

Kestabilan lereng kritis pada tambang terbuka batubara menggunakan metode kesetimbangan batas

Stability of critical slope in open pit coal mine Using limit equilibrium method

Muhammad Fadlillah Akbar, Eko Santoso*, Sari Melati

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

email: eko@ulm.ac.id

ABSTRAK

Genangan air dalam bekas pit (void) akan mempengaruhi re-distribusi tegangan dan kondisi massa batuan pada lereng. Adanya creek di sisi luar lereng tersebut menyebabkan interaksi antara creek, lereng, dan void, menjadi lebih kompleks dan berdampak pada kestabilan lereng. Pada penelitian ini mengaplikasikan metode *Limit Equilibrium* dengan kriteria Mohr-Coulomb serta perangkat lunak MineScape 5.7 dan Rocscience Slide 6.0 untuk menganalisis Lereng X yang langsung berbatasan dengan sungai. Membuat simulasi pesimistik yang mempengaruhi tingkat kestabilan lereng aktual dengan membuat simulasi pengaruh level muka air sungai dan void terhadap lereng, membuat pengaruh pelapukan material penyusun lereng dan pengaruh jarak sungai terhadap tingkat kestabilan lereng. Hasil analisis kondisi aktual pada Lereng X nilai FK semua penampang $>2,0$ dengan kondisi lereng di antara sungai dan void. Hasil simulasi penurunan level muka air sungai 11 m dan void 39 m hingga surut mempengaruhi tingkat kestabilan lereng di indikasikan adanya gaya hidrostatik terhadap lereng yang mempengaruhi nilai FK dari 2,011 menjadi 0,927. Lereng yang terlapukan oleh air juga mempengaruhi nilai FK dari 1,773 menjadi 0,790 kondisi kritis. Simulasi penambahan jarak sungai terhadap lereng berdampak baik bagi lereng dari faktor keamanan awal 0,927 pada jarak 6,4 m menjadi 1,977 pada jarak 500 m.

Kata-kata kunci: *limit equilibrium, mohr-coulomb, slope stability, faktor keamanan (FK)*

ABSTRACT

The accumulation of water in former pit (void) affects stress redistribution and rock mass condition of the slope. The presence of a creek on the outer side of slope further increases the complexity of interaction between creek, slope, and void, thereby influencing overall slope stability. This study applies Limit Equilibrium Method with the Mohr-Coulomb failure criterion, utilizing MineScape and Rocscience Slide 6.0 software to analyze Slope X, which is directly adjacent to the creek. A series of pessimistic simulations were conducted to assess actual slope stability, including the effects of creek and void water level fluctuations, the effects of material weathering on slope stability, and the impact of creek distance on slope safety factor. The analysis of actual condition of Slope X indicates that Factor of Safety (FoS) in all cross-sections is >2.0 , with the slope located between creek and void. The simulation results show that a decrease in creek water level by 11 m and void water level by 39 m significantly affects slope stability, as indicated by hydrostatic forces acting on the slope, reducing the FoS from 2.011 to 0.927. Furthermore, slope material weathering due to water infiltration decreases FoS from 1.773 to a critical value of 0.790. Increasing distance between creek and slope improves its stability, which is the initial FoS of 0.927 at a distance of 6.4 m increases to 1.977 at a distance of 500 m.

Keywords: *Limit equilibrium, mohr-coulomb, slope stability, factor of safety (FoS)*

PENDAHULUAN

Analisis kestabilan lereng dilakukan untuk menilai tingkat kestabilan suatu lereng. Istilah kestabilan lereng dapat didefinisikan sebagai ketahanan suatu blok di atas suatu permukaan miring (diukur dari garis horizontal) terhadap runtuhnya (collapsing) dan gelinciran (sliding) (Kliche, 1999).

[1] Pada penelitian Ariana dkk 2015 “Pengaruh *Seepage* dan Kestabilan Lereng Terhadap Optimalisasi Geometri Lereng Tambang Bukit M Air Laya Blok Timur, Unit Pertambangan Tanjung Enim” menjelaskan pengaruh kestabilan lereng terhadap sungai Enim yang mana elevasi lereng di bawah sungai Enim. Kemudian membuat desain pelebaran lereng terhadap sungai dengan 3 penampang semua penampang dengan jarak 100 m FK *overall slope* > 1.72 , Hubungan antara debit dengan FK adalah bila debit besar maka nilai FK menjadi kecil sedangkan bila debit kecil maka nilai FK menjadi besar.

[2] Pada penelitian Handayani dkk 2014 “Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Menggunakan Geoslope/W 7,12” hasil dari penelitian didapatkan bahwa jarak muka air tanah terhadap bidang dasar kelongsoran juga dapat mempengaruhi kestabilan suatu lereng, yaitu semakin jauh jarak muka air tanah terhadap bidang dasar kelongsoran dan semakin dekat jarak muka air tanah terhadap tanah permukaan lereng, maka semakin kecil nilai faktor keamanannya. Begitu pula sebaliknya semakin dekat jarak muka air tanah terhadap bidang dasar kelongsoran dan semakin jauh dari permukaan lereng, maka semakin besar nilai faktor kemannya.

[3] Pada penelitian Frans dan Nurfalaq 2019 “Studi Geoteknik Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Tambang Batubara” Berdasarkan hasil analisa dengan muka air tanah yang bervariasi, diketahui bahwa muka air tanah pada sebuah lereng memiliki pengaruh terhadap nilai FK lereng tersebut. Hasil analisa menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara muka air tanah dengan nilai FK lereng. Penurunan muka air tanah pada lereng akan menyebabkan peningkatan nilai FK lereng tersebut.

Kasus umum yang terjadi terkait penelitian tingkat kestabilan lereng adalah berupa pengaruh geometri lereng, pengaruh seismik oleh peledakan maupun alat muat dan angkut, pengaruh bidang lemah, pengaruh muka air tanah dan *seepage* serta pengaruh sungai terhadap kestabilan lereng. Pada penelitian ini membahas sebuah lereng yang berada di antara sungai dan void dengan mengetahui pengaruh level muka air tersebut, pengaruh tingkat pelapukan material penyusun dan

pengaruh jarak sungai terhadap kestabilan lereng menurut KEPMEN ESDM 1827 yang mana belum adanya penelitian yang mengangkat kasus mengenai lereng tambang di antara dua endapan air.

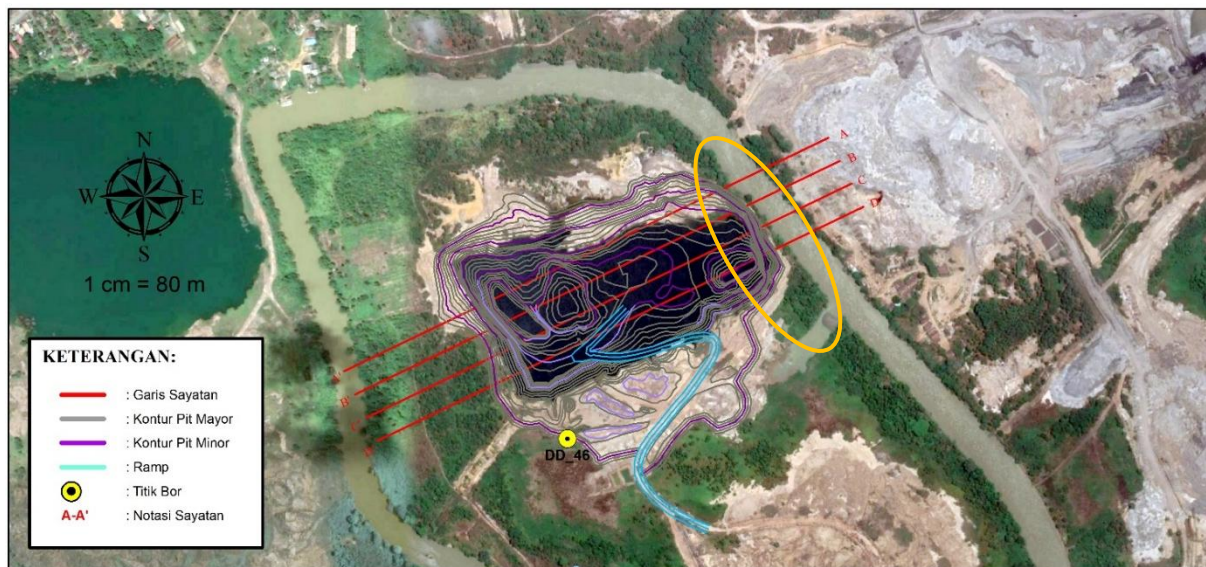
Lereng X adalah lereng bekas tambang batubara di antara sungai dan *void*. Area tambang berada pada kondisi morfologi dataran landai yang berdekatan dengan sungai. Jarak terdekat sungai terhadap Lereng X selebar $\pm 6,4$ m dengan kedalaman *void* ± 39 m. Lereng X memiliki geometri yang bervariasi dengan ketinggian tertinggi lereng 48,62 m dan sudut kemiringan tertinggi 45° tanpa jenjang. Di sebelah barat terdapat rawa dengan berbagai macam tumbuhan berukuran kecil ataupun besar. Sampai saat ini, Lereng X tidak dimonitor secara berkala karena tidak ada kegiatan operasional di *Pit*. Tetapi, untuk pertambangan yang berkelanjutan dan sebagai pertimbangan teknis dalam mengambil keputusan, Lereng X perlu dianalisis tingkat kestabilannya.

Pada penelitian ini, kestabilan lereng ini dikaji menggunakan metode kesetimbangan batas dengan mempertimbangkan pengaruh level air dalam *void*, jarak sungai, dan simulasi tingkat pelapukan yang berdampak pada perubahan propertis material di lereng. Hasil penelitian diharapkan dapat bermanfaat untuk analisis lanjutan pada kajian keberlanjutan tambang.

METODOLOGI

Penelitian dimulai dengan melakukan kegiatan survei kondisi aktual di area Lereng X kemudian melakukan pengukuran geometri lereng dan sungai, melakukan wawancara dengan warga sekitar lokasi area penelitian untuk mengetahui informasi pada area penelitian, melakukan kegiatan pemboran *full coring* sedalam 50 m pada sisi selatan Lereng X dapat di lihat pada gambar 1 di titik DD_46 dan melakukan *packing* sampel sesuai SNI 4148-1:2017, melakukan uji laboratorium *shear direction test* berdasarkan SNI 2824:2011 dan sifat fisik SNI 03-2437-1991, melakukan analisis kestabilan lereng pada Lereng X dengan metode *Limit Equilibrium* kriteria runtuh Mohr-Coulomb.

Sayatan dibuat di MineScope 5.7 sebanyak 4 sayatan berjarak per 50 m dengan notasi A-A', B-B', C-C' dan D-D', yang telah di masukan data litologinya, secara otomatis akan terlihat batas-batas dari tiap litologi untuk selanjutnya diberikan kode warna dan nilai profil material dari uji sifat fisik dan mekanik batuan. Desain sungai dibuat sama pada semua penampang sesuai dengan geometri hasil pengukuran dan wawancara dengan warga sekitar, dapat dilihat pada gambar 2. Penampang yang digunakan untuk simulasi adalah penampang D-D' dikarenakan memiliki geometri yang cukup berbahaya serta terdapat bidang yang telah longsor membentuk sudut 60° pada bagian bawah lereng sehingga penampang tersebut dapat mewakili kondisi terburuk dari penampang lain. Lokasi penelitian dan sayatan dapat dilihat pada Gambar-1.



Gambar-1. Kondisi Lokasi Penelitian & Lokasi Sayatan

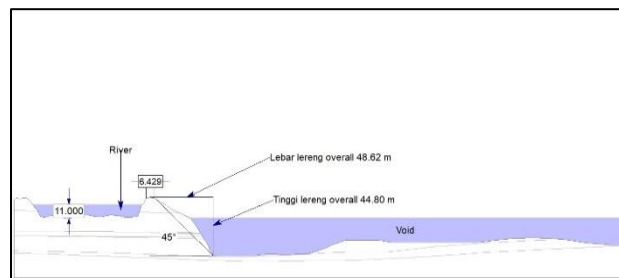
Tabel-1. Hasil Pengujian Sampel

Material	Kode Sampel	Unit Weight kN/m ³	Cohesion (KPa)	Internal Friction Angle (°)
Soil	SOIL	11	30	20
Claystone (1)	CL1	21,89	126,6	18,88
Claystone (2)	CL2	20,59	94,03	23,75
Claystone (3)	CL3	20,29	146,25	25,88
Sandy Clay	SC	21.18	110,59	19,75
Batubara	BB	13,4	131	39,35

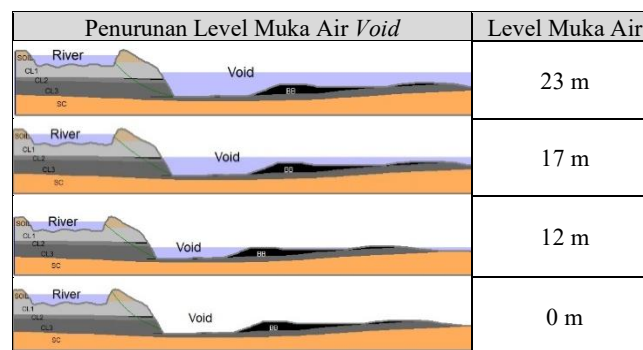
Tabel-2. Geometri Penampang

Penampang	Tinggi Lereng Overall (m)	Sudut Lereng Overall (°)	Lebar Lereng Overall (m)
A-A'	17,3	43	27,1
B-B'	24,7	41	31,5
C-C'	45,5	44	30,2
D-D'	48,62	45	44,8

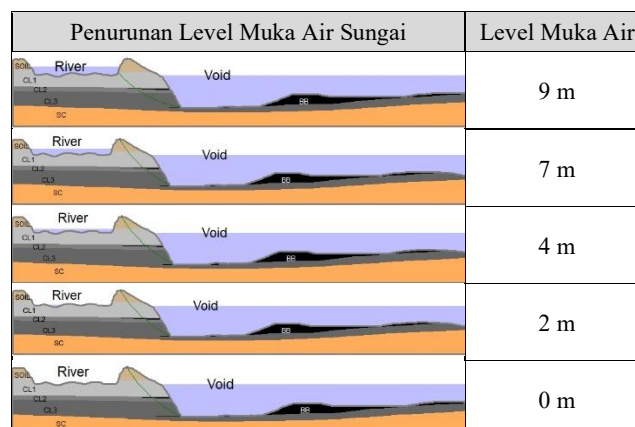
Untuk mengetahui pengaruh tingkat kestabilan lereng di antara sungai dan *void* diberikan asumsi-asumsi yang bersifat pesimistik terhadap Lereng X dengan memvariasikan level muka air sungai dan *void* dimana asumsi ini buat untuk mengetahui kondisi lereng pada saat musim penghujan dan musim kering. Membuat simulasi kondisi material penyusun lereng dalam keadaan terlapukan pada kasus ini disebabkan oleh air. Membuat variasi jarak sungai terhadap Lereng X untuk mengetahui tingkat kestabilan lereng pada jarak tertentu dan membuat jarak berdasarkan KEPMEN ESDM 1827/K/30/MEM/2018.

**Gambar-2. Contoh Model Lereng Penampang D-D'**

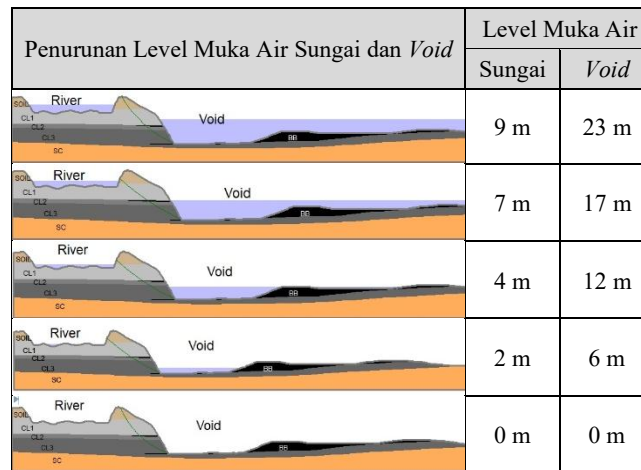
Pada Gambar-3 penurunan level muka air *void* dibuat dalam 4 tahap hingga kondisi kering dengan level air sungai tetap kemudian di analisis dengan *software* Slide 6.0 untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kestabilan lereng.

**Gambar-3. Model Level Muka Air *Void***

Pada Gambar-4 penurunan level muka air sungai dibuat dalam 5 tahap hingga kondisi kering dengan level air *void* tetap kemudian di analisis dengan *software* Slide 6.0 untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kestabilan lereng.

**Gambar-4. Model Level Muka Air Sungai**

Pada Gambar-5 penurunan level muka air sungai dan *void* dibuat dalam 5 tahap hingga kondisi kering dengan kemudian di analisis dengan *software* Slide 6.0 untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kestabilan lereng.



Gambar-5. Model Level Muka Air Sungai dan *Void*

Pada Tabel-3 dan Tabel-4 diberikan nilai propertis untuk simulasi pelapukan material penyusun lereng. Pelapukan tersebut dapat terjadi akibat interaksi air dan massa batuan di lereng yang menyebabkan nilai kohesi dan sudut geser dalam menjadi berkurang.

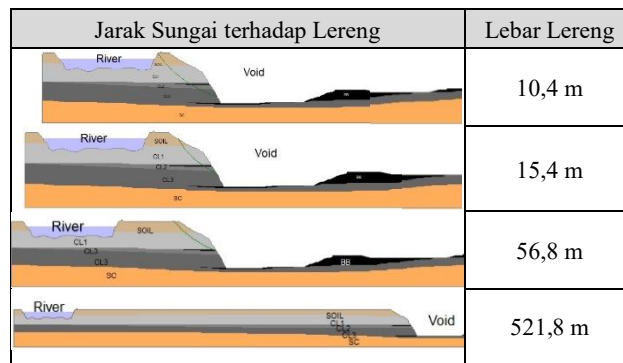
Tabel-3. Variasi Nilai Sudut Geser Dalam

Kode Sampel	Phi-1 <i>Internal Friction Angle</i> (°)	Phi-2 <i>Internal Friction Angle</i> (°)	Phi-3 <i>Internal Friction Angle</i> (°)	Phi-4 <i>Internal Friction Angle</i> (°)	Phi-5 <i>Internal Friction Angle</i> (°)
SOIL	16.0	12.0	8.0	4.0	1.0
CL1	14.9	10.9	6.9	2.9	1.9
CL2	19.8	15.8	11.8	7.8	3.8
CL3	21.9	17.9	13.9	9.9	5.9
SC	15.8	11.8	7.8	3.8	1.8
BB	35.4	31.4	27.4	23.4	19.4

Tabel-4. Variasi Nilai Kohesi

Kode Sampel	C-1 <i>Cohesion</i> (KPa)	C-2 <i>Cohesion</i> (KPa)	C-3 <i>Cohesion</i> (KPa)	C-4 <i>Cohesion</i> (KPa)	C-5 <i>Cohesion</i> (KPa)
SOIL	25.0	20.0	15.0	10.0	5.0
CL1	106.6	86.6	66.6	46.6	26.6
CL2	74.0	54.0	34.0	14.0	10.0
CL3	126.3	106.3	86.3	66.3	46.3
SC	90.6	70.6	50.6	30.6	10.6
BB	111.0	91.0	71.0	51.0	31.0

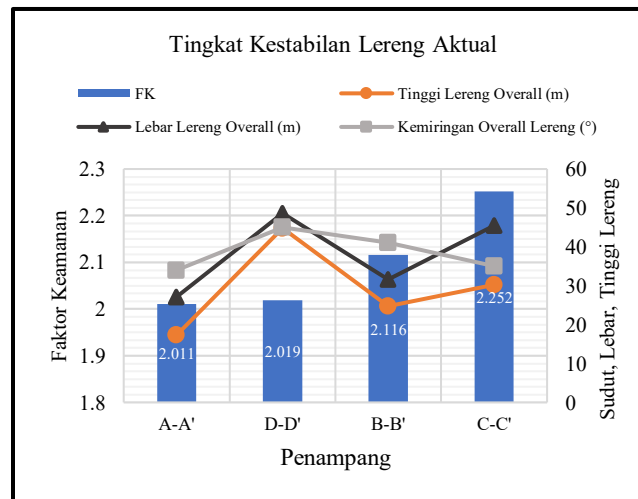
Pada Tabel-5 menjelaskan simulasi jarak sungai terhadap Lereng X dengan sudut lereng keseluruhan 45° tetap dimana pada jarak awal 6,4 m di tambahkan sebanyak 4 tahap hingga 500 m.



Gambar-6. Variasi Jarak Sungai Terhadap Lereng

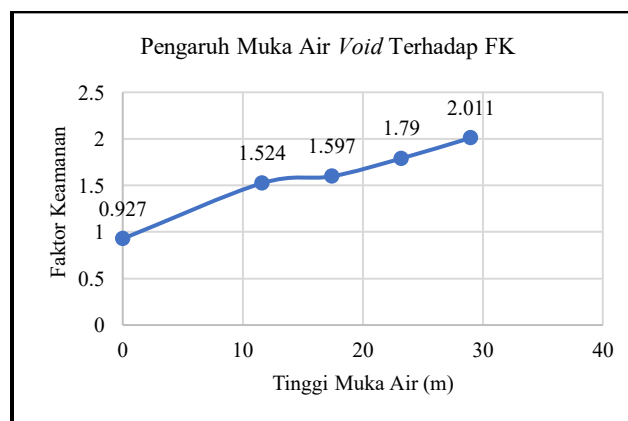
HASIL DAN DISKUSI

Dari hasil penelitian kondisi dari setiap penampang semua dalam keadaan stabil $FK > 1.2$ kondisi lereng yang stabil tersebut diakibatkan oleh lereng yang tidak terlalu curam, lereng yang tidak terlalu tinggi, material penyusun berupa *clay* yang sifatnya tidak mudah tergerus oleh air seperti *sand* dan diindikasikan adanya gaya hidrostatik terdapat lereng yang mempengaruhi kestabilan lereng. Pada Gambar-7 dapat dilihat grafik lereng aktual.



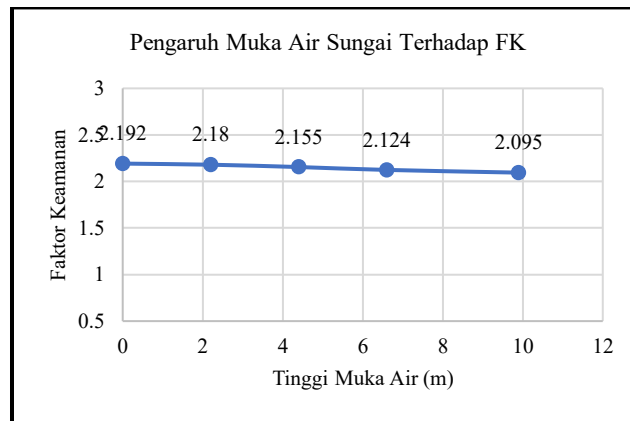
Gambar-7. Grafik Tingkat Kestabilan Lereng Aktual

Pada Gambar-8 diketahui level air *void* yang menurun akan mempengaruhi nilai FK menjadi tidak stabil, penurunan nilai FK di mungkinkan adanya pengaruh sungai terhadap lereng dari penurunan level muka air *void*.



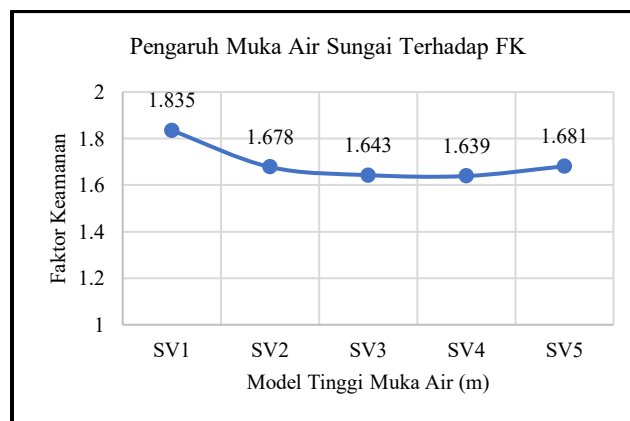
Gambar-8. Grafik Pengaruh Muka Air Void Terhadap FK

Dari hasil pengolahan data pada Gambar-9 diketahui bahwa semakin level air menurun nilai FK akan naik, keadaan tersebut bertolak belakang jika *void* dalam keadaan surut, akibat tidak adanya gaya hidrostatik dari sisi sungai terhadap lereng menuju *pit* sehingga mengurangi beban terhadap lereng dari sisi luar lereng. Kondisi paling kering sungai akan memberikan dampak positif pada lereng.



Gambar-9. Grafik Pengaruh Muka Air Sungai Terhadap FK

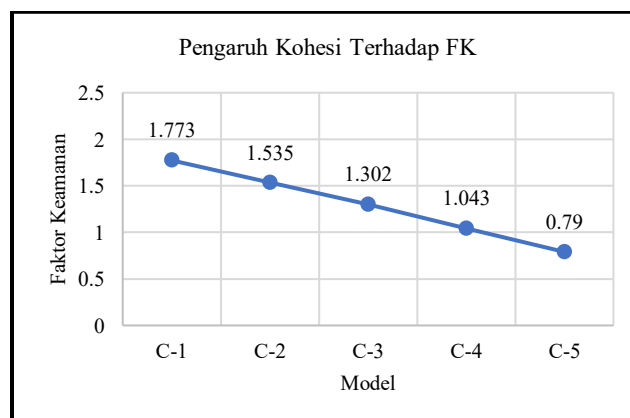
Pada analisis ini level muka air *void* dan sungai diturunkan per 20%, dapat dilihat pada gambar 10 diketahui semakin kedua level air menurun model SV-1 – SV-4 maka FK juga ikut menurun namun pada saat kedua endapan air kering model SV-5 nilai FK naik kembali, dalam keadaan ini lereng kembali dalam keadaan normal tidak di pengaruhi gaya dorong pada sisi-sisinya, lereng hanya memiliki beban diatas, sehingga nilai FK lereng naik kembali.



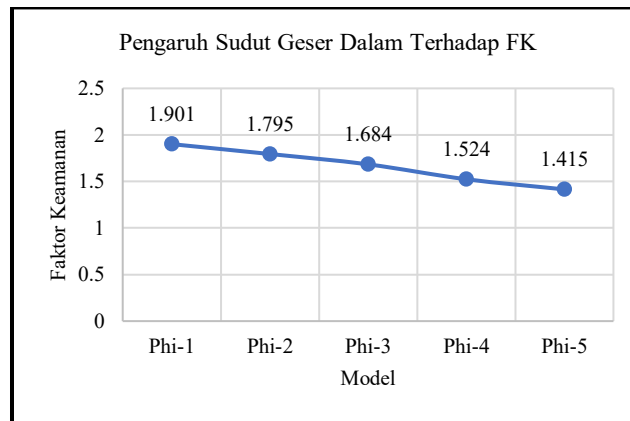
Gambar-10. Grafik Pengaruh Muka Air Sungai Terhadap FK

Dari hasil analisis dapat dilihat pada Gambar-11 dan Gambar-12 diketahui bahwa pelapukan berpengaruh negatif terhadap tingkat kestabilan lereng, penurunan nilai FK cukup signifikan terutama pada kohesi terhadap kestabilan lereng, Pada model C-1 sampai C-3 nilai FK >1,2 namun pada model C-4 dan C-5 nilai FK <1,2 yang mengindikasikan lereng dalam keadaan tidak stabil.

Untuk pengaruh sudut geser dalam terhadap kestabilan lereng juga berpengaruh negatif, seiring material lapisan batuan mengalami pelapukan nilai FK pun turun, pada analisis ini semua model memiliki nilai FK >1,2 mengindikasikan lereng dalam keadaan stabil.

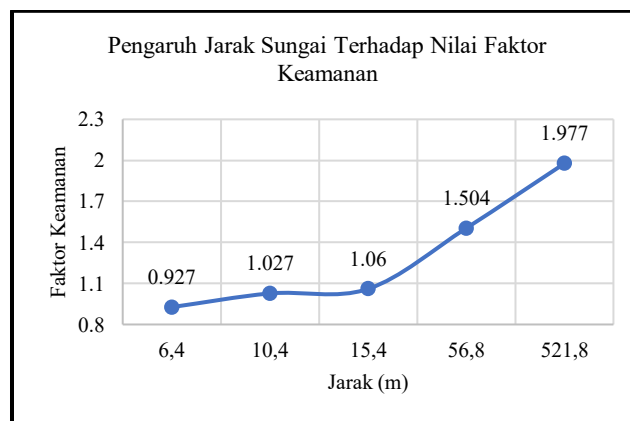


Gambar-11. Grafik Pengaruh Kohesi Terhadap FK



Gambar-12. Grafik Pengaruh Sudut Geser Dalam Terhadap FK

Pada analisis yang mengacu pada KEPMEN ESDM Nomor 1827 K 30 MEM 2018, mengharuskan jarak minimal batas penambangan ke fasilitas pengendapan seperti sungai minimal 500 m. Penampang D-D' memiliki 2 sudut kemiringan yang berbeda dimana sudut kemiringan lereng keseluruhan adalah 45° dan sudut paling tegaknya 60° . Penampang D-D' dipilih karena dapat mewakili kondisi terburuk dari tiap penampang lain. Simulasi pengaruh jarak sungai didesain dengan mendesain sungai pada jarak tertentu terhadap lereng, yaitu pada jarak 521,8 m, 56,8 m, 15,4 m, 10,4 m dan jarak sebenarnya 6,4 m sampai 15,4 m nilai FK $<1,2$. Ini merupakan indikasi bahwa lereng tidak stabil karena jarak yang terlalu dekat. Kemudian, pada jarak $>56,8$, nilai FK $>1,2$. Ini menunjukkan bahwa lereng stabil karena pengaruh sungai terhadap lereng sudah tidak ada lagi pada jarak tersebut.



Gambar-13. Grafik Pengaruh Jarak Sungai Terhadap Nilai Faktor Keamanan

KESIMPULAN

Hasil analisis tingkat kestabilan lereng aktual menggunakan Metode kesetimbangan batas dengan kondisi lereng tanpa sungai menggunakan Program Rocscience Slide 6.0 didapatkan nilai FK $>1,2$ pada semua penampang dengan kondisi terhimpit di antara sungai dan *void*.

- Pada variasi ketinggian level air *void* 29 m – 12 m kondisi lereng masih stabil FK $>1,524$ sedangkan pada kondisi *void* kering lereng tidak stabil FK 0,927 penurunan level muka air *void* berdampak negatif terhadap tingkat kestabilan lereng diindikasikan adanya gaya hidrostatik yang menyebabkan lereng menjadi stabil dan tidak stabil dan berlaku sebaliknya pada variasi level air sungai. Nilai FK dari variasi level air sungai dan *void* sebelum divariasikan adalah FK 2,011 kemudian level air diturunkan bersamaan per 20% dari level air sebenarnya, didapatkan nilai FK 1,639 penurunan level air berdampak negatif terhadap kestabilan lereng, namun pada kondisi air kering nilai FK naik kembali menjadi FK 1,681.
- Variasi tingkat pelapukan yang terjadi pada lereng akan berdampak negatif terhadap lereng, penurunan nilai FK sebesar 13% - 14% dari kondisi nilai aktual FK 2,011.
- Berdasarkan simulasi variasi penambahan jarak sungai terhadap tingkat kestabilan lereng berdampak positif terhadap kestabilan lereng dengan kondisi tanpa sungai, pada jarak 6,4 m nilai FK 0,927 dan pada jarak 500 m nilai FK 1,977.
- Faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan Lereng X pada lokasi penelitian:
 - Lereng yang tidak memiliki geometri curam, lebar jenjang yang sesuai, serta nilai material properties batuan yang baik maka lereng akan semakin stabil.
 - Pada kasus penelitian ini di indikasikan adanya gaya hidrostatik terhadap lereng oleh sungai dibuktikan dari hasil simulasi pengaruh level muka air sungai dan $\neg$ void yang menyebabkan tingkat kestabilan lereng menurun apabila level muka air $\neg$ void terus turun dan level air sungai tetap.
 - Keberadaan air pada daerah penelitian akan meningkatkan resiko pelapukan pada lapisan material penyusun lereng sehingga menyebabkan menurunnya kerapatan antar partikel yang akan mempengaruhi tingkat kestabilan lereng.

- d. Penambahan jarak yang berdasarkan KEPMEN ESDM Nomor 1827 K 30 MEM 2018 berpengaruh positif terhadap tingkat kestabilan lereng.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ariana D, Pudjihardjo H, Fahrudin, T. Joko. 2015, *Pengaruh Seepage dan Kestabilan Lereng Terhadap Optimalisasi Geometri Lereng Tambang Bukit M Air Laya Blok Timur, Unit Pertambangan Tanjung Enim*. Program Studi Teknik Geologi. Universitas Diponegoro. Semarang.
- [2] Handayani Tri, Wulandari Sri, Wulan Asri. 2014. *Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Menggunakan GeoSlope/W 7,12*. Jurusan Teknik Sipil. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan. Universitas Gunadarma. Depok.
- [3] Frans Santo Jiano, Nurfalaq Hafizh M. 2019. *Studi Geoteknik Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Tambang Batubara*. Teknik Geologi. Fakultas Teknologi Mineral. UPN Veteran. Yogyakarta.
- [4] Agustina & Elfrida. 2019. *Pengaruh Perubahan Kadar Air Terhadap Kekuatan Geser Tanah Lempung*. Program Studi Teknik Sipil. Universitas Riau Kepulauan. Hal 120. Riau.
- [5] BSN 1991. *SNI 03-2437-1991 Metode Pengujian Laboratorium Untuk Menentukan Parameter Sifat Fisika Pada Contoh Batu*. Gd Manggala Wanabakti. Jakarta.
- [6] BSN 2011. *SNI 2824:2011 Cara Uji Geser Langsung Batu*. Gd Manggala Wanabakti. Jakarta.
- [7] BSN 2017. *SNI 4148-1:2017 Standar pengambilan sampel tanah berbutir halus dengan tabung berdinding tipis untuk keperluan geoteknik (Adopsi identik ASTM D1587/D1587-15)*. Gd Manggala Wanabakti. Jakarta.
- [8] BSN 2011. *SNI 5015:2011 Pedoman Pelaporan, Sumberdaya dan Cadangan Batubara*. Gd Manggala Wanabakti. Jakarta.
- [9] Das, M.B. 2002. *Principles of Geotechnical Engineering (Fifth Edition)*. Brooks/Cole. P. 472-474. United States of America.
- [10] Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pd T-09-2005-B Rekayasa Penanganan Keruntuhan Lereng Pada Tanah Residual dan Batuan*. Departemen Pekerjaan Umum. Hal 13. Jakarta.
- [11] KEPMEN ESDM 1827 K/30/MEM/2018. *Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. Hal 203-204. Jakarta.
- [12] Rocscience Slide 2018. *Tutorial 19 Transient Groundwater Analysis with Slope Stability 2018*. Toronto.
- [13] Wyllie, D. C. & Mah C. W.. 2004. *Rock Slope Engineering Civil and Mining (4th Edition)*. Spon Press Taylor & Francis Group. P. 188-191. New York.