

OPTIMASI BATAS PIT BERDASARKAN PERTIMBANGAN GEOTEKNIK DAN FINANSIAL PADA PT BUKIT ASAM TBK

OPTIMIZATION OF PIT LIMITS BASED ON GEOTECHNICAL AND FINANCIAL CONSIDERATIONS AT PT BUKIT ASAM TBK

I. F. Dani¹, E. Ibrahim^{2*}, M. T. Toha³

¹⁻³Program Studi Magister Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya

¹⁻³Jalan Padang Selasa No. 524 Bukit Besar Palembang

e-mail: *2eddyibrahim@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK

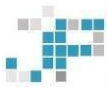
Perencanaan tambang batubara terbuka memerlukan integrasi kajian geoteknik dan finansial untuk menghasilkan batas pit yang aman serta layak secara ekonomi. Penelitian ini dilakukan pada Tambang Batubara Pit X Barat PT Bukit Asam, Tbk dengan tujuan mengoptimalkan batas pit berdasarkan kestabilan lereng dan kelayakan finansial serta mengevaluasi dampak risiko transisi energi terhadap keekonomian tambang. Optimasi pit dilakukan menggunakan algoritma Lerchs–Grossmann (LG) berbasis *block model* untuk memperoleh batas pit optimum. Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan metode kesetimbangan batas untuk menentukan nilai Faktor Keamanan (FK) dan *Probability of Failure* (PoF) dengan mengacu pada Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Evaluasi finansial dilakukan menggunakan metode Discounted Cash Flow (DCF) dengan parameter *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Break Even Stripping Ratio* (BESR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pit optimal (OPT 1) memiliki *Stripping Ratio* (SR) sebesar 5,58 dengan nilai BESR sebesar 11,63 pada kondisi non-transisi. Geometri lereng yang digunakan meliputi tinggi jenjang 8 m, sudut jenjang 45°, lebar berm 15 m, *rest bench* 30 m, dan lebar jalan 30 m dengan sudut keseluruhan lereng 6,77–19,61°. Analisis kestabilan lereng menghasilkan nilai FK statis sebesar 1,395 dengan PoF 3,27% serta FK dinamis sebesar 1,272 dengan PoF 4,89%. Evaluasi finansial menunjukkan nilai NPV sebesar USD 158.345.272 dan IRR sebesar 32,93%. Pada skenario transisi energi dengan Harga Batubara Acuan (HBA) USD 74/ton, nilai BESR menurun menjadi 9,38. Meskipun terjadi penurunan fleksibilitas ekonomi, kegiatan penambangan tetap layak karena nilai SR aktual masih lebih kecil dibandingkan BESR.

Kata kunci: optimasi pit, kestabilan lereng, analisis finansial tambang, *stripping ratio*, transisi energi

ABSTRACT

Open-pit coal mine planning requires the integration of geotechnical and financial aspects to produce a safe and economically feasible pit boundary. This research was conducted at Pit X Barat Coal Mine of PT Bukit Asam Tbk with the objective of optimizing the pit limit based on slope stability and financial feasibility, as well as evaluating the impact of energy transition risks on mine economics. Pit optimization was carried out using the Lerchs–Grossmann (LG) algorithm based on a block model to determine the optimal pit boundary. Slope stability analysis was conducted using the Limit Equilibrium Method to determine the Factor of Safety (FoS) and Probability of Failure (PoF) referring to the Indonesian Ministry of Energy and Mineral Resources Decree No. 1827 K/30/MEM/2018. Financial evaluation was performed using the Discounted Cash Flow (DCF) method with parameters including Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Break Even Stripping Ratio (BESR). The results indicate that the optimal pit (OPT 1) has a Stripping Ratio (SR) of 5.58 with a BESR value of 11.63 under the non-energy transition scenario. The applied slope geometry consists of an 8 m bench height, 45° bench angle, 15 m berm width, 30 m rest bench, and 30 m haul road width, resulting in an overall slope angle ranging from 6.77° to 19.61°. The slope stability analysis produced a static FoS of 1.395 with a PoF of 3.27% and a dynamic FoS of 1.272 with a PoF of 4.89%. The financial evaluation resulted in an NPV of USD 158,345,272 and an IRR of 32.93%. Under the energy transition scenario with a Coal Benchmark Price (HBA) of USD 74/ton, the BESR decreases to 9.38. Despite the reduction in economic flexibility, the mining operation remains feasible because the actual SR remains lower than the BESR.

Keywords: pit optimization, slope stability, financial feasibility, break even stripping ratio, energy transition



PENDAHULUAN

Perencanaan tambang terbuka memerlukan pendekatan multidisiplin untuk memastikan kegiatan penambangan dapat berlangsung secara aman dan ekonomis [1]. Salah satu aspek paling krusial dalam perencanaan tambang terbuka adalah penentuan batas pit optimal, yang akan menentukan jumlah cadangan tertambang, geometri lereng serta risiko geoteknik yang mungkin terjadi selama umur tambang [2].

Pada praktiknya, optimasi pit sering kali dilakukan berdasarkan parameter ekonomi, seperti harga batubara, biaya penambangan dan *nilai Net Present Value* (NPV) [3]. Namun, pendekatan tersebut berpotensi mengabaikan keterbatasan geoteknik, khususnya kestabilan lereng, yang dapat meningkatkan risiko longsor dan mengancam keselamatan operasional [4]. Sebaliknya, penerapan desain lereng yang terlalu konservatif tanpa mempertimbangkan aspek ekonomi dapat menyebabkan berkurangnya cadangan tertambang dan menurunkan nilai keekonomian proyek [5].

Beberapa penelitian terkini mulai menekankan pentingnya integrasi aspek geoteknik dalam perencanaan *pit ultimate* untuk meminimalkan risiko kegagalan lereng tanpa menurunkan nilai ekonomi tambang. Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa pendekatan terintegrasi antara geoteknik dan optimasi ekonomi menjadi kebutuhan dalam perencanaan tambang terbuka modern [6-9]. Oleh karena itu, terdapat celah penelitian (research gap) dalam penerapan parameter geoteknik sebagai batasan langsung pada proses optimasi *pit ultimate* yang terintegrasi dengan evaluasi finansial. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengintegrasikan analisis geoteknik, optimasi pit berbasis algoritma Lerchs-Grossmann dan analisis finansial dalam satu kerangka perencanaan batas pit.

Penelitian dilakukan pada Pit X Barat PT Bukit Asam Tbk yang memiliki kondisi geologi dan geoteknik kompleks, sehingga memerlukan pendekatan optimasi pit yang tidak hanya berorientasi pada keuntungan ekonomi, tetapi juga memenuhi prinsip keselamatan lereng tambang. Tujuan penelitian ini yaitu: (1) menentukan batas pit optimal berdasarkan integrasi aspek geoteknik dan finansial; (2) mengevaluasi kestabilan lereng hasil optimasi berdasarkan kriteria regulasi; (3) menganalisis kelayakan ekonomi penambangan batubara pada Pit X Barat.

Penelitian ini memiliki kebaruan (*novelty*) pada penerapan batasan geoteknik secara eksplisit ke dalam proses optimasi pit berbasis nilai ekonomi. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang cenderung menitikberatkan optimasi pada parameter finansial semata, penelitian ini mengintegrasikan kriteria faktor keamanan dan *probability of failure* sebagai *constraint* utama dalam penentuan batas *pit ultimate*. Pendekatan ini memungkinkan diperolehnya desain pit yang tidak hanya menguntungkan secara

ekonomi, tetapi juga memenuhi prinsip keselamatan dan keberlanjutan operasi tambang terbuka.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada Tambang Batubara Pit X Barat PT Bukit Asam Tbk yang berlokasi di Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatera Selatan. Lokasi penelitian berada di dalam wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP) PT Bukit Asam Tbk.

Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer digunakan untuk menganalisis kajian geoteknik seperti kohesi, sudut geser dalam, berat isi, data geometri lereng, serta kondisi aktual lereng. Data sekunder digunakan untuk membuat pit optimasi dan kajian finansial yang meliputi data eksplorasi (log bor dan kualitas batubara), model geologi, *block model*, data produksi, topografi, foto udara, biaya penambangan, dan harga jual batubara.

Data primer dalam penelitian ini digunakan sebagai dasar penentuan parameter geoteknik aktual lereng yang menjadi input utama dalam analisis kestabilan menggunakan Metode Kestimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method/LEM*). Parameter kohesi, sudut geser dalam, berat isi, serta geometri lereng aktual diperoleh dari pengujian laboratorium dan observasi lapangan untuk merepresentasikan kondisi nyata material penyusun lereng Pit X Barat.

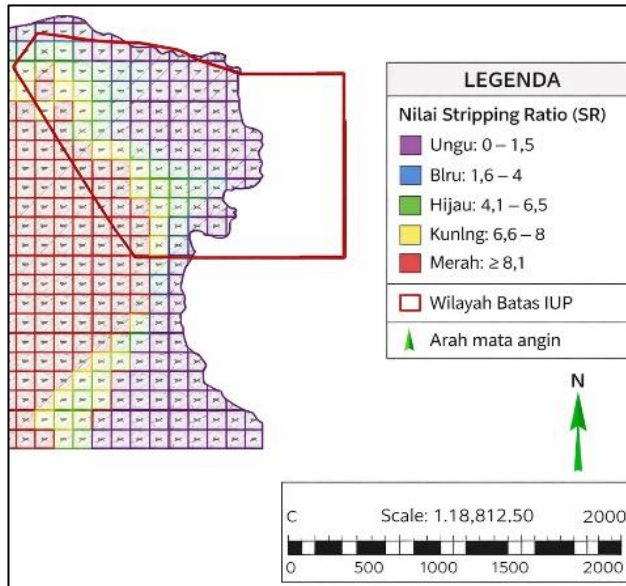
Sementara itu, data sekunder digunakan sebagai dasar pemodelan geologi, penyusunan *block model*, estimasi cadangan, serta perhitungan nilai ekonomi setiap blok dalam proses optimasi pit. Data eksplorasi, model geologi, data produksi, biaya penambangan, dan harga jual batubara berperan dalam perhitungan nilai blok yang menjadi dasar algoritma Lerchs-Grossmann dan analisis kelayakan finansial menggunakan metode DCF.

Pemodelan Geologi dan *Block Model*

Pemodelan geologi dan *block model* merupakan tahapan fundamental dalam estimasi cadangan dan perencanaan tambang terbuka. Pemodelan geologi disusun berdasarkan data eksplorasi yang meliputi koordinat *collar* dan elevasi lubang bor, kedalaman pemboran, log litologi, korelasi *seam* batubara, ketebalan lapisan, serta parameter kualitas batubara (analisis proksimat, nilai kalor, total sulfur, kadar abu, dan kadar air). Data struktur geologi seperti *strike* dan *dip*, serta data topografi, turut digunakan untuk memastikan ketelitian spasial model [10, 11].

Data tersebut kemudian diolah untuk membangun model geologi tiga dimensi yang merepresentasikan penyebaran *seam* batubara dan *interburden*. Selanjutnya, dilakukan pemodelan *block model* dengan membagi endapan ke dalam blok-blok berukuran tertentu yang memuat atribut

volume, densitas, kualitas batubara, dan nilai ekonomi (Gambar 1). *Block model* ini menjadi dasar dalam proses optimasi pit menggunakan algoritma Lerchs–Grossmann (LG) serta dalam estimasi cadangan tertambang.



Gambar 1. Model geologi dan *block model* Pit X Barat

Optimasi Pit

Optimasi pit dilakukan dengan menerapkan *algoritma Lerchs–Grossmann* yang secara luas digunakan dalam penentuan batas *pit ultimate* berdasarkan nilai ekonomi blok dan batasan teknis [3, 12]. Algoritma Lerchs–Grossmann (LG) dipilih karena merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam penentuan batas *pit ultimate* berbasis nilai ekonomi blok [3, 8].

Kelebihan algoritma ini adalah kemampuannya dalam menentukan kombinasi blok yang menghasilkan nilai ekonomi maksimum dengan mempertimbangkan batasan geometri lereng [8]. Namun, algoritma LG pada dasarnya hanya mempertimbangkan aspek ekonomi tanpa memperhitungkan parameter geoteknik seperti FK dan PoF secara langsung. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan integrasi batasan geoteknik sebagai *constraint* tambahan sehingga hasil optimasi tidak hanya maksimum secara ekonomi tetapi juga memenuhi kriteria kestabilan lereng [13].

Optimasi pit dilakukan menggunakan perangkat lunak *Minescape* dengan pendekatan *algoritma Lerchs–Grossmann*. Setiap blok pada *block model* diberikan nilai ekonomi berdasarkan selisih antara pendapatan dan biaya penambangan. Batasan geoteknik diterapkan dalam proses optimasi untuk memastikan desain pit yang dihasilkan memenuhi kriteria kestabilan lereng.

Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng dalam penelitian ini mengacu pada konsep mekanika batuan dan tanah dengan pendekatan Metode Kesetimbangan Batas yang umum digunakan pada tambang terbuka [1, 4]. *Limit Equilibrium Method* (LEM) digunakan karena merupakan metode yang paling umum diterapkan dalam analisis kestabilan lereng tambang terbuka dan direkomendasikan dalam berbagai pedoman desain lereng [1, 2].

Kelebihan LEM adalah kemampuannya dalam menghitung Faktor Keamanan secara relatif sederhana dengan mempertimbangkan parameter kohesi, sudut geser dalam, dan berat isi material [4]. Keterbatasan metode ini adalah asumsi bidang gelincir yang telah ditentukan serta tidak mempertimbangkan deformasi material secara kontinu seperti pada metode numerik. Meskipun demikian, LEM tetap dipilih karena kesesuaiannya dengan standar regulasi dan kemampuannya dalam analisis probabilistik melalui perhitungan *Probability of Failure* (PoF) [5, 14].

Analisis kestabilan lereng dilakukan menggunakan Metode Kesetimbangan Batas dengan bantuan perangkat lunak *GeoStudio*. Analisis dilakukan pada kondisi statis dan dinamis untuk memperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) dan *Probability of Failure* (PoF). Parameter geoteknik yang digunakan mengacu pada hasil pengujian laboratorium dan evaluasi lapangan. Hasil analisis dibandingkan dengan kriteria kestabilan lereng berdasarkan Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018.

Analisis Finansial

Analisis finansial dilakukan menggunakan pendekatan arus kas terdiskonto (*Discounted Cash Flow/DCF*) yang merupakan metode standar dalam evaluasi kelayakan investasi pertambangan [14, 15]. Metode *Discounted Cash Flow* dipilih karena mampu merepresentasikan nilai waktu dari uang (*time value of money*) dan memberikan gambaran kelayakan proyek tambang dalam jangka panjang melalui parameter NPV dan IRR.

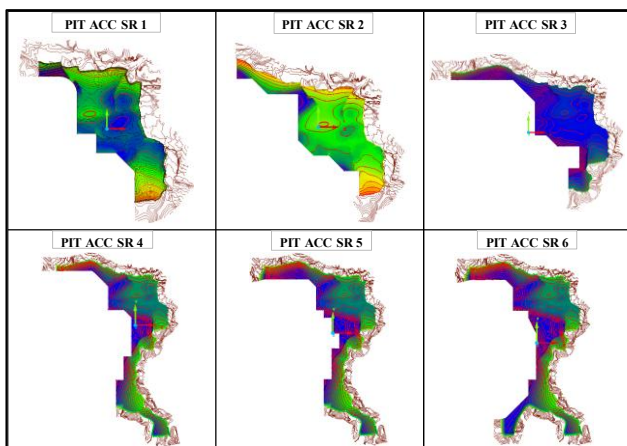
Kelebihan metode DCF adalah kemampuannya dalam mengintegrasikan komponen biaya, pendapatan, risiko inflasi, serta faktor diskonto ke dalam satu kerangka evaluasi ekonomi yang komprehensif [16]. Namun demikian, metode DCF memiliki keterbatasan karena sangat sensitif terhadap asumsi harga batubara, biaya produksi, dan tingkat diskonto yang digunakan. Perubahan kecil pada parameter tersebut dapat memberikan perbedaan signifikan pada nilai NPV.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan difokuskan pada keterkaitan antara hasil analisis geoteknik, optimasi pit, dan evaluasi finansial, sehingga memberikan gambaran utuh mengenai implikasi teknis dan ekonomi dari desain pit yang diusulkan.

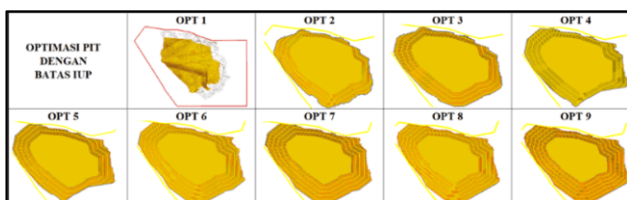
Optimasi Pit

Gambar 2 menunjukkan hasil optimasi pit berdasarkan variasi nilai *Stripping Ratio* (SR) yang dilakukan dengan menggunakan *block model* sebagai dasar perhitungan. Pada tahap ini, optimasi pit dilakukan dengan mengevaluasi distribusi nilai ekonomi setiap blok terhadap perubahan batas pit pada beberapa skenario SR, mulai dari SR rendah hingga SR yang lebih tinggi.



Gambar 2. Hasil optimasi pit Pit X Barat

Optimasi pit berbasis *block model* ini digunakan untuk memberikan gambaran awal mengenai respon geometri pit terhadap perubahan SR, sekaligus menjadi dasar dalam pemilihan skenario pit yang paling rasional untuk dianalisis lebih lanjut. Selanjutnya hasil optimasi pit dari keseluruhan *block model* yang ditunjukkan pada Gambar 2 dilakukan optimasi pit kembali dengan dibatasi area Izin Usaha Pertambangan (IUP). Hasil optimasi pit yang dibatasi oleh wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP) disajikan dalam bentuk beberapa alternatif optimasi pit (OPT_1 hingga OPT_9). Setiap alternatif optimasi pit menunjukkan hubungan antara volume *overburden* (waste volume), tonase batubara tertambang, dan nilai SR yang dihasilkan dari proses optimasi pit. Hasil optimasi pit dengan area batas IUP tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil optimasi pit dalam bentuk batas pit

Hasil optimasi pit ini selanjutnya dijadikan sebagai acuan awal dalam tahapan analisis geoteknik, dengan tujuan

memastikan kestabilan lereng serta kesesuaian geometri pit terhadap kondisi geologi dan kriteria faktor keamanan yang dipersyaratkan. Penyesuaian geometri lereng dilakukan apabila diperlukan untuk memperoleh desain pit akhir yang aman dan dapat dioperasikan.

Hasil Cadangan Tertambang Pada Pit Optimasi

Evaluasi hasil optimasi pit dilakukan dengan membandingkan cadangan tertambang, *stripping ratio*, serta implikasi geoteknik dan ekonomi sebagaimana direkomendasikan dalam studi optimasi tambang terbuka [13]. Optimasi pit dilakukan dengan mempertimbangkan nilai ekonomi blok serta batasan geoteknik yang diperoleh dari hasil analisis kestabilan lereng. Proses optimasi menghasilkan batas *pit ultimate* yang berbeda dibandingkan optimasi berbasis ekonomi semata. Batas pit hasil optimasi terintegrasi cenderung lebih konservatif pada area tertentu yang memiliki kondisi geoteknik kurang baik.

Tabel 1. Cadangan Tertambang Pit Optimasi

Pitshell	Volume		SR
	Waste (bcm)	Coal (ton)	
SR 1	4.487.056	2.893.987	1,55
SR 2	10.038.036	4.526.248	2,22
SR 3	19.898.097	6.382.948	3,12
SR 4	54.697.132	13.453.229	4,07
SR 5	72.962.956	14.494.148	5,03
SR-6	95.073.586	15.711.508	6,05
OPT 1	72.342.619	12.967.367	5,58
OPT 2	106.612.303	13.463.493	7,92
OPT 3	112.089.460	13.760.382	8,15
OPT 4	128.505.804	14.129.359	9,09
OPT 5	141.221.570	14.471.537	9,76
OPT 6	170.632.122	15.540.271	10,98
OPT 7	197.388.050	16.397.428	12,04
OPT 8	209.512.143	16.589.211	12,63
OPT 9	234.124.218	17.216.710	13,60

Perbandingan hasil optimasi pit pada beberapa skenario, termasuk perbedaan cadangan tertambang dan *stripping ratio* disajikan pada Tabel 1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun terdapat penurunan cadangan tertambang pada beberapa area, desain pit yang dihasilkan tetap memberikan nilai ekonomi yang layak serta meningkatkan aspek keselamatan penambangan.

Parameter Geoteknik dan Geometri Lereng

Penentuan parameter dan perancangan geometri lereng mengacu pada pedoman desain lereng tambang terbuka serta praktik terbaik dalam industri pertambangan [2, 12]. Parameter geoteknik material penyusun lereng diperoleh dari hasil pengujian laboratorium dan evaluasi data geoteknik perusahaan. Parameter utama yang digunakan meliputi kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan berat isi (γ) untuk masing-masing satuan litologi. Parameter tersebut menjadi input utama dalam analisis kestabilan lereng

menggunakan Metode Kesetimbangan Batas.

Geometri lereng dirancang dengan mempertimbangkan rekomendasi teknis berupa tinggi jenjang, sudut jenjang, lebar *berm* serta *overall slope* yang sesuai dengan kondisi geoteknik Pit X Barat. Perancangan geometri lereng bertujuan untuk memperoleh kombinasi desain yang aman secara teknis namun tetap optimal dari sisi cadangan tertambang. Parameter geoteknik material penyusun lereng yang digunakan dalam analisis kestabilan dirangkum dalam Tabel 2. Standar deviasi geoteknik dan statistik parameter geoteknik yang juga menjadi pertimbangan dalam menganalisis geometri lereng dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 2. Parameter Geoteknik Material Lereng

Stratigrafi	Density (kN/m ³)	Kohesi (kPa)	Angle of Internal Friction (°)
Overburden D	0,792	46,629	5,749
Seam D	0,174	23,254	5,457
Interburden Seam D-E	0,608	35,523	5,984
Seam E1	0,238	63,095	3,441
Interburden Seam E1-E2	0,883	31,338	5,500
Seam E2	0,238	63,095	3,441
Underburden Seam E	0,857	32,199	5,057

Tabel 3. Standar Deviasi Geoteknik

Satuan Litologi	Density (kN/m ³)	Kohesi (kPa)	Angle of Internal Friction (°)
Overburden D	20,72	75,21	21,94
Seam D	11,81	95,84	22,46
Interburden Seam D-E	20,91	68,18	19,92
Seam E1	11,73	100,25	25,52
Interburden Seam E1-E2	20,63	47,46	19,91
Seam E2	11,74	363,89	22,86
Underburden Seam E	20,89	67,36	19,56

Tabel 4. Statistik Parameter Geoteknik

Parameter	Mean	Standar Deviasi	COV
Kohesi (c)	60	12	0,2
Sudut geser (φ)	21	13	0,14

Hasil Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng dilakukan pada beberapa penampang representatif yang mewakili kondisi geologi dan geometri lereng Pit X Barat. Analisis dilakukan pada kondisi statis dan dinamis untuk mengevaluasi pengaruh beban gempa terhadap kestabilan lereng. Parameter faktor keamanan (FK) dan *Probability of Failure* (PoF) digunakan sebagai indikator utama dalam penilaian kestabilan.

Tabel 5. Hasil Analisis Faktor Keamanan dan Probabilitas Kelongsoran

Pitshell	Elevasi	FK Statis	FK Dinamis	PoF Statis (%)	PoF Dinamis (%)
OPT 1	+10	1.395	1.272	3,27	4,89
OPT 2	+20	1.798	1.525	0,00	0,58
OPT 3	+10	1.509	1.270	5,38	4,32
OPT 4	+0	1.449	1.229	6,23	8,10
OPT 5	-10	1.392	1.179	8,70	15,50
OPT 6	-20	1.354	1.145	11,72	21,23
OPT 7	-30	1.313	1.111	13,78	27,35
OPT 8	-40	1.277	1.081	14,45	32,15
OPT 9	-50	1.251	1.251	16,51	36,62

Hasil analisis kestabilan lereng pada Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan lereng pada desain pit hasil optimasi rata-rata berada di atas nilai minimum yang dipersyaratkan. Pada kondisi statis, nilai FK berada di atas 1,30, sedangkan pada kondisi dinamis nilai FK tetap berada di atas 1,10. Selain itu, nilai *Probability of Failure* (PoF) berada di bawah 10%, sehingga masih berada dalam kategori risiko yang dapat diterima berdasarkan Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Namun hasil dari analisis tersebut belum menjadi hasil akhir dari optimasi pit yang akan dipilih karena akan dilakukan lagi kajian finansial pada setiap optimasi pit. Hasil analisis faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran pada Tabel 5 dilakukan berdasarkan data pada Tabel 2, 3, dan 4. OPT 2 ditampilkan sebagai pembanding karena memiliki nilai FK tertinggi dan PoF terendah dibandingkan opsi lainnya, sehingga merepresentasikan kondisi paling aman secara geoteknik. Namun, secara ekonomi OPT 2 memiliki *nilai Stripping Ratio* yang lebih besar dibanding OPT 1, sehingga meskipun sangat aman secara geoteknik, desain ini kurang optimal dari sisi kelayakan ekonomi tambang.

Geometri Lereng

Desain lereng rekomendasi ditentukan berdasarkan hasil evaluasi *deterministik* dan *probabilistik* dengan mengacu pada ketentuan Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Parameter desain meliputi tinggi jenjang, sudut jenjang, lebar berm, dan sudut lereng keseluruhan dengan melakukan perbandingan antara geometri lereng aktual (Tabel 6) dan geometri lereng pit optimasi (Tabel 7).

Tabel 6. Geometri Lereng Aktual

Parameter	Rekomendasi
Tinggi jenjang (m)	10
Sudut jenjang (°)	55
Lebar berm (m)	15
Akses Jalan	30
Overall slope (°)	27 - 46

Tabel 7. Geometri Lereng Pit Optimasi

Parameter	Rekomendasi
Tinggi jenjang (m)	8
Sudut jenjang (°)	45
Lebar berm (m)	15
Rest Bench	30
Akses Jalan	30
Overall slope (°)	6,77 – 19,61

Biaya Produksi dan Pendapatan

Analisis biaya produksi dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya penambangan batubara dan pengupasan

overburden yang menjadi komponen utama dalam perhitungan kelayakan ekonomi. Biaya produksi meliputi biaya pengupasan *overburden*, biaya penambangan batubara, biaya pengangkutan, serta biaya penunjang lainnya.

Rincian biaya produksi batubara Pit X Barat disajikan pada Tabel 8. Analisis pendapatan dilakukan berdasarkan harga jual batubara yang mengacu pada Harga Batubara Acuan (HBA). Biaya produksi untuk pemindahan *overburden* (OB) dan lumpur ditetapkan untuk jarak angkut maksimum 3,5 km serta untuk kegiatan *coal getting* ke *stockpile* dibatasi jarak angkut maksimum 4 km.

Tabel 8. Biaya produksi batubara Pit X Barat

BIAYA PRODUKSI		Satuan	Unit Biaya	Proporsi	Biaya Produksi
Biaya Stripping					
OB dan lumpur	Pemindahan OB (maks 3,5 km)	\$/bcm	2,98	100,00%	2,98
	<i>Over Distance</i> 1-km OB	\$/bcm-km	0,46	0,00%	0
	Pemindahan lumpur	\$/bcm	3,72	0,00%	0
	<i>Over Distance</i> 1-km Lumpur	\$/bcm-km	0,58	0,00%	0
Total Biaya Stripping		\$/bcm			2,98
Biaya Penambangan Batubara					
Penggalian menuju ROM	Penggalian batubara - <i>Distance</i> 4 km	\$/t	2,13	100,00%	2,13
	<i>Over Distance</i> - 1 km <i>Coal getting</i>	\$/t	0,53	0,00%	0
Rehandling	Rehandling to TLS 3-4-5 (<i>trucking</i> & <i>conveyor</i>)	\$/t	1,69	100,00%	1,69
Train Hauling	Train Hauling to Kertapati Domestik	\$/t	8,04	10,06%	0,81
	Train Hauling to Kertapati <i>Export</i>	\$/t	9,74	15,09%	1,47
	Train Hauling to Tarahan Domestik	\$/t	16,31	29,94%	4,88
	Train Hauling to Tarahan Ekspor	\$/t-km	17,75	44,91%	7,97
Port	Kertapati <i>Port</i>	\$/t	1,51	25,14%	0,38
	Tarahan <i>Port</i>	\$/t-km	1,26	74,86%	0,94
Transshipment	Transshipment for Kertapati <i>Export</i>	\$/t	4,56	15,09%	0,69
Overhead Biaya Produksi		\$/t	3,58	100,00%	3,58
Overhead Biaya Produksi Tidak Langsung		\$/t	2,5	100,00%	2,5
Administrasi		\$/t	2,73	100,00%	2,73
Pemasaran		\$/t	0,06	100,00%	0,06
Royalti pemerintah (sesuai PP No 26 tahun 2022)		10,50%		100,00%	6,53
Total Biaya Penambangan Batubara		\$/t			36,36
Total Biaya Produksi Batubara		\$/t			39,34

Analisis Risiko Penambangan

Analisis meliputi risiko moneter, risiko komposit penambangan, dan risiko transisi energi.

Risiko Moneter

Dalam kajian finansial diasumsikan eskalasi biaya sebesar 1,5% per tahun, yang didasarkan pada volatilitas harga dan risiko fluktuasi harga batubara. Berdasarkan data inflasi Indonesia periode 2006–2024, inflasi rata-rata tercatat sebesar 4,31% dengan kecenderungan volatilitas yang menurun. Proyeksi inflasi periode 2025–2042 diperkirakan berada pada kisaran rata-rata 2,1% per tahun dengan ambang batas inflasi 1,03% dan potensi deflasi sekitar 0,34%. Kondisi ini menunjukkan bahwa secara moneter

risiko inflasi dan deflasi relatif kecil, sehingga daya beli nasional dan stabilitas harga batubara domestik masih dapat terjaga.

Tabel 9. Tingkat risiko inflasi dan deflasi serta proyeksi periode 2025–2042

Parameter Risiko harga	2006-2025	2025-2042 (Proyeksi)
Average Inflation (%)	4,6	2,1
Threshold Inflation (%)	0,24	1,03
Deflasi (%)	-0,98	0,34
Volatility	-1,35	-1,35

Hasil analisis menunjukkan bahwa inflasi historis Indonesia relatif terkendali dengan kecenderungan volatilitas yang menurun. Proyeksi inflasi jangka menengah berada pada kisaran rendah, sehingga secara moneter risiko inflasi dan deflasi terhadap kelayakan ekonomi proyek dinilai kecil (Tabel 9).

Risiko Komposit Penambangan

Risiko komposit penambangan merupakan hasil integrasi risiko makro nasional dan risiko operasional tambang. Nilai risiko penambangan akan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kedalaman dalam melakukan aktivitas penambangan akibat meningkatnya *Probability of Failure* (PoF) lereng dan faktor keamanan (Tabel 10).

Tabel 10. Matriks indeks risiko, probabilitas risiko, dan risiko komposit penambangan

Pitshell	Indonesia Risk Index (%)	Mining Risk Index (%)	Probability of Failure (PoF) Dinamis	Probability Risk Mining (%)	Composite Mining Risk (%)
OPT 1	4,6	2	17,23	0,1723	14
OPT 2	4,6	0,4	0,58	0,0058	12,4
OPT 3	4,6	1,3	4,32	0,0432	13,3
OPT 4	4,6	1,7	8,1	0,081	13,7
OPT 5	4,6	1,9	15,5	0,155	13,9
OPT 6	4,6	1,9	21,23	0,2123	13,9
OPT 7	4,6	2,1	27,35	0,2735	14,1
OPT 8	4,6	2,3	32,15	0,3215	14,3
OPT 9	4,6	2,3	36,2	0,362	14,3
Keterangan	Rata-rata = 4,6	Jumlah = 15,9	Jumlah = 162,66	Jumlah = 1,6266	Rata-rata = 13,77

Risiko Transisi Energi

Harga jual batubara menggunakan nilai HBA sebesar 74 USD/ton yang diasumsikan tetap pada kondisi non-transisi maupun transisi energi, sehingga perubahan nilai *Break Even Stripping Ratio* (BESR) hanya dipengaruhi oleh perubahan biaya produksi. Dampak utama yang dianalisis adalah perubahan biaya dan implikasinya terhadap margin operasional serta nilai BESR.

Tabel 11. Perbandingan BESR Pit X Barat pada kondisi non-transisi dan transisi energi

Deskripsi	Satuan	Non Transisi	Transisi EBT
Biaya Penambangan Batubara	\$/t	36,36	39,996
Biaya Stripping	\$/bcm	2,98	3,278
Biaya Produksi Batubara	\$/t	39,34	43,274
Harga Jual Batubara (HBA)	\$/t	74	74
Margin (SR=1)	\$/t	34,66	30,726
BESR Pit X Barat		11,63	9,38

Semua nilai dari kondisi non transisi diperoleh dari Tabel 8. Penurunan nilai BESR dari 11,63 menjadi 9,38 menunjukkan bahwa transisi energi mengurangi fleksibilitas ekonomi penambangan. Namun, karena SR aktual sebesar 5,58 masih berada di bawah nilai BESR, kegiatan penambangan di Pit X Barat tetap layak secara

ekonomis meskipun dengan tingkat risiko yang lebih tinggi.

Pada kondisi non-transisi, margin penambangan sebesar 34,66 USD/ton menghasilkan BESR 11,63. Sementara pada kondisi transisi energi, kenaikan biaya produksi menurunkan margin menjadi 30,726 USD/ton dan BESR menjadi 9,38. Hasil ini menunjukkan bahwa optimasi pit perlu mempertimbangkan risiko transisi energi sebagai faktor eksternal yang mempengaruhi keekonomian cadangan tertambang.

Hasil Analisis Finansial

Analisis finansial dilakukan menggunakan metode *Discounted Cash Flow* (DCF) untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi pit hasil optimasi pit. Parameter utama yang dianalisis meliputi *Net Present Value* (NPV), *Stripping Ratio* (SR) dan *Break Even Stripping Ratio* (BESR). Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa BESR dengan design optimasi pit yang sudah dilakukan sebelumnya adalah opsi optimal dan layak untuk dilakukan penambangan dengan nilai BESR 11,63. Adapun hasil optimasi pit yang dipilih untuk dilakukan penambangan dengan mempertimbangkan finansial dan geoteknik ditujukan pada OPT 1 (Tabel 12).

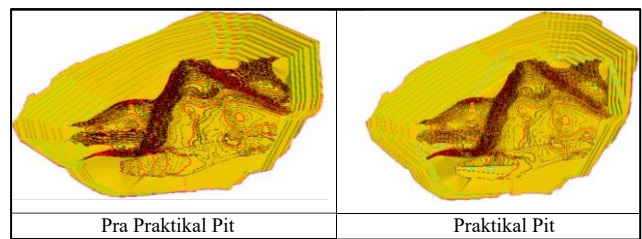
Hasil analisis menunjukkan bahwa desain pit terpilih (OPT 1) menghasilkan nilai *Net Present Value* (NPV) sebesar \$158.345.272 serta nilai *stripping ratio* pada optimasi pit yang dipilih (OPT 1) sebesar 5,58 berada di bawah nilai *Break Even Stripping Ratio* (BESR) sebesar 11,63.

Tabel 12. Hasil Analisis Aspek Finansial dan Analisis Geoteknik

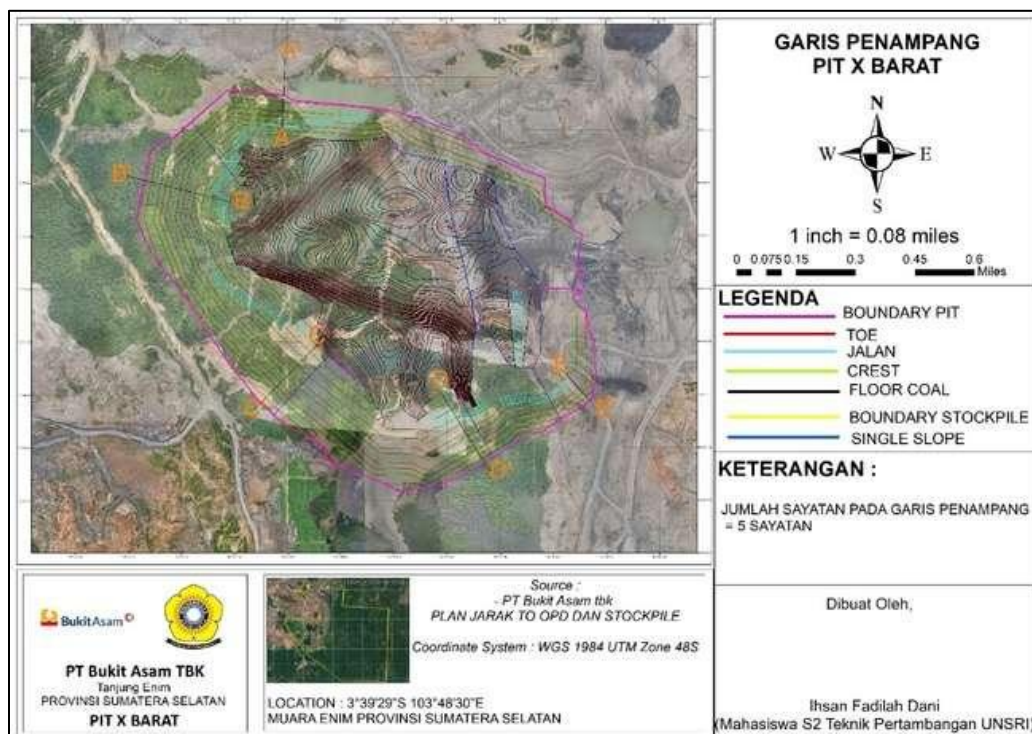
Pitshell	Waste Volume (bcm)	Coal Volume (ton)	Coal Revenue (USD)	FK / POF(%)		SR	Net Profit	NPV	IRR
				Statis	Dinamis				
SR 1	4.487.056	2.893.987	83.219.257	-	-	1,55	83.219.257	66.575.405	41,35%
SR 2	10.038.036	4.526.248	123.251.500	-	-	2,22	123.251.500	98.601.200	39,82%
SR 3	19.898.097	6.382.948	158.221.733	-	-	3,12	158.221.733	126.577.386	37,74%
SR 4	54.697.132	13.453.229	299.576.555	-	-	4,07	299.576.555	239.661.244	35,82%
SR 5	72.962.956	14.494.148	281.222.651	-	-	5,03	281.222.651	224.978.121	33,93%
SR 6	95.073.586	15.711.508	257.526.664	-	-	6,05	257.526.664	206.021.331	32,14%
OPT 1	72.342.619	12.967.367	230.153.011	1,395/3,27	1,272/4,89	5,58	197.931.589	158.345.272	32,93%
OPT 2	106.612.303	13.463.493	145.225.092	1,798 / 0,00	1,525 / 0,58	7,90	127.217.181	101.773.745	29,28%
OPT 3	112.089.460	13.978.432	146.750.950	1,509 / 5,38	1,270 / 4,32	8,00	127.233.074	101.786.459	29,15%
OPT 4	128.505.804	14.129.359	103.061.375	1,449 / 6,23	1,229 / 8,10	9,00	88.941.967	71.153.573	27,74%
OPT 5	141.221.570	14.471.537	77.028.282	1,392 / 8,70	1,179 / 15,54	9,70	66.321.351	53.057.081	26,94%
OPT 6	170.632.122	15.540.271	26.427.157	1,354 / 11,72	1,145 / 21,23	10,90	22.753.782	18.203.026	25,59%
OPT 7	197.388.050	16.397.428	-23.596.447	1,313 / 13,78	1,111 / 27,35	12,00	-20.269.348	-16.215.478	24,52%
OPT 8	209.512.143	16.589.211	-53.079.045	1,277 / 14,45	1,081 / 32,15	12,60	-45.488.741	-36.390.993	23,96%
OPT 9	234.124.218	17.216.710	-104.673.913	1,251 / 16,51	1,059 / 36,62	13,60	-89.705.543	-71.764.435	23,10%

Implementasi Optimasi Pit Limit Terhadap Kajian Geoteknik dan Kajian Finansial

Optimasi Pit (OPT 1) yang dipilih kemudian dibuatkan praktikal design optimasi pit untuk menunjang perencanaan tambang yang jangka panjang pada Pit X Barat PT Bukit Asam. Selanjutnya, *design* praktikal pit yang didapat dari hasil optimasi pit yang paling menguntungkan dan aman tersebut akan dilakukan kajian analisis lebih lanjut untuk mempermudah proses penambangan jangka panjang agar lebih aman ketika melakukan kegiatan penambangan (Gambar 4).



Gambar 4. Pra Praktikal dan Praktikal Pit



Gambar 5. Section Penampang Pit X Barat PT Bukit Asam, Tbk

Garis Penampang Pit X Barat

Sebelum dilakukan analisis kestabilan lereng diperlukan penentuan *section* sebagai irisan area lereng yang akan dilakukan penelitian analisis kestabilan lereng pada praktikal pit optimasi (Gambar 5). Pada desain praktikal pit akan dilakukan pembuatan beberapa *section* sebagai penunjang dalam melakukan analisis kestabilan lereng. Terdapat lima *section* yang akan diamati pada penelitian ini yaitu *section* A-A', B-B', C-C', D-D' dan E-E'. Setelah dibuat lima *section* pada Pit X Barat, kemudian dianalisis dengan kajian geoteknik untuk mengetahui nilai faktor keamanan statis maupun dinamis serta mengetahui *Probability of Failure* (PoF).

Tabel 13. Faktor Keamanan dan *Probabilistic of Failure* Statis dan Dinamis Praktikal Pit

Section	FK Statis	FK Dinamis	PoF Statis (%)	PoF Dinamis (%)
A-A'	2,10	2,08	1,03	2,76
B-B'	1,44	1,80	4,38	1,66
C-C'	1,41	1,81	1,83	0,36
D-D'	1,37	1,84	4,32	4,08
E-E'	1,89	1,87	2,07	3,79

Berdasarkan hasil analisis tersebut, secara umum desain Praktikal Pit menunjukkan nilai Faktor Keamanan yang memenuhi kriteria kestabilan lereng baik pada kondisi statis maupun dinamis (Tabel 13). Nilai Faktor Keamanan statis berkisar antara 1,37–2,10, sedangkan pada kondisi dinamis berada pada rentang 1,80–2,08, yang masih berada di atas batas minimum yang dipersyaratkan.

Nilai *Probability of Failure* (PoF) pada kondisi statis dan dinamis secara umum masih berada dalam batas yang dapat diterima. Meskipun demikian, secara keseluruhan nilai PoF yang diperoleh masih menunjukkan bahwa desain lereng Praktikal Pit berada dalam kondisi stabil dan layak untuk dilanjutkan ke tahap evaluasi finansial.

KESIMPULAN

Optimasi pit dengan mempertimbangkan aspek geoteknik dan finansial menghasilkan batas pit yang aman dan layak secara ekonomi. Desain lereng hasil optimasi memenuhi kriteria faktor keamanan dan *Probability of Failure* sesuai Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 dengan geometri lereng slope 45°, lebar *bench* 15 meter, *rest bench* 30 meter, akses jalan 30 meter, tinggi *bench* 8 meter dengan *overall slope* 6,77 – 19,61.

Analisis finansial menunjukkan bahwa pit terpilih pada OPT 1 memberikan nilai NPV sebesar \$158.345.272 dengan nilai SR 5,58 yang berada di bawah nilai BESR sebesar 11,63. Dengan demikian, integrasi kajian geoteknik dan finansial dinilai penting untuk mendukung perencanaan tambang yang aman, optimal, dan

berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy.
- [2] Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Melbourne: CSIRO Publishing.
- [3] Lerchs, H., & Grossmann, I. F. (1965). Optimum design of open-pit mines. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 58, 47–54.
- [4] Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2014). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. London: CRC Press.
- [5] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2018). *Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Jakarta.
- [6] Zhao, X., Liu, C., & Yang, Y. (2021). Integration of geotechnical constraints into open pit optimization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 141, 104728.
- [7] Pourrahimian, Y., & Askari-Nasab, H. (2020). Geotechnical risk management in open pit mine design. *Mining Technology*, 129(4), 193–205.
- [8] Kavousi, A., Jalali, S. M. E., & Hasanipناه, M. (2022). Slope stability consideration in ultimate pit limit optimization. *Engineering Geology*, 301, 106605.
- [9] Liu, W., Topal, E., & Dowd, P. (2023). Coupled economic–geotechnical optimization of open pit mines under uncertainty. *Resources Policy*, 82, 103458.
- [10] Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design*. London: CRC Press.
- [11] Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2002). *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [12] Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Dordrecht: Springer.
- [13] Whittle, D. (2013). Open pit optimization and design. In *SME Mining Engineering Handbook*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- [14] Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering*. New York: Wiley.
- [15] Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jordan, B. D. (2016). *Fundamentals of Corporate Finance*. New York: McGraw-Hill.
- [16] Torries, T. F. (2004). *Evaluating Mineral Projects: Applications and Misconceptions*. SME.