



## ANALISIS KESTABILAN LERENG TIMBUNAN PADA *REDESIGN* LERENG PASCA LONGSORAN JALAN *HAULING* PT X KM 78 DI KALIMANTAN TIMUR

### *FILL SLOPE STABILITY ANALYSIS ON REDESIGN SLOPE POST HAULING ROAD FAILURE AT PT X KM 78 IN EAST KALIMANTAN*

Hifni Satria Muwaffaqi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, KESDM

Email: [muwaffaqis@yahoo.com](mailto:muwaffaqis@yahoo.com)

#### INFO ARTIKEL

#### ABSTRAK

##### **Kata Kunci:**

kestabilan lereng, infrastruktur, jalan *hauling*, lereng timbunan.

Kestabilan lereng merupakan isu kritis dalam industri pertambangan, terutama pada jalan *hauling* yang umumnya digunakan sebagai akses pengangkutan batubara ke tempat penumpukan (*stockpile*) dan mobilitas alat. PT X yang berlokasi di Kabupaten Kutai Barat, Kalimantan Timur memiliki infrastruktur jalan *hauling* sepanjang 90 kilometer (km). Pada Februari 2024 terjadi longsor di jalan *hauling* KM 78.500 arah kosong, hasil investigasi geoteknik menunjukkan bahwa penyebab kelongsoran adalah adanya rembesan pada *crest* lereng, adanya genangan air pada kaki lereng, dan kurangnya *maintenance* pada lereng *existing*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng timbunan (*counterweight*) sebagai usaha remediasi lereng jalan *hauling* di PT X area KM 78.500. Desain *counterweight* yang direncanakan memiliki geometri kemiringan lereng tunggal 30<sup>0</sup>, lebar lereng tunggal 15 meter, dan tinggi lereng tunggal 10 meter. Adapun pada lereng timbunan diberikan perkuatan berupa *boulder* dan kayu pancang untuk meningkatkan faktor keamanan lereng timbunan hingga 1.716.

**Keywords:**

*Slope stability, infrastructure, hauling road, fill slope.*

*Slope stability is a critical issue in the mining industry, especially on mine hauling roads, which generally used as access to transport coal to the stockpile and for mechanical unit mobility. In February 2024, a slope failure occurred on the KM 78,500 hauling road of X Mining Company. The results of geotechnical investigations showed that the cause of the failure was seepage at the slope crest, water ponding at the toe of the slope, and lack of maintenance on the existing slope. This research aims to analyze the stability of fill slopes (counterweights) as an effort to remediate hauling road slopes in X mining company area KM 78,500. The planned counterweight design has a geometry of 30° single slope angle, 15 meters width of single slope, and a single slope height of 10 meters. Meanwhile, the embankment slopes were reinforced in the form of boulders and log pile to increase the safety factor of the fill slopes up to 1,716.*

---

**PENDAHULUAN**

Isu geoteknik yang penting dalam industri pertambangan adalah kestabilan lereng tambang dan *jalan hauling*, dua hal tersebut terhubung dengan peningkatan produksi perusahaan tambang terbuka, sehingga perlu dilakukan analisis kestabilan lereng untuk mengetahui kondisi kestabilan aktual dan merencanakan mitigasi agar tidak terjadi kelongsoran parah yang menutup akses jalan tambang hingga merusak properti perusahaan. Dari penjelasan tersebut, salah satu isu penting tetapi sering dilupakan adalah kestabilan lereng infrastruktur atau *jalan hauling*, dimana *jalan hauling* merupakan salah satu komponen vital

yang menentukan efisiensi dan keamanan operasional. Fungsi *jalan hauling* tidak hanya terbatas pada transportasi batubara dari *front* penambangan ke area pengolahan atau penumpukan (*stockpile*), namun berperan juga sebagai jalur utama untuk mobilisasi alat berat dan logistik penunjang lainnya. Efisiensi dan keamanan pada *jalan hauling* secara langsung mempengaruhi produktivitas tambang serta keselamatan kerja. Oleh karena itu, keberadaan dan kondisi *jalan hauling* seperti pada Gambar 1.1 sangat menentukan kelancaran proses produksi dan distribusi batubara. Atas dasar itu, perencanaan dan pemeliharaan infrastruktur ini menjadi prioritas utama dalam manajemen



**Gambar 1.1** Jalan *Hauling* Tambang Batubara di Kutai Barat, Kalimantan Timur

tambang batubara (Smith, 2015).

Kestabilan lereng pada jalan *hauling* tambang batubara menjadi aspek penting yang harus diperhatikan dalam desain dan pemeliharaan. Stabilitas lereng tidak hanya berkaitan dengan keamanan pekerja dan peralatan yang beroperasi di sekitar area tersebut, tetapi juga memiliki dampak langsung terhadap kelancaran transportasi batubara menuju ke pelabuhan (*port*). Lereng yang tidak stabil dapat menyebabkan longsoran atau pergerakan tanah yang berpotensi menutup jalan *hauling*, mengakibatkan terhentinya operasi pengangkutan dan kerugian ekonomi yang signifikan.

Beberapa faktor dapat mempengaruhi kestabilan lereng, antara lain jenis material lereng, kemiringan lereng, tinggi lereng, kondisi

air tanah, pengaruh air permukaan, dan beban yang ditimbulkan oleh aktivitas di jalan *hauling* (Wang dkk, 2018). Pemahaman yang mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng dan pengembangan teknik mitigasi risiko merupakan area penelitian yang penting dan terus berkembang dalam disiplin teknik pertambangan dan geoteknik (Sari dkk, 2019).

PT X yang terletak di Kabupaten Kutai Barat Provinsi Kalimantan Timur memiliki infrastruktur jalan *hauling* sepanjang 90 kilometer yang terbentang dari pit terjauh hingga ke fasilitas *crushing plant* dan penumpukan (*stockpile*) di area port. Pada jalan *hauling* sisi kosong area KM 78.500 pernah longsor di bulan Februari 2024, longsoran tersebut membentuk bidang gelincir berupa



**Gambar 1.2** Longsoran Busur pada Jalan *Hauling* KM 78.500 PT X

busur (*circular failure*) karena material lereng dominan tersusun oleh material lunak (*soft material*) seperti *loose sand* dan *sandy siltstone* seperti pada Gambar 1.2.

Pembebanan pada lereng dan perubahan kekuatan geser material sewaktu-waktu dapat menyebabkan penurunan nilai faktor keamanan lereng (Duncan dkk, 2014). Oleh karena itu, sebelum dilakukan analisis, terlebih dahulu dilakukan investigasi geoteknik untuk mengidentifikasi beban utama penyebab kelongsoran. Pada pengamatan di lapangan yang dilakukan, ditemukan beberapa bukti kuat yang menjadi penyebab longornya lereng jalan *hauling* KM 78.500, diantaranya adalah rembesan (*seepage*) pada *crest* jalan *hauling* dan genangan air (*water ponding*) pada kaki lereng (*toe of slope*) seperti pada Gambar 1.3.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng timbunan (*fill slope*) serta jenis perkuatan berupa *boulder* dan *log pile* yang digunakan untuk *redesign* lereng jalan *hauling* sisi kosongan area KM 78.500 pasca terjadinya longsor. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting terhadap peningkatan keamanan dan efisiensi dalam operasional di jalan *hauling* PT X, khususnya dalam aspek transportasi dan logistic serta menjadi salah satu rujukan dalam penanganan kasus serupa pada daerah tambang lainnya.

## METODOLOGI

Hasil dari analisis kestabilan lereng umumnya dinyatakan dalam indeks faktor keamanan (*factor of safety*) (Duncan dkk, 2014). Faktor keamanan lereng dihitung menggunakan



**Gambar 1.3** Area Longsoran Sisi Kosongan Jalan *Hauling* KM 78.500 PT X

metode kesetimbangan batas berdasarkan jumlah gaya penahan dibagi dengan jumlah gaya pendorong (Duncan dkk, 2014). Dasar dari pemilihan metode kesetimbangan batas Morgenstern-Price tersebut adalah dengan mempertimbangkan kesetimbangan gaya dan momen pada material lereng secara sederhana sehingga didapatkan nilai faktor keamanan deterministik yang singkat dan akurat. Selain itu, pemilihan metode tersebut juga didasarkan pada terbatasnya data *material properties* yang lebih dominan memiliki kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb*. Metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*) merupakan metode yang sangat populer untuk digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng tipe gelinciran translasional dan rotasional dengan merujuk pada nilai faktor keamanan (FK) (Duncan

dkk, 2014). Pada metode ini menggunakan kondisi kesetimbangan statik dari kekuatan geser daripada parameter regangan dan tegangan (Helm dkk, 2014). Hal yang utama dalam menggunakan metode kesetimbangan batas adalah parameter geometri dari bentuk bidang runtuh harus diketahui dan ditentukan terlebih dahulu. Faktor keamanan dihitung menggunakan kesetimbangan gaya, kesetimbangan momen, atau menggunakan kedua kondisi kesetimbangan tersebut karena tergantung dari metode yang dipakai.

Pada Metode Kesetimbangan Batas, setiap jenis longsoran dapat diasumsikan dengan kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb*, dimana kekuatan material ditentukan berdasarkan kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Data nilai kekuatan material tersebut diperoleh

dari sampel batuan yang diuji di laboratorium yang selanjutnya digunakan untuk melakukan analisis kestabilan lereng hingga diperoleh nilai faktor keamanan lereng. Pada Metode Kesetimbangan Batas, gaya normal dan gaya geser antar irisan diasumsikan dalam semua metode, dan perbedaan utama di antara keduanya adalah bagaimana gaya-gaya ini dihitung atau diasumsikan.

Bentuk longsoran yang diantisipasi, serta kondisi keseimbangan untuk menghitung faktor keamanan adalah salah satu pertimbangan lainnya. Krahn (2004) membuat klasifikasi metode kesetimbangan batas berdasarkan asumsi yang digunakan seperti pada Tabel 2.1.

Keruntuhan suatu material dapat disebabkan oleh kombinasi kritis antara tegangan normal ( $\sigma_n$ ) dan tegangan geser ( $\tau$ ). Menurut Mohr,

keruntuhan (*failure*) dapat terjadi jika kombinasi tegangan normal dan geser mencapai limit maksimumnya sehingga menyebabkan keruntuhan yang dapat direpresentasikan secara grafis.

Persamaan ini akan melalui sebuah lingkaran yang kemudian dikenal dengan lingkaran Mohr seperti pada Gambar 2.1 (Das & Sobhan, 2018). Stabilitas lereng batuan dan tanah tergantung pada kekuatan geser yang dihasilkan sepanjang bidang gelincir (*sliding surface*). Terutama pada lereng yang dominan tersusun oleh material homogen dan material lepas (*loose material*) akan sangat dipengaruhi oleh keruntuhan geser. Untuk semua keruntuhan geser (*shear-type failures*), perhitungan faktor keamanan (*factor of safety*) dapat diasumsikan dengan model *Mohr-Coulomb* di mana tahanan

**Tabel 2.1** Kondisi Kesetimbangan yang Dipenuhi (Krahn, 2004)

Metode	Kesetimbangan Gaya		Kesetimbangan momen
	Vertikal	Horizontal	
Ordinary atau Fellenius	Tidak	Tidak	Ya
Bishop yang Disederhanakan	Ya	Tidak	Ya
Janbu yang Disederhanakan	Ya	Ya	Tidak
Spencer	Ya	Ya	Ya
Morgestern – Price	Ya	Ya	Ya
Kesetimbangan Batas Umum	Ya	Ya	Ya

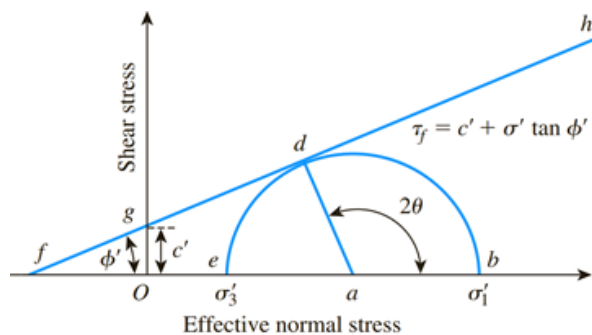
(Sumber: Arif (2016), hlm 176).

geser (*shear resistance*) dinyatakan dalam kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Untuk bidang gelincir di mana tegangan normal ( $\sigma$ ) bekerja, kekuatan geser ( $\tau$ ) yang dikembangkan pada bidang tersebut sebagai berikut.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \dots\dots\dots (2.1)$$

Untuk material jenuh air, tegangan normal total pada persamaan (2.1) berubah menjadi tegangan normal efektif ( $\sigma'$ ) (Das & Sobhan, 2018). Tegangan normal efektif didapatkan dari selisih antara tegangan normal vertikal ( $\sigma_v$ ) akibat bobot material yang berada di atas bidang geser (*sliding surface*) dan gaya angkat (*uplift*) karena tekanan air pori (*pore water pressure*) yang bekerja pada bidang gelincir tersebut (Wyllie & Mah, 2018).

Pada Gambar 2.1, ketika beban bertambah yaitu tegangan normal efektif (*effective normal stress*) dan tegangan geser (*shear stress*) mengalami kenaikan, maka lingkaran akan semakin besar. Apabila lingkaran Mohr



**Gambar 2.1** Mohr-Coulomb Failure Envelope (Das & Sobhan, 2018)

mencapai garis keruntuhan (*failure envelope*) maka akan terjadi keruntuhan.

Pada beberapa kasus nilai faktor keamanan yang diperoleh dari hasil simulasi menggunakan *software* dan perhitungan konvensional tidak sesuai dengan kondisi yang ada di lapangan. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor berupa ketidakpastian data spasial sehingga harus dilakukan analisis balik atau *back analysis* untuk mendapatkan nilai parameter yang mendekati dengan kondisi *existing* di lapangan karena hal ini akan mempengaruhi efektivitas dan efisiensi model geometri lereng tambang.

Data yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng timbunan pada jalan *hauling* KM 78.500 adalah sebagai berikut.

1. Data topografi *progress* jalan *hauling* KM 78.500 sebelum terjadi longsor.
2. Data topografi kondisi aktual jalan *hauling* saat longsoran terjadi.
3. Data model geologi area KM 78.500.
4. *Plotting* titik longsoran pada *crest* jalan *hauling* yang masih *intact* dengan badan jalan untuk penentuan titik awal dilakukannya *maintenance*.
5. Data material properties lereng yang terdiri dari *unit weight* ( $\gamma$ ), *phi* ( $\phi$ ), dan *cohesion* ( $c$ ).  
Pengolahan data dilakukan melalui *plotting* titik koordinat yang telah didapatkan menggunakan GPS ke dalam desain jalan *hauling* Km 78.500 untuk mengetahui validitas

data hasil pemetaan di lapangan. Hasil dari pemetaan GPS dapat dikatakan valid karena titik GPS berada di jalan *hauling* Km 78.500 (Gambar 2.2).



**Gambar 2.2** Plotting Titik Koordinat Longsoran Jalan *Hauling* KM 78.500

Tahapan selanjutnya adalah pembuatan *cross section* dengan terlebih dahulu menempatkan *line section* pada titik koordinat yang telah dipetakan sebelumnya seperti pada Gambar 2.2. Kondisi lereng *original* area KM 78.500 yang terjal dan kompleks menjadi perhatian khusus pada saat penempatan *line section*. Penempatan *line section* haruslah merepresentasikan area yang memiliki risiko geoteknik dan tidak hanya berfokus pada titik longsorannya saja, sehingga panjang *line section* yang dibuat pada penelitian ini mewakili kondisi sungai yang berada di sebelah utara jalan *hauling*, area KM 78.500, dan *in-pit dump* yang berada di sebelah selatan jalan *hauling* seperti pada Gambar 2.3.

*Cross section* disertai dengan model geologi selanjutnya digunakan sebagai dasar melakukan analisis kestabilan lereng dan



**Gambar 2.3** Lokasi Longsoran Tampak Atas

rencana *redesign* pada jalan *hauling* KM 78.500. Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan menggunakan *software GeoStudio Slope/W* versi 2021.4 milik PT X.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Geometri Lereng *Existing* Sebelum Longsor

Desain geometri *redesign* lereng timbunan yang digunakan sebagai *counterweight* untuk jalan *hauling* sisi kosong area KM 78.500 dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

**Tabel 3.1** Geometri Rencana Lereng Timbunan KM 78.500

<i>Section</i>	Lokasi Lereng	Bagian Lereng	Sudut (°)	Lebar (m)	Tinggi (m)
<i>Section A-A'</i>	<i>Hauling Road</i>	<i>Bench</i>	30	10	10
		<i>Overall Slope</i>	20.21	-	32

Parameter yang digunakan pada analisis kali ini adalah:

1. Tinggi Muka Air Tanah (MAT) sesuai dengan elevasi air sungai yang berada di sebelah utara tebing arah muatan KM 78.500.
2. Material properties yang digunakan dalam analisis merupakan material dengan kekuatan geser residual
3. Beban *Long Vehicle* yang mengangkut batubara menuju ke *port* adalah 110 kN/m<sup>2</sup> untuk yang bermuatan dan 60 kN/m<sup>2</sup> untuk arah kosong

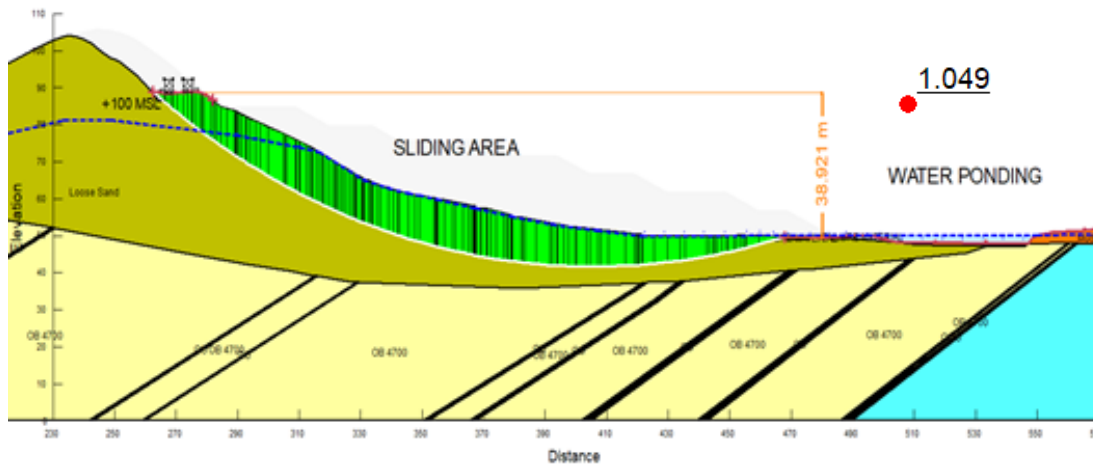
Sebelum melakukan analisis kestabilan lereng timbunan untuk *redesign* jalan *hauling* KM 78.500, perlu terlebih dahulu mengetahui geometri dan kondisi kestabilan lereng *existing* sebelum longsor terjadi. Adapun geometri lereng sebelum terjadinya longsor adalah sebagai berikut.

- a. Sudut kemiringan lereng keseluruhan (*overall slope angle*) =
- b. Tinggi lereng keseluruhan (*overall slope height*) = meter

- c. Elevasi *hauling road* = +108 msl
- d. Faktor Keamanan (FK) lereng *existing* = 1.049

Dari laporan hasil kajian tim geoteknik PT X dapat dilihat bahwa geometri lereng sebelum longsor memiliki nilai faktor keamanan sebesar 1.049. Nilai tersebut mengindikasikan lereng tidak stabil. Adapun geometri dan hasil perhitungan FK lereng sebelum mengalami kelongsoran seperti pada Gambar 3.1.

Pada desain lereng *existing* KM 78.500 terdiri dari beberapa litologi diantaranya pasir lepas (*loose sand*), *overburden*, batubara,



**Gambar 3.1** Geometri dan FK Lereng KM 78.500 Sebelum Longsor

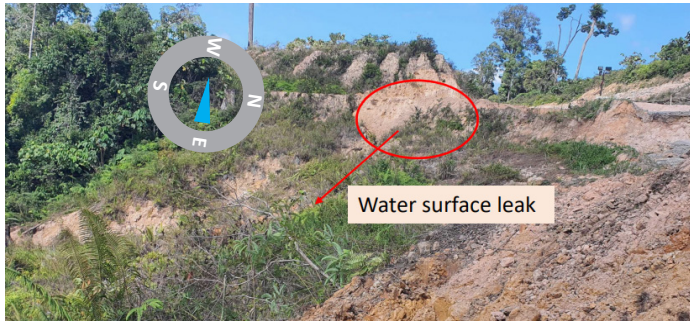
dan lumpur. Nilai *material properties* untuk masing-masing litologi tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Kurangnya *maintenance* lereng *existing* menjadi penyebab terjadinya longsor, pada Gambar 1.3 dapat dilihat terdapat genangan air

(*water ponding*) dan akumulasi lumpur yang menyebabkan kaki lereng menjadi lunak, selain itu juga ditemukan adanya rembesan (*seepage*) seperti pada Gambar 3.2 di *crest* jalan *hauling* pada saat terjadinya longsor. Hal tersebut berkontribusi pada penurunan *shear strength*

**Tabel 3.2** Keterangan Litologi Model Lereng

Material	Warna	Parameter	Nilai <i>Material Properties</i>
<i>Loose Sand</i>		Kohesi (kPa)	8
		Sudut Geser Dalam (°)	20.05
		<i>Unit Weight</i> (kN/m <sup>3</sup> )	18.64
<i>Coal</i>		Kohesi (kPa)	150
		Sudut Geser Dalam (°)	36
		<i>Unit Weight</i> (kN/m <sup>3</sup> )	13
<i>Overburden</i>		Kohesi (kPa)	181.4
		Sudut Geser Dalam (°)	36
		<i>Unit Weight</i> (kN/m <sup>3</sup> )	21.32
<i>Mud</i>		Kohesi (kPa)	5
		Sudut Geser Dalam (°)	9
		<i>Unit Weight</i> (kN/m <sup>3</sup> )	18
<i>Dump</i>		Kohesi (kPa)	30
		Sudut Geser Dalam (°)	26
		<i>Unit Weight</i> (kN/m <sup>3</sup> )	16
<i>Boulder</i>		<i>Unit Weight</i> (kN/m <sup>3</sup> )	26



**Gambar 3.2** Rembesan pada *Crest* Lereng Jalan *Hauling*

material dan membentuk bidang gelincir di lereng *existing*, sehingga terjadi longsor busur.

### 3.2. Geometri Lereng *Redesign*

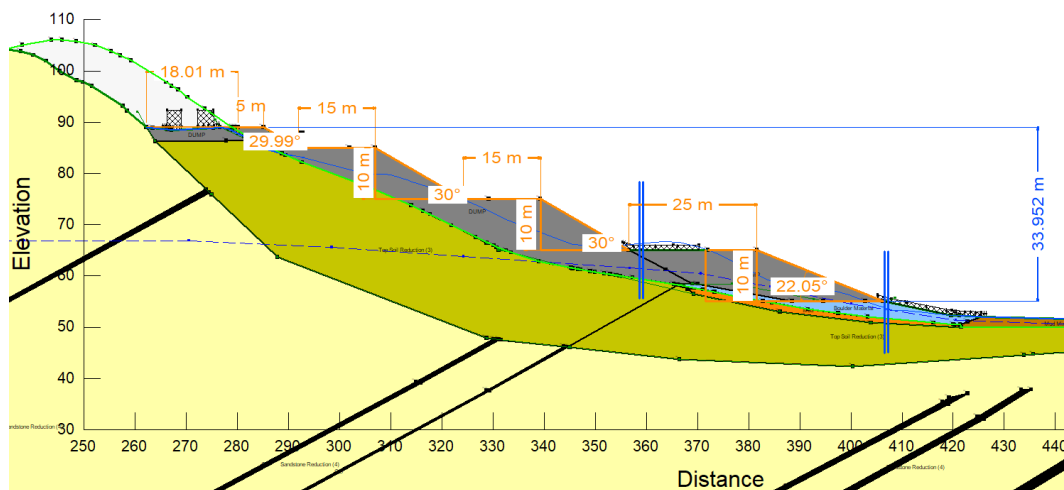
Setelah dilakukan investigasi lapangan untuk melihat keparahan longsor, selanjutnya membuat rencana *redesign* lereng jalan *hauling* arah kosongan KM 78.500 dengan cara menimbun area longsor dengan material *overburden* untuk membentuk *counterweight*. Adapun geometri lereng timbunan untuk

rencana *redesign* area KM 78.500 adalah sebagai berikut.

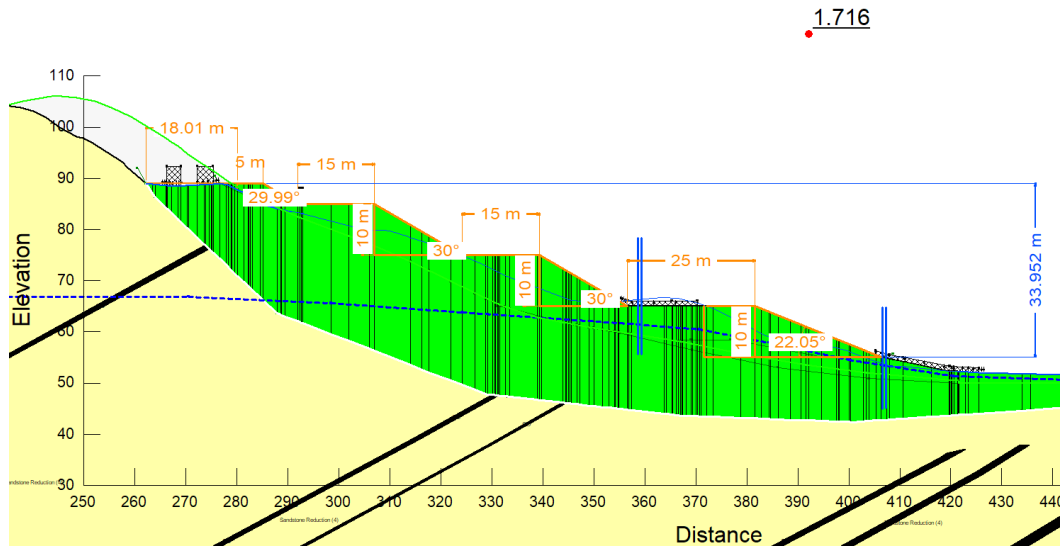
- Sudut kemiringan lereng keseluruhan (*overall slope angle*) =
- Tinggi lereng keseluruhan (*overall slope height*) = meter
- Jenis material = *overburden*
- Elevasi *hauling road* = +108 msl
- Faktor Keamanan (FK) lereng *redesign* = 1.716

Hasil *redesign* untuk lereng timbunan area KM 78.500 didapatkan nilai faktor keamanan stabil yaitu 1.716. Untuk memenuhi kebutuhan material *overburden*, material diambil dari pit yang dekat dengan KM 78.500. Adapun gambaran *redesign* lereng timbunan yang digunakan sebagai *counterweight* dapat dilihat pada Gambar 3.3.

Geometri *counterweight* yang digunakan untuk *redesign* lereng KM 78.500 adalah sebagai berikut.



**Gambar 3.3** Desain dan Geometri *Counterweight* Lereng KM 78.500



**Gambar 3.4** Faktor Keamanan Lereng Hasil *Redesign* dengan *Counterweight*

Sudut lereng tunggal =  $30^{\circ}$

Lebar lereng tunggal = 15 meter

Tinggi lereng tunggal = 10 meter

Hasil analisis kestabilan lereng KM 78.500 dengan tambahan *counterweight* berhasil meningkatkan faktor keamanan lereng menjadi 1.716 seperti pada Gambar 3.4.

Sebelum eksekusi desain dilaksanakan, terlebih dahulu mencari kedalaman material *original* sekaligus memindahkan material longsor untuk menentukan *base* timbunan apakah masih dalam keadaan lunak atau keras. Selanjutnya, hasil analisis dan *redesign* lereng KM 78.500 dapat segera diimplementasikan dan dilakukan monitoring secara berkala untuk melihat *sequence* remediasi lereng hingga benar-benar stabil dan sesuai dengan rencana. Adapun pada Gambar 3.5 dapat dilihat adanya 2 *sequence* saat eksekusi desain sedang dilaksanakan, *sequence* tersebut adalah sebagai

berikut.

Pada *bench* pertama dilakukan penimbunan hingga terbentuk lereng sesuai desain, selanjutnya dilakukan kompaksi hingga padat. Kompaksi dan *maintenance* terus dilakukan selama proses remediasi lereng berjalan.

Pada *bench* kedua dilakukan penimbunan material *dump* hingga terbentuk sesuai desain, namun pada bagian dasar timbunan terlebih dahulu dihamparkan *boulder* untuk memberikan ruang aliran air sehingga tidak terjadi adanya pemampatan dan erosi.

Pemilihan *overburden* dengan *material properties* residual terbaik haruslah diprioritaskan dalam pembangunan *counterweight* tersebut, selain itu perlu adanya *treatment* berupa kompaksi dan perkuatan tambahan dengan menggunakan *boulder* dan *log* kayu seperti yang digunakan pada kasus di atas.



**Gambar 3.5** *Sequence* Remediasi Lereng KM 78.500

Dalam mengatasi masalah longsor pada jalan *hauling*, penambahan timbunan yang berfungsi sebagai *counterweight* pada lereng *existing*, disertai dengan perkuatan berupa *boulder* dan *log pile*, merupakan solusi komprehensif yang menargetkan peningkatan stabilitas secara fisik dan mekanis. Pendekatan ini mengintegrasikan prinsip-prinsip rekayasa geoteknik dan rekayasa lingkungan untuk mencapai solusi yang efektif dan berkelanjutan.

Hasil *redesign* lereng KM 78.500 dengan bantuan *counterweight* menunjukkan adanya peningkatan nilai faktor keamanan menjadi 1.716, sehingga secara deterministik dapat dikatakan aman. Tahap selanjutnya adalah eksekusi desain, namun sebelum melakukan penimbunan material *overburden* untuk membentuk *counterweight*, hal terpenting yang perlu dikerjakan adalah memindahkan material longsor dan mencari keberadaan lapisan

material *original*. Hal tersebut penting karena material *original* bersifat *intact* dengan batuan di sekitarnya, apabila penimbunan langsung dikerjakan pada tumpukan material longsor akan mengakibatkan penurunan *counterweight* (*settlement*) yang diakibatkan oleh lunaknya material longsor yang berada di *base* timbunan. Lapisan *original* juga sangat berguna untuk pemancangan kayu *log* agar lebih stabil.

Penggunaan *counterweight* pada lereng bertujuan untuk menambah beban agar lebih stabil, sehingga meningkatkan gaya penahan (*moment*) terhadap potensi pergerakan massa tanah. Secara ilmiah, penggunaan *counterweight* bertujuan untuk meningkatkan momen *resistance* terhadap gaya rotasional yang disebabkan oleh gaya gravitasi pada massa tanah. Timbunan yang berfungsi sebagai *counterweight* harus dirancang dengan mempertimbangkan berat, distribusi,

dan interaksi dengan material lereng untuk tidak menambah beban yang berlebihan yang justru bisa memicu ketidakstabilan. Studi menunjukkan bahwa penambahan berat penyeimbang yang ditempatkan secara strategis dapat secara signifikan meningkatkan faktor keamanan lereng (Wang, Li, & Wang, 2017).

Penggunaan *boulder* atau batu besar, dalam stabilisasi lereng merupakan teknik yang efektif untuk menambah massa dan interlock antar partikel pada lereng. *Boulder* berfungsi tidak hanya sebagai elemen struktural yang menambah kekuatan dan stabilitas fisik tetapi juga membantu dalam mengurangi erosi dan *runoff* serta mengurangi adanya pemampatan air. Teknik ini efektif untuk meningkatkan resistensi terhadap gaya geser pada lereng dan mengurangi risiko longsor. Menurut (Zhang, Yang, & Cheng, 2020), pengintegrasian

*boulder* dalam desain lereng timbunan dapat memperbaiki sifat mekanis lereng dan mengurangi potensi deformasi. *Boulder* ditempatkan pada dasar timbunan yang berfungsi untuk menahan material timbunan dan meloloskan air seperti pada Gambar 3.6.

Studi menunjukkan bahwa penggunaan teknik perkuatan lereng seperti *soil nailing* atau secara konvensional menggunakan kayu pancang dapat signifikan meningkatkan stabilitas lereng (Zhao, Wang, & Li, 2015). Penempatan dan orientasi dari elemen perkuatan seperti pada Gambar 3.7 sangat mempengaruhi efektivitasnya dalam meningkatkan stabilitas lereng. Lebih lanjut, penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2019) mengeksplorasi penggunaan material organik, termasuk kayu, dalam aplikasi geoteknik. Pemilihan jenis kayu yang tepat dan perlakuan terhadap kayu



**Gambar 3.6** *Boulder* pada Dasar Timbunan

sangat penting untuk memastikan durabilitas dan efektivitas jangka panjang dalam aplikasi stabilisasi lereng.

Dalam merancang sistem stabilisasi lereng dengan kayu pancang, beberapa faktor harus dipertimbangkan, seperti:

**Kedalaman dan Jarak Penanaman:** Penting untuk menentukan kedalaman yang cukup untuk kayu pancang agar dapat memberikan dukungan yang efektif, serta jarak antar pancang untuk cakupan yang optimal. Pada kasus ini kedalaman kayu pancang didasarkan pada lapisan *material original*.

**Jenis dan Perlakuan Kayu:** Memilih jenis kayu yang tahan terhadap pembusukan dan serangan hama, serta perlakuan kayu yang dapat meningkatkan ketahanannya terhadap kondisi lingkungan.

Setelah remediasi lereng telah dilaksanakan,

langkah selanjutnya adalah perlu dilakukan pemantauan (*monitoring*) dan *maintenance* secara berkala untuk meningkatkan kualitas kepadatan timbunan dan meminimalisir dampak kelongsoran yang lebih besar.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Kondisi lereng *existing* pada jalur sisi kosongan KM 78.500 tidak stabil, hal tersebut ditunjukkan dengan adanya rembesan pada *crest* lereng, serta *water ponding* pada kaki lereng yang menyebabkan faktor keamanan lereng menjadi 1.049 dan mengalami kelongsoran.
2. Untuk meningkatkan nilai faktor keamanan, akan dilakukan *redesign* lereng KM 78.500 dan dibangun *counterweight* disertai dengan



**Gambar 3.7** Pemancangan Log Kayu pada *Toe of Slope*

perkuatan berupa *boulder* dan kayu *log* pada kaki timbunan. Hasil *redesign* untuk lereng timbunan area KM 78.500 didapatkan nilai faktor keamanan stabil yaitu 1.716.

3. Sebelum menempatkan material perkuatan pada lereng timbunan, material longsoran perlu dipindahkan (*unload*) terlebih dahulu agar *base* atau dasar timbunan tidaklah lunak.
4. Perkuatan lereng berupa material *boulder* ditempatkan pada dasar timbunan agar gaya *interlock* material timbunan meningkat dan meloloskan air, hal ini akan menurunkan tekanan air pori dan mencegah terjadinya erosi. Sedangkan kayu *log* akan dipancang pada material *original* yang diletakkan pada kaki timbunan. Perkuatan lereng berkontribusi dalam meningkatkan nilai Faktor Keamanan lereng timbunan menjadi 1.716 atau stabil.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering*. United States of America: Cengage Learning.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). In *Soil Strength and Slope Stability* (pp. 81-100). Canada: John Wiley & Sons.
- Helm, A. P., Carol, M., & Farook, Z. (2014). Slope Stability Analysis - Limit Equilibrium or The Finite Element Method? *Newcastle University Ground Engineering*, 1-7.
- Krahn, J. (2022). *Stability Modelling with SLOPE/W. An Engineering Methodology*. GeoSlope International.
- Sari, M., Kesimal, A., & Ercikdi, B. (2019). Evaluation of the Stability of a Slope Failure and Remediation by Piled Wall. *Environmental Earth Sciences*, 441.
- Smith, J. (2015). Efficiency Improvements in Coal Mining Operations. *Journal of Mining Science* 51, 202-210.
- Wang, B., Li, S., & Wang, X. (2019). Long-term performance and durability of wood materials used in geotechnical engineering applications. *Construction and Building Materials*, 597-610.
- Wang, L., Li, Z., & Wang, S. (2017). Effect of counterweight on stability of slope under dynamic conditions. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(16).
- Wang, L., Zhang, Y., & Wei, X. (2018). Comprehensive analysis of slope stability and determination of stable slope angle in open-pit mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 97-107.

Wyllie, D. C., & Mah, C. (2018). *Rock Slope Engineering Civil Applications Fifth Edition*. New York: Taylor & Francis Group.

Zhang, D., Yang, Z., & Cheng, L. (2020). Mechanical properties of slope reinforced with boulders and vegetation. *Ecological Engineering*, 158.

Zhao, L., Wang, J., & Li, D. (2015). Effectiveness of soil nailing in stabilizing slopes: A review. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 59-64.