

OPTIMASI *PIT* TAMBANG TERBUKA BATUBARA MENGGUNAKAN METODE LERCHS-GROSSMANN

(OPEN-PIT COAL MINE OPTIMIZATION USING THE LERCHS-GROSSMANN METHOD)

Supriyadi¹, Ahmad Fauzan Haryono^{1*}, Supardi Razak¹, Fajar Abdulfattah¹, Muhammad Manaqib²

^{1*} Program Studi Teknik Pertambangan, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Jakarta, Indonesia

² Program Studi Matematika, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Jakarta, Indonesia

* Korespondensi E-mail: ahmad@uinikt.ac.id

Abstrak

Penentuan batas *pit* tambang terbuka harus menyeimbangkan perolehan batubara, volume material penutup, kendala geometri, dan nilai ekonomi blok. Tujuan: Penelitian ini menentukan batas *pit* ekonomis PT XYZ dan mengevaluasi perubahan dari *pit ramp* hasil optimasi menjadi *final pit* operasional. Data topografi, pemboran, model *seam*, kualitas batubara, biaya, harga jual, dan geometri tambang diintegrasikan ke dalam model blok ekonomi. Pemodelan awal menggunakan blok 1 m x 1 m x 1 m dengan atribut CV, *total moisture*, densitas, total sulfur, dan *ash*, kemudian diagregasi pada grid ekonomi 20 m x 40 m. Nilai blok dioptimasi dengan algoritma Lerchs-Grossmann pada faktor diskon harga 0%, 10%, dan 30%. Skenario 0% menghasilkan *net value* US\$208,31 juta, sedangkan skenario 10% dan 30% menghasilkan US\$183,94 juta dan US\$135,55 juta. Pada skenario 30%, *net value* turun 34,93%, tetapi tonase batubara tetap 1.211.630 ton dan volume *overburden* hanya turun 3,13%. Konversi *pit ramp* menjadi *final pit* menaikkan *overburden* 10,59%, tonase batubara 0,77%, *stripping ratio* 9,74%, dan *net value* 0,10%. Marginal *stripping ratio* penyesuaian sebesar 85,07 BCM/ton, sedikit lebih rendah daripada BESR operasional sebelum pajak sebesar 85,53 BCM/ton. Lerchs-Grossmann efektif membentuk batas ekonomis, tetapi kelayakan perubahan menuju desain operasional perlu dinilai dengan *stripping ratio* marginal, bukan hanya *stripping ratio* total.

Kata kunci: batubara, *discount rate*, metode Lerch Grossman, optimasi, profit.

Abstract

Open-pit limits must balance coal recovery, overburden volume, geometric constraints, and block economic value. This study determines an economic pit limit for PT XYZ and evaluates the transition from an optimized pit ramp to an operational final pit. Topographic, drillhole, seam-model, coal-quality, cost, selling-price, and mine-geometry data were integrated into an economic block model. The initial model used 1 m x 1 m x 1 m blocks carrying CV, total moisture, density, total sulfur, and ash attributes, which were aggregated into a 20 m x 40 m economic grid. Block values were optimized using the Lerchs-Grossmann algorithm under price-discount factors of 0%, 10%, and 30%. The 0% scenario produced a net value of US\$208.31 million, compared with US\$183.94 million and US\$135.55 million for the 10% and 30% scenarios. Under the 30% scenario, net value decreased by 34.93%, while coal tonnage remained at 1,211,630 tonnes and overburden decreased by only 3.13%. Converting the pit ramp into the final pit increased overburden by 10.59%, coal tonnage by 0.77%, stripping ratio by 9.74%, and net value by 0.10%. The marginal stripping ratio of 85.07 BCM/t was slightly below the pre-tax operating BESR of 85.53 BCM/t. Lerchs-Grossmann provides an effective economic envelope; however, operational design adjustments should be evaluated using marginal rather than total stripping ratio.

Keywords: coal, discount rate, Lerch Grossman method, optimization, profit.

Article	Submitted: 20-06-2026	Revised: 29-07-2026	Accepted: 27-08-2026
Published by	Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Palangka Raya		
License	CC BY-SA 4.0		
DOI	10.36873/jtp.v26i2.26761		

1. Pendahuluan

Batubara merupakan salah satu sumber energi fosil yang telah lama dimanfaatkan sebagai bahan bakar dan hingga saat ini masih memegang peranan penting dalam memenuhi kebutuhan energi dunia (Widara & Saputra, 2026). Tingginya permintaan batubara sejalan dengan perkembangan sektor industri dan pembangunan infrastruktur yang terus meningkat. Endapan batubara umumnya ditemukan

pada wilayah perbukitan maupun dataran, sehingga diperlukan perencanaan penambangan yang matang untuk menjamin kelayakan teknis dan ekonomis kegiatan penambangan (Olmos-de-Aguilera et al., 2023).

Sebagian besar endapan batubara di Indonesia ditambang menggunakan metode tambang terbuka (*open-pit mining*) karena umumnya berada pada kedalaman yang relatif dangkal dan memiliki ketebalan lapisan yang ekonomis untuk dieksploitasi. Metode ini memungkinkan kegiatan penambangan dilakukan dengan produktivitas yang tinggi serta biaya produksi yang relatif lebih rendah dibandingkan metode tambang bawah tanah (Lin et al., 2024). Namun demikian, kegiatan tambang terbuka melibatkan pengupasan material penutup (*overburden*) dalam jumlah besar sehingga memerlukan pengelolaan yang cermat agar operasi penambangan tetap layak secara teknis dan ekonomis (Lin et al., 2025; Xu et al., 2023). Oleh karena itu, penentuan batas penambangan yang optimum menjadi faktor penting dalam memaksimalkan pemanfaatan cadangan batubara sekaligus menjaga keuntungan perusahaan.

Perencanaan tambang merupakan tahapan penting yang dilakukan sebelum kegiatan penambangan dimulai (Nancel-Penard et al., 2025). Tahap ini mencakup berbagai aspek teknis dan operasional, seperti pemodelan geologi, perancangan *pit*, penentuan metode penambangan, perencanaan produksi, serta evaluasi keekonomian tambang (Fathollahzadeh et al., 2021; Saavedra et al., 2023). Tujuan utama perencanaan tambang adalah menentukan apakah suatu cadangan dapat ditambang secara ekonomis dengan memberikan keuntungan yang optimal. Oleh karena itu, ketepatan dalam menentukan batas penambangan *pit limit* menjadi faktor yang sangat berpengaruh terhadap keberhasilan suatu proyek tambang (Abalos et al., 2025).

Dalam praktiknya, penentuan batas *pit* sering kali dilakukan berdasarkan pendekatan *trial and error* dengan mempertimbangkan nilai *stripping ratio* (SR) dan *Break Even Stripping ratio* (BESR). Namun, pendekatan tersebut memiliki keterbatasan karena parameter ekonomi yang digunakan, seperti harga jual batubara dan biaya penambangan, bersifat dinamis dan dapat berubah sewaktu-waktu. Perubahan parameter ekonomi tersebut dapat memengaruhi nilai cadangan yang layak ditambang serta batas penambangan yang optimal (Hustrulid et al., 2013). Oleh karena itu, diperlukan metode optimasi yang mampu mempertimbangkan nilai ekonomi setiap blok sumber daya secara lebih sistematis dan objektif.

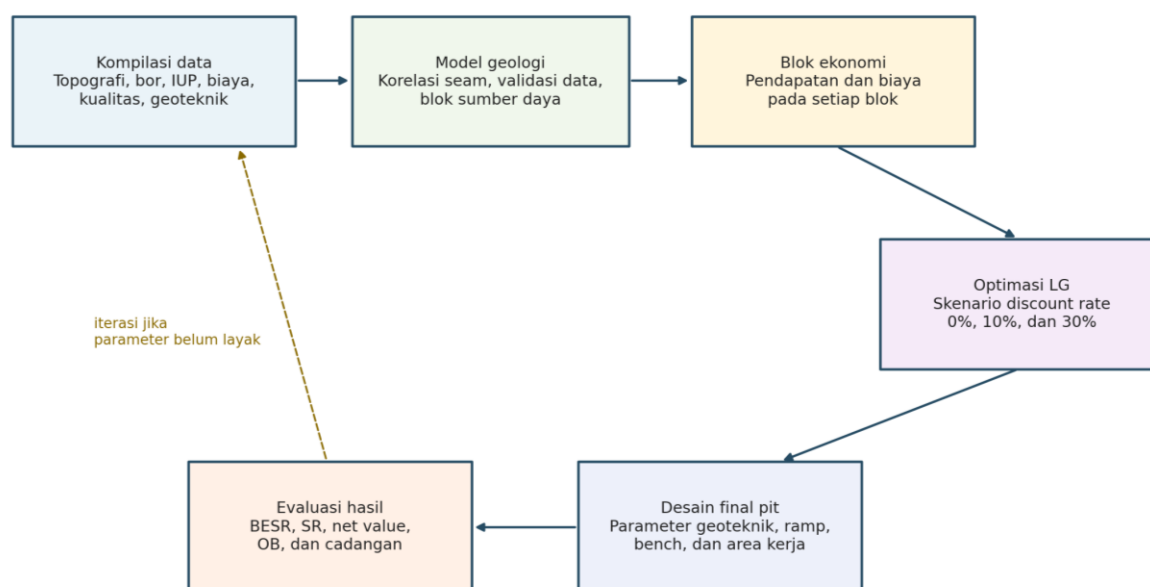
Salah satu metode yang banyak digunakan untuk optimasi batas tambang terbuka adalah algoritma Lerchs–Grossmann (LG). Metode ini bekerja dengan mengoptimalkan model blok berdasarkan nilai ekonominya sehingga dapat menghasilkan batas *pit* yang memberikan keuntungan maksimum (Birch, 2018; Buelga Díaz et al., 2021). Selain mampu memperhitungkan hubungan geometris antarblok, algoritma Lerchs–Grossmann juga memungkinkan evaluasi ekonomi dilakukan secara lebih cepat dan efisien dibandingkan pendekatan manual (Bargawa, 2018). Implementasi metode ini umumnya dilakukan dengan bantuan perangkat lunak pemodelan tambang yang mampu mengintegrasikan data geologi, parameter ekonomi, dan parameter geoteknik dalam proses optimasi.

Penelitian ini dilakukan pada endapan batubara subbituminus PT XYZ di Desa Bantuas, Kecamatan Palaran, Kalimantan Timur, pada wilayah seluas 2.442 ha. Tujuannya adalah (1) membentuk model blok ekonomi, (2) mengevaluasi sensitivitas *pit* terhadap faktor diskon harga 0%, 10%, dan 30%, (3) menyusun *final pit* dengan kendala geometri operasional, serta (4) menilai kelayakan perubahan *pit ramp* ke *final pit* menggunakan marginal *stripping ratio*. Kebaruan praktis penelitian terletak pada integrasi dua tahap, yaitu optimasi selubung ekonomi dan verifikasi perubahan desain secara marginal, sehingga keputusan penambahan batas *pit* tidak hanya didasarkan pada SR total.

2. Metode

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis model blok ekonomi. Tahapan analisis meliputi kompilasi data, pembentukan model geologi dan blok, valuasi ekonomi setiap blok, optimasi Lerchs–Grossmann, penyusunan *final pit*, serta evaluasi perbedaan antara *pit ramp* dan desain operasional. Urutan kerja penelitian ditampilkan pada Gambar 1.

+



Gambar 1. Diagram alir penelitian

a. Data dan parameter masukan

Data utama terdiri atas data topografi, data bor, batas IUP, model *seam* batubara, kualitas batubara, parameter biaya, harga jual, dan parameter geometri tambang. Data tersebut tidak diperlakukan sebagai informasi terpisah, melainkan diintegrasikan untuk membangun model blok yang dapat dievaluasi secara ekonomi.

Tabel 1. Data masukan dan perannya dalam optimasi *pit*

Kelompok data	Komponen	Peran dalam analisis
Geologi dan topografi	Topografi, data bor, model <i>seam</i> , batas area	Membentuk representasi ruang endapan dan batas area kerja
Kualitas dan cadangan	CV, densitas, tonase, volume <i>coal</i> dan OB	Menentukan nilai ekonomi batubara dan volume material
Ekonomi	Selling price, OB removal, <i>coal</i> getting, hauling, crushing, royalty, pajak	Mengubah blok teknis menjadi blok ekonomi
Geoteknik dan operasional	Slope, <i>bench</i> , <i>ramp</i> , grade jalan, lebar kerja	Membatasi bentuk <i>final pit</i> agar dapat diterapkan di lapangan
Skenario optimasi	<i>Discount rate</i> 0%, 10%, dan 30%	Menguji sensitivitas nilai ekonomi terhadap perubahan skenario

b. Pemodelan blok ekonomi

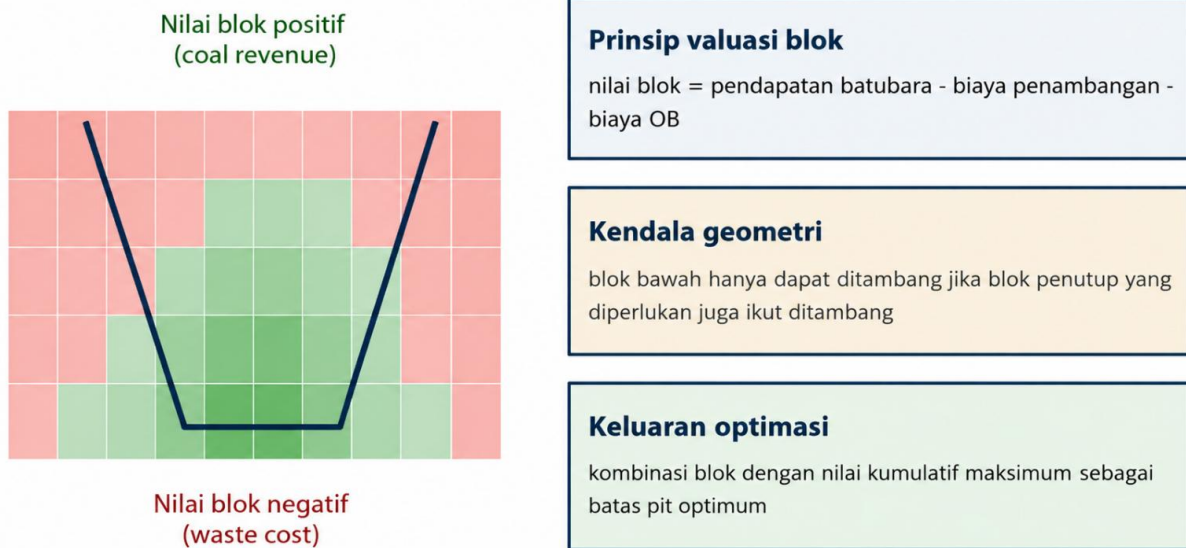
Model blok digunakan sebagai unit dasar evaluasi. Setiap blok diberi atribut material, volume, kualitas, dan nilai ekonomi. Blok batubara memiliki nilai positif apabila pendapatan penjualan lebih besar daripada komponen biaya yang dibebankan. Sebaliknya, blok *overburden* diberi nilai negatif karena merepresentasikan biaya pengupasan. Ilustrasi konsep blok ekonomi pada metode Lerchs-Grossmann ditampilkan pada Gambar 2.

Secara umum, nilai blok diperoleh dari selisih antara pendapatan dan biaya. Pada blok batubara, pendapatan dihitung dari tonase batubara dikalikan harga jual, kemudian dikurangi biaya penambangan, royalti, pajak, dan biaya pendukung. Pada blok *overburden*, nilai blok merupakan biaya pengupasan yang bertanda negatif. Dengan pendekatan ini, optimasi tidak hanya menentukan bentuk geometris *pit*, tetapi juga memilih kombinasi blok yang layak secara ekonomi.

c. Optimasi *pit* dan desain *final*

Optimasi dilakukan menggunakan algoritma Lerchs-Grossmann pada tiga skenario *discount rate*, yaitu 0%, 10%, dan 30%. Hasil optimasi dievaluasi berdasarkan *net value*, *volume coal*, *volume overburden*, dan *stripping ratio*. Skenario dengan *net value* tertinggi digunakan sebagai dasar

penyusunan *final pit*. Pada tahap *final pit*, bentuk hasil optimasi disesuaikan dengan parameter operasional, meliputi tinggi *bench*, lebar *ramp*, lebar tikungan, *single slope*, dan lebar area kerja.

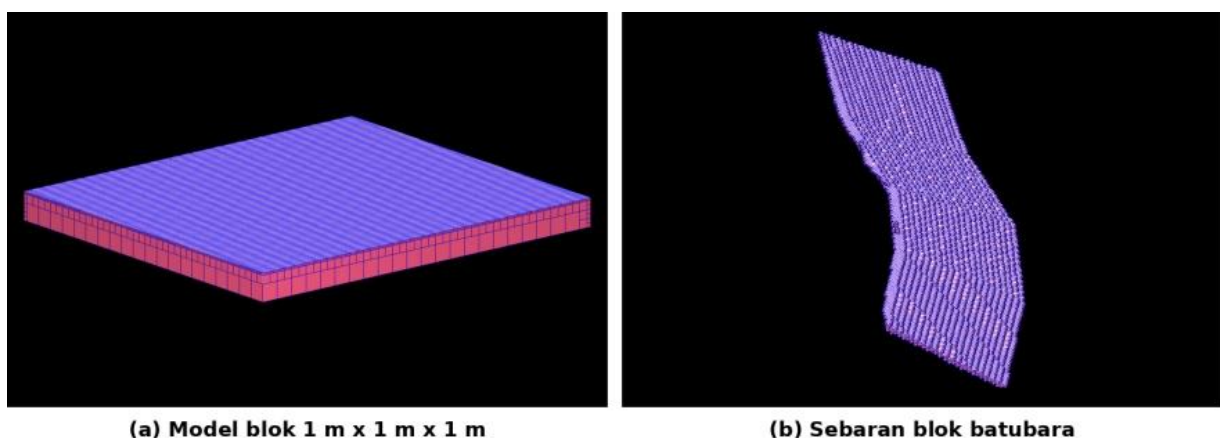


Gambar 2. Konsep blok ekonomi dalam optimasi Lerchs-Grossmann

3. Hasil dan Pembahasan

a. Kondisi sumber daya dan parameter ekonomi

Sumber daya pada area kajian terdiri atas volume batubara 2.839.951,41 m³ dengan tonase 3.691.936,84 ton, yang menunjukkan densitas rata-rata sekitar 1,30 ton/m³. Sumber daya dikategorikan sebagai terukur. Model awal terdiri atas tujuh lapisan batubara dengan ukuran blok 1 m x 1 m x 1 m dan atribut CV, TM, densitas, TS, serta *ash content*. Bentuk model dan sebaran blok batubara ditampilkan pada Gambar 3. Untuk optimasi, harga jual pada kualitas 4.800 kcal/kg GAR ditetapkan sebesar US\$201,39/ton, yang diperoleh dari penyesuaian HBA US\$265,26/ton pada basis 6.322 kcal/kg GAR. Ringkasan parameter ekonomi yang menjadi input utama optimasi ditampilkan pada Tabel 2.



Gambar 3. Visualisasi model blok penelitian

Tabel 2. Parameter ekonomi utama yang digunakan dalam optimasi

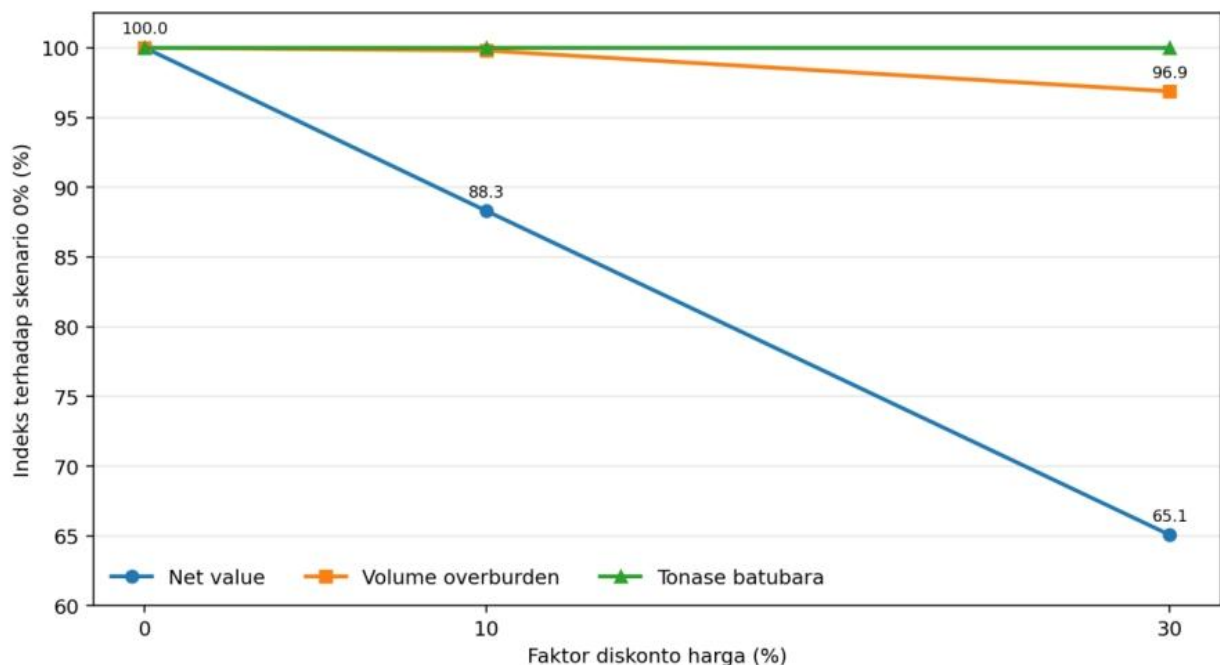
Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Kurs	15.010,35	Rp/US\$	Acuan konversi nilai ekonomi
<i>Selling price</i>	201,39	US\$/ton	Harga jual batubara setelah penyesuaian kualitas
<i>OB removal</i>	1,90	US\$/BCM	Biaya pengupasan material penutup
<i>Coal getting</i>	0,58	US\$/ton	Biaya pengambilan batubara
<i>Hauling</i>	2,15	US\$/ton	Biaya pengangkutan batubara
Crushing	1,71	US\$/ton	Biaya pengolahan ukuran batubara
FOB dan pendukung	5,64	US\$/ton	Biaya pengapalan dan fasilitas terkait
Royalti	21,14	US\$/ton	10,5% dari harga jual
Tax	20,14	US\$/ton	10% dari harga jual

b. Hasil optimasi berdasarkan skenario *discount rate*

Harga jual skenario berturut-turut adalah US\$201,39/ton pada faktor 0%, US\$181,25/ton pada faktor 10%, dan US\$140,97/ton pada faktor 30%. Skenario 0% menghasilkan *net value* tertinggi karena menggunakan harga acuan penuh. Skenario lainnya bukan alternatif yang diharapkan melampaui kondisi dasar, melainkan uji sensitivitas untuk menilai ketahanan nilai dan bentuk *pit* terhadap penurunan harga. Hasil numerik disajikan pada Tabel 3, sedangkan perubahan relatifnya ditampilkan pada Gambar 4.

Tabel 3. Perbandingan hasil optimasi *pit* pada beberapa skenario *discount rate*

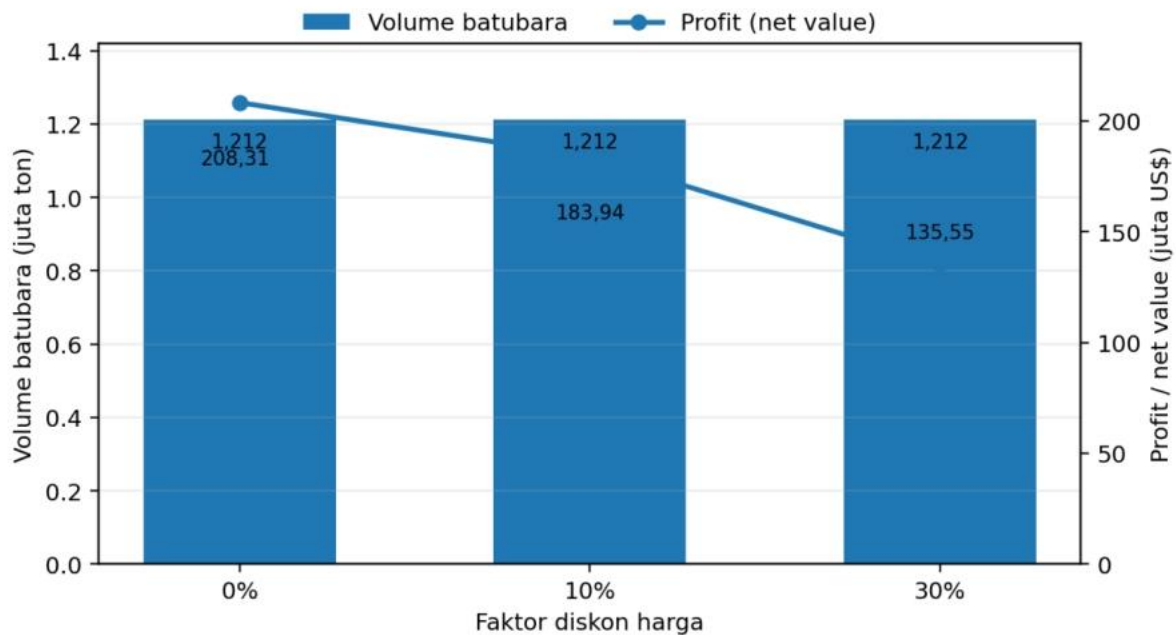
Skenario	<i>Net value</i> (US\$)	Volume coal (ton)	Volume OB (BCM)	SR (BCM/ton)
<i>Discount rate</i> 0%	208.312.874,50	1.211.630	7.475.250	6,169
<i>Discount rate</i> 10%	183.939.621,30	1.211.630	7.460.000	6,156
<i>Discount rate</i> 30%	135.550.077,40	1.211.630	7.241.625	5,970



Gambar 4. Sensitivitas *net value* dan keluaran fisik terhadap faktor diskon harga

Gambar 4 menunjukkan perbedaan sensitivitas antara indikator ekonomi dan fisik. Pada faktor 10%, *net value* turun 11,70%, sedangkan volume *overburden* hanya turun 0,20% dan tonase batubara tidak berubah. Pada faktor 30%, *net value* turun 34,93%, volume *overburden* turun 3,13%, dan tonase batubara tetap 1.211.630 ton. Temuan ini menunjukkan bahwa geometri endapan membuat perolehan batubara relatif stabil, tetapi margin proyek sangat sensitif terhadap penurunan harga. Oleh karena itu, hasil optimasi tidak cukup dibaca dari perubahan cadangan; perubahan nilai ekonomi harus menjadi indikator utama dalam analisis sensitivitas.

Gambar 5 menunjukkan bahwa volume batubara hasil optimasi tetap sebesar 1.211.630 ton pada seluruh skenario, sedangkan profit yang direpresentasikan oleh *net value* menurun seiring peningkatan faktor diskon harga. Profit turun dari US\$208,31 juta pada skenario 0% menjadi US\$183,94 juta pada skenario 10% dan US\$135,55 juta pada skenario 30%. Pola ini menegaskan bahwa pada rentang skenario yang diuji, perubahan harga belum mengurangi tonase batubara yang masuk ke batas *pit* optimum, tetapi secara langsung menekan margin ekonomi proyek.



Gambar 5. Perubahan volume batubara dan profit pada faktor diskon harga 0%, 10%, dan 30%

c. Penyusunan *final pit*

Pit ramp Lerchs-Grossmann merupakan batas ekonomis dan belum sepenuhnya memenuhi kebutuhan operasi. *Final pit* disusun dari skenario dasar dengan menerapkan parameter *bench*, lereng, *ramp*, tikungan, grade jalan, dan lebar area kerja pada Tabel 4. Penyesuaian ini mengubah posisi batas *pit* karena desain harus menyediakan ruang manuver alat, akses angkut, dan geometri lereng yang dapat dibangun.

Tabel 4. Parameter geometri yang digunakan dalam *final pit*

Parameter	Nilai	Satuan
Tinggi <i>bench</i>	10	m
Lebar <i>low wall</i>	18	m
Lebar <i>high wall</i>	16	m
Single slope <i>low wall</i>	50	derajat
Single slope <i>high wall</i>	50	derajat
Lebar <i>ramp</i>	15	m
Lebar tikungan	20	m
Grade jalan	sekitar 10	%
Lebar area kerja	>= 20	m

Perbandingan spasial dilakukan antara *pit ramp* Lerchs-Grossmann pada skenario 0% dan *final pit* operasional. *Pit ramp* menunjukkan selubung ekonomi sebelum penerapan seluruh detail geometri, sedangkan *final pit* telah memuat *bench*, *ramp*, lebar kerja, dan keterikatan terhadap topografi. Perbandingan ditampilkan pada Gambar 6.

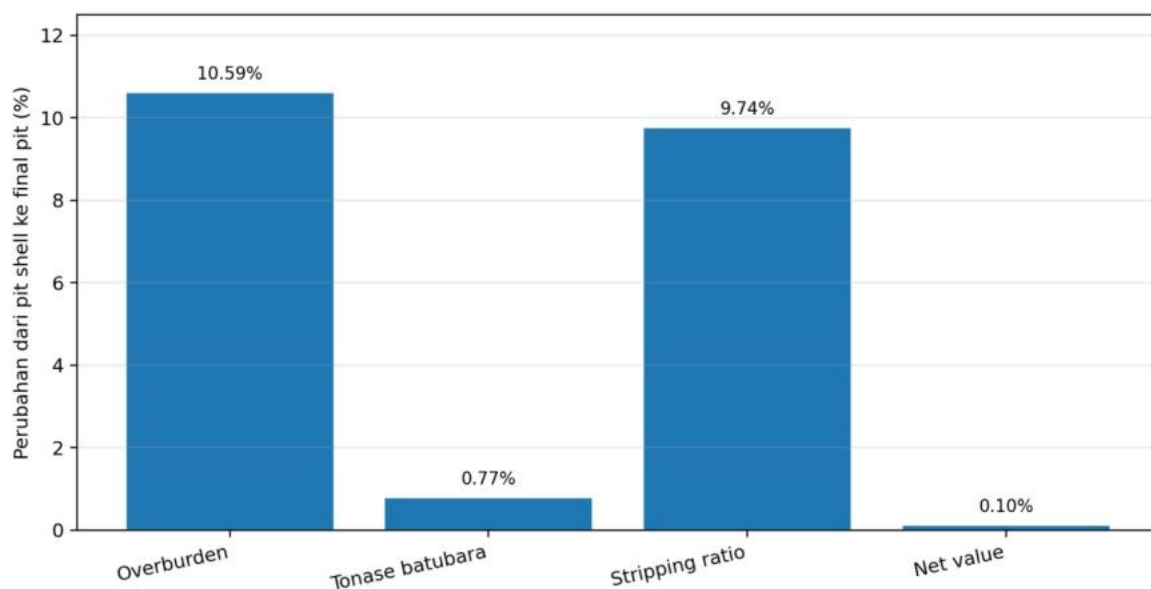


Gambar 6. Perbandingan (a) *pit ramp* skenario 0% dan (b) *final pit* operasional

Tabel 5. Perbandingan hasil optimasi awal dan *final pit*

Keterangan	Optimasi <i>pit</i>	<i>Final pit</i>	Perubahan
Volume <i>overburden</i>	7.475.250 BCM	8.267.250 BCM	+792.000 BCM (+10,59%)
Tonase coal	1.211.630 ton	1.220.940 ton	+9.310 ton (+0,77%)
<i>Stripping ratio</i>	6,169 BCM/ton	6,77 BCM/ton	+0,601 BCM/ton (+9,74%)
Net value	US\$208.312.874,50	US\$208.517.856,00	+US\$204.981,50 (+0,10%)
Marginal <i>stripping ratio</i>	-	85,07 BCM/ton	Di bawah BESR 85,53 BCM/ton

Tabel 5 menunjukkan bahwa penerapan parameter geometri operasional pada *pit ramp* menghasilkan perubahan yang cukup besar pada volume material, tetapi hanya memberikan tambahan nilai ekonomi yang relatif kecil. Volume *overburden* meningkat dari 7.475.250 BCM menjadi 8.267.250 BCM atau bertambah 792.000 BCM (10,59%). Pada saat yang sama, tonase batubara hanya meningkat dari 1.211.630 ton menjadi 1.220.940 ton atau bertambah 9.310 ton (0,77%). Ketidakseimbangan tersebut menyebabkan *stripping ratio* naik dari 6,169 BCM/ton menjadi 6,770 BCM/ton atau meningkat 9,74%. Meskipun beban pengupasan bertambah cukup signifikan, *net value final pit* masih meningkat sebesar US\$204.981,50 (0,10%), dari US\$208.312.874,50 menjadi US\$208.517.856,00.



Gambar 7. Perubahan relatif dari *pit ramp* ke *final pit*

Perubahan relatif tersebut divisualisasikan pada Gambar 7. Grafik memperlihatkan bahwa peningkatan *overburden* dan *stripping ratio* jauh lebih besar dibandingkan peningkatan tonase batubara dan *net value*. Kondisi ini menunjukkan bahwa penyesuaian *pit ramp* menjadi *final pit* terutama dipengaruhi oleh kebutuhan geometri operasional, seperti pembentukan *bench*, *ramp*, tikungan, dan area kerja, bukan semata-mata untuk memperoleh tambahan cadangan batubara. Oleh karena itu, tambahan batubara perlu dievaluasi berdasarkan beban pengupasan marginal yang ditimbulkan.

Berdasarkan selisih antara *pit ramp* dan *final pit*, marginal *stripping ratio* diperoleh sebesar 85,07 BCM/ton. Nilai tersebut masih sedikit lebih rendah daripada BESR operasional sebesar 85,53 BCM/ton, dengan selisih hanya 0,46 BCM/ton. Hal ini menunjukkan bahwa penyesuaian desain masih layak secara ekonomi, tetapi posisinya sangat dekat dengan batas impas. Kenaikan biaya pengupasan, penurunan harga jual batubara, atau perubahan geometri yang menambah *overburden* berpotensi menghilangkan keuntungan marginal *final pit*.

d. Sensitivitas ekonomi dan ketahanan bentuk *pit*

Konsistensi tonase batubara pada ketiga skenario menunjukkan bahwa posisi dan kontinuitas *seam* lebih dominan dalam menentukan perolehan batubara daripada perubahan harga pada rentang yang diuji. Sebaliknya, penurunan *net value* yang jauh lebih besar daripada perubahan *overburden* menunjukkan tingginya paparan ekonomi proyek terhadap harga jual. Dengan demikian, kestabilan bentuk *pit* tidak dapat diartikan sebagai kestabilan kelayakan finansial. Evaluasi sensitivitas harus melaporkan perubahan nilai dan perubahan fisik secara bersamaan.

Perbedaan *pit ramp* dan *final pit* juga menunjukkan bahwa desain operasional dapat menambah volume material secara tidak proporsional terhadap tambahan cadangan. Pada kasus ini, *overburden* meningkat 10,59% untuk memperoleh tambahan batubara 0,77%. SR total tetap rendah, tetapi indikator tersebut tidak menjelaskan apakah penambahan terakhir layak. MSR memberikan ukuran yang lebih tepat untuk keputusan perubahan batas karena secara langsung membandingkan tambahan beban pengupasan dengan tambahan batubara.

4. Simpulan

Penelitian menunjukkan bahwa algoritma Lerchs-Grossmann dapat membentuk batas *pit* ekonomis PT XYZ secara sistematis melalui integrasi geometri endapan dan nilai blok. Reprodusibilitas proses diperkuat dengan pemodelan tujuh lapisan batubara pada blok 1 m x 1 m x 1 m, agregasi ke grid ekonomi 20 m x 40 m, pemberian air block bernilai nol, akumulasi nilai secara vertikal dan horizontal, serta penelusuran balik batas *pit*. Kondisi dasar menghasilkan *net value* tertinggi sebesar US\$208,31 juta. Penurunan harga 30% menurunkan *net value* 34,93%, tetapi tidak mengubah tonase batubara dan hanya menurunkan *overburden* 3,13%; *pit* relatif stabil secara geometris, tetapi sensitif secara ekonomi. Kontribusi utama penelitian adalah kerangka dua tahap yang memisahkan pembentukan *pit ramp* ekonomis dari verifikasi *final pit* secara marginal. Penyesuaian geometri meningkatkan *overburden* 10,59%, batubara 0,77%, SR 9,74%, dan *net value* 0,10%. MSR sebesar 85,07 BCM/ton masih berada di bawah BESR 85,53 BCM/ton, sehingga perubahan desain masih layak, tetapi selisih 0,46 BCM/ton menunjukkan margin yang sempit. Berdasarkan temuan ini, penambahan batas *pit* sebaiknya diterima hanya apabila rasio tambahan *overburden* terhadap tambahan batubara tidak melebihi BESR dan memberikan perubahan *net value* positif. Prinsip tersebut perlu diuji pada endapan dan skenario biaya lain. Penelitian lanjutan perlu mengintegrasikan jadwal produksi dan NPV antarwaktu, analisis ketidakpastian, geoteknik rinci, disposasi, *dewatering*, serta kapasitas alat.

Ucapan Terimakasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Publikasi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta atas dukungan dana untuk penelitian ini dengan nomor kontrak UN.01/KPA/1064/2024.

Referensi

- Abalos, P., Brickey, A., & Goycoolea, M. (2025). Scheduling by Pushbacks: A historical review of optimization approaches for strategic open pit mine planning. *Resources Policy*, 111, 105759. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105759>
- Bargawa, W. S. (2018). Perencanaan Tambang Edisi Kedelapan. *Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jogyakarta: Yogyakarta*.

- Birch, C. (2018). Review of cut-off grade optimisation from Southern African mines. Student assignment based observations. *Resources Policy*, 56, 134–140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.10.004>
- Buelga Díaz, A., Diego Álvarez, I., Castañón Fernández, C., Krzemień, A., & Iglesias Rodríguez, F. J. (2021). Calculating ultimate pit limits and determining pushbacks in open-pit mining projects. *Resources Policy*, 72, 102058. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102058>
- Fathollahzadeh, K., Asad, M. W. A., Mardaneh, E., & Cigla, M. (2021). Review of Solution Methodologies for Open Pit Mine Production Scheduling Problem. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(8), 564–599. <https://doi.org/10.1080/17480930.2021.1888395>
- Hustrulid, W. A., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design* (3rd ed.). Crc Press.
- Lin, J., Asad, M. W. A., Topal, E., & Chang, P. (2025). Comparative analysis of mathematical models for integrated production scheduling and sustainable waste management in open-pit mining complexes. *Resources Policy*, 109, 105694. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105694>
- Lin, J., Asad, M. W. A., Topal, E., Chang, P., Huang, J., & Lin, W. (2024). A novel model for sustainable production scheduling of an open-pit mining complex considering waste encapsulation. *Resources Policy*, 91, 104949. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104949>
- Nancel-Penard, P., Jelvez, E., Mancilla, D., & Morales, G. (2025). Open-pit phase design considering operational constraints: Towards the generation of high adherence production planning policies. *Resources Policy*, 103, 105546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105546>
- Olmos-de-Aguilera, C., Campos, P. G., & Risso, N. (2023). Error reduction in long-term mine planning estimates using deep learning models. *Expert Systems with Applications*, 217, 119487. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119487>
- Saavedra, F., Morales, N., Nelis, G., & Gómez, R. (2023). A fast method to find smooth economic envelopes for block and panel caving mines. *Resources Policy*, 83, 103703. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103703>
- Widara, M. R., & Saputra, M. I. (2026). PENGARUH KARAKTERISTIK LITOLOGI TERHADAP EFEKTIVITAS FRAGMENTASI PELEDAKAN DAN DIGGING TIME MATERIAL OVERBURDEN PADA TAMBANG BATUBARA TERBUKA. *JURNAL TEKNIK PERTAMBANGAN*, 26(1), 31–41.
- Xu, X., Gu, X., Wang, Q., Zhao, Y., Zhu, Z., Wang, F., & Zhang, Z. (2023). Ultimate pit optimization with environmental problem for open-pit coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 366–372. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.024>