



STUDI GEOTEKNIK PENGARUH MUKA AIR TANAH TERHADAP KESTABILAN LERENG TAMBANG BATUBARA

Geotechnical Study of The Impact of Groundwater Level For Slope Stability in Coal Mine

Jioni Santo Frans^{1*}, dan Muhammad Hafizh Nurfalaq²

¹ Senior Geotechnical Engineer, PT Sinarmas Mining

² Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, UPN "Veteran" Yogyakarta

Artikel masuk : September 2019 , Artikel diterima : Oktober 2019, Atikel terbit : November 2019

ABSTRAK

Kata kunci:

kestabilan lereng, muka air tanah, longsor, dewatering, sudut lereng keseluruhan.

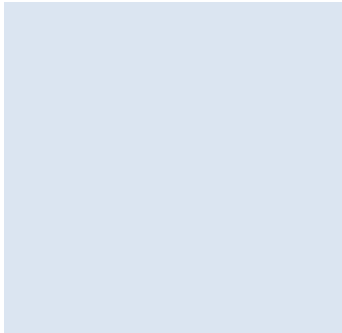
Massa batuan memiliki kesetimbangan gaya yang bisa terganggu akibat terjadinya perubahan kondisi massa batuan, baik secara alamiah maupun aktivitas manusia. Sebagai respon, massa batuan akan mengalami ketidakstabilan untuk mencapai kesetimbangan baru dan memicu terjadinya longsor. Lereng yang tidak stabil akan berdampak terhadap faktor keselamatan, ekonomi, dan sosial. Air tanah memiliki permasalahan tersendiri dalam pengelolaan tambang. Tekanan air pori dapat menimbulkan gaya angkat dan menurunkan kekuatan massa batuan penyusun lereng serta mempengaruhi kestabilan suatu lereng. Daerah penelitian memiliki muka air tanah relatif dekat dengan permukaan dan menyebabkan lereng berada dalam kondisi hampir jenuh. Penelitian ini bertujuan sebagai studi pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng tambang batubara di daerah penelitian. Metode penelitian yang digunakan meliputi pengumpulan data primer melalui observasi lapangan untuk mengumpulkan data-data teknis terkait dan pengumpulan data sekunder melalui studi literatur. Analisa kestabilan lereng dilakukan untuk mendapatkan rekomendasi dengan nilai Faktor Keamanan minimum 1,30. Hasil penelitian menunjukkan muka air tanah memiliki hubungan berbanding terbalik terhadap nilai Faktor Keamanan. Rekomendasinya yaitu melakukan dewatering menggunakan drain hole. Target penurunan muka air tanah pada dinding tambang yaitu RL+40 pada area sidewall dan RL+65 pada area highwall. Alternatif lain adalah dengan melandaikan sudut lereng keseluruhan. Lereng tambang daerah penelitian direkomendasikan untuk dilakukan pelandaian dengan sudut lereng keseluruhan berkisar 24°.

ABSTRACT

Keywords:

slope stability, ground water level, slope failure, dewatering, overall slope angle.

Rock mass has force equilibrium which can be disturbed due to changes in rock mass conditions, both by naturally as well as human activities. In response, rock masses could have instability to reach new equilibrium and trigger landslides. Unstable slopes will affect the safety, economic and social factors. Groundwater has its own problems in mining management. Pore water pressure can cause uplift force and reduce the strength of the



rock mass forming slopes and affect the slope stability. The study area has groundwater level relatively close to surface and causes the slope to be in nearly saturated condition. This research aims to study of the effect of groundwater levels on the stability of coal mine slopes in the study area. The research method includes collecting primary data through field observations to collect related technical data and secondary data collection through literature studies. Slope stability analysis was carried out to obtain recommendations with a minimum Safety Factor of 1.30. The results showed the ground water level has an inverse relationship to Safety Factor value. The recommendation is depressurisation using drain holes. The target of groundwater level reduction in the mine wall is RL+40 in the sidewall area and RL+65 in the highwall area. Another alternative is is by resloping the overall slope angle of the mine wall in the study area. The mine slope is recommended for layback with an overall slope angle of around 24 °.

*Penulis Koresponden: jioni.simamora@gmail.com

Doi :

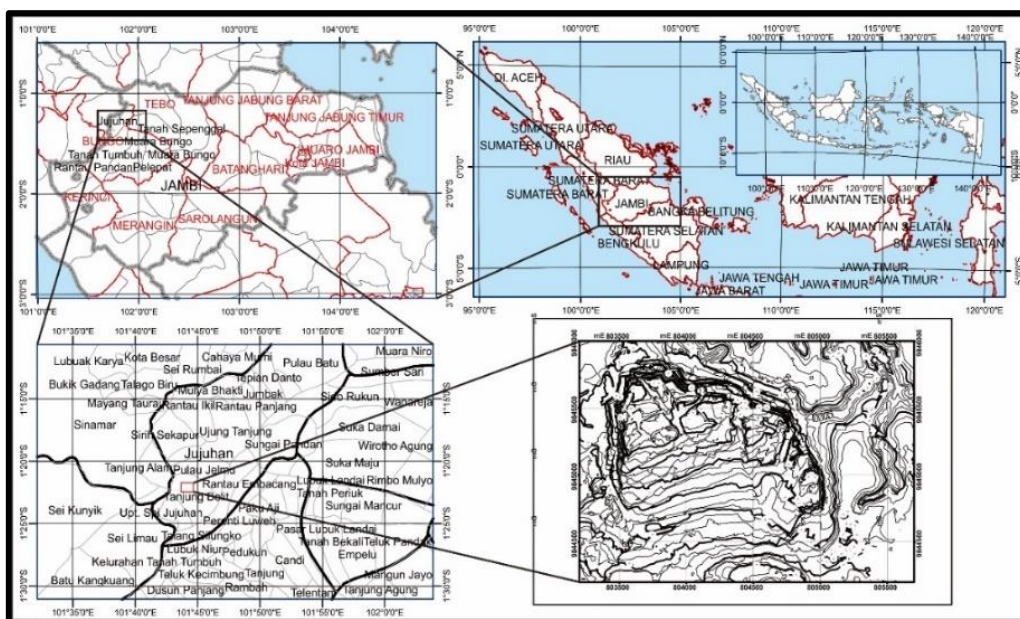
PENDAHULUAN

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya adalah geometri lereng, sifat fisik batuan, sifat mekanik batuan, struktur geologi, keberadaan air tanah, pelapukan, dan gaya-gaya luar. Keberadaan air, terutama air tanah (*groundwater*) sangat mempengaruhi kemantapan suatu lereng. Hal ini dikarenakan air tanah memiliki tekanan air pori (*pore water pressure*) yang dapat menimbulkan gaya angkat (*uplift force*) dan menurunkan kekuatan suatu massa batuan penyusun lereng. Hal ini mengakibatkan keselamatan atas unit dan manusia yang beroperasi pada area di bawah/kaki lereng berada dalam resiko bahaya yang tinggi. Di saat yang bersamaan, kegiatan di bagian atas (*crest*) lereng juga mengalami resiko yang meningkat.

Secara administratif daerah penelitian berlokasi di Desa Tanjung Belit, Kecamatan Jujuhan, Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi. Secara geografis daerah penelitian terletak pada koordinat UTM (*Universal*

Traverse Mercator) 803200 mE – 805700 mE dan 9844200 mS – 9846000 mS. Daerah penelitian secara umum memiliki kontur permukaan yang relatif bergelombang. Sebagian daerah penelitian telah dilakukan aktivitas penambangan, sementara area lainnya masih merupakan area hijau yang ditutupi rerumputan, semak belukar, dan pepohonan. Karakteristik lereng tambang daerah penelitian yang terdapat titik-titik rembesan (*seepage*) relatif dekat dengan permukaan, mengindikasikan muka air tanah yang tinggi. Kondisi aktual menunjukkan bahwa muka air tanah berada pada level 80% dari total tinggi lereng.

Penelitian ini memiliki tujuan untuk melakukan studi mengenai pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng tambang batubara di daerah penelitian. Sehingga dapat disusun pendekatan maupun rekomendasi *slope engineering* untuk mencegah terjadinya *slope failure* yang dipengaruhi muka air tanah.

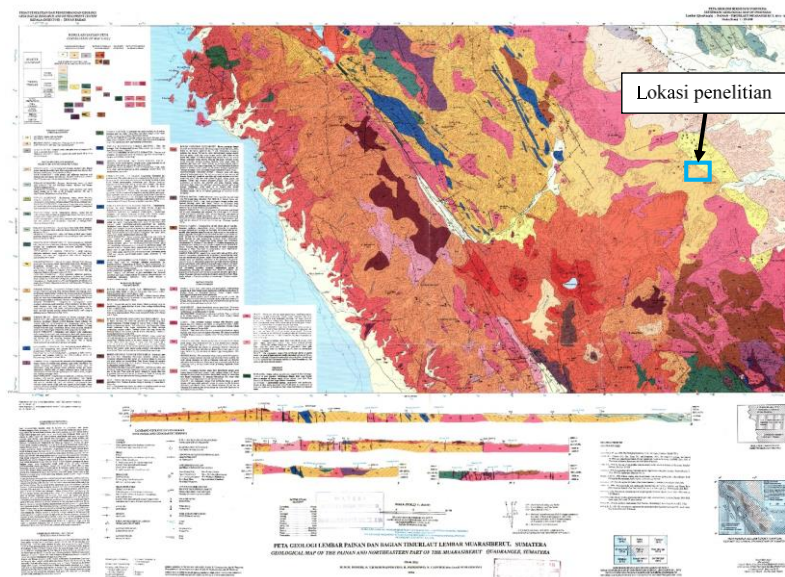


Gambar 1 Peta lokasi penelitian

**METODE
GEOLOGI REGIONAL**

Secara regional, kondisi geologi daerah penelitian berada pada lembar Painan dan bagian Timur Laut lembar Siberut, Sumatra. Daerah penelitian melingkupi Formasi Sinamar yang berumur Oligosen dengan tebal mencapai 750 meter. Formasi Sinamar (Tos) terdiri dari: batupasir, berwarna abu-abu hingga abu-abu terang, berbutir halus hingga sedang, menyudut tanggung, *loose*. Batulempung berwarna abu-abu hingga abu-abu kecoklatan-kemerahan, sedikit pasiran, lunak. Batulanau, berwarna abu-abu hingga abu-abu kehijauan, kompak. Batubara berwarna hitam kusam sampai hitam mengkilap, kilap *dull*, agak keras, mengandung damar tebal sampai 15 cm. Hal ini juga terkonfirmasi dengan keberadaan konglomerat, batulempung, batupasir, dan lapisan batubara di daerah penelitian. Formasi Sinamar merupakan endapan darat dengan lingkungan rawa-rawa (*limnik*).

Di atasnya diendapkan Formasi Rantau Ikil (Tmr) yang terdiri dari batulempung hijau bersifat gampingan, napal dan sisipan batugamping berlapis, mencirikan lingkungan danau. Kedua Formasi tersebut secara tidak selaras ditutupi oleh Endapan Vulkanik Kuarter yang berasal dari pegunungan barisan di sebelah Barat akibat kegiatan magmatisme. Beberapa penyelidikan terdahulu menyimpulkan, bahwa Formasi Sinamar diendapkan dalam kondisi peralihan, di mana bagian bawah formasi menunjukkan lingkungan daratan yang diendapkan pada masa Oligosen Akhir, sedangkan bagian atas formasi diendapkan dalam lingkungan laut pada masa Miosen Bawah. Endapan vulkanik tersebar tidak merata di daerah penyelidikan, terdiri dari breksi laharik, aglomerat dan konglomerat. Breksi, berwarna hitam, keras, masadasar pasir kasar tufaan, fragmen berupa batuan beku andesit, berwarna abu-abu hingga abu-abu kehitaman, bentuk membulat-menyudut tanggung, ukuran kerikil sampai *boulder*.



Gambar 2 Peta Geologi daerah penelitian (Rosidi *et al.*, 1996)

STRATIGRAFI REGIONAL

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, pada area penelitian terdapat endapan permukaan Aluvium (Qal), Formasi Rantau Ikil (Tmr), Formasi Sinamar (Tos), endapan batuan gunung api yang tak terpisahkan (Qyu) dan endapan batuan intrusi Granit (Jgr).

- a) Endapan Aluvium (Qal)
Endapan aluvium terbentuk dari lapukan batuan (tanah), terdiri dari material lempung dan lumpur, pasir sampai kerikil. Endapan aluvium ini, umumnya terdapat pada dataran rendah dan sebagian besar berupa bantaran sungai Batanghari.
- b) Formasi Rantau Ikil (Tmr)
Berupa batu pasir lempungan, batu pasir tuf, batu pasir gampingan, batu lempung pasiran, batu

- lempung tufaan, napal, sisipan-sisipan batubara dan lensa-lensa tipis batugamping. Formasi ini berumur Te hingga Tf (masa Oligosen akhir sampai Miosen awal). Tebal formasi ini sekurang-kurangnya 1000 meter.
- c) Formasi Sinamar (Tos)
Tersusun dari konglomerat, pasir kuarsa berbutir kasar, batu pasir kuarsa mengandung mika, batupasir arkosa, batulempung, napal, batu lempung pasiran, lapisan batu bara dan batu gamping koral. Komponen konglomerat adalah kuarsit, kuarsa susu dan pecahan granit. Batu lempung, serpih dan napal semakin bertambah tebal ke arah atas. Berumur Oligosen dengan tebal ± 750 m.

- d) Batuan gunung api yang tak terpisahkan (Qyu) Tersusun dari breksi gunung api, lahar, breksi tuf dan tuf, bersusunan basal sampai andesit. Batuan ini berasal dari Gunung Kerinci dan Gunung Tujuh.
- e) Fomasi Granit (Jgr) Susunannya berkisar antara batu granit biotit hornblende sampai granodiorit, dengan bintik-bintik mineral mafik, plagioklas dan jenis oligoklas, hornblende yang telah mengalami kloritisasi, dan secara setempat terdapat apatit. Terdapat dalam bentuk stok. Gamadiorit disimpulkan lebih muda dari Paleozoikum namun lebih tua daripada formasi Tabir (Jt) yang diperkirakan berumur Jura awal.

UMUR	FORMASI	Batuan Vulkanik	PEMERIAN LITOLOGI
RESENT	ALUVIUM	Qvu	Alluvium Pasir, kerakal, kerakal, Lumpur Batu-batu Vulkanik Breksi Gu Api, breksi tufa, tufa
PLISTOSEN	KASAI (Qtk)		Tufa batupung, pundi, hunk danmudak hancur. Batupasir rufan, pundi kemerahan, halus sedang, kompak, banyak mineral kuarsa.
PLIOSEN			
MIOSEN	RANTAUKIL (Tmr)		Batuempung, batupasir rufan, batupasir gamping, napal dan lensa tipis batugamping
OLIGOSEN	SINAMAR (Tos)		Batupasir konglomeratan, batuempung hitam, batupasir kerikilan, serpih dan banbara
EOSEN			
PALEOSEN			
KAPUR			
JURA		GRANIT (Jgr)	Granit abu-abu terang, berbintik mineral mafik plagioklas, dan oligoklas.

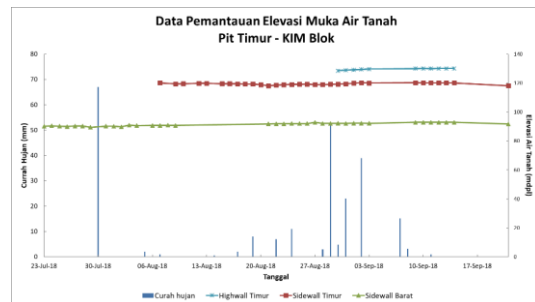
Gambar 3 Stratigrafi regional area penelitian (Rosidi et al., 1996)

KONDISI HIDROLOGI & HIDROGEOLOGI

Sungai utama yang mengalir di daerah penelitian yaitu Sungai Tanjung Belit yang berada di bagian Barat area pit daerah penelitian dengan lebar sungai antara 5-10 meter. Muka air tanah pada daerah penelitian berada pada elevasi yang cukup tinggi, dekat dengan permukaan. Selain itu juga ditemukan beberapa titik rembesan air (seepage) pada lereng *highwall*.

Hasil pengambilan data muka air tanah pada sumbu pantau (*piezometer hole*) area *sidewall* sisi Timur menunjukkan muka air tanah berada pada RL+120. Pada area *highwall* sisi Timur, data yang didapat dari lubang *piezometer* menunjukkan muka air tanah berada pada RL+130. Sedangkan data pengukuran pada area *sidewall* dan *highwall* sisi Barat menunjukkan muka air tanah berada pada RL+90. Pengamatan visual di lapangan menunjukkan terdapat *seepage* di sepanjang lereng *highwall* relatif berada pada RL+95 hingga RL+115 dan untuk sisi *sidewall* pada RL+80 hingga RL+95. Kondisi ini

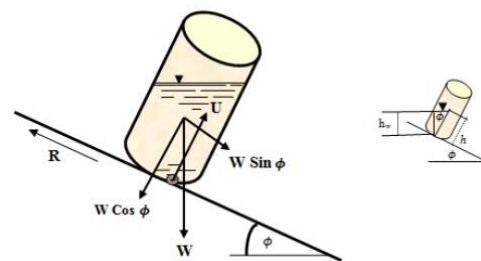
mengindikasikan terjadinya proses penjuhan pada material pembentuk lereng *highwall* maupun *sidewall*.



Gambar 4 Grafik pemantauan muka air tanah area penelitian

PENGARUH TEKANAN AIR

Pengaruh tekanan air pada kuat geser dapat dideskripsikan seperti sebuah bejana berisi air yang ditempatkan di atas bidang miring, seperti terlihat pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5 Deskripsi pengaruh tekanan air terhadap kuat tekan

Jika diketahui $k = 0$ dan $\alpha = \phi$, dari persamaan $F = c.A + W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi$, maka akan diperoleh

$$F = (W \cdot \cos \phi - U) \cdot \tan \phi \dots\dots\dots(1)$$

di mana tekanan air sebesar u atau gaya angkat sebesar $U = u.A$, dengan A adalah luas dasar bejana. Jika berat satuan dari bejana dan air adalah γ_t dan berat per unit volume air adalah γ_w , maka

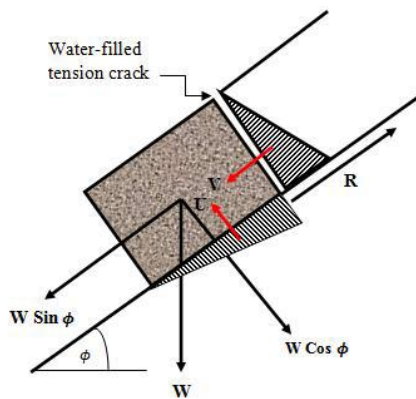
$$W = \gamma_t \cdot h \cdot A \dots\dots\dots(2)$$

$$U = \gamma_w \cdot h_w \cdot A \dots\dots\dots(3)$$

Gaya normal σ_n yang bekerja pada arah tegak lurus terhadap permukaan bidang gelincir dikurangi oleh gaya yang ditimbulkan oleh tekanan air u akan menjadi tegangan efektif (*effective stress*) yang dinyatakan dalam $\sigma_n - u$. Hubungan antara kuat geser dan tegangan normal dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\tau = (c + \sigma_n - u) \cdot \tan \phi \dots\dots\dots(4)$$

Selain itu, tekanan air juga memiliki pengaruh terhadap rekahan tarik. Hal ini dapat dijelaskan dengan Gambar 6, di mana sebuah balok yang berada di atas bidang miring dan dipisahkan oleh suatu rekahan tarik (*tension crack*) yang terisi air. V merupakan total gaya yang bekerja pada rekahan tarik yang diakibatkan oleh tekanan air yang bertambah secara linier mengikuti kedalaman. Hal ini akan mengakibatkan bertambah besarnya gaya geser ($W \cdot \sin \alpha$). Sedangkan U merupakan total gaya dorong ke atas yang dihasilkan tekanan air dan mengalami distribusi pada permukaan bidang geser. Hal ini akan mengurangi gaya normal yang bekerja pada permukaan bidang geser tersebut.



Gambar 6 Pengaruh tekanan air pada rekahan tarik

Berdasarkan kondisi kesetimbangan batas pada persamaan $W \cdot \sin \alpha = c \cdot A + W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi$, maka akan diperoleh

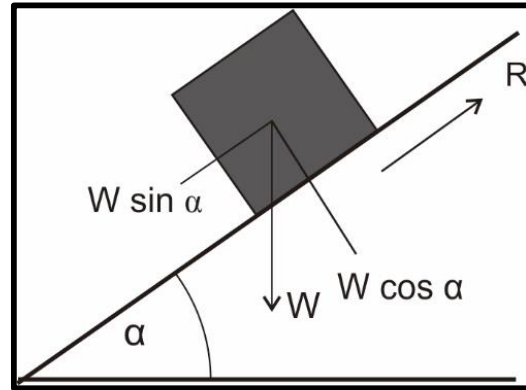
$$W \cdot \sin \alpha + V = c \cdot A + (W \cdot \cos \alpha - U) \cdot \tan \phi \quad (5)$$

METODE KESETIMBANGAN BATAS

Metode kesetimbangan batas memerlukan massa batuan dengan bidang permukaan yang kontinu. Bidang permukaan ini sangat penting untuk menentukan nilai Faktor Keamanan (FK) minimum. Metode ini dinyatakan dengan persamaan-persamaan kesetimbangan dari satu atau beberapa blok yang diasumsikan tidak mengalami deformasi, dan mengurangi gaya-gaya yang tidak diketahui (reaksi dari bagian stabil massa batuan atau gaya-gaya antar blok), khususnya gaya geser yang bekerja pada permukaan longsoran yang dipilih sebelumnya. Kondisi kestabilan lereng dengan menggunakan metode ini dinyatakan dalam nilai faktor keamanan. Faktor keamanan dihitung menggunakan kesetimbangan gaya atau kesetimbangan momen, maupun keduanya tergantung dari metode perhitungan yang dipakai.

Dalam keadaan tidak terganggu, massa batuan pada umumnya memiliki kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja. Kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja

tersebut dapat terganggu dikarenakan adanya perubahan kondisi massa batuan, baik secara alamiah (erosi, patah, peningkatan air tanah) maupun aktivitas manusia (pengupasan, pengangkutan, penggalian, penimbunan). Dapat dilihat pada Gambar 7 di bawah ini yang memperlihatkan gaya-gaya yang bekerja pada suatu blok yang berada pada suatu bidang miring yang mempunyai sudut kemiringan sebesar α .



Gambar 7 Mekanisme luncuran blok pada bidang

Gambar di atas menunjukkan hubungan gaya-gaya yang bekerja pada bidang miring. Gaya pendorong digambarkan sebagai gaya yang bekerja searah dengan kemiringan bidang. Sedangkan gaya normal bekerja tegak lurus terhadap permukaan bidang miring. Besarnya gaya yang dimiliki oleh benda (lereng) sebanding dengan nilai massa batuan, dan terjadinya gaya disebabkan oleh adanya gravitasi. Apabila nilai gaya penggerak yang bekerja adalah $W \sin \alpha$, maka nilai FK dinyatakan dengan:

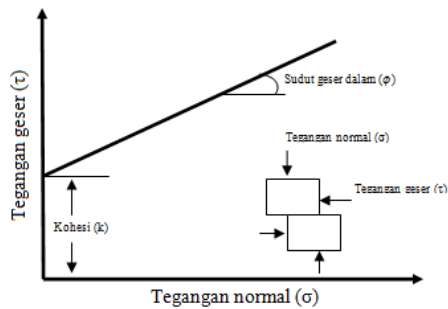
$$FK = \frac{c + (\sigma - \mu) \tan \phi}{W \sin \alpha} \quad (6)$$

di mana:

- c : kohesi (kN/m²)
- σ : tegangan normal (kN/m²)
- μ : tekanan air pori (kN/m²)
- ϕ : sudut geser dalam (°)
- α : sudut lereng (°)

Sifat-sifat material yang relevan dengan masalah kemandapan lereng adalah sudut geser dalam (ϕ), kohesi (c), dan berat satuan (γ) batuan. Grafik pada Gambar 8 menjelaskan secara sederhana tentang batuan yang mengandung bidang diskontinu, di mana bekerja tegangan normal dan tegangan geser, sehingga batuan retak pada bidang diskontinu dan mengalami pergeseran. Hubungan antara kuat geser (τ) dan tegangan normal (σ_n) dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (7)$$



Gambar 8 Grafik hubungan kuat geser (τ) dengan tegangan normal (σ) (Lambe dan Whitman, 1979)

Metode perhitungan kesetimbangan batas yang paling sering digunakan untuk analisa longsor tipe busur yaitu metode irisan Fellenius dan Bishop. Metode Fellenius mengasumsikan bahwa gaya-gaya yang bekerja antar irisan adalah nol. Penyelesaian tersebut meliputi penyelesaian ulang untuk gaya yang bekerja pada setiap irisan yang tegak lurus terhadap dasar.

Metode Bishop yang disederhanakan merupakan salah satu metode perhitungan yang menggunakan kesetimbangan gaya dalam arah vertikal dan kesetimbangan momen pada pusat lingkaran bidang gelincir. Dalam metode ini, gaya geser antar irisan diasumsikan bernilai nol. Faktor Keamanan untuk metode perhitungan Bishop yang disederhanakan, dirumuskan sebagai berikut:

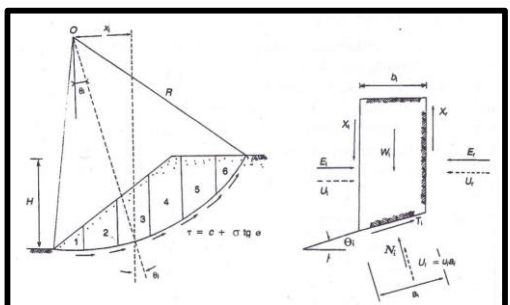
$$F = \frac{\sum ((c' + (\gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h_w) \cdot \tan \phi) \cdot \frac{\Delta X}{\cos \alpha})}{(1 + \frac{\gamma \tan \alpha \cdot \tan \phi'}{F})} \dots \dots \dots (8)$$

$$\frac{\sum (\gamma \cdot h \cdot \Delta X \cdot \sin \alpha) + (\frac{1}{2} \gamma_w \cdot Z^2 \cdot a/R)}{\dots}$$

- F = faktor keamanan
- γ = bobot isi material (ton/m³)
- γ_w = bobot isi air (ton/m³)
- α = kemiringan bidang gelincir (°)
- h = tinggi lereng (m)
- h_w = tinggi lereng jenuh (m)
- c' = kohesi (MPa)
- Z = kedalaman tegangan tarik (m)
- φ' = sudut geser dalam (°)

Metode irisan merupakan metode yang umum digunakan dalam menganalisa kestabilan lereng maupun timbunan. Metode ini menyediakan sarana yang efektif untuk analisa kuantitatif. Gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran longsor, terutama sangat dipengaruhi beban massa tanah/batuan di atasnya. Pada metode irisan, massa batuan yang longsor dibagi menjadi beberapa irisan vertikal. Penyelesaian nilai faktor keamanan membutuhkan sedikitnya satu asumsi yang berkaitan dengan gaya-gaya antar irisan (*interslice forces*). Asumsi yang umum digunakan berkaitan dengan arah, besar, dan titik kerja (*point of application*) dari gaya-gaya antar irisan. Setiap

gaya yang bekerja pada masing-masing irisan tersebut dapat dilihat pada Gambar 9 di bawah ini.



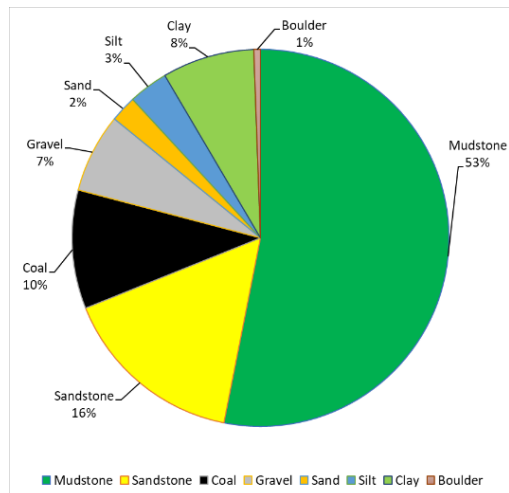
Gambar 9 Gaya yang bekerja pada irisan (Hardiyatmo, 2010)

- Xi, Xr = gaya geser efektif sepanjang sisi irisan
- Ei, Er = gaya normal efektif sepanjang sisi irisan
- Ti = resultan gaya geser efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan
- Ni = resultan gaya normal efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan
- Ui, Ur = tekanan air pori yang bekerja pada kedua sisi irisan

Di dalam satu irisan terdapat tiga persamaan kesetimbangan, yaitu kesetimbangan arah horizontal, vertikal, dan momen serta satu persamaan Mohr-Coulomb. Dengan demikian, untuk n irisan akan terdapat 4n persamaan. Jumlah bilangan yang unknown sebanyak 6n-2, sehingga persoalan tersebut merupakan persoalan statis tak tentu tingkat (2n-2). Oleh karena itu, penyelesaian persoalan tersebut memerlukan asumsi agar menjadi statis tertentu. Setiap metode perhitungan memiliki asumsi yang berbeda sehingga penyelesaian yang diperoleh pun akan berbeda antar metode.

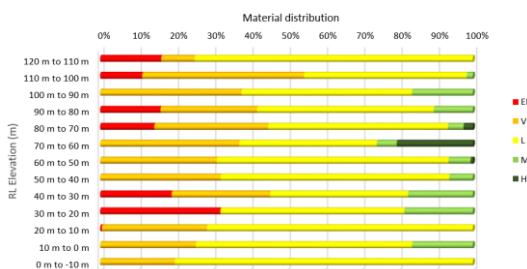
HASIL DAN PEMBAHASAN
HASIL OBSERVASI LAPANGAN

Distribusi massa batuan penyusun lereng yang ada di lokasi penelitian, berdasarkan dari beberapa log lubang bor, disajikan pada Gambar 10 di bawah. *Mudstone*, *sanstone*, dan batubara merupakan jenis massa batuan yang mendominasi dengan jumlah sekitar 80% dari total massa batuan penyusun lereng tambang di daerah penelitian. Material penyusun lereng lainnya merupakan soil dan jenis konglomerat.



Gambar 10 Distribusi massa batuan penyusun lereng

Dari data log lubang bor menunjukkan bahwa distribusi kekuatan batuan padu (*intact rock*), setelah dikorelasikan dengan hasil tes laboratorium, tidak mengalami peningkatan selaras dengan penambahan kedalaman. Kekuatan *intact rock* berkisar dari *Extremely Low* (EL) hingga *High* (H) dengan proporsi yang signifikan pada *Extremely Low* (EL) dan *Low* (L). *Intact rock* dengan kekuatan *extremely low* ditemukan di antara beberapa interval kedalaman hingga RL+10.



Gambar 11 Distribusi kekuatan *intact rock* (sumber: Golder Associates, 2018)

PARAMETER ANALISA

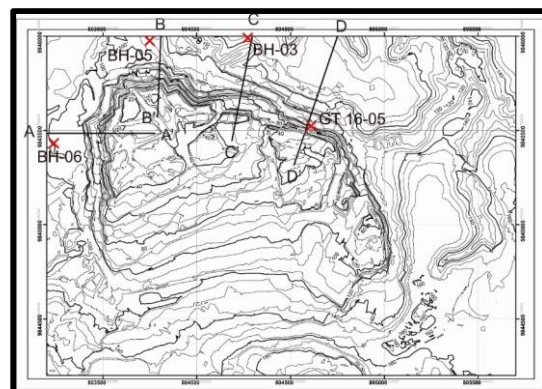
Parameter kekuatan material penyusun lereng yang digunakan dalam analisa ini diperoleh dari hasil pengujian terdahulu terhadap sifat fisik dan sifat mekanik batuan contoh daerah penelitian. Analisa dilakukan menggunakan metode kesetimbangan batas. Perhitungan kestabilan lereng dilakukan dengan mengikuti kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Mekanisme longsor lereng yang digunakan yaitu longsor busur (*circular*). Muka air tanah dimodelkan berdasarkan data pengukuran pada lubang sumur pantau (*piezometer hole*) dan lokasi-lokasi *seepage* di area lereng tambang. Nilai *seismic load* yang digunakan sebesar 0,02g.

Tabel 1 Tabulasi data sifat mekanis material penyusun lereng daerah penelitian

Litologi	γ_{sat} (KN/cm ³)	Kohesi (KPa)	Sudut geser dalam (°)
Soil	16,9	35	13,6
Igimbrite	18,52	75	21,25
Conglomerate	20	63	27
Sandstone	23	83	37
Claystone	24	120	44
Claystone_2	24	80	26
Carbonaceous Mudstone	22	64	20
Coal	19	73	34

HASIL ANALISA

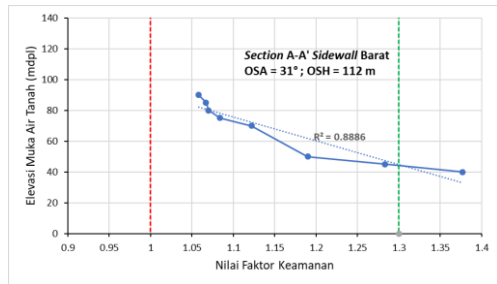
Analisa kestabilan lereng dilakukan dengan 1 penampang melintang (A-A') pada lereng *sidewall* dan 3 penampang melintang (B-B', C-C', dan D-D') pada lereng *highwall* tambang. Model geoteknik lereng disusun dengan memasukkan beberapa parameter yaitu geometri lereng, batas antar material, sifat fisik batuan, sifat mekanik batuan, faktor seismik, dan muka air tanah. Lokasi keempat penampang melintang tersebut dapat dilihat pada Gambar 12 di bawah ini. Analisa dilakukan untuk menghitung pengaruh penurunan muka air tanah terhadap nilai Faktor Keamanan kondisi lereng tambang pada desain rencana tahunan. Analisa dilakukan dengan variasi elevasi muka air tanah yang diturunkan per 10 meter, hingga didapatkan nilai Faktor Keamanan = 1,30.



Gambar 12 Lokasi penampang melintang A-A', B-B', C-C', dan D-D'

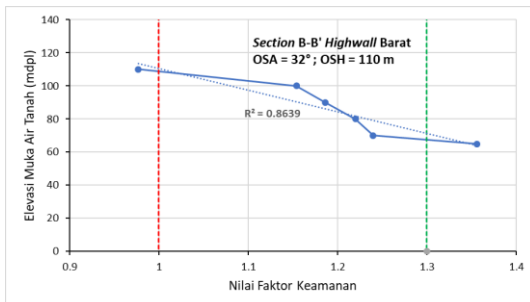
Berdasarkan hasil analisa dengan muka air tanah yang bervariasi pada area *sidewall* Barat (Gambar 13) menunjukkan hubungan yang kuat antara muka air tanah dengan nilai Faktor Keamanan dengan nilai koefisien determinasi (*R squared*) sebesar 0,8886. Hal ini memperlihatkan penurunan muka air tanah pada area *sidewall* Barat memiliki pengaruh sebesar 88,86%

terhadap kenaikan nilai Faktor Keamanan lereng tambang.



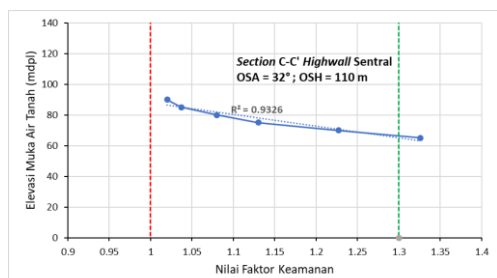
Gambar 13 Grafik pengaruh muka air tanah terhadap nilai FK pada area *sidewall* Barat

Berdasarkan hasil analisa dengan muka air tanah yang bervariasi pada area *highwall* Barat (Gambar 14) menunjukkan hubungan yang kuat antara muka air tanah dengan nilai Faktor Keamanan dengan nilai koefisien determinasi (*R squared*) sebesar 0,8639. Hal ini memperlihatkan penurunan muka air tanah pada area *highwall* Barat memiliki pengaruh sebesar 86,39% terhadap kenaikan nilai Faktor Keamanan lereng tambang.



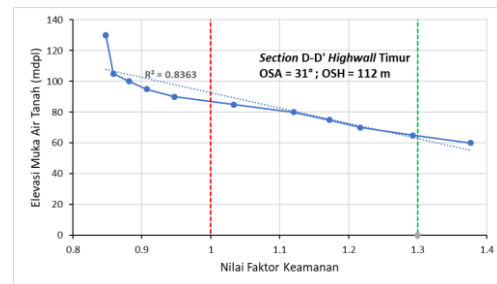
Gambar 14 Grafik pengaruh muka air tanah terhadap nilai FK pada area *highwall* Barat

Berdasarkan hasil analisa dengan muka air tanah yang bervariasi pada area *highwall* Sentral (Gambar 15) menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara muka air tanah dengan nilai Faktor Keamanan dengan nilai koefisien determinasi (*R squared*) sebesar 0,9326. Hal ini memperlihatkan penurunan muka air tanah pada area *highwall* Sentral memiliki pengaruh sebesar 93,26% terhadap kenaikan nilai Faktor Keamanan lereng tambang.



Gambar 15 Grafik pengaruh muka air tanah terhadap nilai FK pada area *highwall* Sentral

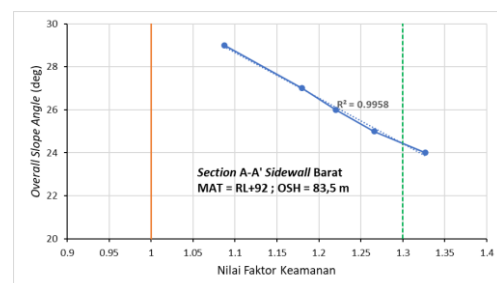
Berdasarkan hasil analisa dengan muka air tanah yang bervariasi pada area *highwall* Timur (Gambar 16) menunjukkan hubungan yang kuat antara muka air tanah dengan nilai Faktor Keamanan dengan nilai koefisien determinasi (*R squared*) sebesar 0,8363. Hal ini memperlihatkan penurunan muka air tanah pada area *highwall* Timur memiliki pengaruh sebesar 83,63% terhadap kenaikan nilai Faktor Keamanan lereng tambang.



Gambar 16 Grafik pengaruh muka air tanah terhadap nilai FK pada area *highwall* Timur

Dari empat (4) hasil analisa di atas, diketahui bahwa muka air tanah pada sebuah lereng memiliki pengaruh terhadap nilai Faktor Keamanan lereng tersebut. Hasil analisa menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara muka air tanah dengan nilai Faktor Keamanan lereng. Penurunan muka air tanah pada lereng akan menyebabkan peningkatan nilai Faktor Keamanan lereng tersebut. Adapun nilai pengaruh rata-rata adalah 87,8% dengan area *highwall* Sentral memiliki nilai pengaruh terbesar (93,26%). Hasil analisa menunjukkan bahwa untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan $\geq 1,30$ pada lereng tambang daerah penelitian, muka air tanah pada lereng *sidewall* perlu diturunkan hingga elevasi RL+40 dan pada lereng *highwall* perlu diturunkan hingga elevasi RL+65.

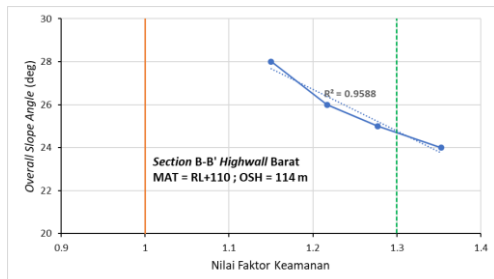
Selain analisa dengan pemodelan muka air tanah yang bervariasi, dilakukan juga analisa dengan rencana pelandaian sudut kemiringan lereng keseluruhan. Analisa ini dilakukan dengan asumsi muka air tanah alami, sesuai dengan data pemantauan sumur pantau (*piezometer hole*).



Gambar 17 Grafik pengaruh *overall slope angle* terhadap nilai FK pada area *sidewall* Barat

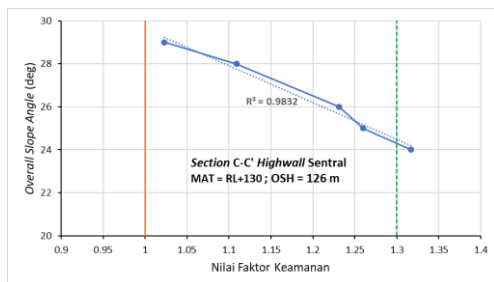
Hasil analisa pengaruh *overall slope angle* terhadap nilai FK pada area *sidewall* Barat (Gambar 17)

menunjukkan hubungan yang sangat kuat dengan nilai koefisien determinasi (*R squared*) sebesar 0,9958. Hal ini memperlihatkan pelandaian sudut lereng keseluruhan pada area *sidewall* Barat memiliki pengaruh sebesar 99,58% terhadap kenaikan nilai Faktor Keamanan lereng tambang.



Gambar 18 Grafik pengaruh *overall slope angle* terhadap nilai FK pada area *highwall* Barat

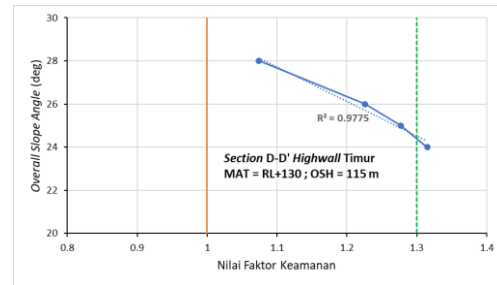
Hasil analisa pengaruh *overall slope angle* terhadap nilai FK pada area *highwall* Barat (Gambar 18) menunjukkan hubungan yang sangat kuat dengan nilai koefisien determinasi (*R squared*) sebesar 0,9588. Hal ini memperlihatkan pelandaian sudut lereng keseluruhan pada area *highwall* Barat memiliki pengaruh sebesar 95,88% terhadap kenaikan nilai Faktor Keamanan lereng tambang.



Gambar 19 Grafik pengaruh *overall slope angle* terhadap nilai FK pada area *highwall* Sentral

Hasil analisa pengaruh *overall slope angle* terhadap nilai FK pada area *highwall* Sentral (Gambar 19) menunjukkan hubungan yang sangat kuat dengan nilai koefisien determinasi (*R squared*) sebesar 0,9832. Hal ini memperlihatkan pelandaian sudut lereng keseluruhan pada area *highwall* Sentral memiliki pengaruh sebesar 98,32% terhadap kenaikan nilai Faktor Keamanan lereng tambang.

Hasil analisa pengaruh *overall slope angle* terhadap nilai FK pada area *highwall* Timur (Gambar 20) menunjukkan hubungan yang sangat kuat dengan nilai koefisien determinasi (*R squared*) sebesar 0,9775. Hal ini memperlihatkan pelandaian sudut lereng keseluruhan pada area *highwall* Timur memiliki pengaruh sebesar 97,75% terhadap kenaikan nilai Faktor Keamanan lereng tambang.



Gambar 20 Grafik pengaruh *overall slope angle* terhadap nilai FK pada area *highwall* Timur

Berdasarkan empat (4) hasil analisa pada rencana pelandaian sudut kemiringan lereng keseluruhan di atas, diketahui bahwa sudut kemiringan lereng keseluruhan berdampak pada nilai Faktor Keamanan lereng tersebut. Seperti halnya dengan pengaruh muka air tanah, hasil analisa menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara sudut kemiringan lereng keseluruhan dengan nilai Faktor Keamanan lereng. Semakin landai lereng yang dibentuk, akan menghasilkan nilai Faktor Keamanan yang semakin meningkat. Adapun nilai pengaruh rata-rata adalah 97,88% dengan area *sidewall* Barat memiliki nilai pengaruh terbesar (99,58%). Hasil analisa kestabilan lereng di atas menunjukkan bahwa lereng tambang baik *sidewall* maupun *highwall* perlu dilakukan pelandaian (*layback*) dengan sudut kemiringan keseluruhan $\leq 24^\circ$.

Dari hasil analisa yang dilakukan terhadap dua model kondisi lereng desain rencana tahunan, menunjukkan nilai Faktor Keamanan (FK) lereng $< 1,30$. Hal ini mengindikasikan lereng termasuk kelas labil – kritis (Bowles, 1989). Oleh karena itu, sangat direkomendasikan untuk dilakukan upaya *slope engineering* untuk menaikkan nilai Faktor Keamanan lereng. Secara umum upaya stabilisasi lereng dapat dilakukan dengan menambah gaya penahan atau mengurangi gaya penggerak yang bekerja pada lereng. Dalam studi ini, upaya stabilisasi yang diusulkan adalah dengan mengurangi gaya penggerak. Metode yang diusulkan yaitu dengan melakukan *depressurization* melalui *drain hole* maupun dengan melakukan pelandaian (*layback*) lereng keseluruhan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng yang telah dilakukan, penulis menarik beberapa kesimpulan, yaitu:

- 1) Keberadaan dan muka air tanah pada sebuah lereng tambang memiliki pengaruh terhadap kestabilan lereng tersebut.
- 2) Penurunan muka air tanah memiliki hubungan berbanding terbalik dengan peningkatan nilai Faktor Keamanan sebuah lereng.
- 3) Untuk mencapai nilai Faktor Keamanan standar (FK = 1,30), diusulkan dilakukan upaya

depressurization dengan target muka air tanah pada elevasi RL+40 untuk *sidewall* sisi Barat dan RL+60 untuk area *highwall*.

- 4) Upaya lain terkait peningkatan kestabilan lereng yang diusulkan adalah dengan melakukan pelandaian (*layback*) lereng, dengan target sudut lereng keseluruhan (*overall slope angle*) 25°.
- 5) Sistem manajemen *seepage* dan drainase air permukaan di daerah penelitian perlu diperhatikan.
- 6) Kajian lanjutan terkait hidrogeologi dan tekanan air pori pada lereng *highwall* perlu dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada karyawan dan manajemen Golden Energy Mines (GEMS) dan semua pihak terkait atas dukungannya sehingga makalah ilmiah ini dapat selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- Alloisio, S., Douglas, B., McKittrick, R., & Prigneau, P., 2004. Groundwater modelling for large-scale mine dewatering in Chile: MODFLOW or FEFLOW?. Shrewsbury.
- Arif, I., 2010. Geoteknik Tambang, Program Studi Teknik Pertambangan ITB. Bandung. 2010.
- Bestler, M., Nel, E., & Gavigan, G., 2013. A Strategic Approach to the Design and Implementation of an Effective Mine Dewatering System, Slope Stability (hal. 1-16). Australian Centre for Geomechanics. Brisbane.
- Bishop, A.W., 1955. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Geotechnique vol. 5.
- Bishop, A.W. dan Bjerrum, L., 1960. The Relevance of the Triaxial Test to the Solution of Stability Problems. ASCE Conference on Strength of Cohesive Soils.
- Bishop, A.W. dan Morgenstern, N., 1960. Stability Coefficients for Earth Slopes. Geotechnique vol. 19.
- Bowles, E.J., 1989. Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Chaulya, S.K. dan Prasad, G.M., 2016. Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas. Elsevier Inc.
- Coulomb, C.A., 1776. Sur une application des regles maximis et minimis a quelques problems de statique, relatives a l'architecture. Acad Sci Paris Mem Math Phys 7:343-382.
- Fellenius, W., 1936. Calculation of the Stability of Earth Dams, Trans. 2nd Cong. on Large Dams vol 4. Washington.
- Golder Associates, 2018. Geotechnical Investigation for Pit and Waste Dump Studies Report.
- Hardiyatmo, H.C., 2010. Mekanika Tanah 1. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., 2010. Mekanika Tanah 2. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Johansson, J., 2014. Impact of Water-Level Variations on Slope Stability. Lulea University of Technology.
- Lambe, T.W. dan Whitman, R.V., 1979. Soil Mechanics, SI Version. Wiley. New York.
- LAPI ITB, PT., 2017. Studi Pengaruh Getaran Peledakan Terhadap Perumahan Penduduk dan Evaluasi Kestabilan Lereng Tambang PT Kuansing Inti Makmur Site Muara Bungo. Jambi.
- Mohr, O., 1900. Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials?. Zeit des Ver Deut Ing 44:1524-1530.
- Muntohar, A.S. dan Saputro, R.I., 2014. Pengaruh Kedalaman Muka Air Tanah Awal Terhadap Analisis Stabilitas Lereng Tak Jenuh. Seminar Nasional X – 2014. Teknik Sipil ITS Surabaya.
- Nadai, A., 1950, Theory of Flow and Fracture of Solids. McGraw Hill. New York.
- Rahardjo, H., Hritzuk, K., Leong, E., & Rezaur, R., 2003. Effectiveness of horizontal drains for slope stability. Engineering Geology, 295-308.
- Rai, M.A., Kramadibrata, S., dan Wattimena, R.K., 2007. Mekanika Batuan. Penerbit ITB. Bandung.
- Rosidi, H.M.D., Tjokrosapoetro, S., Pendowo, B., Gafoer, S., dan Suharso., 1996. Peta Geologi Lembar Painan dan Bagian Timurlaut Lembar Muarasiberut, Sumatera. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sugianti, K., 2013. Pengaruh Muka Airtanah terhadap Kestabilan Lereng pada Ruas Jalan Raya Cadaspangeran, Sumedang. Riset Geologi Tambang Vol.22 No.2, 117-125.