

Analisis Kestabilan Lereng Tumpukan Batubara ROM pada PT Adaro Indonesia Kabupaten Tabalong Kalimantan Selatan

Slope Stability Analysis of ROM Stock at PT Adaro Indonesia, Tabalong Regency, South Kalimantan

Akbar Arni, Romla Noor Hakim, Muhammad Zaini Arief
Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat
Jl. A. Yani KM 35,5 Banjarbaru 70714
e-mail: *romla@ulm.ac.id

ABSTRAK

Dalam kegiatan pertambangan, batubara yang telah ditambang akan disimpan sementara di ROM (Run of Mine) sebelum diangkut ke pelabuhan dan dijual. Ketika tidak terjadi proses bargaining, batubara yang berasal dari pit akan terus menumpuk di ROM. Penumpukan ini menyebabkan bertambahnya luas dan tinggi tumpukan batubara seiring dengan berjalannya aktivitas penambangan. Peningkatan tinggi tumpukan tersebut berbanding lurus dengan meningkatnya potensi terjadinya longsor. Oleh sebab itu, diperlukan kajian geoteknik untuk menganalisis stabilitas lereng dan memperkirakan risiko longsor pada tumpukan batubara di ROM. Pengambilan dan pengumpulan data dilakukan secara berkala selama dua bulan agar data yang diperoleh bersifat representatif dan dapat digunakan sebagai dasar penelitian. Data yang dikumpulkan meliputi tinggi dan sudut kemiringan lereng tumpukan batubara, geometri tumpukan, jenis serta spesifikasi alat yang beroperasi di ROM, data uji laboratorium batubara, dan data hasil uji CBR. Hasil analisis menunjukkan bahwa tinggi maksimum tumpukan batubara yang aman diterapkan di ROM 19 adalah 15 meter dengan faktor keamanan (FK) $\geq 1,2$. Desain geometri tumpukan batubara di ROM 19 menggunakan kombinasi lereng dengan dua bench, yaitu bench pertama setinggi 8 meter dan bench kedua setinggi 7 meter, masing-masing dengan sudut kemiringan 30° dan jarak antar-bench sebesar 8 meter.

Kata-kata kunci: faktor keamanan, geometri lereng, kestabilan lereng, *run of mine*

ABSTRACT

In mining operations, coal extracted from the pit is temporarily stored at the Run of Mine (ROM) area prior to transportation to the port and final sale. When no bargaining process occurs, coal continues to accumulate at the ROM, leading to an increase in both the height and area of the stockpile as mining activities progress. The increase in stockpile height is directly associated with a higher risk of slope instability and potential failure. Therefore, a geotechnical assessment is required to evaluate slope stability and to estimate the risk of failure in coal stockpiles at the ROM. Data collection was conducted periodically over a two-month period to ensure representative results for this study. The collected data included the actual height and slope angle of the coal stockpile, stockpile geometry, types and specifications of equipment operating at the ROM, laboratory test results of coal samples, and California Bearing Ratio (CBR) test data. The analysis results indicate that the maximum safe coal stockpile height applicable at ROM 19 is 15 m, with a factor of safety (FS) ≥ 1.2 . The proposed stockpile geometry at ROM 19 adopts a combined slope configuration with two benches. The first bench has a height of 8 m with a slope angle of 30° , while the second bench has a height of 7 m with a slope angle of 30° , and the horizontal distance between the two benches is 8 m.

Keywords: safety factor, slope geometry, slope stability, *run of mine*

PENDAHULUAN

Kegiatan penyimpanan batubara di area *Run of Mine* (ROM) merupakan bagian penting dalam rantai produksi pertambangan. Peningkatan produksi dan ketidakseimbangan laju pengangkutan dari pit ke ROM dan dari ROM ke pelabuhan dapat menyebabkan penumpukan batubara dalam jumlah besar. Kondisi ini mendorong peningkatan tinggi dan volume tumpukan batubara, yang secara langsung meningkatkan risiko ketidakstabilan lereng dan potensi longsor. Kegagalan lereng pada tumpukan batubara dapat menimbulkan kerugian operasional, keselamatan kerja, dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng tumpukan batubara di ROM menjadi sangat penting untuk menjamin keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan kegiatan pertambangan.

Studi tentang kestabilan lereng tambang dan timbunan sudah lazim dilakukan untuk kepentingan keberlanjutan dan keselamatan tambang [1,2,3]. Tetapi, kestabilan lereng timbunan batubara pada stockpile dan stock ROM terbilang masih jarang dilakukan. Penelitian di stockpile dan stock-ROM batubara sampai saat ini masih terbatas pada control kualitas, coal losses, daya dukung tanah pondasi, penanganan batubara, dan pencegahan swabakar [4,5,6,7]. Penelitian ini akan berfokus pada analisis kestabilan lereng timbunan stock batubara.

Saat ini PT Adaro Indonesia merupakan salah satu perusahaan tambang batubara yang berada di Kalimantan Selatan. Perusahaan ini memiliki beberapa ROM yang areanya cukup besar. Kegiatan pengangkutan Batubara dari PIT Tutupan ke ROM 19A. Namun dengan tingginya PTR (Pit to ROM) dan rendahnya RTK (ROM to Kelanis) menyebabkan deadstock pada ROM 19A. Dengan adanya *deadstock* (kehabisan stock) pada ROM 19A maka harus diadakan penambahan volume, yaitu dengan menambah tinggi tumpukan batubara pada ROM agar volume yang dapat ditampung meningkat dari sebelumnya.

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut: melakukan analisis terhadap kestabilan lereng geometri rencana awal tumpukan batubara dari Perusahaan, melakukan analisis terhadap kestabilan lereng geometri aktual tumpukan batubara., dan memberikan rekomendasi geometri tumpukan batubara yang optimal di ROM PT Adaro Indonesia.

METODOLOGI

Kegiatan pengambilan dan pengumpulan data dilakukan beberapa dalam kurun waktu dua bulan agar data yang didapat representatif ataupun mewakili dan dapat digunakan dalam penelitian ini. Data yang dikumpulkan berupa tinggi aktual lereng tumpukan Batubara, sudut kemiringan lereng tumpukan Batubara, alat-alat yang beroperasi di ROM beserta spesifikasinya, Geometri tumpukan Batubara, data laboratorium uji batubara dan data hasil uji CBR (California Bearing Ratio).

Studi Literatur

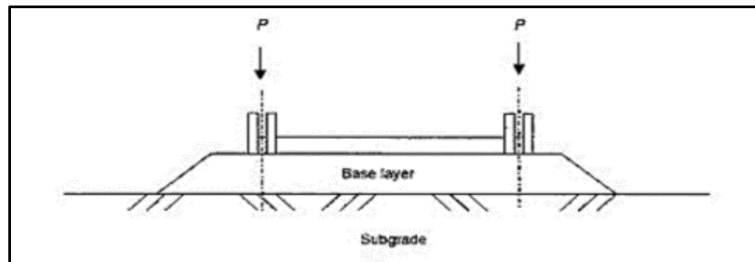
Kestabilan lereng, baik lereng alami maupun lereng buatan (buatan manusia) serta lereng timbunan, dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat dinyatakan secara sederhana sebagai gaya-gaya penahan dan gaya-gaya penggerak yang bertanggung jawab terhadap kestabilan lereng tersebut. Pada kondisi gaya penahan (terhadap longsoran) lebih besar dari gaya penggerak, lereng tersebut akan berada dalam kondisi yang stabil (aman). Namun, apabila gaya penahan lebih kecil dari gaya penggerak, lereng tersebut tidak stabil dan akan terjadi longsoran. Sebenarnya, longsoran merupakan suatu proses alami yang terjadi untuk mendapatkan kondisi kestabilan lereng yang baru (keseimbangan baru), di mana gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak.

Faktor Kemanan (FK) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Faktor Keamanan (FK)} = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}} = \frac{C.A + W \cos \alpha \tan \theta}{W \sin \alpha} \quad (1)$$

Keterangan: C adalah kohesi material dalam satuan KPa, A merupakan luas bidang longsoran dalam satuan m^2 , W adalah berat material dalam satuan kN/m^3 , α adalah sudut kemiringan lereng dalam satuan derajat ($^\circ$) dan θ merupakan sudut geser dalam, dalam satuan derajat ($^\circ$) [7].

Metode pengujian yang digunakan pada pembebanan oleh alat menggunakan metode Giroud-Han. Metode ini digunakan untuk desain lapis konstruksi perkerasan jalan tambang dengan penggunaan geosintetik untuk perbaikan subgrade, ditemukan oleh J.P. Giroud dan Jie Han. Metode Giroud-Han menggunakan 1 jenis kendaraan dengan muatan terberat dalam perencanaannya [8]. Jenis kendaraan rencana diasumsikan sama untuk volume lalu lintas rencana. Konsep hitungan *base course* jalan tambang diidealisasikan seperti Gambar-1 Beban roda (wheel load) seberat P disalurkan oleh dua ban yang mempunyai tekanan ban sebesar p kepada lapisan *base*.



Gambar-1. Idealisasi Penyaluran Beban Roda

$$\text{Total Pembebanan} = \frac{\text{Berat Unit (ton)} \times \text{gravitasi (m/s}^2\text{)}}{\text{lebar Wheelbase (m)} \times \text{panjang as ban (m)}} \quad (2)$$

Untuk menghitung faktor keamanan keseluruhan dari beban yang ada di ROM seperti batubara, alat berat dan tanah itu sendiri maka diperlukan perhitungan menggunakan rumus dari Terzaghi, pertama adalah $Q_{ultimate}$ yang digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung tanah untuk pondasi memanjang (tumpukan batubara) dan yang kedua adalah q_{coal} yang digunakan untuk menghitung tekanan yang diberikan oleh tumpukan batubara berikut ini.

$$Q_{ultimate} = c \times N_c + \gamma \times D \times N_q + 0,5 \times \gamma \times B \times N_y \quad (3)$$

$$Q_{Coal} = \gamma_{ob} \times H + \text{Ground Pressure} \quad (4)$$

Dimana C merupakan kohesi, D adalah kedalaman pondasi, B lebar pondasi, N_c , N_q , N_y berturut-turut merupakan faktor kapasitas daya dukung tanah Terzaghi, H merupakan tinggi tumpukan batubara, G adalah Ground pressure alat yang beraktifitas di atas batubara,

Pengamatan Lapangan dan Pengambilan Data

Dilakukan dengan pengamatan langsung terhadap kondisi lapangan seperti geometri tumpukan, sudut kemiringan, tinggi tumpukan, Panjang tumpukan, lebar tumpukan dan alat-alat yang bekerja di ROM. Data diperoleh dari pengamatan langsung di lapangan (data primer) dan literatur atau data sebelumnya yang berhubungan dengan permasalahan yang ada (data sekunder). Pengambilan data tergantung dari jenis data yang dibutuhkan, yaitu sebagai berikut:

- a. Data primer antara lain:
 - 1) Tinggi aktual lereng tumpukan batubara.
 - 2) Sudut kemiringan lereng tumpukan batubara.
 - 3) Alat-alat yang beroperasi di ROM.
 - 4) Geometri Lereng tumpukan Batubara.
 - 5) Panjang dan lebar lereng tumpukan Batubara.
 - 6) Pengujian sampel Batubara di lab
- b. Data sekunder antara lain:
 - 1) Peta daerah penelitian.
 - 2) Foto udara.
 - 3) Topografi daerah ROM 19.
 - 4) Data uji lab Batubara sebelumnya.
 - 5) Data hasil uji CBR base ROM 19.
 - 6) Spesifikasi alat gali muat dan alat angkut yang beroperasi di ROM 19.

ANALISIS PENGOLAHAN DATA

Pengolahan data dibuat dengan bantuan *software* pertambangan. Yang selanjutnya dilakukan beberapa analisis seperti menghitung berapa *material properties* batuan, seberapa besar beban yang dapat ditahan oleh Batubara dan tanah dasarnya, dari hasil perhitungan factor keamanan apakah memungkinkan dilakukan penambahan volume dengan ditingkatkannya tinggi dari tumpukan Batubara di ROM.

1. Pengolahan Data Hasil Uji Laboratorium

A. Pengujian Sampel Batubara

Pengujian di lab telah dilakuakn untuk mendapatkan propertis fisik dan mekanik batubara (Tabel-1 dan Tabel-

- 2). Dari 8 data uji kuat geser dan 3 data sifat fisik, dirata-ratakan untuk mendapatkan propertis yang representatif

Tabel-1. Data Hasil Uji Kuat Geser Laboratorium Batubara

Sampel	K1.A	K1.B	K1.C	K1.D	K3.A	K3.B	K3.C	K3.D	Rata-rata
<i>Cohesion</i> (kPa)	2,2	25,8	7,5	9,0	13,3	1,6	16,0	8,1	10,4
<i>Sudut Geser</i> (°)	26,2	18,8	28,9	19,7	19,5	25,4	19,4	19,7	22,2

Tabel-2. Data Hasil Uji Sifat Fisik Laboratorium Batubara

Unit Weight Mg/m ³				Rata-rata
K1	1,09	1,08	1,04	10,1 kN/m ³
K3	0,93	0,96	0,96	

B. Pengujian Kekuatan Tanah Dasar

Dari data sekunder dengan hasil pengujian lapisan tanah menggunakan metode uji CBR lapangan, didapatkan data propertis fisik dan mekanik surface, base, dan subbase (Tabel-3).

Tabel-3. Data Uji Tanah Dasar

Jenis Lapisan	Tebal (cm)	γ	C (kPa)	Unit Weight (kN/m ³)	Tipe Kohesi	Strength Type
Surface	20	-	117	20	Constant	Undrained
Base	80	-	156,5	18	Constant	Undrained
Subbase	∞	-	185	18	Constant	Undrained

C. Input Data Hasil Uji Batubara dan Tanah ke Aplikasi *Slide V6*

Kemudian setelah dilakukan perhitungan *unit weight*, *cohesion* dan sudut geser dari batubara dan juga tanah dari *base* ROM dimasukkanlah data tersebut ke dalam aplikasi *Slide V6*. Contoh tampilan input material diberikan pada Gambar-2.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Ru
Coal		10.1	Mohr-Coulomb	10.4	22.2		None	0.5
Surface		20	Undrained	117		Constant	None	0
Base		18	Undrained	156.5		Constant	None	0
Subbase		18	Undrained	185		Constant	None	0

Gambar-2. Material Properties

2. Analisis Bearing Capacity

Untuk Perhitungan bearing capacity digunakan rumus daya dukung Terzaghi 1943 dengan hasil sebagai berikut:

$$Q_{ultimate} = (185 \times 5,7) + (18 \times 0 \times 1) + (0,5 \times 18 \times 100 \times 0) \\ = 1054,5 \text{ kPa}$$

$$Q_{coal} = (10,1 \times 15) + 25 + 69 \\ = 245,5 \text{ kPa}$$

$$SF = 1054,5 / 245,5 \\ = 4,295$$

Safety factor 4, 29 > 1, yang berarti tumpukan batubara stabil karena gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak longsor.

3. Perhitungan Beban Alat di ROM

Perhitungan beban alat di tumpukan batubara ROM ada 2 buah alat yang digunakan yaitu *dump truck* dan *dozer* dan untuk spesifikasi alat yang lebih lengkap bisa dilihat pada lampiran B, C dan D, perhitungan beban alat diuraikan sebagai berikut:

$$\text{Total Pembebanan} = \frac{(\text{Berat unit (ton)} \times \text{gravitasi (m/s}^2))}{(\text{Lebar tapak ban (m)} \times \text{Panjang tapak ban (m)})}$$

$$\text{Beban Dump Truck} = \frac{(163 \text{ ton} \times 9,8 \text{ m/s}^2)}{(4,5 \text{ m} \times 5,2 \text{ m})} \\ = \frac{1597,4 \text{ Kn}}{23,4 \text{ m}^2} \\ = 69 \text{ Kn/m}^2 = 69 \text{ kPa}$$

$$\text{Beban Dozer} = \frac{(15,4 \text{ ton} \times 9,8 \text{ m/s}^2)}{(2,9 \text{ m} \times 2,1 \text{ m})} \\ = \frac{150,92 \text{ Kn}}{6,09 \text{ m}^2} \\ = 25 \text{ Kn/m}^2 = 25 \text{ kPa}$$

4. Permodelan Geometri Tumpukan Batubara

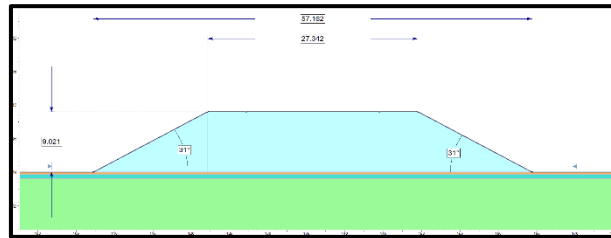
Setelah melakukan pengolahan data material properties, data hasil perhitungan beban alat yang beroperasi dan melakukan perhitungan terhadap daya dukung tanah di ROM selanjutnya menghitung faktor keamanan dengan beberapa skenario geometri lereng. Yang dimaksud dengan skenario geometri lereng yang dianalisis adalah geometri rencana awal, geometri aktual dan geometri optimasi.

Pengaturan yang digunakan pada model yang akan diuji menggunakan aplikasi *Slide V6* adalah sebagai berikut:

- Arah longsor akan menggunakan dari arah kanan menuju ke bagian kiri model.
- Tipe longsor yang digunakan adalah longsor busur karena jenis material yang diuji adalah homogen.
- Metode yang digunakan adalah metode GLE/Morgenstern-Price karena dengan metode ini data tentang *force equilibrium* dan *moment equilibrium* bisa didapatkan dan metode ini lebih lengkap melakukan pengujian hasil faktor keamanan.
- Untuk *groundwater* akan menggunakan metode *Ru coefficient* karena tidak adanya genangan air pada permukaan batubara dan untuk air yang akan diperhitungkan adalah air hujan oleh karena itu nilai *Ru* yang digunakan adalah 0,5 karena batubara tidak dalam keadaan tergenang air ataupun dalam keadaan yang kering.

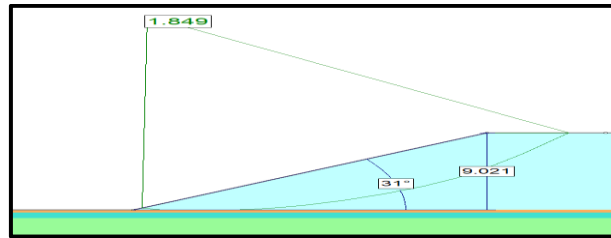
A. Geometri Rencana Awal Tumpukan Batubara (GRA)

Geometri rencana awal yang digunakan sesuai dengan rencana model tumpukan Batubara milik perusahaan. Tinggi jenjang 1 (*h*₁) 9 meter, sudut kemiringan jenjang (*α*) 31°, lebar jenjang bawah (*L*₁) 57 meter, lebar jenjang atas (*L*₂) 27 meter dan hanya memiliki satu jenjang (single bench). *Material properties* yang digunakan terdapat pada gambar 5.16 dan geometri seperti pada Gambar-3.



Gambar-3. Geometri Rencana Tumpukan Batubara

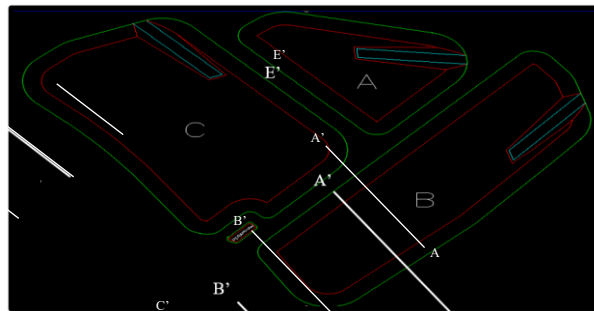
Setelah geometri dilakukan analisis diperoleh hasil faktor keamanan sebesar 1.849 seperti pada gambar 4 Nilai ini memiliki nilai kestabilan yang cukup tinggi sehingga dapat dilanjutkan untuk penambahan volume tumpukan batubara yang lebih optimal.



Gambar-4. Faktor Keamanan Geometri Rencana Tumpukan Batubara

B. Geometri Aktual Tumpukan Batubara (GA)

Geometri aktual tumpukan batubara yang dimaksud adalah kondisi tumpukan yang ada dilapangan saat pengambilan data. Gambar 5 menunjukan peta tumpukan aktual dan garis sayatan yang akan dianalisis faktor keamanannya. Ada 5 garis sayatan pada posisi yang berbeda untuk mewakili ukuran geomteri aktual.



Gambar-5. Pengambilan Garis Sayatan Pada Topografi

Pada geometri aktual tumpukan batubara yang dianalisis memiliki hasil yang sudah diambil garis sayatannya didapatkan seperti pada Tabel-4.

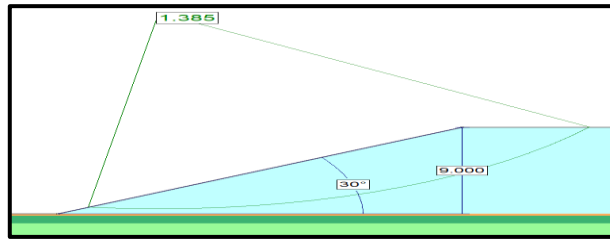
Tabel-4. Geometri Sayatan Aktual

Parameter	Sayatan				
	A	B	C	D	E
h_1 (m)	9	9	9	9	9
α (°)	30	32	36	34	32
L_1 (m)	100	80	90	120	130
L_2 (m)	69	51	65	93	101

Dari data geometri 5 hasil sayatan tersebut diperoleh hasil perhitungan FK 1.38, 1.31, 1.17, 1.23 dan 1.30 tanpa adanya penambahan beban dinamis dari alat yang beroperasi.

1. Hasil Model Sayatan A-A' (GA_1)

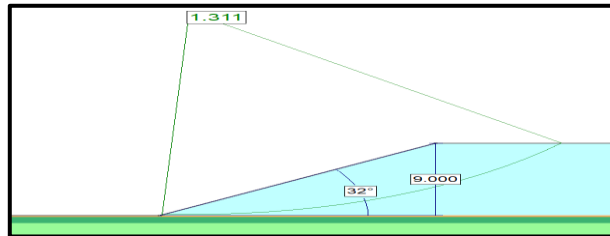
Setelah dilakukan permodelan sayatan A-A' yang memiliki tinggi 9 meter dan sudut kemiringan 30° selanjutnya model dijalankan dan didapatkan hasil faktor keamanan sebesar 1.385.



Gambar-6. FK Geometri Aktual Tumpukan Batubara Sayatan A-A'

2. Hasil Skenario Model Sayatan B-B' (GA_2)

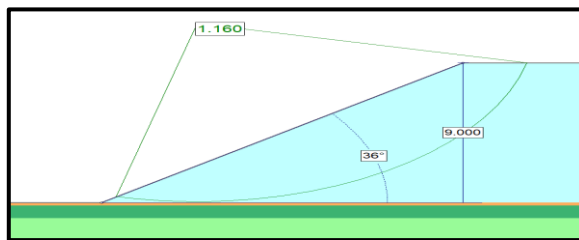
Setelah dilakukan permodelan sayatan B-B' yang memiliki tinggi 9 meter dan sudut kemiringan 32° selanjutnya model dijalankan dan didapatkan hasil faktor keamanan sebesar 1.31.



Gambar-7. FK Geometri Aktual Tumpukan Batubara Sayatan B-B'

3. Hasil Skenario Model Sayatan C-C' (GA_3)

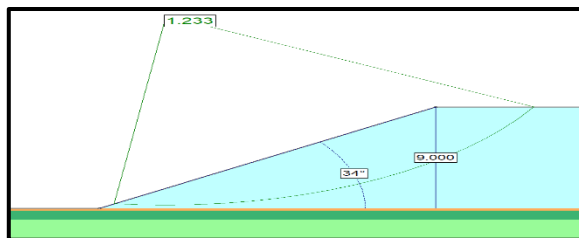
Setelah dilakukan permodelan sayatan C-C' yang memiliki tinggi 9 meter dan sudut kemiringan 36° selanjutnya model dijalankan dan didapatkan hasil faktor keamanan sebesar 1.16.



Gambar-8. FK Geometri Aktual Tumpukan Batubara Sayatan C-C'

4. Hasil Skenario Model Sayatan D (GA_4)

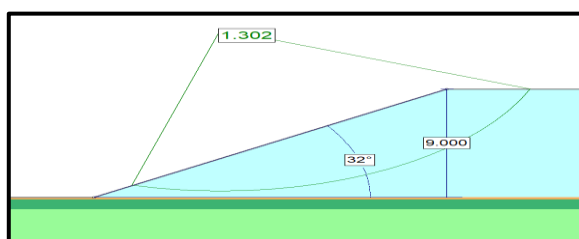
Setelah dilakukan permodelan sayatan D-D' yang memiliki tinggi 9 meter dan sudut kemiringan 34° selanjutnya model dijalankan dan didapatkan hasil faktor keamanan sebesar 1.23.



Gambar-9. FK Geometri Aktual Tumpukan Batubara Sayatan D-D'

5. Hasil Skenario Model Sayatan E-E' (GA_5)

Setelah dilakukan permodelan sayatan E-E' yang memiliki tinggi 9 meter dan sudut kemiringan 32° selanjutnya model dijalankan dan didapatkan hasil faktor keamanan sebesar 1.30.

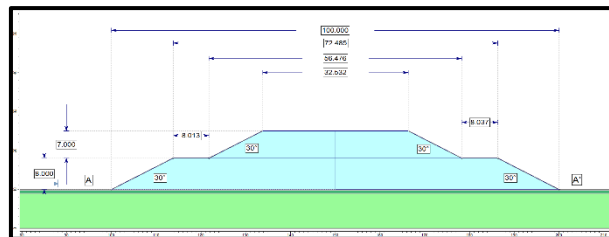


Gambar-10. FK Geometri Aktual Tumpukan Batubara Sayatan E-E'

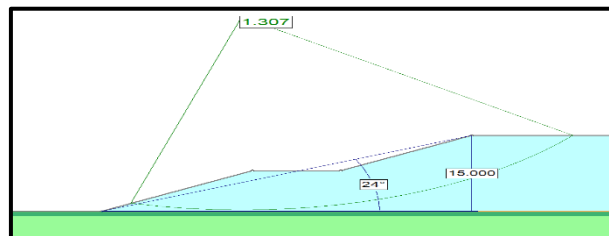
Setelah dilakukan analisis didapatkan faktor keamanan tertinggi pada sayatan yang dibuat adalah 1.39 dan nilai ini masih dianggap masih bisa dilakukan optimasi pada geometri tumpukan batubara.

C. Geometri Optimasi Tumpukan Batubara (GO)

Setelah melakukan analisis pada sayatan dari geometri aktual kemudian dilanjutkan untuk membuat model optimalisasi. Pada model buatan untuk optimalisasi memiliki dua tumpukan (*double bench*), tinggi keseluruhan jenjang tumpukan adalah 15 meter dengan masing-masing tumpukan memiliki tinggi 8 meter untuk tumpukan pertama dan 7 meter untuk tumpukan kedua alasan kenapa memiliki *double bench* adalah karena dipengaruhi oleh spesifikasi alat *loader* yang hanya memiliki ketinggian kerokan mencapai 7 meter saja, memiliki sudut kemiringan keseluruhan sebesar 24° dengan masing-masing jenjang memiliki sudut kemiringan sebesar 30° pada tumpukan pertama dan tumpukan kedua karena menyesuaikan sudut paling aman setelah melakukan analisis pada model sayatan sebelumnya, memiliki jarak sejauh 8 meter untuk pembentukan tumpukan kedua dari ujung *crest* tumpukan pertama, hal ini diperlukan agar tumpukan kedua memiliki tahanan longsor yang lebih aman daripada tidak memiliki jarak antar bench maupun jarak yang terlalu dekat, serta memiliki lebar 100 meter karena menyesuaikan kapasitas ROM saat ini.

**Gambar-11.** Geometri Optimisasi

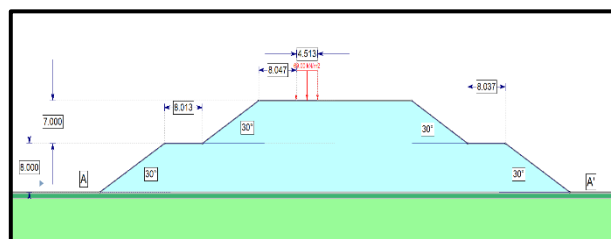
Setelah dilakukan permodelan geometri selanjutnya skenario model optimalisasi dijalankan dan didapatkanlah hasil faktor keamanan sebesar 1.31.

**Gambar-12.** FK Geometri Optimisasi

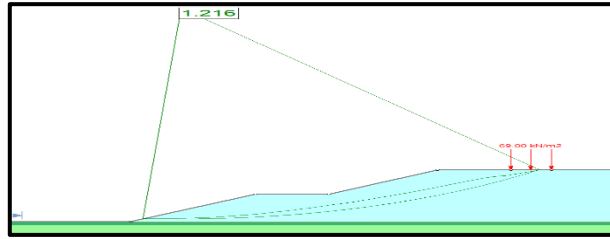
Setelah mendapatkan model geometri yang sesuai dan menggunakan *material properties* yang sudah ditentukan selanjutnya akan dilakukan pengujian menggunakan 4 skenario dengan model geometri dan pembebanan sebagai berikut:

1. Model Ketika ada *Dump Truck* di Atas Tumpukan Batubara (GO_{DT})

Berikut adalah geometri tumpukan Batubara saat aktifitas alat berat *dump truck* yang memiliki beban sebesar 69 kPa dengan lebar alat sebesar 4,5 meter dan jarak *dumping* sejauh 8 meter dari *crest* dan *dump truck*.

**Gambar-13.** Geometri Tumpukan Batubara saat ada *dump truck*

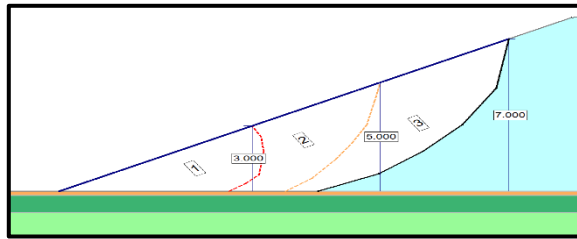
Setelah dilakukan analisis kemudian didapatkanlah hasil faktor keamanan yang diperoleh dari model dan juga beban yang sudah ditentukan maka didapatkan hasil faktor keamanan sebesar 1.216 dengan jarak longsor dari *crest* menuju beban sebesar 12 meter dan jarak dari ujung longsor di bawah memiliki jarak sejauh 3 meter.



Gambar-14. FK Geometri Tumpukan Batubara saat ada *dump truck*

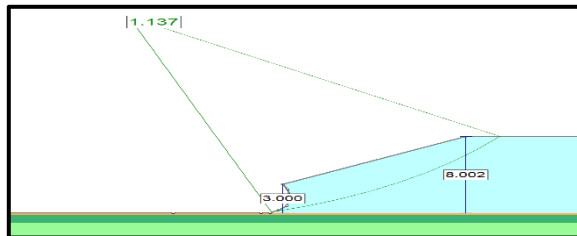
2. Model Setelah Dilakukan *loading* Oleh Alat *Loader* (GO_{LO})

Berikut adalah hasil permodelan dari aplikasi *Slide V6* untuk geometri tumpukan Batubara saat ada aktifitas *loading* dari tumpukan Batubara oleh alat *loader* dengan spesifikasi memiliki sudut *loading* sebesar 40° dan tinggi maksimal *loading* mencapai 7 meter dengan melalui 3 proses untuk mencapai ketinggian mencapai 7 meter yaitu dengan proses pertama 3 meter, *loading* kedua 5 meter dan terakhir *loading* ketiga 7 meter.

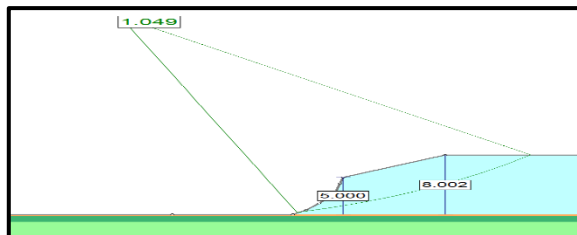


Gambar-15. Geometri Tumpukan Batubara saat ada *Loading Batubara Step 1* Dengan Tinggi 3 Meter

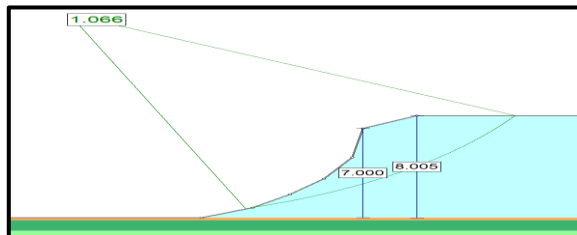
Setelah dilakukan analisis kemudian didapatkan hasil faktor keamanan yang diperoleh dari model dan besar hasil pengerukan maka didapatkan hasil faktor keamanan pada *step 1* sebesar 1.18, *step* kedua sebesar 1.05 dan *step* ketiga sebesar 1.07.



Gambar-16. FK Geometri Tumpukan Batubara saat ada *Loading Batubara Step 1* dengan Tinggi 3 Meter



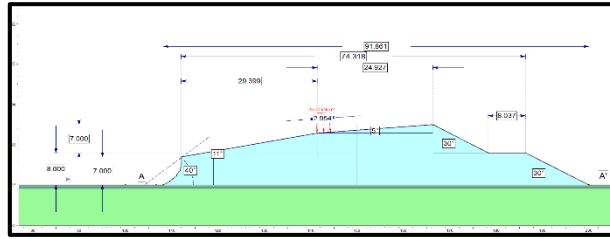
Gambar-17. FK Geometri Tumpukan Batubara saat ada *Loading Batubara Step 2* dengan Tinggi 5 Meter



Gambar-18. FK Geometri Tumpukan Batubara saat ada *Loading Batubara Step 3* dengan Tinggi 7 Meter

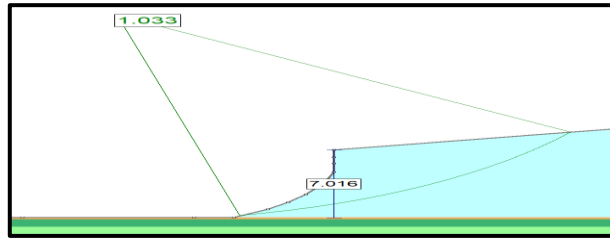
3. Model Saat Dilakukan Proses Pelandaian Oleh Alat *Dozer* (GO_B)

Berikut adalah geometri tumpukan Batubara saat pelandaian dari tumpukan Batubara oleh alat *dozer* yang memiliki beban sebesar 25 kPa dan lebar alat sebesar 2,5 meter yang sedang melakukan pelandaian tumpukan batubara.



Gambar-19. Geometri Tumpukan Batubara saat Pelandaian

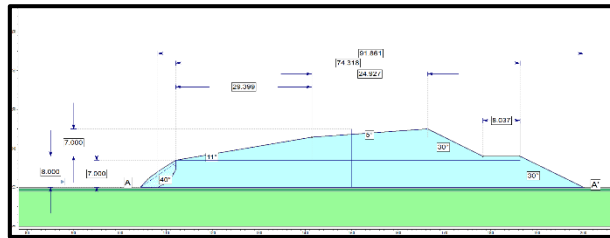
Setelah dilakukan analisis kemudian didapatkanlah hasil faktor keamanan yang diperoleh dari model dan juga beban yang sudah ditentukan maka didapatkan hasil faktor keamanan sebesar 1.03 dengan jarak longsor dari *crest* menuju beban sebesar 4 meter dan jarak dari ujung longsor di bawah memiliki jarak sejauh 0,1 meter.



Gambar-20. FK Geometri Tumpukan Batubara saat Pelandaian

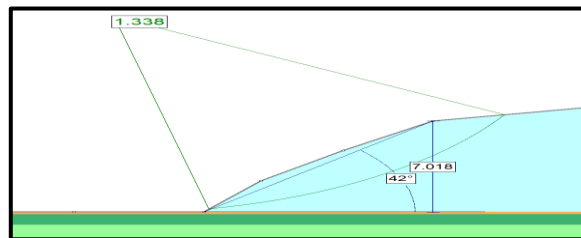
4. Model Setelah Dilakukan Proses Pelandaian Oleh Alat *Dozer* (GO_A)

Berikut adalah geometri tumpukan batubara saat pelandaian dari tumpukan batubara yang sudah selesai dilakukan dengan model yang memiliki geometri lebar 91 meter dan tinggi yang variatif dari 7 meter sampai dengan tinggi 15 meter serta memiliki sudut kemiringan lereng sebesar 40° .



Gambar-21. Geometri Tumpukan Batubara Setelah Pelandaian

Setelah dilakukan analisis kemudian didapatkanlah hasil faktor keamanan yang diperoleh dari model didapatkan hasil faktor keamanan sebesar 1.34.



Gambar-22. FK Geometri Tumpukan Batubara Setelah Pelandaian

Setelah dilakukan analisis setiap proses aktivitas mulai dari adanya beban *dump truck*, adanya *loading*, hingga pelandaian pada geometri optimasi tumpukan Batubara bisa disimpulkan apabila geometri yang sudah dioptimasi bisa dinyatakan stabil dan bisa dioperasikan pada tumpukan Batubara di ROM.

DISKUSI DAN PEMBAHASAN

1. Perbandingan model geometri tumpukan batubara

Dari semua model yang telah dibuat dan dijalankan oleh aplikasi Slide V6, diperoleh hasil rangkuman pada Tabel 5. Analisis yang dilakukan dari setiap model yang diimplementasikan dalam berbagai skenario pengujian.

Tabel-5. Geometri Analisis

Kode	Geometri	Jumlah jenjang	Lebar Antar Jenjang (m)	Tinggi Jenjang		Kemiringan		FK
				h ₁ (m)	h ₂ (m)	α_1 (°)	α_2 (°)	
GRA	Plan	1	-	9	-	31	-	1,82
GA ₁	Aktual	1	-	9	-	30	-	1,39
GA ₂		1	-	9	-	32	-	1,31
GA ₃		1	-	9	-	36	-	1,17
GA ₄		1	-	9	-	34	-	1,23
GA ₅		1	-	9	-	32	-	1,30
GO	Optimasi	2	8	8	7	30	30	1,38
GO _{DT}		2	8	8	7	30	30	1,22
GO _{LO1}		2	8	8	7	40	30	1,14
GO _{LO2}		2	8	8	7	40	30	1,05
GO _{LO3}		2	8	8	7	40	30	1,07
GO _B		2	-	15		40	-	1,03
GO _A		2	-	15		40	-	1,34

Dari Tabel-5 dapat disimpulkan bahwa dari setiap geometri yang telah dianalisis, terdapat tiga kondisi geometri yang dinyatakan tidak aman. Kondisi pertama yaitu pada geometri aktual (GA₃) yang memiliki sudut kemiringan tertinggi yaitu 36°. Kondisi kedua ketika tumpukan batubara sedang dalam proses loading (GO_{LO1}, GO_{LO2}, GO_{LO3}), di mana adanya perubahan yang diterapkan pada tumpukan dapat menyebabkan peningkatan tekanan yang signifikan pada lereng. Hal ini dapat mengakibatkan distribusi tegangan yang tidak merata dan meningkatkan risiko terjadinya kegagalan lereng.

Kondisi geometri yang ketiga yang dinyatakan tidak aman terjadi pada saat proses pelandaian (GO_B). Selama proses ini, perubahan dalam distribusi berat dan penurunan tumpukan batubara dapat menghasilkan redistribusi gaya dan tekanan di dalam struktur lereng. Jika tidak dikelola dengan baik, pelandaian ini dapat menyebabkan peningkatan tegangan lateral yang dapat mengurangi faktor keamanan lereng secara signifikan.

Penting untuk dicatat bahwa analisis terhadap keamanan geometri harus dilakukan dengan sangat teliti dan berkelanjutan selama seluruh siklus operasional tumpukan batubara. Dengan memahami kondisi-kondisi yang menyebabkan ketidakamanan, langkah-langkah mitigasi dapat dirancang dan diimplementasikan untuk mengurangi risiko terjadinya kegagalan lereng. Ini meliputi monitoring kondisi lereng secara rutin, penggunaan teknologi pemodelan untuk prediksi perilaku lereng, dan implementasi praktik pengelolaan yang tepat sesuai dengan kondisi operasional yang aktual.

2. Varian yang mempengaruhi FK

Dari hasil analisis yang sudah dilakukan dapat dikatakan varian yang mempengaruhi FK antara lain adalah sebagai berikut:

A. Tinggi lereng

Varian pertama yang mempengaruhi hasil faktor kemiringan (FK) dari lereng adalah tinggi lereng yang digunakan. Semakin tinggi lereng tumpukan batubara yang ditambahkan, maka semakin rendah nilai FK yang didapatkan. Hal ini menunjukkan adanya korelasi negatif antara tinggi lereng dan nilai FK. Penelitian telah menunjukkan bahwa semakin curam lerengnya, semakin besar kemungkinan terjadinya perubahan dalam nilai FK.

Selain itu, faktor lain yang dapat memengaruhi FK adalah komposisi geoteknik dari tanah di sekitar tumpukan batubara. Kekuatan tanah yang rendah atau tanah yang cenderung erodibel dapat menyebabkan pergeseran dan penurunan kemiringan tumpukan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis geoteknik yang komprehensif dalam merancang tumpukan batubara guna memastikan stabilitas dan keamanannya terjaga.

Adapun pengaruh aktivitas manusia juga dapat berdampak signifikan terhadap FK. Misalnya, penggunaan alat berat yang tidak terkontrol atau penambangan yang berlebihan dapat mengganggu struktur dan stabilitas lereng tumpukan batubara. Pengelolaan operasional yang cermat dan pengawasan yang ketat terhadap aktivitas di sekitar tumpukan menjadi kunci untuk mengurangi risiko terjadinya perubahan nilai FK.

Dalam konteks ini, pemantauan terus-menerus terhadap kondisi lereng tumpukan batubara sangatlah penting. Teknologi pemantauan modern seperti penggunaan sensor dan pemodelan numerik dapat membantu dalam mendeteksi perubahan kondisi lereng secara dini. Dengan demikian, tindakan preventif dan perbaikan dapat segera dilakukan untuk menjaga nilai FK dalam batas aman dan mendukung operasional yang berkelanjutan.

Dengan mengintegrasikan semua aspek ini dalam perencanaan dan pengelolaan, dapat dipastikan bahwa tumpukan batubara dapat dikelola dengan efisien, aman, dan berkelanjutan. Hal ini tidak hanya mengoptimalkan nilai FK sesuai dengan persyaratan teknis dan lingkungan, tetapi juga mengurangi potensi dampak negatif terhadap lingkungan sekitar sudut kemiringan lereng.

B. Sudut Kemiringan Lereng

Varian kedua yang mempengaruhi hasil faktor kemiringan (FK) adalah sudut kemiringan lereng yang digunakan. Semakin curam sudut yang digunakan, maka semakin rendah nilai FK yang didapatkan. Sebaliknya, apabila semakin landai sudut kemiringan lereng, semakin tinggi nilai FK yang dapat dicapai.

Penelitian telah menunjukkan bahwa sudut kemiringan lereng memainkan peran krusial dalam menentukan stabilitas dan kemiringan tumpukan batubara. Sudut yang terlalu curam dapat meningkatkan risiko terjadinya longsor atau kecelakaan struktural, yang pada gilirannya dapat mengurangi nilai FK secara signifikan. Oleh karena itu, pemilihan sudut yang tepat dalam desain dan konstruksi tumpukan batubara menjadi sangat penting untuk memastikan keamanan serta memenuhi standar teknis yang diharapkan.

Selain itu, karakteristik geoteknik dari tanah di sekitar tumpukan juga mempengaruhi respons terhadap sudut kemiringan. Tanah yang stabil dan memiliki kekuatan yang memadai dapat mendukung penggunaan sudut kemiringan yang lebih curam tanpa mengorbankan nilai FK. Namun, tanah yang lemah atau rentan terhadap erosi akan membatasi opsi sudut kemiringan yang dapat diterapkan tanpa mengurangi stabilitas keseluruhan.

Dalam konteks ini, pendekatan yang holistik dalam perencanaan dan implementasi tumpukan batubara sangat diperlukan. Menggabungkan penilaian geoteknik, pemantauan kondisi lereng secara terus-menerus, dan penggunaan teknologi modern dalam pemodelan dapat membantu mengoptimalkan sudut kemiringan untuk mencapai nilai FK yang optimal. Ini akan mendukung keberlanjutan operasional dan meminimalkan dampak lingkungan dari aktivitas penambangan dan pengelolaan tumpukan batubara.

Perlu dicatat bahwa pemantauan terhadap perubahan kondisi geoteknik dan lingkungan sekitar tumpukan batubara juga merupakan langkah yang krusial. Perubahan cuaca ekstrem atau aktivitas alamiah seperti gempa bumi dapat mempengaruhi stabilitas lereng dan, oleh karena itu, mempengaruhi nilai FK. Dengan melakukan pemantauan yang cermat dan responsif terhadap perubahan kondisi ini, dapat diambil tindakan pencegahan yang tepat waktu untuk menjaga keamanan operasional dan mengoptimalkan kinerja tumpukan batubara secara keseluruhan.

Dengan demikian, integrasi dari berbagai disiplin ilmu dan teknologi dalam manajemen tumpukan batubara tidak hanya berpotensi meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga mendukung prinsip-prinsip keberlanjutan lingkungan yang semakin diperlukan dalam industri pertambangan modern.

C. Jarak antar jenjang

Varian ketiga yang mempengaruhi hasil faktor kemiringan (FK) adalah jarak antar jenjang yang diberikan. Semakin besar jarak antar jenjang, semakin besar nilai FK yang dapat dicapai. Hal ini disebabkan oleh gaya penahan yang lebih besar dari jenjang pertama, karena jenjang kedua memberikan gaya penggerak yang lebih besar dibandingkan dengan jarak yang lebih kecil atau bahkan tidak ada jarak antar jenjang (single bench).

Penelitian telah menunjukkan bahwa optimisasi jarak antar jenjang dapat secara signifikan mempengaruhi stabilitas dan efisiensi tumpukan batubara. Dengan memberikan jarak yang memadai antar jenjang, dapat mengurangi tekanan pada lereng tumpukan dan mencegah kemungkinan terjadinya longsor atau deformasi struktural yang dapat mempengaruhi nilai FK. Oleh karena itu, desain yang mempertimbangkan faktor ini secara cermat akan mendukung pencapaian nilai FK yang optimal dan keberlanjutan operasional yang lebih baik.

Selain itu, analisis mekanika tanah juga memainkan peran penting dalam mengevaluasi pengaruh jarak antar jenjang terhadap stabilitas lereng. Tanah yang memiliki kekuatan yang memadai di sekitar jenjang dapat memberikan dukungan yang lebih baik terhadap struktur tumpukan secara keseluruhan. Dengan demikian, pemilihan jarak antar jenjang yang tepat tidak hanya berdampak pada nilai FK, tetapi juga pada keamanan keseluruhan dari tumpukan batubara tersebut.

Dalam konteks operasional, monitoring terus-menerus terhadap kondisi lereng sangatlah penting. Ini mencakup pemantauan ketegangan dan deformasi yang mungkin terjadi sebagai akibat dari perubahan kondisi alamiah atau aktivitas operasional. Dengan memahami dan merespons perubahan kondisi dengan tepat waktu, dapat diambil tindakan pencegahan atau perbaikan yang diperlukan untuk menjaga stabilitas dan keamanan tumpukan batubara, serta memaksimalkan nilai FK sesuai dengan tujuan teknis dan lingkungan yang diharapkan.

Selain pemantauan, penggunaan teknologi modern seperti sistem sensor dan pemodelan numerik juga dapat membantu dalam mengevaluasi dan memprediksi perilaku lereng tumpukan batubara. Dengan memanfaatkan data yang dikumpulkan secara real-time dan analisis yang mendalam, dapat dilakukan pemantauan yang lebih efektif terhadap perubahan kondisi dan potensi risiko. Ini akan memungkinkan manajemen proaktif terhadap operasional tumpukan batubara, menjaga keberlanjutan operasional dan mengurangi dampak lingkungan yang mungkin terjadi.

Terakhir, kolaborasi antara ahli geoteknik, insinyur pertambangan, dan ahli lingkungan sangat penting dalam mengembangkan strategi yang komprehensif untuk pengelolaan tumpukan batubara. Dengan memadukan pengetahuan dan pengalaman dari berbagai disiplin ilmu ini, dapat dihasilkan solusi yang inovatif dan berkelanjutan dalam menjaga nilai FK serta kelestarian lingkungan sekitar.

D. Kondisi Geometri Lereng

Varian keempat yang dapat mempengaruhi kestabilan lereng tumpukan batubara adalah kondisi geometri lereng. Perubahan dalam geometri lereng dapat signifikan mempengaruhi faktor keamanan yang dihasilkan dari analisis. Misalnya, dengan merubah geometri lereng untuk membuatnya lebih curam atau lebih landai dari yang awalnya direncanakan dapat mengubah distribusi tegangan dan gaya dalam struktur lereng. Hal ini bisa menyebabkan faktor keamanan menjadi lebih rendah dari yang seharusnya, meningkatkan risiko terjadinya kegagalan lereng.

Penelitian dan pengalaman lapangan menunjukkan bahwa pemahaman mendalam terhadap geometri lereng sangat penting dalam merencanakan dan mengelola tumpukan batubara. Geometri yang kurang optimal dapat mengakibatkan peningkatan tekanan lateral pada tanah di sekitar lereng, yang pada gilirannya dapat mengurangi stabilitas keseluruhan dari tumpukan batubara tersebut. Oleh karena itu, perencanaan yang teliti dan evaluasi terhadap kemungkinan perubahan geometri lereng selama operasional sangatlah penting untuk menghindari potensi risiko yang tidak diinginkan.

Selain itu, analisis mekanika tanah yang mendalam dapat membantu dalam memprediksi respons lereng terhadap perubahan geometri. Dengan menggunakan model numerik dan simulasi, dapat dilakukan evaluasi yang lebih rinci terhadap potensi dampak dari perubahan geometri terhadap stabilitas lereng. Ini memungkinkan pengambilan

keputusan yang lebih tepat dalam merancang solusi mitigasi dan pengelolaan yang sesuai dengan kondisi aktual dari geometri lereng.

Dalam prakteknya, pemantauan kontinu terhadap kondisi geometri lereng juga sangat penting. Ini mencakup pemantauan terhadap deformasi lereng, perubahan geometri secara alamiah, atau bahkan perubahan yang disengaja selama proses operasional. Dengan memiliki sistem pemantauan yang efektif, operator dapat merespons dengan cepat terhadap perubahan kondisi dan mengimplementasikan tindakan preventif yang diperlukan untuk menjaga stabilitas dan keamanan tumpukan batubara.

Secara keseluruhan, mengelola geometri lereng dengan bijak merupakan bagian integral dari strategi pengelolaan risiko dan keberlanjutan dalam industri pertambangan batubara. Dengan mempertimbangkan semua faktor ini secara komprehensif, dapat diharapkan bahwa nilai faktor keamanan dapat dipertahankan dalam batas yang aman, sambil mendukung operasional yang efisien dan lingkungan yang berkelanjutan.

Perlu juga ditekankan bahwa evaluasi terhadap geometri lereng harus bersifat dinamis dan terus-menerus selama siklus hidup tumpukan batubara. Kondisi lingkungan, beban operasional, dan faktor lain yang mempengaruhi stabilitas lereng dapat berubah dari waktu ke waktu. Dengan demikian, pemantauan rutin dan analisis reguler perlu dilakukan untuk memastikan bahwa sistem manajemen risiko yang tepat diterapkan dan menjaga nilai FK serta keberlanjutan operasional secara konsisten.

KESIMPULAN

1. Geometri rencana awal yang digunakan sesuai dengan rencana model tumpukan Batubara milik perusahaan. Tinggi jenjang 9 meter, sudut kemiringan jenjang 31° , lebar jenjang bawah 57 meter, lebar jenjang atas 27 meter dan hanya memiliki satu jenjang (single bench). Setelah dilakukan analisis didapatkan hasil FK sebesar 1.85 dan masih dianggap memiliki nilai kestabilan yang tinggi sehingga dapat dilanjutkan untuk penambahan volume tumpukan batubara yang lebih optimal dengan menambahkan tinggi tumpukan menjadi 2 jenjang.
2. Geometri aktual tumpukan batubara yang dimaksud adalah kondisi tumpukan yang ada dilapangan saat pengambilan data. Ada 5 garis sayatan pada posisi yang berbeda untuk mewakili ukuran geometri aktual. Setelah dilakukan analisis didapatkan hasil FK sebesar 1,39, 1,31, 1,17, 1,23 dan 1,30.
3. Geometri lereng yang direkomendasikan untuk tumpukan Batubara adalah memiliki dua tumpukan (double bench), masing-masing tumpukan memiliki tinggi 8 meter untuk tumpukan pertama dan 7 meter untuk tumpukan kedua, memiliki sudut kemiringan sebesar 30° pada tumpukan pertama dan tumpukan kedua, memiliki jarak sejauh 8 meter untuk pembentukan tumpukan kedua dari ujung *crest* tumpukan pertama.

Dari penelitian ini disarankan untuk: (1) apabila geometri yang direkomendasikan sudah dipakai selanjutnya diharapkan dilakukan pembentukan Kembali geomeri apabila tumpukan sudah dalam kondisi *deadstock*, (2) Kondisi *loading* disarankan jangan melakukan aktivitas seperti *dumping* dan juga pelandaian agar kondisi kerja tetap aman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Adaro Indonesia yang telah memberi dukungan dalam bentuk finansial, fasilitas, atau legalitas terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S, Hanswily. Analisis Failure Time Menggunakan Data GPS Geodetic dengan Metode Inverse Velocity Pada Disposasi HW 123 South Tutupan PT Adaro Indonesia, Kalimantan Selatan. *Diss. Universitas Jambi*, 2024.
- [2] Anjani, A. Putri, dan D. Radityo. Analisis Kestabilan Lereng Disposasi "X" pada Tambang Terbuka Batubara, Kabupaten Balangan, Kalimantan Selatan. *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea*, 12.2, 2025.
- [3] M.F. Akbar, E. Santoso, dan Melati, S. Kestabilan lereng kritis pada tambang terbuka batubara menggunakan metode kesetimbangan batas. *Jurnal Himasapta*, 10 (1), pp.57-64, 2025.
- [4] Wahidah, Nurul, dan R. Nikolus. Quality Control Batubara Dari Channel-pit Menuju Rom Stockpile di PT Mega Multi Energi. *Journal Scientific of Mandalika*, 6.4, pp. 904-916, 2025.
- [5] Navtalia dan Zella. Kajian Teknis Daya Dukung Tanah untuk Menentukan Kapasitas Optimum Stockpile Utama PT Putra Muba Coal. *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik*, 4.1, pp. 196-211, 2025
- [6] Renaldy, Davin, H. Bahar, dan S. Yuwanto. Evaluasi Desain Stockpile pada Live Stock BWE 203-MTBU untuk Pencegahan Swabakar Batubara PT Bukit Asam, Tbk Kecamatan Tanjung Enim Kabupaten Muara Enim Provinsi Sumatera Selatan. *Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan*. Vol. 5, 2025.
- [7] I. Arif. *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama. 2016.
- [8] Sukmaningrum, A. Diah. Perbandingan Jenis Lapisan Base Course antara Material In Situ dan Batu Pecah terhadap Pencapaian Produksi Tambang di Kalimantan Selatan. *Diss. Universitas Bakrie*, 2025.