

**ANALISIS PENGARUH AIRTANAH TERHADAP
KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN *FINITE
ELEMENT METHOD* PADA PT. BHARINTO EKATAMA,
KABUPATEN KUTAI BARAT KALIMANTAN TIMUR**
*(The Analysis of The Impact of Groundwater Towards Stability of Pit
Slopes on The Lowwall and Highwall Using The Finite Element Method
at Pit A, PT. Bharinto Ekatama, Kutai Barat District, East Kalimantan)*

Prety Permatasari Hutahayan, Tommy Trides
Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman
E-mail: pretty.hutahayan@gmail.com

Abstrak

PT. Bharinto Ekatama merupakan perusahaan pertambangan di Kalimantan Timur. Penelitian dilakukan pada *Pit A* yang berada pada blok. Kestabilan lereng merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi aktivitas penambangan. Kestabilan suatu lereng dipengaruhi oleh beberapa parameter yang salah satu faktornya adalah airtanah. Keberadaan airtanah tersebut mempengaruhi nilai kekuatan geser pada material yang menyebabkan menurunnya nilai kestabilan lereng. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh airtanah terhadap kestabilan lereng *lowwall* dan *highwall Pit A*. Ketinggian muka airtanah serta arah aliran airtanah diperoleh melalui pemodelan airtanah menggunakan aplikasi *Visual Modflow v3.1*. Hasil pemodelan airtanah tersebut digunakan sebagai ketinggian muka airtanah pada lereng *Pit A*, kemudian diolah menggunakan aplikasi *Phase 2 v8.0* untuk mendapatkan nilai kestabilan lereng. Analisis kestabilan lereng pada penelitian ini menggunakan *Finite Element Method* dengan keluaran berupa zonasi tegangan, deformasi, dan perpindahan. Karena itu, digunakan pendekatan *Strength Reduction Factor* yaitu pengurangan kekuatan geser secara bertahap sampai kohesi dan sudut geser dalam mencapai nilai minimum dan lereng kritis. Hasil pemodelan terhadap airtanah menunjukkan bahwa, aliran airtanah mengalir menuju sungai Biangan dengan nilai *hydraulic head* yang bervariasi antara +76 hingga +108 mdpl. Berdasarkan analisis menggunakan *Finite Element Method*, nilai kestabilan lereng pada *Pit A* yang dipengaruhi oleh airtanah adalah sebesar 0,65 pada lereng *lowwall* dan 1,40 pada lereng *highwall*. *Total displacement* yang terjadi 0,019 meter pada lereng *lowwall* dan 0,002 pada lereng *highwall*. Pengaruh airtanah terhadap lereng tersebut ialah airtanah menambah beban lereng sehingga meningkatkan gaya dorong material dan menimbulkan berkurangnya kekuatan geser material yang mengakibatkan berkurangnya massa batuan dan berfungsi sebagai jalur rembesan air. Oleh karena itu, diberikan rekomendasi untuk konstruksi pada *lowwall Pit A* sehingga diperoleh nilai Faktor Keamanan sebesar 7,79 dengan *total displacement* 0,020 meter.

Kata Kunci : Akuifer, Kestabilan Lereng, *Lowwall*, *Modflow*, *Strength Reduction Factor*.

Abstract

PT. Bharinto Ekatama is a mining company in East Kalimantan. Research was conducted on Pit A which is located in the Biangan block. The stability of pit slopes is one of the most important factors affecting mining activities. The stability of a slope is influenced by several parameters, one of which is groundwater. The existence of groundwater reduces shear strength of the materials which causes a decrease in the stability value of pit slopes. The main objective of this study is to assess the impact of groundwater on the stability of the lowwall and highwall at Pit A. Groundwater tables and groundwater flow direction were obtained through groundwater modelling using Visual Modflow v3.1. The groundwater modelling results in the form of groundwater tables were used on the slopes of Pit A which were then processed using Phase 2 v8.0 to obtain slope stability. Slope stability analysis in this study was performed using the Finite Element Method, producing output in the form of strain zones, deformation and displacement values. Therefore, the Strength Reduction Factor approach was used, which is a gradual reduction of shear strength until the values of cohesion and friction angles reach minimums and the slopes are at a critical state. Groundwater modelling results indicate that groundwater flows to the Biangan river with hydraulic heads between 76 and 108 meters above sea level. Based on the analysis using the Finite Element Method, the stability values of the pit slopes of Pit A, which is influenced by groundwater, are 0.65 on the lowwall and 1.40 on the highwall. The total displacements are 0.019 meters on the lowwall and 0.002 meters on the highwall. The impact of groundwater on the slope is an increase in slope load. This increases the materials' thrust and reduces shear strength of the materials which reduces the rock mass that can function as a water seepage path. Therefore, recommendations for construction

Keywords: *Finite Element Method, Groundwater Modelling, Stability, Strength Reduction Factor.*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Airtanah menempati lapisan pada zona jenuh dan keberadaan airtanah tersebut dapat mempengaruhi nilai kekuatan geser pada material yang menyebabkan menurunnya nilai kestabilan suatu lereng yang dapat mengakibatkan terjadinya longsor.

Analisis kestabilan lereng yang dipengaruhi airtanah terhadap lereng *highwall* dan lereng *lowwall* dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dan nilai Faktor Keamanan dari lereng tersebut didapatkan dengan menggunakan pendekatan yaitu metode pengurangan kekuatan geser (*Strength Reduction Factor*).

Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng ini perlu dilakukan untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan yang aman pada lereng *lowwall* dan *highwall Pit A* di blok Biangan, PT. Bharinto Ekatama, Kabupaten Kutai Barat, Provinsi Kalimantan Timur.

METODOLOGI

Penelitian dilakukan di PT. Bharinto Ekatama. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan airtanah untuk mengetahui pola aliran serta ketinggian muka airtanah pada daerah penelitian dan akan digunakan sebagai parameter dalam menganalisis lereng *lowwall* dan lereng *highwall* pada *Pit A*.

Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang digunakan pada penelitian ini yaitu melalui pengumpulan data primer yang diperoleh langsung saat penelitian dan data sekunder yang diperoleh dari arsip perusahaan serta literatur.

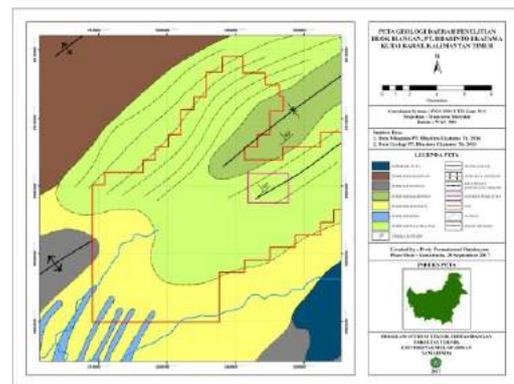
Metode Pengolahan Data

Pengolahan data yang dilakukan meliputi pengolahan data hidrologi, hidrogeologi dan geoteknik. Pengolahan data hidrologi meliputi perhitungan curah hujan dan Daerah Aliran Sungai (DAS), pengolahan data hidrogeologi meliputi penentuan nilai konduktivitas hidrolis pada lubang piezometer yang didapatkan dari hasil *slug test*, *run-off*, evapotranspirasi, imbuhan airtanah serta *sub-surface* akuifer, dan pengolahan data geoteknik meliputi data *strength materials*, geometri lereng hingga litologi material penyusun lereng. Data hidrologi dan data geohidrologi diolah untuk mendapatkan pemodelan airtanah, sedangkan data geoteknik diolah agar dapat dilakukannya analisis terhadap lereng *highwall* dan lereng *lowwall*.

Geologi Daerah Penelitian

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Samarinda daerah penelitian berada pada formasi geologi Pulaubalang (Supriatna dkk., 1995). Geologi daerah penelitian digambarkan pada peta geologi yang dapat dilihat pada Gambar 1.

Formasi Pulaubalang (TMPB) tersusun batuan berupa perselingan batupasir kuarsa dan gres, batulanau, batulempung dengan sisipan batugamping, tuf dan batubara. Batupasir kuarsa, halus – sedang, terpilah baik, sebagian tufan dan gampingan, karbonan, setempat berselingan dengan batulanau dan batulempung setebal 15 cm, perlapisan sejajar, gres, halus – sedang, setempat gampingan, kepingan batubara, setempat berselingan dengan batulempung kelabu dan batupasir halus. Batulempung, menyerpih, sisipan batubara 3 – 5 cm. Batugamping, menghablur pejal, tuf, andesitan – basalt, lapisan tipis. Batubara, mengkilat agak kusam, tebal 20 – 150 cm. Umur satuan diperkirakan Miosen Tengah. Lingkungan pengendapan darat – laut dangkal. Tebal lapisan kurang lebih 2500 m.

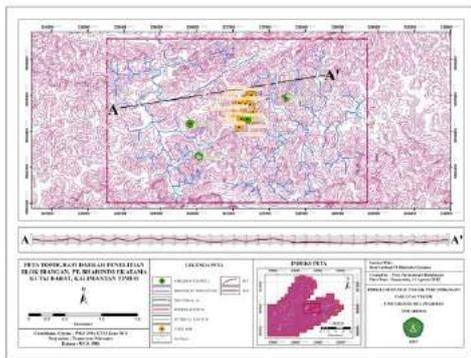


Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian

Topografi Daerah Penelitian

Daerah penelitian didominasi oleh perbukitan dimana hal ini dapat ditunjukkan dengan jarak antar kontur yang rapat dengan kenaikan elevasi. Pada daerah penelitian memiliki rata-rata kemiringan lereng 27,2 %, berdasarkan kenampakan geomorfologi yang didasarkan pada kelerengannya menurut Van Zuidam dan Cancelado (1979) daerah penelitian termasuk dalam relief topografi perbukitan dan masuk pada kelas lereng curam (Van Zuidam, 1983). Peta topografi (Gambar 2) memperlihatkan daerah penelitian dengan luas 11,745 km² dan elevasi tertinggi berada di perbukitan selatan dengan ketinggian +170 mdpl, sementara itu elevasi terendah berada di utara dengan ketinggian +81 mdpl.

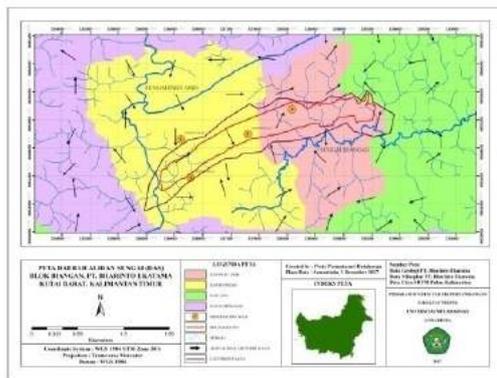
HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2. Peta Topografi Daerah Penelitian

Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah penelitian masuk dalam DAS Biangan dan DAS Pahu Amis. DAS Biangan digambarkan oleh poligon berwarna merah muda dengan luasan 3,056 km², sementara itu DAS Pahu Amis dengan poligon berwarna kuning mempunyai luas 5,847 km². Oleh karena itu, luas DAS pada daerah penelitian adalah 8,903 km², luasan DAS tersebut digunakan sebagai parameter dalam perhitungan imbunan airtanah. Pada daerah penelitian terdapat batas wilayah tangkapan air atau *catchment area* seluas 1,89 km², dimana *catchment area* tersebut dibatasi oleh elevasi tertinggi area sekitar bukaan, diperkirakan air hujan yang jatuh pada area tersebut mengalir dan terkumpul pada daerah bukaan tambang (*sump*) dan saluran terbuka.

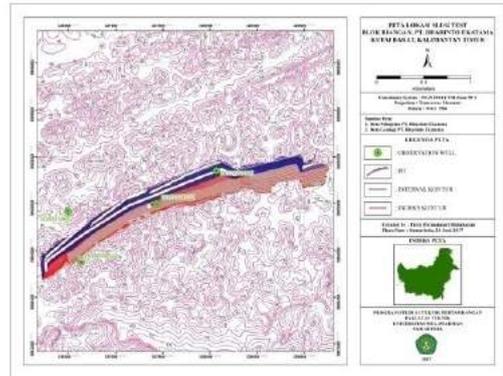


Gambar 3. Peta Daerah Aliran Sungai (DAS) Pada Lokasi Penelitian

Karakteristik Akuifer & Jenis Akuifer

Karakteristik akuifer berupa nilai konduktivitas hidraulik diperoleh dari hasil pengolahan data *slug test* yang dilakukan pada lubang piezometer (*Piezometer wells*) yang berada di daerah penelitian yang pada umumnya lubang-lubang tersebut digunakan untuk memonitor fluktuasi muka airtanah, lokasi pelaksanaan *slug test* dan pemantauan airtanah terlampir pada Gambar 4. *Slug test* pada penelitian ini dilakukan dengan cara memasukkan

air ke dalam lubang bor dengan volume tertentu kemudian dilakukan pencatatan penurunan muka airtanah setelah air dimasukkan. Nilai konduktivitas hidraulik (K) lapisan akuifer dan lapisan lainnya dapat dilihat pada Tabel 1.

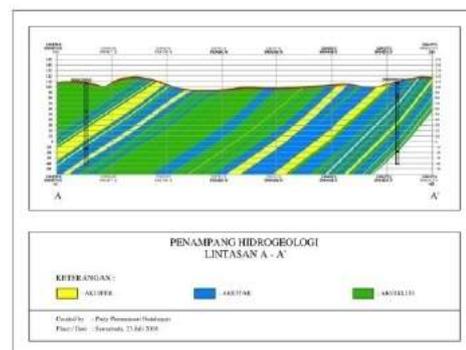


Gambar 4. Peta Lokasi *Slug Test*

Tabel 1. Nilai konduktivitas hidraulik pada lubang piezometer

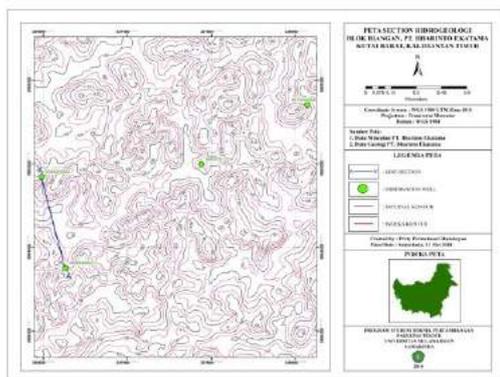
ID Holes	ID Piezometer	Jenis Material	K (m/dtk)	Sifat Batuan
B07250008Z	PZ 02	Batubara	$4,68 \times 10^{-7}$	Akuitar
B08000012Z	PZ 03	Batupasir lanauan	$1,20 \times 10^{-6}$	Akuifer
B08825066Z	PZ 05	Batupasir	$1,10 \times 10^{-5}$	Akuifer
B08950062Z	PZ 06	Batupasir	$1,11 \times 10^{-4}$	Akuifer

Slug test dilakukan pada lubang piezometer oleh karena itu nilai konduktivitas hidraulik yang didapatkan hanya pada lapisan pembawa air. Konduktivitas hidraulik dapat diartikan sebagai kecepatan Bergeraknya suatu cairan pada media berpori dalam keadaan jenuh atau dapat juga dikatakan sebagai kecepatan air untuk mengalir pada periode waktu tertentu dalam satuan meter per detik. Semakin besar nilai konduktivitas hidraulik, maka semakin besar kemampuan batuan untuk meneruskan air.



Gambar 5. Penampang Lapisan Akuifer Daerah Penelitian Sayatan A - A'

Berdasarkan hasil analisis melalui data yang diperoleh, diketahui sebaran akuifer di daerah penelitian adalah jenis akuifer semi tertekan, dapat dilihat pada penampang hasil *section* (Gambar 5), dimana garis penampang tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta Lokasi *Section* Hidrogeologi Daerah Penelitian

Evapotranspirasi

Evapotranspirasi adalah peristiwa penguapan dari suatu daerah aliran sungai sebagai akibat pertumbuhan tanaman. Evapotranspirasi dipengaruhi oleh besarnya curah hujan dan temperatur udara rata-rata tahunan di daerah target penelitian. Besarnya nilai evapotranspirasi pada daerah penelitian dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini :

Tabel 2. Perhitungan Evapotranspirasi

Parameter Perhitungan	Unit	Simbol	Nilai
Curah hujan	mm/tahun	P	2.854,85
Temperatur udara rata-rata	°C	Tm	28,13
Evapotranspirasi	mm/tahun	Evp	1.731,261

Surface Run-off

Air permukaan adalah semua air yang terdapat pada permukaan tanah sedangkan air permukaan yang mengalir disebut dengan aliran permukaan (Kodoatie, 2012).

Parameter yang mempengaruhi besarnya penyebaran limpasan permukaan adalah curah hujan, luas daerah aliran sungai, dan temperature. Hasil perhitungan *surface run-off* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan *Surface Run-off*

Parameter Perhitungan	Unit	Simbol	Nilai
Curah hujan	mm/tahun	P	2.854,85
Luas daerah aliran sungai	ha	A	890,3
<i>Surface run-off</i>	mm/tahun	Ro	1077,98

Imbuan Airtanah

Dalam siklus tersebut, air akan selalu melalui sistem akuifer yang disebut sebagai proses imbuan, yaitu penambahan air ke dalam zona akuifer. Besarnya jumlah penambahan air ke dalam zona akuifer dapat dihitung berdasarkan jumlah dari beberapa parameter diantaranya curah hujan, evapotranspirasi, dan *surface run-off*. Hasil perhitungan imbuan airtanah dapat dilihat pada Tabel 4 berikut :

Tabel 4. Perhitungan Imbuan Airtanah

Parameter Perhitungan	Unit	Simbol	Nilai
Curah hujan	mm/tahun	P	2.854,85
Evapotranspirasi	mm/tahun	Evp	1.731,261
<i>Surface run-off</i>	mm/tahun	Ro	1077,98
Imbuan airtanah	mm/tahun	U	45,61

Pemodelan Airtanah Alami Daerah Penelitian

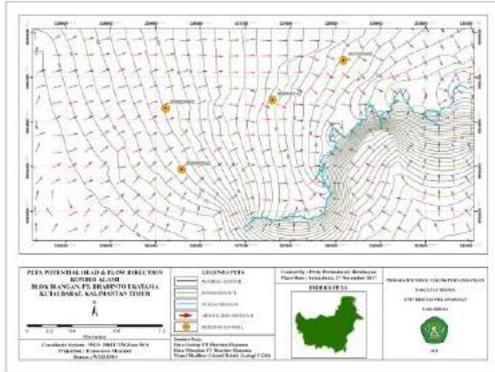
Pemodelan airtanah digunakan untuk mensimulasi dan memprediksi kondisi akuifer. Manfaat dari pemodelan ini adalah untuk mempresentasikan keadaan airtanah, seperti pola aliran airtanah dan ketinggian muka airtanah pada daerah penelitian. Data masukan pemodelan airtanah (Tabel 5), meliputi: imbuan airtanah / *recharge*, konduktivitas hidraulik pada lapisan akuifer, nilai *constant head*, dan ketinggian air sungai.

Tabel 5. Data Masukan Pada Permodelan Airtanah Alami

Data	Unit	Nilai	
K (Konduktivitas hidraulik)	m det ⁻¹	K1	1,10 × 10 ⁻⁵
		K2	1,11 × 10 ⁻⁴
<i>Constant head</i>	m	170 – 169	
<i>River</i>	m	132 – 130	
<i>Recharge</i>	mm th ⁻¹	45,61	

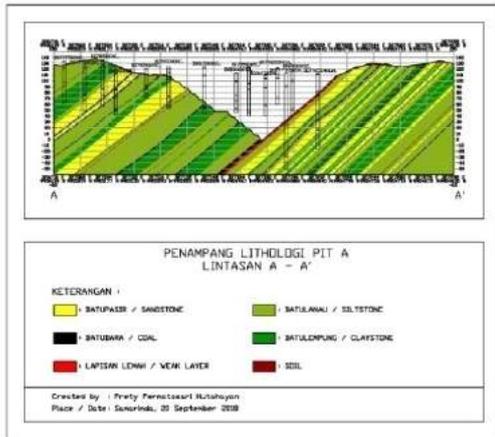
Hasil pemodelan dengan *Visual Modflow*, diketahui bahwa nilai *head* hidraulik kondisi alami pada daerah penelitian mempunyai tinggi maksimum +108 mdpl dan minimum +76 mdpl. Penyebaran equipotensial *head* hidraulik secara rata-rata dari elevasi tinggi di daerah selatan kemudian menuju ke elevasi terendah di daerah timur di Sungai Biangan. Pola sebaran equipotensial *head* hidraulik pada lapisan akuifer menggambarkan, equipotensial *head* hidraulik makin turun dan rapat ketika mencapai jaringan sungai Biangan. Kerapatan kontur yang menurun ini menyebabkan aliran airtanah pada lapisan akuifer mengalir menuju ke sungai yang mempunyai *head* hidraulik rendah. Oleh karena

itu, akibat kondisi tersebut dapat disimpulkan bahwa, airtanah menjadi pengisi / pemberi air pada air sungai. Secara jelas deskripsi pola aliran airtanah pada daerah penelitian dapat dilihat dalam Gambar 7.

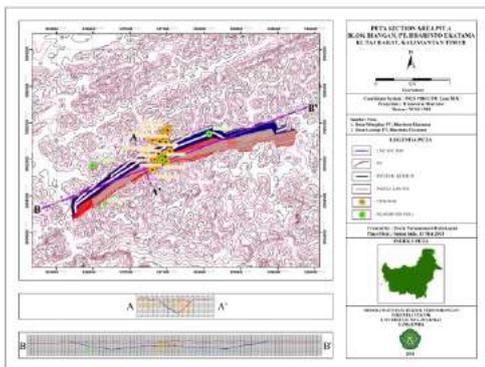


Gambar 7. *Peta Potential Head and Flow Direction*

Kondisi Litologi Daerah Pit A



Gambar 8. *Penampang Litologi pada Pit A*



Gambar 9. *Lokasi Garis Penampang*

Berdasarkan data pemboran diketahui lapisan batuan penyusun lereng di *Pit A* antara lain batupasir, batulanau, batulempung, batubara dan lapisan lemah berupa batulempung karbonan. Perlapisan batuan penyusun pada *Pit A* secara

digambarkan melalui penampang litologi pada Gambar 8 dimana, penampang litologi tersebut merupakan hasil sayatan dari garis penampang pada Gambar 9.

Parameter Sifat Mekanik

Nilai sifat mekanik diperoleh melalui pengujian terhadap *sample* atau conto batuan yang dilakukan oleh PT. Bharinto Ekatama. Nilai uji sifat mekanik yang didapatkan melalui pengujian meliputi nilai kohesi (kPa), sudut geser dalam ($^{\circ}$), sedangkan nilai *modulus young* dan *poisson ratio* menggunakan standar yang dikemukakan oleh Alfreds R. Jumikis (1983). Nilai sifat mekanik tersebut disajikan dalam Tabel 6 sebagai berikut:

Tabel 6. *Parameter sifat mekanik.*

No	Material	Kohesi (kPa)		Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)		Modulus Young (kPa)*	Poisson Ratio*
		Peak	Residu	Peak	Residu		
1	Coal	150	150	36	36	500000	0,3
2	Weak Layer	3	3	18,05	18,05	500000	0,3
3	Top Soil	10	10	34	18	500000	0,3
4	32 Sandstone	312,05	74,155	12,81	10,165	4460000	0,17
5	32 Siltstone	152,11	14,776	4,45	4,13	16650000	0,265
6	32 Claystone	141,78	31,225	9,6	7,63	16650000	0,265
7	43 Sandstone	124,38	40,26	8,46	6,458	4460000	0,17
8	43 Siltstone	124	11,2	8,31	7,407	16650000	0,265
9	43 Claystone	117	14,6	15,28	11,25	16650000	0,265
10	54 Sandstone	362,4	9,5	30,09	18,72	4460000	0,17
11	54 Siltstone	38,86	5,55	5,54	4,065	16650000	0,265
12	54 Claystone	11,12	3,2	2,64	1,515	16650000	0,265
13	65 Sandstone	368,25	155,6	38,37	1,865	4460000	0,17
14	65 Siltstone	186,67	0	10,21	6,905	16650000	0,265
15	65 Claystone	166,8	48	39,67	22,73	16650000	0,265
16	76 Sandstone	14,23	7,5	14,76	10,343	4460000	0,17
17	76 Siltstone	77,34	10	3,33	3,108	16650000	0,265
18	76 Claystone	26,9	2,73	4,39	2,77	16650000	0,265
19	87 Sandstone	299,86	123,623	9,27	8,8	4460000	0,17
20	87 Siltstone	114,56	46,557	7,06	4,953	16650000	0,265
21	87 Claystone	138,84	67,065	10,39	6,808	16650000	0,265

(Sumber: *Geology Department PT.Bharinto Ekatama.*)

(*) *Sumber: Alfreds R. Jumikis.*

Parameter Analisis Sifat Fisik

Berdasarkan data pengujian terhadap *sample* atau conto batuan yang dilakukan oleh PT. Bharinto Ekatama dan didapatkan hasil pengujian terhadap nilai bobot isi batuan yang disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 7. *Parameter Sifat Fisik*

No	Material	Bobot Isi (kN/m ³)
1	Coal	13
2	Weak Layer	19
3	Top Soil	18
4	32 Sandstone	23,31
5	32 Siltstone	23,31
6	32 Claystone	23,31

(*Sumber: Geology Department PT.Bharinto Ekatama.*)

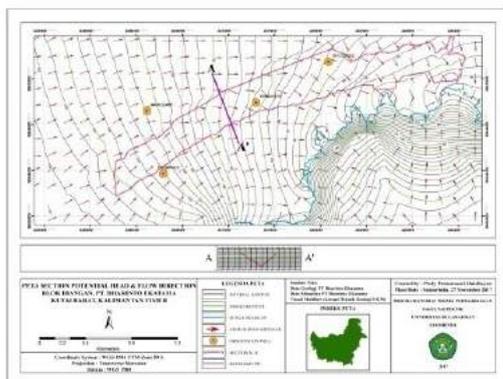
Lanjutan Tabel 7. Parameter Sifat Fisik

No	Material	Bobot Isi (kN/m ³)
7	43 Sandstone	23,47
8	43 Siltstone	23,47
9	43 Claystone	23,47
10	54 Sandstone	23,08
11	54 Siltstone	23,08
12	54 Claystone	23,08
13	65 Sandstone	21,97
14	65 Siltstone	21,97
15	65 Claystone	21,97
16	76 Sandstone	22,29
17	76 Siltstone	22,29
18	76 Claystone	22,29
19	87 Sandstone	22,31
20	87 Siltstone	22,31
21	87 Claystone	22,31

(Sumber: Geology Department PT.Bharinto Ekatama).

Kondisi Airtanah Daerah Lereng

Keberadaan airtanah pada daerah penelitian ini akan menunjang analisis kestabilan lereng pada *Pit A*, oleh karena itu dilakukan penyayatan terhadap model airtanah guna mengetahui secara lebih mendetail. Garis penampang tersebut terletak pada UTM 327057,23 MT – 327288,50 MT, 9905246,24 MU – 9904640,28 MU (Gambar 10).

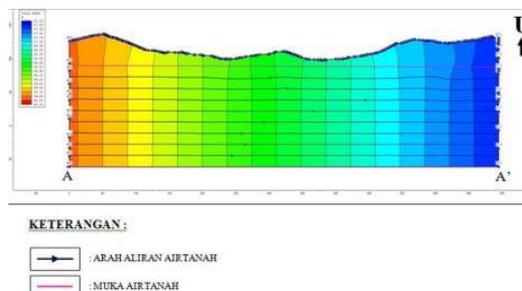


Gambar 10. Lokasi Garis Penampang *Potential Head* Daerah *Pit A*

Kondisi Airtanah Sebelum Penambangan

Hasil pemodelan terhadap airtanah sebelum dilakukannya penambangan digambarkan melalui penampang A – A' yang terdapat pada Gambar 11. Berdasarkan *section* tersebut didapatkan ketinggian muka airtanah pada sisi barat penampang setinggi +89,9 mdpl dan sisi timur penampang memiliki ketinggian muka airtanah setinggi +87,3 mdpl. Melalui penampang A – A' dapat diketahui bahwa airtanah dalam kondisi alami mengalami penurunan hal ini dapat dijelaskan melalui ketinggian muka airtanah yang menurun pada sisi timur dan pola aliran airtanah

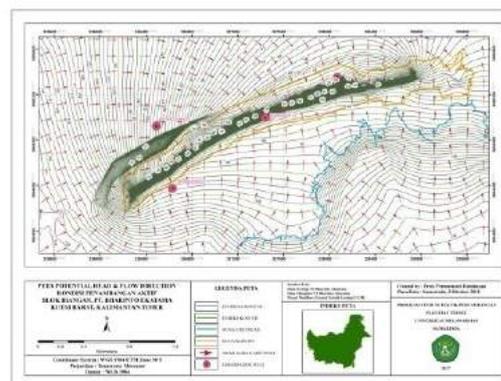
yang dihasilkan menunjukkan bahwa airtanah mengalir dari barat menuju timur penampang. Penampang A – A' pada Gambar 11 mengacu pada Gambar 7, diketahui bahwa pola aliran airtanah dalam kondisi alami mengalir menuju sungai Biangan yang terletak di daerah timur.



Gambar 11. Penampang Airtanah *Pit A* Kondisi Alami

Kondisi Airtanah Penambangan Aktif

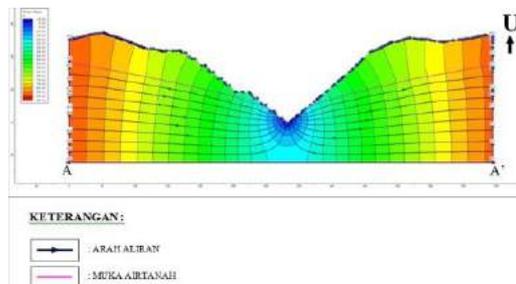
Kondisi airtanah setelah dilakukannya penambangan diketahui mengalami perubahan terhadap arah aliran airtanah (Gambar 12). Hasil pemodelan pada kondisi penambangan aktif akan berbeda dengan kondisi alami, hal ini disebabkan adanya perubahan tata guna lahan dan hidrostratigrafi, yaitu terbentuknya *pit* yang mencapai kedalaman –111,43 meter yang mengakibatkan terpotongnya lapisan akuifer yang mengakibatkan turunnya tekanan hidrolika dan pengaruh gaya gravitasi yang mengakibatkan debit aliran airtanah menjadi besar.



Gambar 12. *Potential Head and Flow Direction* Kondisi Penambangan Aktif

Secara lebih mendetail telah dilakukan analisis lanjutan menggunakan aplikasi *Phase 2*, dapat diketahui bahwa pada penampang A – A' (Gambar 13) didapatkan ketinggian muka airtanah pada sisi barat penampang setinggi +89,9 mdpl dan sisi timur penampang memiliki ketinggian muka airtanah setinggi +87,3 mdpl. Ketinggian tersebut dijadikan *boundary condition* untuk mengetahui kondisi muka airtanah setelah

adanya cekungan atau *pit*. Pada penampang A – A' dalam Gambar 12 dapat diketahui bahwa airtanah dalam kondisi penambangan aktif mengalami penurunan menuju cekungan *pit*, hal ini disebabkan oleh prinsip aliran air yaitu air akan mengalir dari tempat tinggi menuju tempat yang lebih rendah.



Gambar 13. Penampang Airtanah Pit A Kondisi Penambangan Aktif

Analisis Kestabilan Lereng

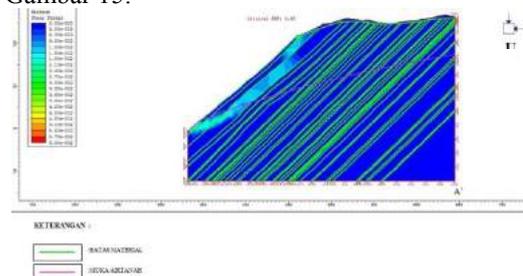
Analisis kestabilan lereng dilakukan pada lereng *highwall* dan lereng *lowwall* Pit A PT. Bharinto Ekatama. Pada Pit A terdapat lapisan batubara yaitu *seam* A1 dan *seam* A2 yang masing-masing memiliki ketebalan 3 dan 4,40 meter. Penambangan pada *pit* ini dilakukan dari arah timur menuju ke arah barat, dimana penambangan dilakukan hingga pada elevasi –3 mdpl. Penentuan lokasi dilakukan dengan penarikan garis penampang pada area Pit A yang akan dianalisis dibuat searah *strike* atau tegak lurus arah *dip*. Lokasi dan garis penampang dapat dilihat pada Gambar 9. Lokasi penarikan garis penampang pada Gambar 9 dan Gambar 10 berada pada koordinat yang sama yaitu terletak pada UTM 327057,23 MT – 327288,50 MT, 9905246,24 MU – 9904640,28 MU.

Analisis Lereng Lowwall Pit A

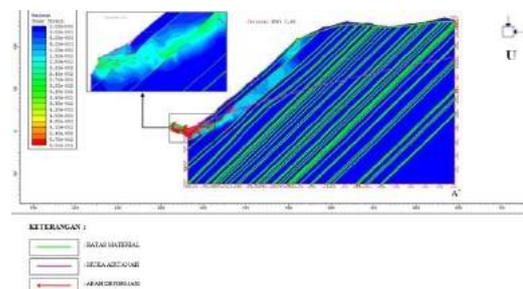
Analisis kestabilan lereng keseluruhan (*overall slope*) dilakukan pada lereng *lowwall*, lereng *lowwall* Pit A memiliki sudut kemiringan lereng sebesar 41°, kemiringan lereng ini mengikuti sudut kemiringan lapisan batuan atau *dip* bidang perlapisan yang ada pada lereng tersebut. Lereng *lowwall* berada pada elevasi +108,625 mdpl, penambangan akan dilakukan hingga elevasi –3 mdpl dengan kedalaman penambangan –111,625 meter.

Analisis lereng *lowwall* ini menggunakan airtanah sebagai faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng *lowwall*. Ketinggian muka airtanah pada lereng *lowwall* yang mengacu pada Gambar 13 sebagaimana telah dijelaskan bahwa ketinggian muka airtanah pada sisi timur penampang memiliki ketinggian muka airtanah setinggi +87,3 mdpl. Hasil perhitungan kestabilan lereng *lowwall* yang dipengaruhi oleh airtanah

dengan menggunakan metode elemen hingga atau *finite element method* pada Gambar 14 didapatkan nilai *Critical SRF* atau FK sebesar 0,65 dengan perpindahan total (*total displacement*) sebesar 0,019 meter. Hal ini menandakan bahwa gaya penggerak melebihi gaya penahan sehingga mengakibatkan kegagalan atau keruntuhan pada lereng ini. Pada lereng *lowwall* ini *maximum shear strain* membentuk *circular* yang berada di belakang lereng *lowwall*, lereng ini mengalami lipatan pada *toe* lereng *lowwall* yang mekanismenya disebabkan oleh proses *bulking* yaitu gaya yang bekerja tegak lurus terhadap bidang permukaan lapisan. Hal ini disebabkan oleh airtanah yang menambah beban lereng sehingga meningkatnya gaya dorong material. Setelah proses *bulking* lereng ini mengalami tipe longsoran *sliding translational* atau gelinciran translational, dimana gelinciran yang terjadi dengan bidang runtuh yang berupa bidang planar. Gelinciran ini terjadi akibat adanya *weak layer* atau lapisan lemah yang berada di atas material yang kokoh atau material yang memiliki nilai kekuatan batuan yang lebih tinggi daripada lapisan lemah tersebut. Perpindahan atau *displacement* pada lereng dapat dilihat pada Gambar 15.



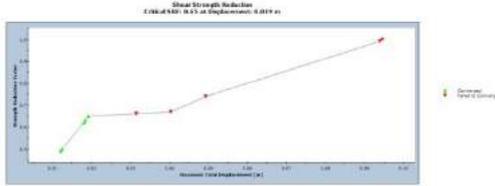
Gambar 14. Hasil Analisis Lereng Lowwall Pit A yang Dipengaruhi Oleh Airtanah



Gambar 15. Perpindahan Pada Lereng Lowwall Pit A

Pada perhitungan elemen hingga lereng dianggap mengalami keruntuhan apabila iterasi perhitungan *failed to converge* atau non-konvergen. Iterasi yang non-konvergen menandakan tidak adanya distribusi tegangan yang dapat dicapai untuk memenuhi kriteria *Mohr-Coloumb*. Iterasi yang non-konvergen

diikuti dengan naiknya perpindahan yang mengalami lompatan besar pada saat lereng runtuh.



Gambar 16. Grafik Hubungan *Critical SRF* Terhadap Perpindahan Pada Lereng *Lowwall Pit A* yang Dipengaruhi Airtanah

Nilai perpindahan total maksimum lereng *lowwall* pada *SRF* tertentu sebelum hingga terjadinya keruntuhan disajikan pada Tabel 8 dengan grafik perpindahan pada Gambar 16.

Tabel 8. Perpindahan Lereng *Lowwall Pit A*

<i>Maximum Total Displacement (m)</i>	<i>Critical Strength Reduction Factor</i>
0,0120359	0,49
0,012374	0,5
0,0179814	0,62
0,0183113	0,63
0,0191521	0,65
0,0314913	0,66*
0,0404371	0,67*
0,0493267	0,74*
0,0939805	0,99*
0,0946841	1*

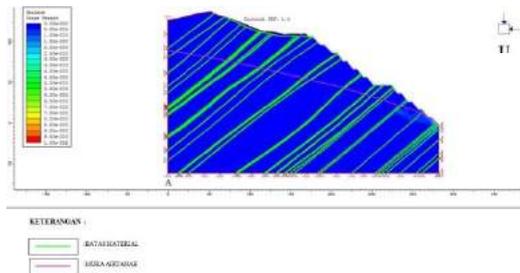
(*) Iterasi Non-Konvergen

Analisis Lereng *Highwall Pit A*

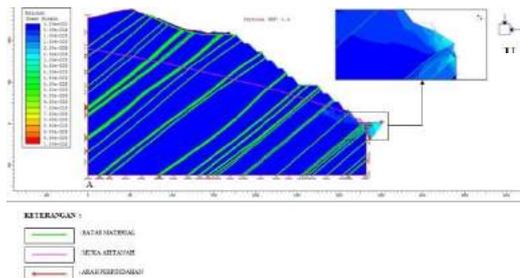
Analisis kestabilan lereng keseluruhan (*overall slope*) dilakukan pada lereng *highwall*, lereng *highwall Pit A* memiliki sudut kemiringan lereng keseluruhan sebesar 35° dengan geometri lereng yang bervariasi yaitu tinggi lereng tunggal 10 meter, lebar *berm* 5 meter dan lebar *ramp* 22 meter, serta sudut lereng tunggal 45° – 53°. Lereng *highwall* berada pada elevasi +109,743 mdpl, penambangan akan dilakukan hingga elevasi -3 mdpl dengan kedalaman penambangan -112,743 meter.

Analisis lereng *highwall* ini menggunakan airtanah sebagai faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng *highwall*. Ketinggian muka airtanah pada lereng *highwall* yang mengacu pada Gambar 13 sebagaimana telah dijelaskan bahwa ketinggian muka airtanah pada sisi barat penampang memiliki ketinggian muka airtanah setinggi +89,9 mdpl. Hasil perhitungan kestabilan lereng *highwall* yang dipengaruhi oleh airtanah dengan menggunakan metode elemen hingga atau *finite element method* pada Gambar 17 didapatkan nilai *Critical SRF* atau *FK* sebesar 1,4 dengan perpindahan total (*total displacement*) sebesar

0,002 meter. Hal ini menandakan bahwa gaya penahan melebihi gaya penggerak sehingga lereng *highwall* pada *Pit A* dalam kondisi aman. Pada lereng *highwall* ini *maximum shear strain* berada pada *toe* lereng, lereng ini hampir tidak mengalami pergerakan kecuali pada bagian *toe* lereng *highwall*. Lereng *highwall* memiliki bidang perlapisan yang berlawanan dengan arah kemiringan lereng sehingga ketika terjadi longsor pada *toe* lereng, lereng *highwall* dalam kondisi aman. Perpindahan atau *displacement* pada lereng dapat dilihat pada Gambar 18.

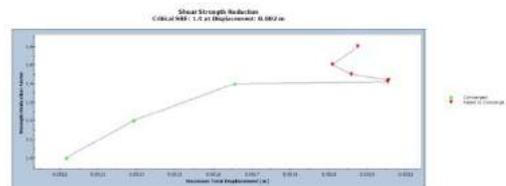


Gambar 17. Hasil Analisis Lereng *Highwall Pit A* yang Dipengaruhi Oleh Airtanah



Gambar 18. Perpindahan Pada Lereng *Highwall Pit A*

Pada perhitungan elemen hingga lereng dianggap mengalami keruntuhan apabila iterasi perhitungan *failed to converge* atau non-konvergen. Iterasi yang non-konvergen menandakan tidak adanya distribusi tegangan yang dapat dicapai untuk memenuhi kriteria *Mohr-Coloumb*. Iterasi yang non-konvergen diikuti dengan naiknya perpindahan yang mengalami lompatan besar pada saat lereng runtuh. Nilai perpindahan total maksimum lereng *highwall* pada *SRF* tertentu sebelum hingga terjadinya keruntuhan disajikan pada Tabel 9 dengan grafik perpindahan pada Gambar 19.



Gambar 19. Grafik Hubungan *Critical SRF* Terhadap Perpindahan Pada Lereng *Highwall Pit A* yang Dipengaruhi Airtanah

Tabel 9. Perpindahan Lereng *Highwall Pit A*

Maximum Total Displacement (m)	Critical Strength Reduction Factor
0,00121806	1
0,00139348	1,2
0,0016564	1,4
0,00205425	1,41*
0,00205577	1,42*
0,00195831	1,45*
0,00191046	1,5*
0,00197568	1,6*
0,0016564	1,4

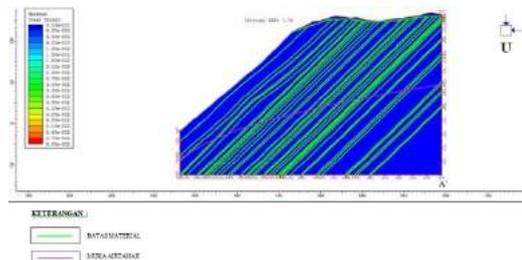
(*) Iterasi Non-Konvergen

Redesign Lowwall Pit A

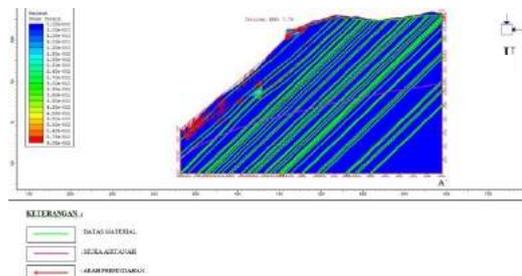
Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa lereng *highwall Pit A* mendapatkan nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan yang melebihi nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan optimum yaitu sebesar 1,4, oleh karena itu tidak perlu dilakukannya *redesign* terhadap lereng *highwall*, sedangkan lereng *lowwall Pit A* mendapatkan nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan yang kurang dari nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan optimum yaitu sebesar 0,65, nilai tersebut sangat kurang dari 1,3, oleh karena itu, perlu dilakukannya *redesign* terhadap lereng *lowwall Pit A* agar mendapatkan nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan yang aman atau mencapai nilai $\geq 1,3$. Nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan pada lereng *lowwall* $\leq 1,3$ disebabkan oleh 2 faktor, yaitu keberadaan *weak layer* atau lapisan lemah dan keberadaan airtanah pada lereng *lowwall*. Oleh karena itu direkomendasikan untuk dilakukannya penambangan sampai pada *weak layer* yang berada di belakang *seam A2*, kemudian untuk penanganan terhadap airtanah ialah perlu dilakukannya pemompaan untuk mengurangi tingkat kejenuhan pada lereng, pemompaan terhadap airtanah dilakukan hingga ketinggian muka airtanah minimal berkurang 40 meter dari ketinggian muka airtanah awal.

Berdasarkan rekomendasi yang diberikan, didapatkan hasil bahwa lereng *lowwall* mengalami peningkatan terhadap nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan menjadi 7,79 dan diikuti dengan meningkatnya nilai perpindahan total (*total displacement*) pada lereng *lowwall* menjadi 0,02 meter. Hasil analisis terhadap *redesign* lereng *lowwall* yang mengalami peningkatan pada nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan menjadi 7,79 dapat dilihat pada Gambar 20 dan perpindahan atau *displacement*

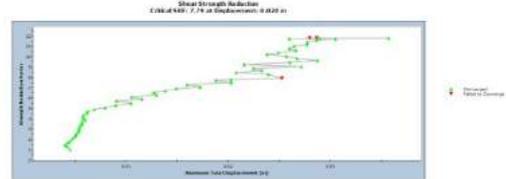
terhadap lereng ini dapat dilihat pada gambar berikutnya yaitu pada Gambar 21.



Gambar 20. Hasil Analisis Lereng *Lowwall Pit A* yang Dipengaruhi Oleh Airtanah Setelah *Redesign*



Gambar 21. Perpindahan Pada Lereng *Lowwall Pit A* Setelah *Redesign*



Gambar 22. Grafik Hubungan *Critical SRF* Terhadap Perpindahan Pada Lereng *Lowwall Pit A* yang Dipengaruhi Airtanah Setelah *Redesign*

Pada perhitungan elemen hingga lereng dianggap mengalami keruntuhan apabila iterasi perhitungan *failed to converge* atau non-konvergen. Iterasi yang non-konvergen menandakan tidak adanya distribusi tegangan yang dapat dicapai untuk memenuhi kriteria *Mohr-Coloumb*. Iterasi yang non-konvergen diikuti dengan naiknya perpindahan yang mengalami lompatan besar saat lereng runtuh.

Nilai perpindahan total maksimum lereng *highwall* pada *SRF* tertentu sebelum hingga terjadinya keruntuhan disajikan pada Tabel 10 dengan grafik perpindahan pada Gambar 22.

Tabel 10. Perpindahan Lereng *Lowwall Pit A* Setelah *Redesign*

Maximum Total Displacement (m)	Critical Strength Reduction Factor	Maximum Total Displacement (m)	Critical Strength Reduction Factor
0,00457508	1	0,0173016	7,09
0,00427753	1,3	0,0159921	7,29
0,00405801	1,5	0,0203467	7,49
0,00433983	1,7	0,0188278	7,69
0,00460068	1,9	0,0203083	7,79
0,00485121	2,1	0,0252968	7,89*
0,00507068	2,3	0,0239304	8,28
0,00516973	2,5	0,0207948	8,47
0,00537788	2,7	0,0233008	8,67
0,00544767	2,9	0,022507	8,86
0,0054261	3,1	0,027177	9,05
0,00554496	3,3	0,0215377	9,25
0,00575701	3,5	0,0260182	9,44
0,00570309	3,7	0,0287324	9,63
0,00601822	3,9	0,0267267	9,83
0,00579475	4,09	0,0256855	10,02
0,00585146	4,29	0,0238096	10,21
0,00617358	4,49	0,0249188	10,41
0,0062306	4,69	0,0266089	10,61
0,00691964	4,89	0,0259937	10,8
0,0079723	5,09	0,026447	11
0,00898518	5,29	0,0277167	11,2
0,0105124	5,49	0,0277605	11,4
0,00908337	5,69	0,0286466	11,6
0,011568	5,89	0,0305125	11,69
0,0105998	6,09	0,0259935	11,74
0,0129841	6,29	0,0289402	11,76
0,012736	6,49	0,0356757	11,77
0,0138695	6,69	0,0280028	11,78*
0,0149628	6,89	0,0286418	11,79*

(*) Interaksi Non-Konvergen

Pengaruh Airtanah Terhadap Lereng

Airtanah merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng, penambahan airtanah pada lereng mengakibatkan nilai *Critical SRF* atau FK pada lereng menurun, hal tersebut dapat dibuktikan melalui hasil analisis pada lereng *lowwall*. Adanya airtanah pada lereng *lowwall* akan menambah beban lereng tersebut sehingga airtanah akan meningkatkan gaya dorong material dan menimbulkan berkurangnya kekuatan geser material pada badan lereng untuk menahan longsor, serta dengan adanya pengurangan kekuatan material yang dimiliki oleh batuan dan faktor lapisan lemah atau *weak layer* pada permukaan *lowwall*, hal ini mengakibatkan berkurangnya massa batuan dan yang kemudian dapat berfungsi sebagai jalur rembesan air. Hal ini mengakibatkan material yang berada di bawah muka airtanah mengalami longsor terlebih dahulu dan diikuti oleh material di atasnya yang mengakibatkan terjadinya *bulking*. Terjadinya longsor pada material lereng yang berada di bawah airtanah juga terjadi pada lereng *highwall*, namun hal ini dapat teratasi dikarenakan lereng *highwall* memiliki bidang perlapisan yang berlawanan dengan arah kemiringan lereng sehingga lereng *highwall* dalam kondisi aman dengan mendapatkan nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan 1,4.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Nilai *head* hidraulik kondisi alami daerah penelitian mempunyai hasil tinggi maksimum +108 mdpl dan minimum +76 mdpl. *Head* hidraulik tinggi berada di daerah batas pemisah airtanah yang berupa perbukitan

barat dan selatan serta head hidraulik rendah berada di Sungai Biangan. Pola sebaran ekuipotensial *head* hidraulik pada lapisan akuifer menggambarkan, ekuipotensial head hidraulik makin turun dan rapat ketika mencapai jaringan sungai Biangan.

2. Lereng *lowwall Pit A* yang dipengaruhi oleh airtanah, diperoleh nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan sebesar 0,65 dengan *total displacement* 0,019 meter.
3. Lereng *highwall Pit A* yang dipengaruhi oleh airtanah, diperoleh nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan sebesar 1,4 dengan *total displacement* 0,002 meter.
4. Keberadaan airtanah menambah beban lereng sehingga meningkatkan gaya dorong material dan menimbulkan berkurangnya kekuatan geser material pada badan lereng untuk menahan longsor, serta adanya pengurangan kekuatan material yang dimiliki batuan dan faktor lapisan lemah atau *weak layer* pada lereng mengakibatkan berkurangnya massa batuan dan dapat berfungsi sebagai jalur rembesan air dan mengakibatkan material yang berada di bawah muka airtanah mengalami longsor terlebih dahulu dan diikuti oleh material di atasnya.
5. Pada lereng *lowwall* harus dilakukan pemompaan terhadap airtanah hingga ketinggian muka airtanah minimal berkurang hingga 40 meter dari ketinggian muka airtanah awal dan dilakukannya penambangan hingga *weak layer* yang berada di belakang *seam A2*, sehingga didapatkan nilai Faktor Keamanan atau *Critical SRF* yang aman untuk lereng *lowwall Pit A* sebesar 7,79 dengan *total displacement* 0,02 meter, sedangkan pada lereng *highwall* sudah mencapai nilai *Critical SRF* atau Faktor Keamanan yang aman yaitu sebesar 1,4 dengan *total* 0,002 meter.

Saran

Pada penelitian ini sebaiknya dilakukan pengujian terhadap nilai *modulus young* dan *poisson ratio* agar hasil yang didapatkan maksimal dan representatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penyusun menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. PT. Bharinto Ekutama yang telah memberikan kesempatan dan bimbingan pada penulis untuk melakukan kegiatan penelitian.
2. Bapak Dr. Shalaho Dina Devy, S.T., M.Eng. selaku Kepala Program Studi S1 Teknik Pertambangan dan dosen pembimbing II.

3. Bapak Tommy Trides, S.T.,M.T selaku dosen pembimbing I.
4. Kedua orangtua serta saudara penulis Ibu Katharina Sihombing, Bapak Liberferi Walsen Hutahayan, Claudya Retta Hutahayan, Adam Jonathan Pratama Junior Hutahayan atas segala doa, kasih dan semangat yang tiada.
5. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, atas bantuan, dukungan, dan kerjasama selama penulis menyelesaikan penelitian tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2001, *Application of the Finite Element Method to Slope Stability*, Rocscience Inc., Toronto, Canada.
- Anonim, <http://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-398/figures/ofr95-398fig4.gif>, Last Accessed: 29 September 2017.
- Anonim, https://www.rocscience.com/help/rs2/phase2_model/Shear_Strength_Reduction_Overview.htm, Last Accessed: 1 Oktober 2017.
- Arif, I., 2016, *Geoteknik Tambang*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Asdak, C., 2010, *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Balfas, M.D., 2015, *Geologi untuk Pertambangan Umum*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Boonstra, J., dan de Ridder, N.A., 1981, *Numerical Modelling of Groundwater Basins*, International Institute for Land Reclamation and Improvement / ILR, Wageningen, The Netherland.
- Devy, S.D., 2018, April. *Hydrogeology of Karang Mumus Watershed in Samarinda, East Kalimantan Province, Indonesia*. In Forum Geografi (Vol. 32, No. 1).
- Dewi, I.A.A., Arsana, K., dan Suputra, O., 2013, *Analisis Kapasitas Saluran Drainase Sekunder dan Penanganan Banjir Di Jalan Gatot Subroto Denpasar*, Vol 2, No 2, Jurnal Ilmiah Elektronik Infrastruktur Teknik Sipil, Denpasar.
- Domenico, P.A, dan Schwartz, F.W., 1990, *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley and Sons, Inc., Toronto, Canada.
- Fabbri, P., Ortombina, M., dan Piccinini, L., 2012, *Estimation of Hydraulic Conductivity Using the Slug Test Method in a Shallow Aquifer in the Venetian Plain (NE, Italy)*, Associazione Acque Sotteranee, Padova, Italy.
- Fetter, C.W., 2001, *Applied Hydrogeology*, 4th edn, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, The United States of America.
- Hadipratomo, W., dan Raharjo P.P., 1985, *Pengenalan Metode Elemen Hingga Pada Teknik Sipil*, Penerbit NOVA, Bandung.
- Hendrayana, H., 1994, *Diktat Pengantar Model Airtanah*, Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., dan McDonald, M.G., 2005, *Visual Modflow – 2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground Water Model, the Ground Water Flow Process*, U.S Geological Survey Techniques and Methods, Reston, Virginia, The United States of America.
- Hardiyatmo, H.C., 2012, *Mekanika Tanah 1*, 6th edn, UGM Press, Yogyakarta.
- Hartman, L.H., dan Mutmansky, J.M., 2002, *Introductory Mining Engineering*, 2nd edn, John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, The United States of America.
- Heath, R.C., 1983, *Basic Ground-Water Hydrology*, Vol 2220, U.S. Geological Survey, North Carolina, The United States of America.
- Herdian, A., Azizi, M.A., dan Nugroho, B., 2006, *Kajian Rancangan Lereng Rencana Tambang Batubara Muara Tiga Besar Selatan Tahun 2006/2007 di PT. Tambang Bukit Asam dalam Kumpulan Makalah Geoteknik 2005 – 2008*, Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia (PERHAPI), Jakarta.
- Hustrulid, W., dan Kuchta, M., 1998, *Open Pit Mine Planning and Design*, vol 1, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- , Kuchta, M., dan Martin, R., 2006, *Open Pit Mine Planning and Design*, 3rd edn, Taylor and Francis plc, London, The United Kingdom.
- Irawan, E.D., dan Puradimaja, D.J., 2015, *Hidrogeologi Umum*, Penerbit Ombak, Yogyakarta.
- Jumikis, A.R., 1983, *Rock Mechanics*, 2nd edn, Trans Tech Publications, Switzerland.
- Kamiana, I Made., 2012, *Teknik Perhitungan Debit Rencana Bangunan Air*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Kassim, M.A., Hanapi, M.N., dan Abdullah, M.H., 2000, *A Non-Instrumental Method to Determine Hydraulic Heads on Low-Lying Coastal Aquifer*, Vol 12, No 1, Jurnal Kejuruteraan Awam (Journal of Civil Engineering), Malaysia.

- Kodoatie, R.J., 2012, *Tata Ruang Air Tanah*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- , R.J dan Sjarief, R., 2010, *Tata Ruang Air*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Konikow, L.F., dan Reilly, T., 1999, *Groundwater Modelling*, School of Civil Engineering: Purdue University Press, Indiana, The United States of America.
- Kramadibrata, S., Rai, M.A., dan Wattimena R.K., 2014, *Mekanika Batuan*, ITB Press, Bandung.
- Locat, J., Leroueil S., Locat, A., dan Lee, H., 2014, *Weak Layers: Their Definition and Classification from a Geotechnical Perspective dalam Advances in Natural and Technological Hazards Research: Submarine Mass Movements and Their Consequences*, Vol 37, Springer, Switzerland.
- Mulyaningsih, S., 2010, *Pengantar Geologi Lingkungan*, Panduan, Yogyakarta.
- Notodarmojo, S., 2005, *Pencemaran Tanah dan Air Tanah*, Penerbit ITB, Bandung.
- Ola, S.A., Fadugba, O.G., dan Uduebor M.A., 2016, *Slug Test for Determination of Hydraulic Conductivity of Contaminated Wells*, Vol 6, No 2, Canadian Center of Science and Education, Akure, Nigeria.
- Prasetyo, H.A., 2013, *Geologi dan Studi Lingkungan Pengendapan Berdasarkan Analisis Maseral*, Universitas Pembangunan Nasional, Yogyakarta.
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 12., 2014, *Penyelenggaraan Sistem Drainase Perkotaan*.
- Rostianingsih, S., Gunadi, K., dan Handoyo, I., 2004, *Pemodelan Peta Topografi ke Objek Tiga Dimensi*, Vol 5, No 1, Jurnal Informatika, Surabaya.
- Smedt De, F., 1999, *Dimension Flow of Groundwater*, Brussels, CRC Press LLC, New York, The United States of America.
- Soewarno, 2015, *Analisis Data Hidrologi Menggunakan Metode Statistik dan Stokastik*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Spitz, K., dan Moreno, J., 1996, *A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling*, John Wiley and Sons, Inc., New York, The United States of America.
- Supriatna, S., Sudradjat, A., dan Abidin, H.Z., 1995, *Peta Geologi Lembar Muaratewe, Kalimantan, Skala 1: 250.000*, Puslitbang Geologi Bandung.
- Todd, D.K., 1980, *Groundwater Hydrology*, 2nd edn, John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, The United States of America.
- Triatmodjo, B., 2008, *Hidrologi Terapan*, Beta Offset Yogyakarta, Yogyakarta.
- US Army Corps of Engineers, 1999, *Engineering and Design: Groundwater Hydrology*, Military Bookshop, Washington DC, The United States of America.
- Van Zuidam, R.A., 1983, *Guide to Geomorphologic – Aerial Photographic Interpretation and Mapping*, ITC, Enschede, The Netherlands.
- , dan Cancelado, F.I., 1979, *Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photographs: A Geomorphological Approach*, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Wesley, L.D., 2012, *Mekanika Tanah Untuk Tanah Endapan dan Residu*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Wibawa, F., dan Kresno, H., 2015, *Rancangan Sump D1 Blok D1 – D2 Pit Roto Selatan PT. Pamapersada Nusantara Distrik Kideco Batu Kajang Kalimantan Timur*, Vol 1, No 1, Jurnal Teknologi Pertambangan, Yogyakarta.
- Widjaja, B., 2004, *Analisis Batas untuk Kestabilan Lereng*, Vol 1, No 1, Jurnal Teknik Sipil, Bandung.
- Wyllie, D.C., dan Mah, C.W., 2004, *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th edn, Spon Press, New York, The United States of America.