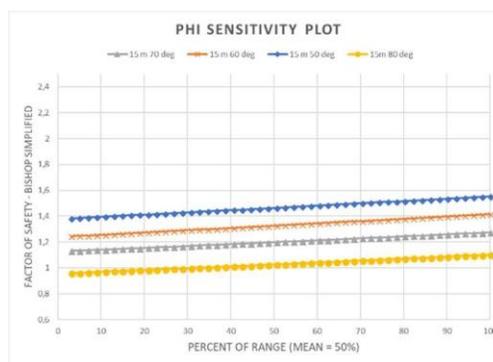
4.2 Kestabilan Lereng

Sensitivitas Parameter

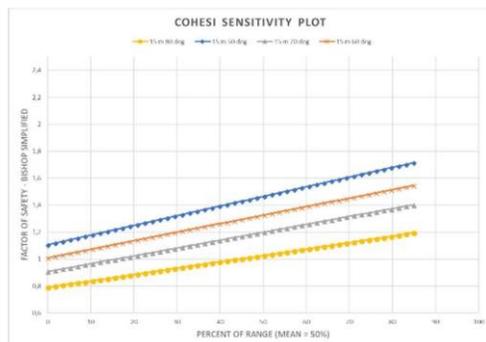
Analisis sensitivitas digunakan untuk melihat pengaruh setiap parameter masukan terhadap perubahan nilai faktor keamanan, sehingga dapat menunjukkan parameter yang paling sensitif mempengaruhi faktor keamanan. Sensitivitas parameter dilakukan pada bobot isi, sudut geser dalam dan kohesi.



Grafik 4. 1 Sensitivitas Bobot isi terhadap Faktor Keamanan



Grafik 4. 2 Sensitivitas sudut geser dalam terhadap Faktor Keamanan

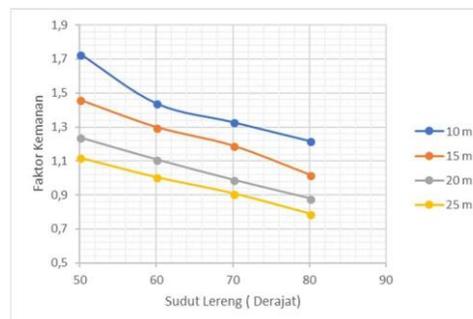


Grafik 4. 3 Sensitivitas Kohesi terhadap Faktor Keamanan

Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar nilai bobot isi maka terjadi penurunan nilai keamanan lereng, sedangkan nilai sudut geser dalam dan kohesi semakin besar menyebabkan nilai faktor keamanan yang meningkat. Analisis sensitivitas bobot isi terhadap nilai FK terlihat pengaruh yang relatif kecil, begitu juga pada sudut geser dalam, tidak terlihat pengaruh yang signifikan ditunjukkan oleh grafik yang cenderung datar. Perubahan nilai kohesi terlihat sangat mempengaruhi nilai FK pada berbagai kondisi geometri lereng, hal itu mengartikan parameter kohesi merupakan -

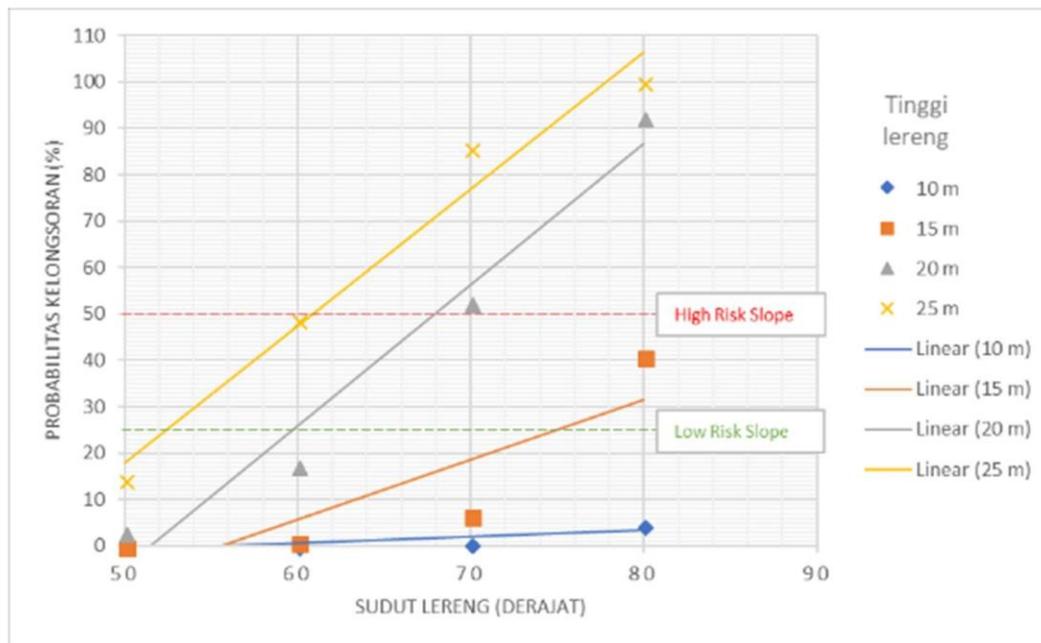
parameter masukan yang paling sensitif, sehingga perlu menjadi perhatian dalam menentukan karakter distribusi data yang akan digunakan dalam rencana desain.

Hubungan FK dengan Sudut Lereng



Grafik 4. 4 Hubungan FK dengan sudut lereng.

Hubungan FK dengan sudut lereng digambarkan dalam grafik diatas berbanding terbalik, semakin tinggi sudut lereng, maka nilai FK menurun. Pada ketinggian lereng 25 meter nilai FK mencapai tingkat tidak aman 70 sampai 80 derajat.



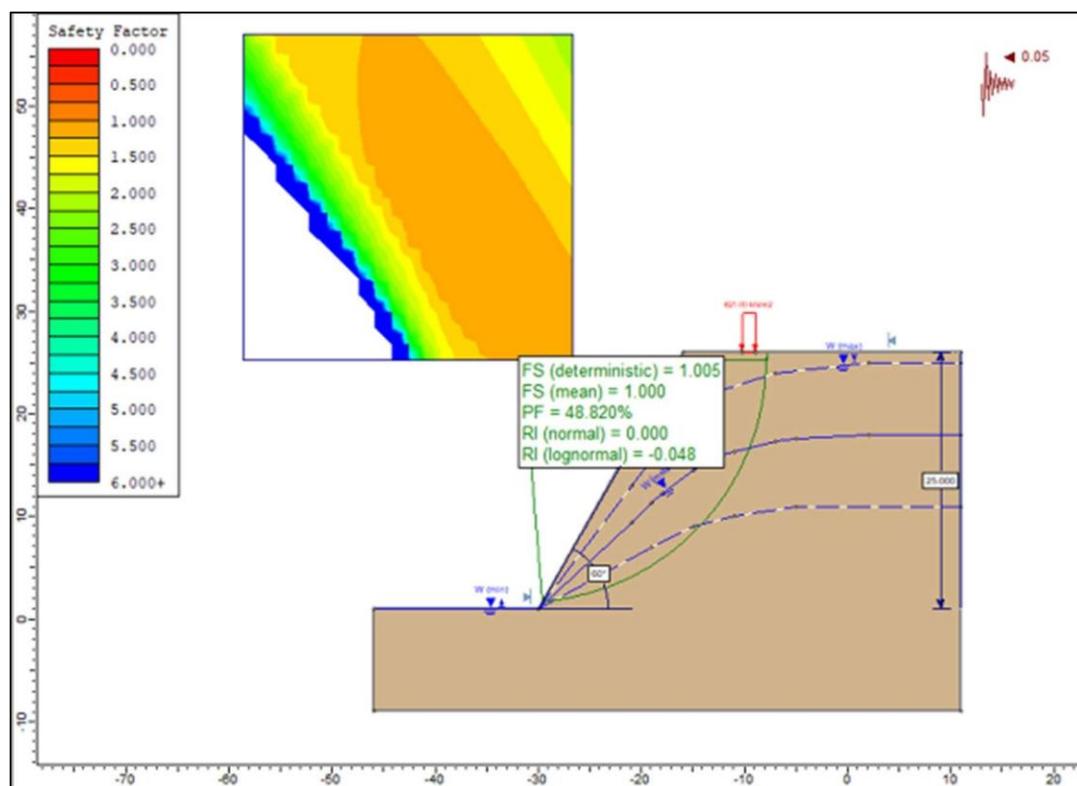
Grafik 4. 5 Probabilitas kelongsoran

Probabilitas Kelongsoran

Nilai probabilitas kelongsoran untuk tiap kondisi geometri lereng telah diplot dalam grafik 4.5. Dalam pendekatan deterministik nilai FK yang menjadi indikator stabilnya lereng biasanya 1,25, namun pada pendekatan probabilistik nilai probabilitas kelongsoran akan menjadi

- Tinggi lereng 10 meter aman untuk semua kondisi sudut lereng
- Tinggi lereng 15 meter ≤ 80 derajat
- Tinggi lereng 20 meter ≤ 70 derajat
- Tinggi lereng 25 meter ≤ 60 derajat

Kondisi *low risk slope* dengan ambang batas nilai PK 50% dikategorikan bagi



Gambar 4. 1 Simulasi Lereng stabil hasil optimasi

acuan yang lebih optimis dalam keamanan lereng yang lebih optimal. Berdasarkan kriteria kemampooterimaan probabilitas kelongsoran (*probability of failure*) SRK 2010 untuk lereng tunggal maka didapatkan dua kondisi, yaitu *High risk slope* dan *Low risk slope*.

Kondisi *high risk slope* dengan ambang batas nilai PK 25% dikategorikan bagi lereng yang memiliki resiko tinggi, maka sudut lereng yang aman direkomendasikan sebagai berikut:

lereng yang memiliki resiko rendah, maka sudut lereng yang aman hasil optimasi dapat mencapai hingga sudut lereng 60 derajat pada keadaan tinggi lereng 25 meter.

5. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan

- Area mahayung tersusun atas dominasi batulempung sebagai lapisan *overburden*, yang termasuk dalam *very weak rock*.

- Nilai FK dapat dijadikan indikator awal dalam keamanan lereng, namun tidak merepresentasikan kemungkinan longsor, maka diperkuat oleh nilai probabilitas kelongsoran (PK)
- Distribusi yang paling sesuai untuk parameter lapisan overburden adalah distribusi normal
- Faktor yang paling sensitif atau sangat mempengaruhi dalam perubahan nilai FK adalah kohesi.
- Rekomendasi Lereng
 - Untuk *High risk slope* (25%)
 - o Tinggi lereng 10 meter aman untuk semua kondisi sudut lereng
 - o Tinggi lereng 15 meter \leq 80 derajat
 - o Tinggi lereng 20 meter \leq 70 derajat
 - o Tinggi lereng 25 meter \leq 60 derajat
 - Untuk *Low risk slope* (50%) dari hasil optimasi bias mencapai tinggi 25 meter dengan sudut 60 derajat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan terselesaikannya artikel ilmiah ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Ir. Zufaldi Zakaria M.T. dan R. Irvan Sophian S.T., M.T. sebagai pembimbing kampus, serta Bapak Joko Tunggal Sebagai pembimbing Teknis di PT. Bukit Asam, Tanjung enim.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., and Boyce, G.M., 1996. *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons Inc.
- Arief, S. 2008. *Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Irisan*,. Sulawesi Selatan.
- Arif, Irwandy, 2016. *Geoteknik Tambang*.

- Gramedia Pustaka Utama.
- Azizi, Masagus, dkk, 2010. *Aplikasi Probabilistik untuk Analisis Kestabilan Lereng Tunggal (Studi Kasus Di Pt. Tambang Batubara Bukit Asam Tbk. Tanjung Enim, Sumatera Selatan*. Prosiding TPT XX PERHAPI | Mataram 10-12 Oktober 2011
- Azizi, Masagus, 2011. *Karakterisasi Parameter Masukan untuk Analisis Kestabilan Lereng Tunggal (Studi Kasus di PT. Tambang Batubara Bukit Asam Tbk. Tanjung Enim, Sumatera Selatan)*. Prosiding Seminar Nasional AVoER ke-3. Oktober 2011 ISBN : 979-587-395-4
- Azizi, Masagus, 2012. *Analisis Risiko Kestabilan Lereng Tambang Terbuka (Studi Kasus Tambang Mineral X)* Prosiding Simposium Dan Seminar Geomekanika Ke-1 Tahun 2012.
- Duncan, J. Michael and Stephen G. Wright., 2005. *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc
- Hammah, R.E., Yacob, T.E., Curran J., 2003, The Influence of correlation and distribution truncation on slope stability analysis results.
- Romana, M, 1993. *A geomechanical Classification for Slopes : Slope Mass Rating. Comprehensive Rock Engineering*, Editor : Hudson, J.A. Pergamon.
- S. Gafoer, T. Cobrie dan J. Purnomo, 1986, *Peta Geologi Lembar Lahat, Sumatera Selatan*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Steffen, O.K.H., Contreras, L. F., Terbrugge, P.J., Venter J, 2008, A risk evaluation approach for pit slope design. ARMA 08-231.
- Zakaria, Z, 2011. *Analisis Kestabilan Lereng Tanah*. Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran. Jatinangor.