

Redesain Batas Akhir Penambangan berdasarkan Re-Analisis Kestabilan Lereng *Lowwall* pada Pit Mahakam Barat PT Insani Baraperkasa Blok Loa Janan Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur

Redesign of the Ultimate Pit Limit Based on Re-Analysis of Lowwall Slope Stability at Pit Mahakam Barat PT Insani Baraperkasa Loa Janan Block Kutai Kartanegara Regency East Kalimantan Province

Sonnia R. M. Rembang^{1*}, Tommy Trides², Agus Winarno³, Ardhan Ismail⁴, Windhu Nugroho⁵

^{1-5*} Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Mulawarman Samarinda

*Email Korespondensi : soniarembang.sr@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan re-analisis kestabilan lereng *lowwall* serta redesain batas akhir penambangan (*ultimate pit limit*) pada Pit Mahakam Barat, PT Insani Baraperkasa. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kondisi lereng desain awal dan menentukan rancangan geometri lereng yang aman dan ekonomis berdasarkan kondisi geoteknik terkini. Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng *lowwall* pada desain awal memiliki nilai Faktor Keamanan (FK) sebesar 1,22 dan Probabilitas Kelongsoran (PoF) sebesar 13,06% dalam kondisi statis, yang termasuk kategori kritis. Redesain lereng dengan geometri baru—litologi batubara (60°, 8 m, 5 m), batupasir (35°, 10 m, 7 m), serta batulempung dan batulanau (40°, 10 m, 5 m)—menghasilkan geometri keseluruhan dengan sudut kemiringan 32°. Nilai FK meningkat menjadi 1,41 dan PoF menurun menjadi 1,12% dalam kondisi dinamis, menunjukkan kondisi lereng yang stabil. Perubahan geometri lereng ini berdampak terhadap peningkatan cadangan batubara dan volume *overburden*. Redesain meningkatkan 14.050,16 MT cadangan batubara, dari 4.520.898,73 MT menjadi 4.534.948,89 MT, serta peningkatan *overburden* 288.673,28 BCM, dari 43.616.288,13 BCM menjadi 43.904.961,41 BCM. Hasil redesain menunjukkan nilai *stripping ratio* (SR) yang tetap ekonomis $\leq 11,31$, yaitu 9,68, sedikit meningkat dari SR awal 9,65, sehingga hasil redesain dapat dinyatakan layak secara ekonomis.

Kata kunci: kestabilan lereng; faktor keamanan; probabilitas kelongsoran; redesain; *stripping ratio*.

ABSTRACT

This research aims to perform a re-analysis of the lowwall slope stability and a redesign of the ultimate pit limit at Pit Mahakam Barat, PT Insani Baraperkasa. The analysis was conducted to evaluate the stability condition of the initial slope design and to determine an appropriate slope geometry that meets both safety and economic feasibility criteria based on the latest geotechnical conditions. The results indicate that the initial lowwall slope design has a Factor of Safety (FoS) of 1.22 and a Probability of Failure (PoF) of 13.06% under static conditions, which falls into the critical category. The redesigned slope geometry for each lithology—coal (slope angle 60°, bench height 8 m, berm width 5 m), sandstone (35°, 10 m, 7 m), and claystone-siltstone (40°, 10 m, 5 m)—produced an overall slope angle of 32°. Under dynamic conditions, the redesigned slope achieved an FoS value of 1.41 and a PoF of 1.12%, indicating a stable slope condition. Furthermore, the redesign led to an increase in both coal reserves and overburden volume. The total coal reserves increased by 14,050.16 MT, from 4,520,898.73 MT to 4,534,948.89 MT, while the overburden volume increased by 288,673.28 BCM, from 43,616,288.13 BCM to 43,904,961.41 BCM. The stripping ratio (SR) also increased slightly from 9.65 to 9.68, yet it remained below the company's maximum economic SR limit of 11.63. Therefore, the redesigned pit is considered both technically stable and economically feasible.

Keyword: slope stability; factor of safety; probability of failure; redesign; *stripping ratio*.

PENDAHULUAN

PT Insani Baraperkasa merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan batubara, dengan metode tambang terbuka (*open pit*). Kegiatan penambangan terbuka selalu dihadapkan pada tantangan terkait kestabilan lereng, baik pada tahap eksplorasi, tahap operasi, maupun pasca tambang. Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng menjadi salah satu aspek penting yang harus dilakukan secara komprehensif untuk menjamin keselamatan kerja, perlindungan terhadap alat berat dan infrastruktur tambang, serta kelangsungan operasional tambang[3].

Penambangan di PT Insani Baraperkasa Blok Loa Janan dilakukan pada Megapit Mahakam yang terdiri atas Pit Mahakam Tengah, Pit Mahakam Timur, dan Pit Mahakam Barat. Desain awal pit disusun melalui

kajian geoteknik tahun 2022, sedangkan Pit Mahakam Barat direncanakan mulai ditambang pada tahun 2025. Interval waktu tersebut berpotensi menimbulkan perubahan kondisi geologi dan sifat massa batuan yang dapat memengaruhi nilai Faktor Keamanan (FK) dan Probabilitas Kelongsoran (PoF), sehingga keduanya berisiko berada di bawah standar yang ditetapkan Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018[10]. Oleh karena itu, diperlukan re-analisis pada desain batas akhir penambangan (*ultimate pit limit*) dengan adanya *update* lubang bor, untuk memastikan rancangan tetap memenuhi kriteria teknis dan aspek keselamatan.

Dalam konteks tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan redesain batas akhir penambangan berdasarkan analisis kestabilan lereng *lowwall* di Pit Mahakam Barat PT Insani Baraperkasa. Redesain ini menyatukan aspek teknis geoteknik dengan estimasi cadangan, perubahan geometri lereng, dan nilai *stripping ratio*. Pendekatan tersebut, diharapkan dapat dihasilkan rancangan akhir tambang yang tidak hanya memenuhi aspek keselamatan, tetapi juga mendukung efisiensi dan produktivitas operasi tambang secara berkelanjutan.

Geologi Regional Daerah Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada wilayah Cekungan Kutai, salah satu cekungan sedimen Tersier terbesar di Indonesia dengan cakupan area sekitar 165.000 km² dan kedalaman mencapai 14.000 meter. Cekungan Kutai memiliki potensi ekonomi yang tinggi, terutama karena keberadaan endapan batubara berumur Tersier yang cukup melimpah. Batubara di wilayah ini umumnya ditemukan dalam tiga satuan formasi utama, yaitu Formasi Pulaubalang (Miosen Awal), Formasi Balikpapan (Miosen Akhir), dan Formasi Kampungbaru (Pliosen) (Gambar 1). Berdasarkan tingkat peringkatnya (rank), batubara yang ditemukan di Cekungan Kutai diklasifikasikan dalam kategori rendah hingga menengah, yakni dari lignit hingga bituminus dengan kadar volatil yang tinggi.

AGE	FORMATION	THICK (m)	LITHOLOGY	DESCRIPTION	DEPOSITION ENVIRONMENT
QUATERNARY	Holocene				
	Alluvial (Qa)	?		Loose-sized materials clay to fine sand, and organic material	Fluvial Lacustrine
TERTIARY	Pliocene	Kampungbaru	900	Quartz sandstone intercalation with claystone, shale, siltstone, and lignite	Deltaic to Shallow-marine
	Late Miosene	Balikpapan	3000	Claystone and quartz sandstone intercalations with siltstone, shale, and coal	Delta front to Delta plain
	Middle Miosene	Pulaubalang	2750	Quartz sandstone, limestone, claystone, dacitic tuff and coal intersection	Terrestrial to shallow marine
	Early Miosene	Bebulu	2000	Bebulu formation: limestone with intersection of sandy limestone and argillaceous shale	Shallow sea
	Pamaluau	3000	Pamaluau formation: quartz sandstone, with intersection of claystone, shale, limestone and siltstone	Deep marine	

Gambar 1 Stratigrafi Cekungan Kutai (modifikasi [4], dalam [21])

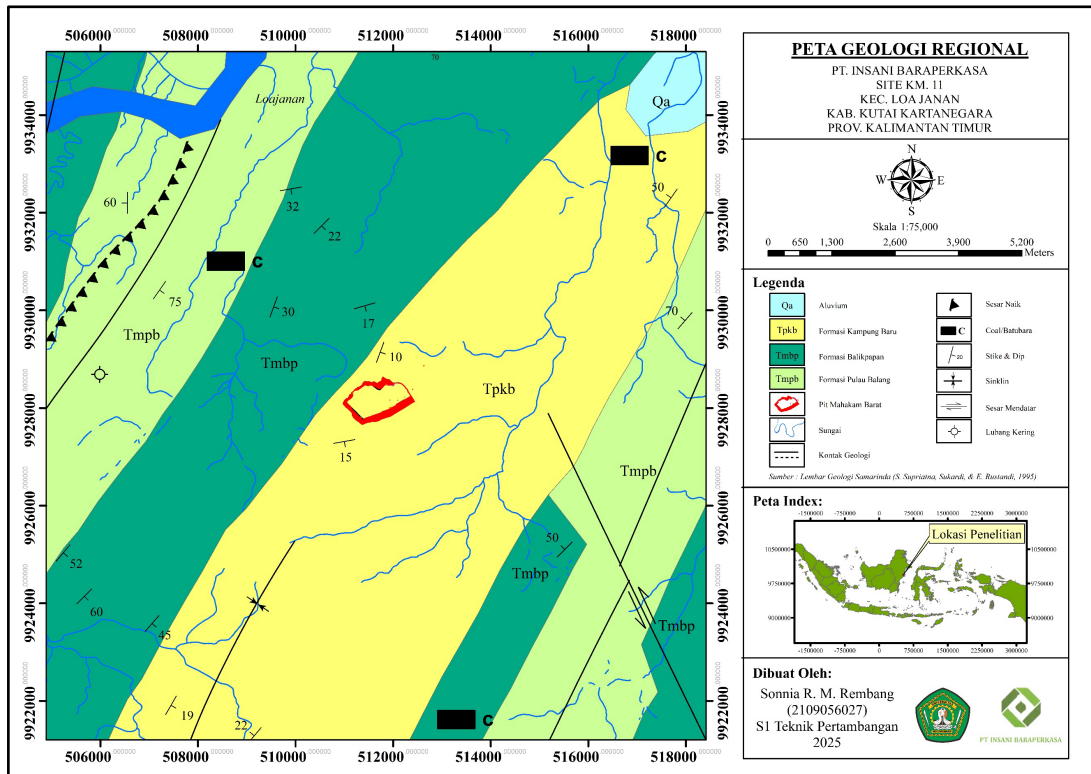
Berdasarkan peta geologi lembar Samarinda (1995), wilayah konsesi PT. Insani Baraperkasa, khususnya Pit Mahakam Barat sebagai area penelitian terletak pada Formasi Kampung Baru yang berumur Miosen Tengah sampai Pliosen (Gambar 2). Kelompok ini dibedakan atas Formasi Tanjungbaru dan Formasi Sepinggan. Formasi Tanjungbaru berumur miosen tengah sampai miosen atas. Formasi ini tersusun atas selingan serpih lempung, batulanau, pasir dan batubara membentuk satu runtunan. Lingkungan pengendapannya adalah neritik. Batupasir berbutir halus sampai sedang, terutama tersusun oleh kuarsa, dan umumnya bersifat lepas. Serpih terdapat sebagai lapisan tipis sampai tebal, lunak, mengandung karbon, dan berwarna abu-abu gelap[18].

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Kesampaian Daerah

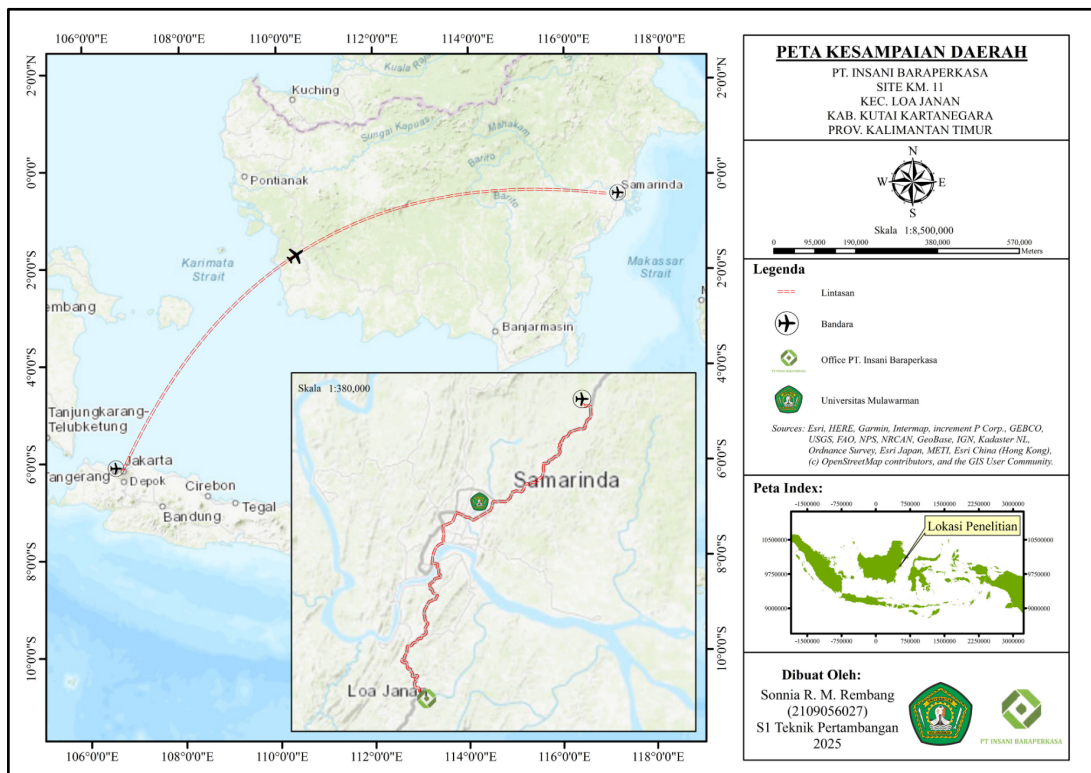
Lokasi penelitian dilakukan di PT. Insani Baraperkasa site km 11 Kecamatan Loajanan Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. Secara geografis, Lokasi penelitian di PT. Insani Baraperkasa terletak pada posisi 00°38'13,64" - 00°39'33,86" Lintang Selatan dan 117°05'52,71" - 117°07'34,63" Bujur Timur.

Akses menuju lokasi penelitian dapat ditempuh dari Ibu Kota Negara Indonesia, Jakarta, dengan menggunakan transportasi udara menuju Bandara Aji Pangeran Tumenggung (APT) Pranoto di Samarinda. Jarak antara Jakarta dan Samarinda melalui jalur udara sekitar ±1.340 km dengan waktu tempuh rata-rata 2,5 jam. Setelah tiba di Bandara APT Pranoto, perjalanan dapat dilanjutkan menggunakan transportasi darat menuju Kecamatan Loajanan dengan jarak sekitar ±50 km yang dapat ditempuh dalam waktu 1,5-2 jam menggunakan kendaraan roda dua.



Gambar 2 Geologi Regional Daerah Penelitian [18]

Selain itu, akses menuju lokasi penelitian juga dapat ditempuh dari Fakultas Teknik Universitas Mulawarman yang berlokasi di Kota Samarinda. Jarak dari Fakultas Teknik Unmul ke Kecamatan Loajanan sekitar ±32 km dengan waktu tempuh kurang lebih 45 menit menggunakan transportasi darat kendaraan roda dua. Dari Loajanan, perjalanan dilanjutkan menuju area penambangan PT. Insani Baraperkasa di Pit Mahakam Barat melalui jalan perusahaan dengan kendaraan operasional tambang. Peta kesampaian daerah PT. Insani Baraperkasa tercantum pada Gambar 3.



Gambar 3 Kesampaian Daerah

Tahap Persiapan

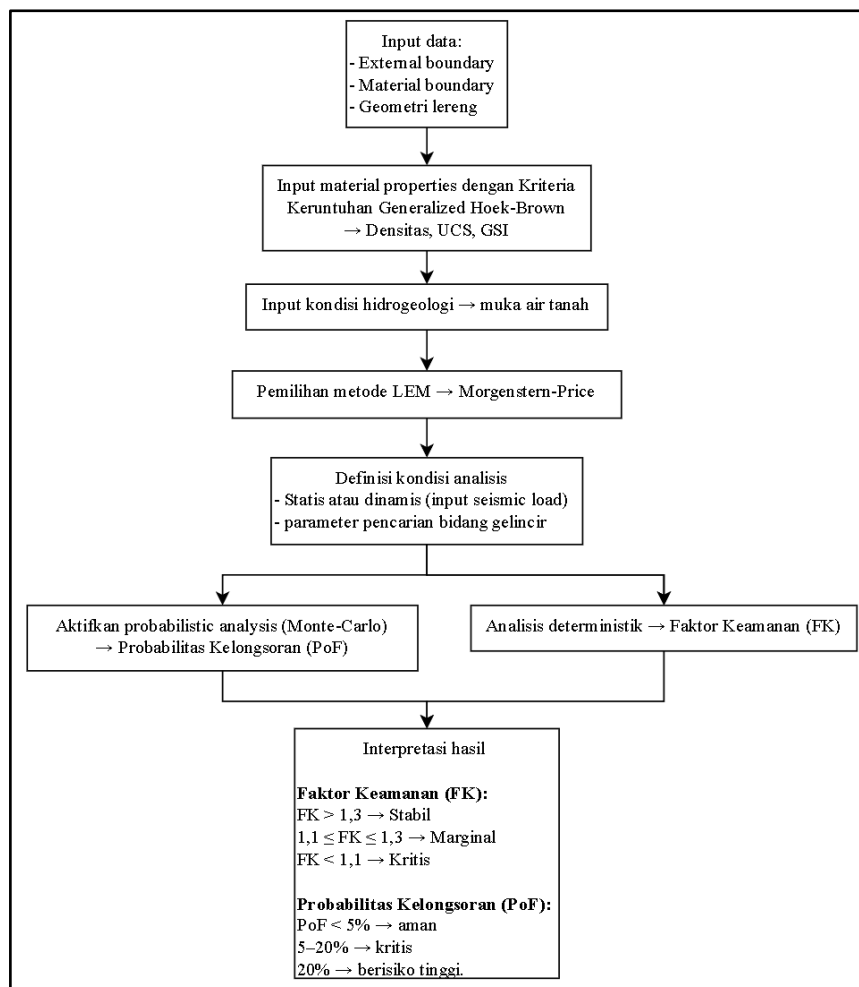
Tahap persiapan yang dilakukan pada penelitian ini meliputi studi literatur untuk mencari literatur yang berhubungan dengan penelitian sehingga dapat membantu dalam pelaksanaan penelitian ini. Selain itu, dilakukan juga pengamatan lapangan dan perumusan masalah.

Tahap Pengumpulan Data

Data-data yang dibutuhkan dalam penelitian ini yakni data sekunder yang menjadi acuan dalam melaksanakan penelitian ini. Data sekunder adalah data yang sudah tersedia di perusahaan sehingga bisa dijadikan standar acuan untuk dilakukan pengolahan data. Data-data tersebut antara lain: Desain Pit Mahakam Barat; data log bor; hasil uji laboratorium; data topografi; muka air tanah; serta nilai *stripping ratio* ekonomis perusahaan pada bulan Maret 2025, yang ditetapkan berdasarkan hasil *forecasting* Harga Batubara Acuan (HBA) Minerba tahun 2025.

Tahap Pengolahan Data

Data yang telah didapatkan dari hasil pengamatan lapangan dan pengumpulan data, selanjutnya dilakukan pengolahan data dengan menggunakan bantuan beberapa perangkat lunak.



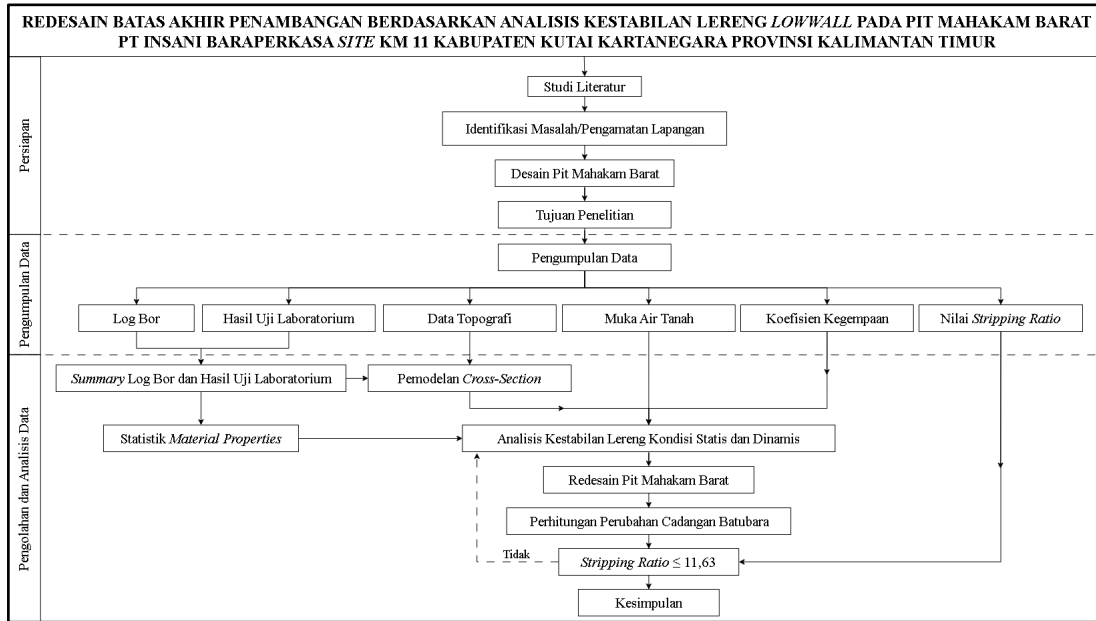
Gambar 4 Langkah-langkah analisis FK dan PoF

Perhitungan cadangan batubara dilakukan dengan bantuan perangkat lunak, melalui tiga proses *reserves*, yaitu:

1. *Reserves sample polygon* yaitu penentuan area yang akan dihitung cadangan batubaranya.
2. *Reserves evaluate sample* yaitu proses memasukkan parameter batubara hilang akibat kegiatan operasional penambangan *coal getting* seperti proses pembersihan *roof* batubara, *finishing floor* batubara dan batubara dengan *true thickness* tertentu yang secara operasional tidak mungkin diambil dengan alat yang tersedia.
3. *Reserves accumulate sample* yaitu proses akumulasi perhitungan cadangan batubara dari 2 proses sebelumnya.

Tahap Analisis dan Pembahasan

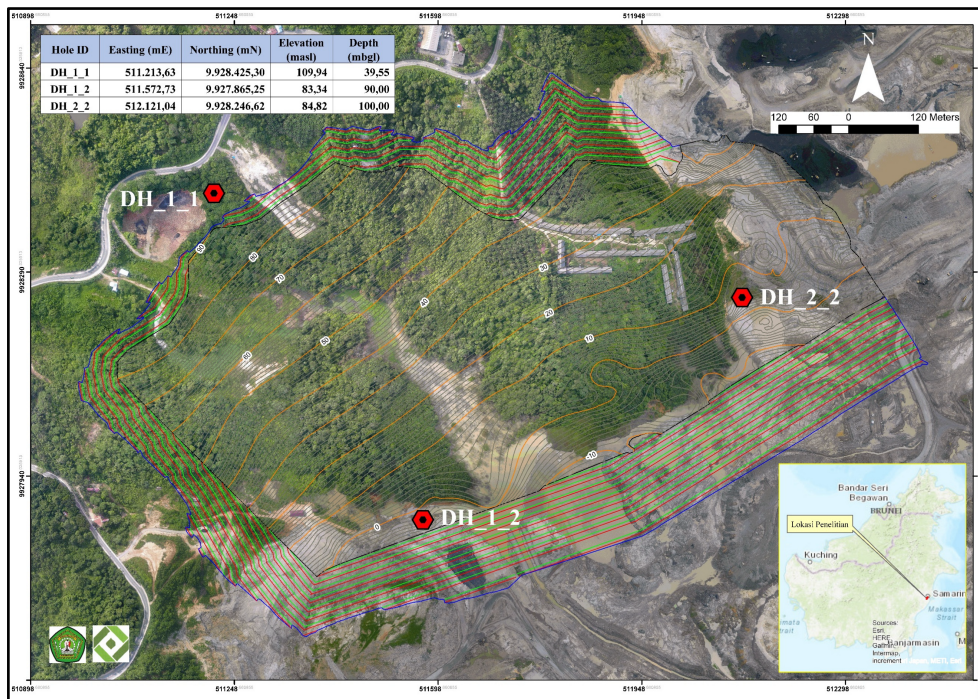
Pada tahap ini dilakukan analisis data setelah tahap pengolahan data. Dengan adanya pertimbangan salah satu faktor pengubah yang mempengaruhi area penambangan, dilakukan analisis lereng pada desain pit untuk selanjutnya dapat dirancang rekomendasi geometri lereng optimal yang memiliki nilai FK dan PoF aman, serta merancang kembali desain pit yang optimal, kemudian dihitung perbandingan hasil cadangan batubara sebelum dan sesudah dilakukannya redesain batas akhir penambangan.



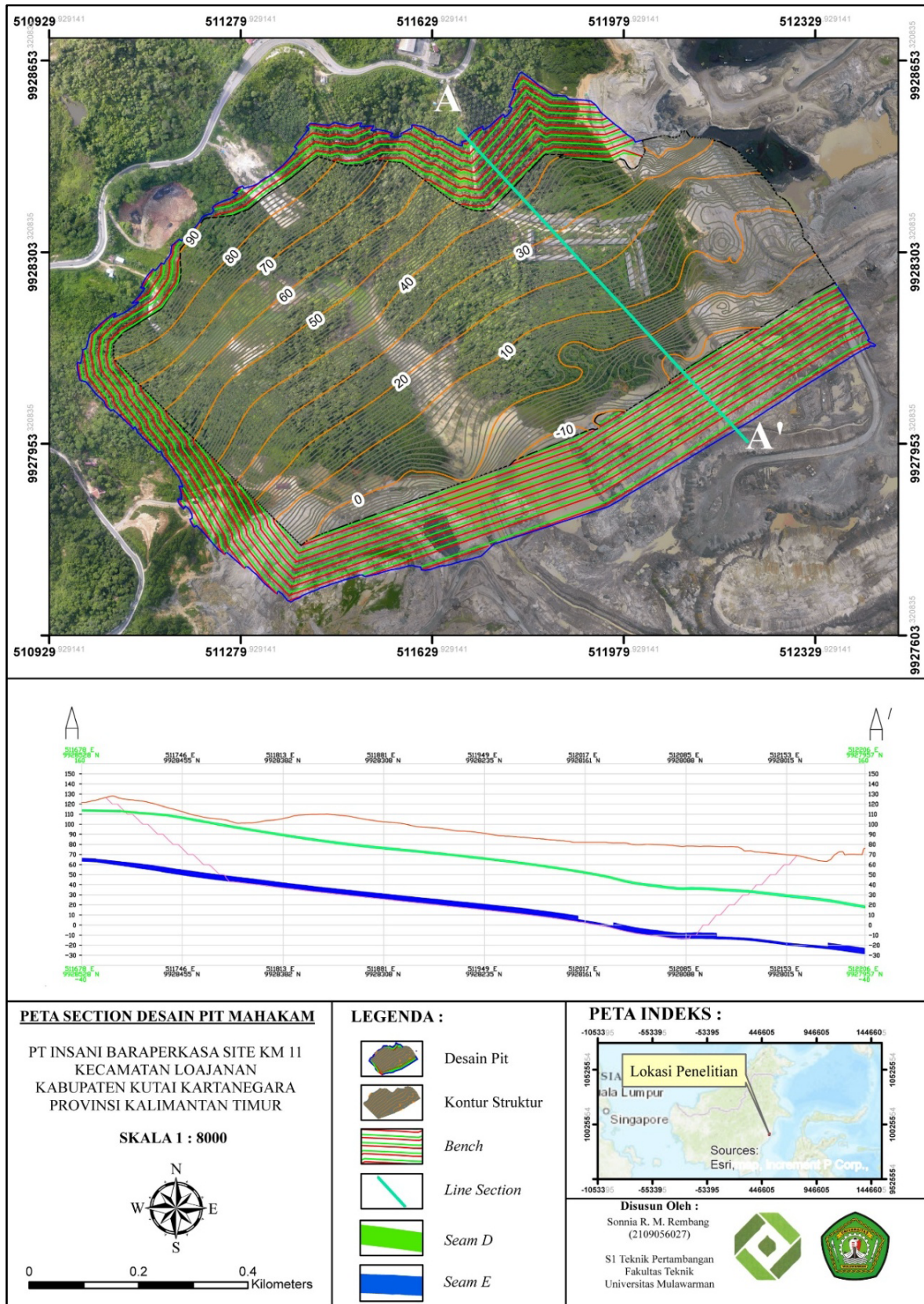
Gambar 5 Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN ANALISIS

Dalam penyusunan model litologi bawah permukaan, data utama yang digunakan berasal dari log bor DH_2_2 yang memiliki koordinat x = 512.121,04 dan y = 9.928.246,61. Untuk meningkatkan akurasi dan representasi kondisi geologi aktual di lapangan, data pendukung dari titik bor DH_1_1 dan DH_1_2 juga dimanfaatkan sebagai referensi tambahan dalam proses pemodelan dan analisis.



Gambar 6 Peta Titik Bor Geoteknik (modifikasi dari Departement Engineering PT Insani Baraperkasa)



Gambar 7 Peta Sayatan Lereng (modifikasi dari Departement Engineering PT Insani Baraperkasa)

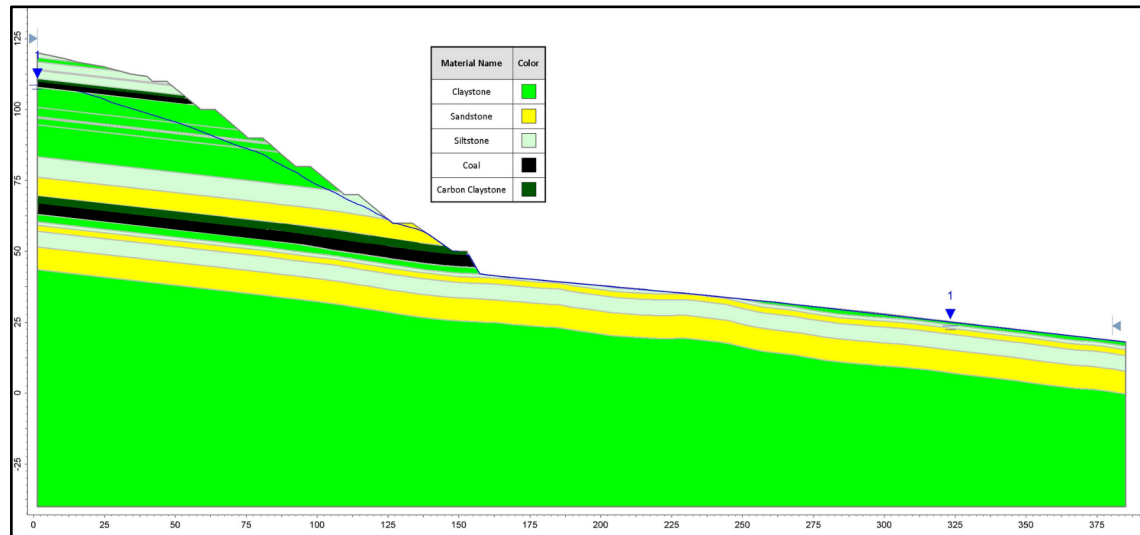
Parameter Geoteknik

Parameter geoteknik yang dapat mempengaruhi kestabilan lereng pada daerah penelitian yaitu sifat fisik dan sifat mekanik material, geometri lereng, pengaruh muka air tanah, serta adanya pengaruh gaya luar berupa faktor kegunaan.

Redesain Batas Akhir Penambangan berdasarkan Re-Analisis Kestabilan Lereng Lowwall pada Pit Mahakam Barat PT Insani Baraperkasa Blok Loa Janan Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur (Sonnia R. M. Rembang, Tommy Trides, Agus Winarno, Ardhan Ismail, Windhu Nugroho)

Litologi dan Hasil Uji Laboratorium

Dalam penelitian ini, data sifat fisik dan mekanik batuan diperoleh dari hasil uji laboratorium PT. Quantus Consultants Indonesia pada tahun 2022 dan CV. Putra Mahatta Nusantara pada tahun 2025. Material batuan penyusun lereng yang dilakukan pengujian laboratorium berupa sampel batupasir, batulanau, batulempung, dan batubara (Gambar 8). Hasil pengujian sifat fisik dan mekanik batuan mencakup nilai densitas serta kuat tekan uniaksial (*Uniaxial Compressive Strength* atau UCS).



Gambar 8 Litologi Penampang A-A'

Untuk dapat mengevaluasi tingkat risiko ketidakstabilan lereng yang disebabkan oleh variasi alami pada parameter-parameter geoteknik, diperlukan pendekatan statistik terhadap sejumlah variabel acak. Tujuan dari pendekatan ini adalah untuk memperoleh nilai faktor keamanan yang tidak hanya bersifat deterministik, tetapi juga mencerminkan distribusi probabilistik berupa peluang kelongsoran. Hasil pengolahan statistik terhadap pengujian laboratorium tersebut disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Statistik Material Batuan

No	Material Name	Mean	Standard Deviation	Relative Min.	Relative Max.
<i>Uniaxial Compressive Strength (kPa)</i>					
1	Claystone	2.459,00	4.611,65	2.214,23	18.524,80
2	Sandstone	830,00	455,60	643,32	352,65
3	Siltstone	2.193,00	1.875,88	2.017,97	4.027,24
4	Coal	12.369,00	3.588,10	5.421,73	4.642,25
5	Carbon Claystone	1.085,00	348,53	348,53	348,53
<i>Density (kN/m³)</i>					
1	Claystone	18,21	2,08	6,24	2,90
2	Sandstone	18,39	0,79	1,44	1,62
3	Siltstone	19,55	2,16	3,07	5,52
4	Coal	11,92	0,22	0,25	0,34
5	Carbon Claystone	15,35	0,74	0,74	0,74

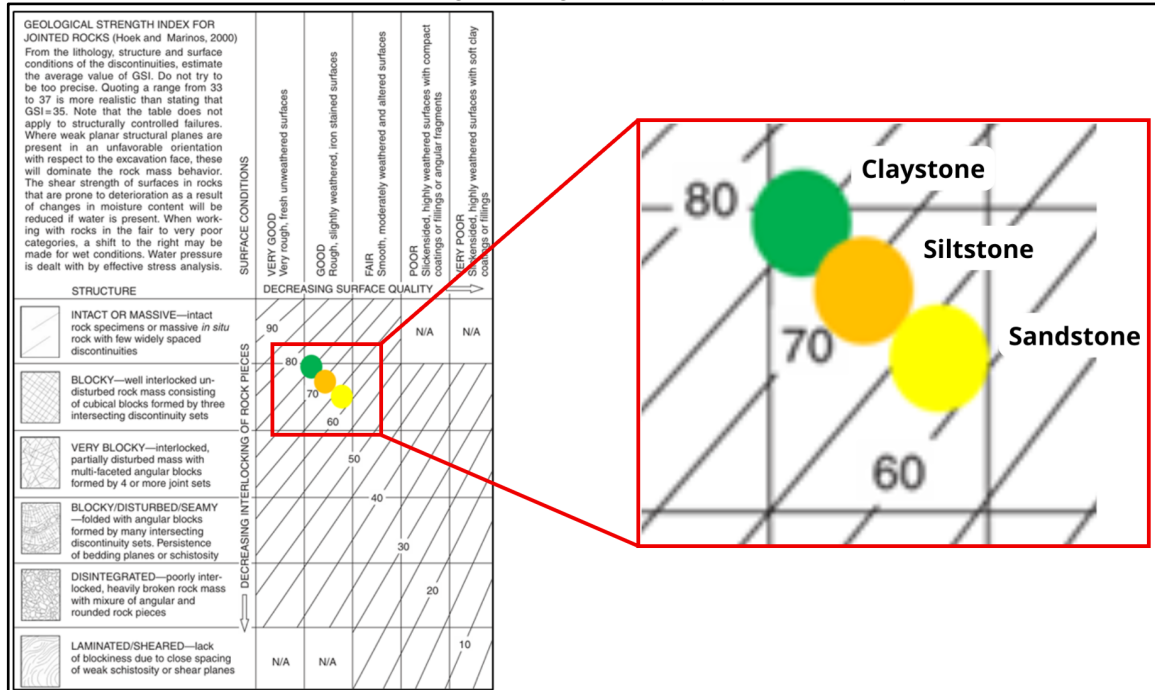
Muka Air Tanah

Berdasarkan hasil pengukuran, muka air tanah pada titik DH_2_2 tercatat berada pada elevasi 83,43 meter di atas permukaan laut, sedangkan pada titik DH_2_1 tercatat pada elevasi 110,30 meter di atas permukaan laut. Data tersebut tercantum dalam laporan penyelidikan hidrogeologi oleh PT. Quantus Consultants Indonesia yang diperoleh dari Departemen Engineering PT. Insani Baraperkasa.

Nilai Geological Strength Index (GSI)

Material *claystone* memiliki nilai GSI antara 60 hingga 90, sedangkan material *siltstone* menunjukkan kisaran nilai yang relatif sama, yaitu 60 hingga 90. Sementara itu, material *sandstone* memiliki kisaran nilai GSI antara 55 hingga 80. Nilai rata-rata GSI yang digunakan dalam analisis ditentukan berdasarkan hasil perhitungan dari kisaran tersebut, dan dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Nilai Geological Strength Index (GSI) (modifikasi dari [8])



Nilai Disturbance factor (D)

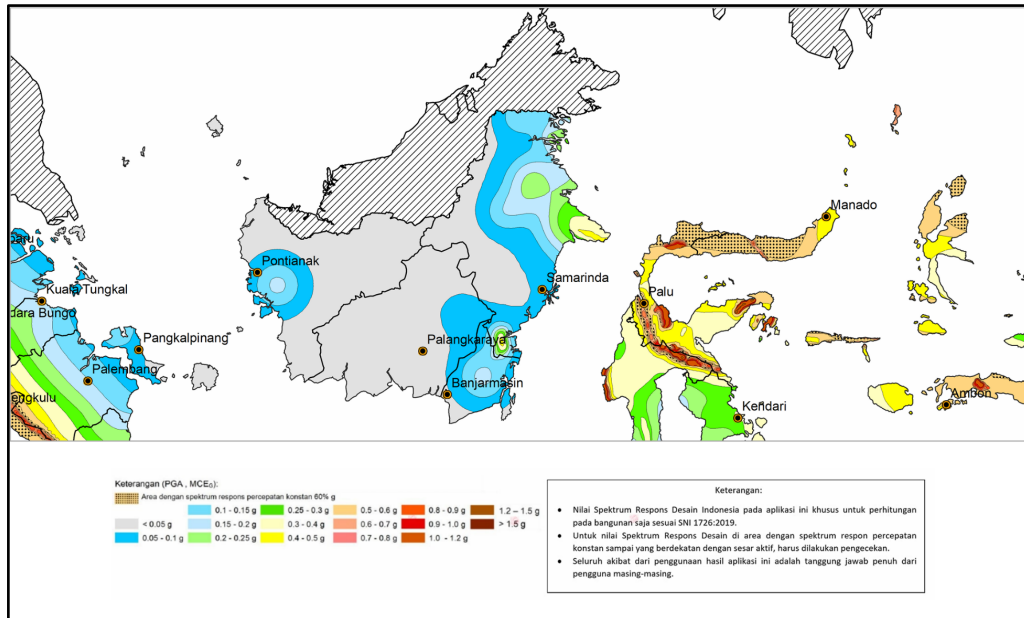
Pembezaian material pada area penelitian dilakukan menggunakan peralatan mekanis, yaitu *excavator* dan *bulldozer*. Berdasarkan metode pembezaian tersebut, kondisi lereng tambang terbuka mengalami tingkat gangguan tertentu pada massa batuan. Tingkat gangguan ini dinyatakan melalui nilai *Disturbance factor (D)* sebesar 0,70, yang merepresentasikan efek dari aktivitas mekanis terhadap penurunan kualitas massa batuan akibat rekahan tambahan atau pembezaian struktur[8]. Nilai ini diperoleh berdasarkan kondisi aktual di lapangan dan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Nilai Disturbance factor (D) (modifikasi dari [8])

	Peledakan skala kecil pada lereng rekayasa sipil menghasilkan kerusakan massa batuan yang relatif kecil, terutama jika digunakan peledakan terkendali seperti yang ditunjukkan pada sisi kiri foto. Namun, pelepasan tegangan tetap menyebabkan sedikit gangguan.	D = 0,7 Good Blasting
		D = 1,0 Poor Blasting
	Lereng tambang terbuka skala sangat besar mengalami gangguan yang signifikan akibat peledakan produksi yang berat serta pelepasan tegangan akibat pengangkatan lapisan penutup.	D = 1,0 Production Blasting
	Pada beberapa jenis batuan yang lebih lunak, penggalian dapat dilakukan dengan cara menggaruk (<i>ripping</i>) dan mendorong (<i>dozing</i>), sehingga tingkat kerusakan pada lereng menjadi lebih kecil	D = 0,7 Mechanical Excavtion

Nilai Koefisien Gempa (*Seismic Load*)

Lokasi penelitian berada pada wilayah dengan nilai Percepatan Tanah Puncak (*Peak Ground Acceleration* – PGA) Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Rata-rata Geometrik (*Maximum Considered Earthquake Geometric Mean* – MCEg) sebesar 0,063g. Nilai MCEg ini merepresentasikan percepatan maksimum yang berpotensi terjadi pada batuan dasar akibat gempa rencana, sesuai dengan standar nasional yang berlaku[14]. Parameter tersebut digunakan sebagai salah satu masukan penting dalam analisis kestabilan lereng, khususnya untuk mempertimbangkan pengaruh beban dinamis akibat aktivitas seismik terhadap keamanan lereng tambang.



Gambar 9 Percepatan Tanah Puncak (PGA) Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Rata-rata Geometrik (MCEg)[14]

Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan menerapkan metode *Limit Equilibrium Method* (LEM) Morgenstern-Price menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* melalui bantuan perangkat lunak. Proses analisis dilakukan terlebih dahulu terhadap lereng *lowwall* berdasarkan desain awal Pit Mahakam Barat PT. Insani Baraperkasa, kemudian dilanjutkan dengan evaluasi terhadap lereng hasil perbaikan geometri yang direkomendasikan.

Tabel 4 Hasil Pengolahan dan Analisis Desain Awal dan Rekomendasi

Geometri dan Analisis		Lereng Desain Awal	Lereng Rekomendasi
Sudut (°)	Coal	65°	60°
	Sandstone	37°	35°
	Claystone	43°-46°	40°
	Siltstone	41°	40°
Tinggi (m)	Coal	8	8
	Sandstone	9	10
	Claystone	10	10
	Siltstone	10	10
Lebar berm (m)	Coal	4	5
	Sandstone	8	7
	Claystone	5	5
	Siltstone	5	5
FK Statis		1,22	1,58
FK Dinamis		1,06	1,41
PoF Statis		13,06%	0
PoF Dinamis		52,55%	1,12%

Analisis Kestabilan Lereng Desain Awal

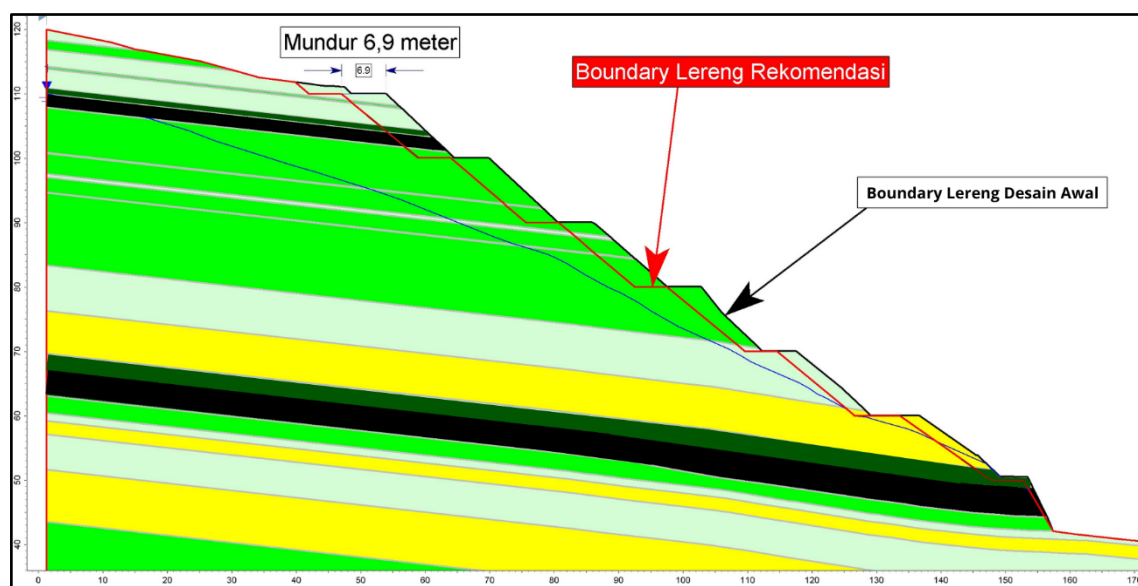
Analisis kestabilan lereng pada desain awal Pit Mahakam Barat PT. Insani Baraperkasa menunjukkan bahwa geometri lereng tunggal bervariasi sesuai dengan karakteristik masing-masing litologi. Sudut kemiringan lereng untuk litologi batubara adalah 65° , sedangkan untuk litologi batupasir (*sandstone*) sebesar 37° , litologi batulanau (*siltstone*) sebesar 41° , dan litologi batulempung (*claystone*) berkisar antara 43° hingga 46° . Lereng tunggal dirancang dengan tinggi jenjang (*bench*) 10 meter dan lebar *berm* 5 meter pada litologi *claystone* dan *siltstone*, tinggi jenjang (*bench*) 9 meter dan lebar *berm* 8 meter pada litologi *sandstone*, dan tinggi jenjang (*bench*) 8 meter dan lebar *berm* 4 meter pada litologi *coal*. Konfigurasi geometri ini menghasilkan lereng keseluruhan (*overall slope*) dengan sudut sebesar 33° dan total tinggi lereng keseluruhan mencapai 68 meter.

Berdasarkan hasil analisis terhadap geometri lereng pada desain awal Pit Mahakam Barat PT. Insani Baraperkasa, diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) statis sebesar 1,22 dan Probabilitas Kelongsoran (PoF) sebesar 13,06%. Mengacu pada standar yang tercantum dalam Keputusan Menteri ESDM nomor 1827 K/30/MEM/2018 [10], nilai minimum FK statis dengan tingkat keparahan longsor kategori tinggi untuk lereng keseluruhan adalah 1,30, sementara nilai maksimum PoF yang diperbolehkan adalah 5%. Selain itu, analisis kondisi dinamis menunjukkan bahwa nilai FK hanya mencapai 1 dengan PoF sebesar 52,55%, yang juga tidak memenuhi kriteria minimum FK dinamis sebesar 1,10 dan batas maksimum PoF sebesar 5% sebagaimana ditetapkan dalam regulasi tersebut. Lereng *lowwall* pada desain awal pit Mahakam Barat PT. Insani Baraperkasa diklasifikasikan dalam kondisi tidak stabil dan oleh karena itu perlu dilakukan perancangan ulang geometri lereng untuk meningkatkan stabilitasnya.

Analisis Kestabilan Lereng Rekomendasi

Rekomendasi perbaikan geometri lereng *lowwall* secara menyeluruh dilakukan melalui penyesuaian konfigurasi lereng berdasarkan karakteristik masing-masing litologi untuk memperoleh desain yang optimal dengan tetap memperhatikan aspek keselamatan. Untuk litologi batubara, disarankan penerapan geometri lereng dengan sudut kemiringan 60° , tinggi jenjang (*bench*) 8 meter, dan lebar *berm* 5 meter. Pada litologi batupasir, direkomendasikan geometri dengan sudut lereng 35° , tinggi *bench* 10 meter, dan lebar *berm* 7 meter. Sementara itu, untuk litologi batulempung dan batulanau, konfigurasi yang disarankan mencakup sudut lereng 40° , tinggi *bench* 10 meter, dan lebar *berm* 5 meter. Kombinasi dari parameter-parameter ini menghasilkan geometri lereng keseluruhan (*overall slope*) dengan sudut kemiringan sebesar 32° , yang diharapkan mampu meningkatkan kestabilan lereng.

Berdasarkan hasil analisis terhadap geometri lereng rekomendasi, diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) statis sebesar 1,46 dan nilai Probabilitas Kelongsoran (PoF) sebesar 0%. Mengacu pada standar yang tercantum dalam Kepmen ESDM nomor 1827 K/30/MEM/2018 [10], nilai minimum FK statis dengan tingkat keparahan longsor kategori tinggi untuk lereng keseluruhan adalah 1,30 dengan batas maksimum PoF sebesar 5%. Selain itu, analisis terhadap kondisi dinamis menunjukkan nilai FK sebesar 1,31 dan PoF sebesar 1,12%, yang juga memenuhi kriteria standar minimum FK dinamis sebesar 1,10 dan PoF maksimum sebesar 5%. Dengan demikian, redesain lereng *lowwall* berdasarkan rekomendasi geometri lereng dapat dikategorikan stabil dan layak secara teknis.



Gambar 10 Perbandingan *Boundary* Lereng Desain Awal dan Lereng Rekomendasi

Estimasi Cadangan Batubara

Hasil rekomendasi geometri lereng dapat berpengaruh terhadap nilai *stripping ratio* akibat perubahan jumlah volume *coal* dan *overburden*. Rekomendasi geometri lereng untuk dilakukan redesain menunjukkan *boundary* yang berbeda yang kemudian perubahan pada geometri lereng tersebut dimodelkan dengan bantuan perangkat lunak. Pemodelan ini bertujuan untuk mendukung analisis perhitungan cadangan batubara. Batas geometri lereng hasil rekomendasi dalam redesain memungkinkan adanya estimasi peningkatan volume batubara dan *overburden*. Hal ini dianalisis melalui perbandingan nilai *stripping ratio* antara desain awal dengan hasil redesain, dengan tetap memperhatikan aspek faktor keamanan serta keselamatan kerja. Perbandingan volume dari kedua desain tersebut disajikan dalam Tabel 5 berikut.

Tabel 5 Perbandingan Volume Batubara dan *Overburden* Hasil Redesain

Volume	Coal (MT)	Overburden (BCM)	SR
Desain Awal	4.520.898,73	43.616.288,13	9,65
Redesain	4.534.948,89	43.904.961,41	9,68
Selisih	14.050,16	288.673,28	

Berdasarkan hasil evaluasi cadangan batubara pada desain awal Pit Mahakam Barat, diperoleh estimasi tonase batubara sebesar 4.520.898,73 MT dengan volume *overburden* mencapai 43.616.288,13 m³, yang menghasilkan nilai *stripping ratio* sebesar 9,65. Sementara itu, hasil analisis terhadap redesain geometri lereng *lowwall* berdasarkan rekomendasi menunjukkan adanya peningkatan estimasi tonase batubara sebesar 14.050,16 MT menjadi total 4.534.948,89 MT. Volume *overburden* juga mengalami peningkatan sebesar 288.673,28 m³, sehingga total volume *overburden* pada desain hasil redesain menjadi 43.904.961,41 m³. Perubahan geometri lereng tersebut menyebabkan nilai *stripping ratio* meningkat menjadi 9,68 akibat pergeseran lereng sejauh 6,90 meter ke arah belakang. Meskipun terjadi kenaikan *stripping ratio*, nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimal standar perusahaan, yaitu sebesar 11,31, sehingga batas akhir penambangan hasil redesain tetap tergolong ekonomis dan layak untuk dieksploitasi. Pemodelan perbandingan lereng desain awal Pit Mahakam Barat dengan hasil redesain terhadap lereng *lowwall* diilustrasikan oleh penampang (*cross-section*) berikut.



Gambar 11 Peta *Section* Redesain Pit Mahakam Barat

KESIMPULAN

Lereng *lowwall* pada desain awal dalam kondisi statis memiliki Faktor Keamanan (FK) 1,22 dan Probabilitas Kelongsoran (PoF) 13,06%, yang termasuk kategori kritis. Geometri lereng untuk litologi batubara dengan sudut 60°, tinggi jenjang 8 m, dan lebar *berm* 5 m; batupasir dengan sudut 35°, tinggi 10 m, dan lebar

7 m; serta batulempung dan batulanau dengan sudut 40° , tinggi 10 m, dan lebar 5 m. Parameter ini menghasilkan geometri keseluruhan dengan sudut 32° , yang memberikan FK 1,41 dan PoF 1,12% pada kondisi dinamis (stabil). Redesain menghasilkan tambahan cadangan batubara 14.050,16 MT, dari 4.520.898,73 MT menjadi 4.534.948,89 MT, serta peningkatan *overburden* 288.673,28 BCM, dari 43.616.288,13 BCM menjadi 43.904.961,41 BCM. *Stripping ratio* juga meningkat dari 9,65 menjadi 9,68, tetapi masih di bawah SR ekonomis maksimum perusahaan yaitu 11,31, sehingga hasil redesain dinyatakan layak secara ekonomis.

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas kasih dan penyertaan-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada Mama, Papa, adik-adik, dan seluruh keluarga besar atas doa serta dukungannya. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada seluruh pihak, baik praktisi, akademisi, serta teman-teman yang telah banyak membantu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. H. Afifa, "Analisis Kestabilan Lereng Highwall dan Lowwall Menggunakan Limit Equilibrium Method pada Pit Penambangan Batubara PT B, Kalimantan Timur," UIN: Jakarta, 2022.
- [2] R. K. Ali, dkk., "Analisis Peningkatan Faktor Keamanan Lereng pada Areal Bekas Tambang Pasir dan Batu di Desa Ngablak, Kecamatan Cluwak, Kabupaten Pati," *Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro*, vol. 5, no. 7, 2017.
- [3] I. Arif, *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama: Jakarta, 2016.
- [4] A. Bachtiar, *Slide Kuliah Geologi Indonesia. Prodi Teknik Geologi. FIKTM-ITB: Bandung*, 2006.
- [5] B. M. Das, *Fundamentals Of Geotechnical Engineering (Third Edition)*. CI Engineering, 2007. ISBN: 978-0-495-29572-3.
- [6] H. Gouw, *Analisa Stabilitas Lereng Limit Equilibrium vs Finite Element Method.*, Universitas Bina Nusantara: Jakarta, 2015.
- [7] W. Hustrulid, M. Kuchta, and R. Martin, *Open pit Mine Planning and Design Volume 1-Fudamentals 3rd Edition*. Taylor & Francis: London, 2013.
- [8] B. Hoek, "The Hoek-Brown Failure Criterion and GSI-2018 Edition," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018.
- [9] G. Jevino, dkk., "Perancangan Pit S17GS pada PT. Kitadin Site Embalut Kecamatan Tenggarong Seberang Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur," *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, vol. 7, no. 2, 2019.
- [10] Kepmen ESDM RI No. 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik.
- [11] K. Kubra, "Optimalisasi Desain Geometri Lereng Lowwall untuk Mengurangi Biaya Pengupasan Lapisan Tanah Penutup". UIN: Jakarta.
- [12] R. Rahman, "Pengaruh Parameter Geoteknik dari Hasil Pengeboran terhadap Desain Tambang PT. Insani Baraperkasa Site Km 11, Kabupaten Kutai Kartangara," Universitas Mulawarman: Samarinda, 2025.
- [13] Rai, Made A, dkk. 2014. *Mekanika Batuan*. ITB: Bandung.
- [14] Standar Nasional Indonesia, (SNI 1726:2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, 2012.
- [15] Standar Nasional Indonesia, (SNI 5015:2019). *Pedoman Pelaporan Sumberdaya dan Cadangan Batubara*. Badan Standardisasi Nasional, 2019.
- [16] O. K. H. Steffen, L. F. Contreras, P. J. Terbrugge, dan J. Venter, "A Risk Evaluation Approach for Pit Slope Design," *The 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd US-Canada Rock Mechanics Symposium: San Francisco*, 2008.
- [17] W. Sulistyana, *Perencanaan Tambang*, Anugrah Print: Yogyakarta, 2010.
- [18] Supriatna, dkk., *Peta Geologi Lembar Samarinda, Kalimantan*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi: Bandung, 1995.
- [19] A. S. Syaifuddin, "Optimasi Produksi Penambangan dari Aspek Perancangan Geometri Lereng Kuari Tanah Liat Mliwang Barat PT. Semen Indonesia (Persero) TBK. Kabupaten Tuban, Jawa Timur". UIN: Jakarta, 2019.
- [20] Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2009 Tentang Pertambangan Mineral dan Batubara.
- [21] A. Winarno, dkk., "Mineral and Geochemistry Study of Lower Kutai Basin Coal East Kalimantan," IOP Publishing, 2019.
- [22] D. C. Wyllie & C. W. Mah, *Rock Slope Engineering: Civil And 56 Mining*, 4th Edition. Spon Press: London. 2004, ISBN: 0-203-49908-5.