



Optimalisasi Cadangan Marginal Batubara *Seam C* melalui *Redesign pit* untuk Meningkatkan *Reserve recovery* dan Menurunkan *Stripping ratio*

Optimization of Marginal Seam C Coal Reserves through Pit Redesign to Improve Reserve recovery and Reduce Stripping ratio

Maya Gustina¹, Fariz Aditya^{1*}, Syari Rahma Yanti¹, Yoszi M. Anaperta¹

Abstrak

Penelitian ini mengkaji optimalisasi cadangan marginal batubara *seam C* pada area *Life of Mine Bottom pit* Jatiluhur, Pit Central NT Tutupan, PT Saptaindra Sejati Jobsite PT Adaro Indonesia. Penelitian bertujuan merancang *redesign pit* untuk meningkatkan *reserve recovery* dan menurunkan *stripping ratio* dengan tetap mempertimbangkan kestabilan lereng. Metode yang digunakan adalah penelitian terapan dengan pengolahan data topografi, geologi, geoteknik, dan desain *existing* menggunakan Minescape 2023. Estimasi cadangan batubara dan *overburden* dilakukan melalui *reserving* berbasis model geologi dan topografi terkini, sedangkan validasi geoteknik menggunakan parameter *Factor of Safety*. Hasil menunjukkan bahwa desain optimalisasi meningkatkan estimasi cadangan batubara dari 53.270 ton menjadi 313.979 ton dan menurunkan *stripping ratio* dari 0,31 menjadi 0,09. Kontribusi penelitian terletak pada penerapan *redesign pit* berbasis kondisi geologi aktual pada area *bottom pit* mendekati *mine out*. Nilai faktor keamanan memenuhi batas minimum perusahaan, sehingga desain yang diusulkan layak secara teknis-geoteknik.

Kata Kunci

redesign pit; cadangan marginal batubara; reserve recovery; stripping ratio; kestabilan lereng

Abstract

This study examines the optimization of marginal seam C coal reserves in the Life of Mine area of Bottom pit Jatiluhur, Pit Central NT Tutupan, PT Saptaindra Sejati Jobsite PT Adaro Indonesia. It aimed to develop a pit redesign to improve reserve recovery and reduce the stripping ratio while maintaining slope stability. This applied study processed topographic, geological, geotechnical, and existing pit design data using Minescape 2023. Coal reserves and overburden were estimated through reserving based on updated geological and topographic models, while geotechnical validation used the Factor of Safety parameter. The optimized design increased estimated coal reserves from 53,270 tons to 313,979 tons and reduced the stripping ratio from 0.31 to 0.09. The contribution lies in applying pit redesign based on actual geological conditions to a near mine-out bottom pit. The Factor of Safety met the company's minimum requirement, indicating technical and geotechnical feasibility.

Keywords

pit redesign; marginal coal reserve; reserve recovery; stripping ratio; slope stability

¹ Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang Sumatera Barat, Indonesia
Jln. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar, Padang Sumatera Barat, Indonesia

* farizaditya@unp.ac.id

Dikirimkan: 30 Mei 2026. Diterima: 30 Juni 2026. Diterbitkan: 3 Juli 2026.



PENDAHULUAN

Optimalisasi cadangan batubara merupakan bagian penting dalam perencanaan tambang terbuka karena berhubungan langsung dengan pemanfaatan sumber daya, efisiensi pengupasan material penutup, dan keberlanjutan operasi penambangan. Dalam konteks penambangan batubara skala besar, perencanaan tambang tidak hanya diarahkan untuk memperoleh cadangan sebesar-besarnya, tetapi juga perlu mempertimbangkan batas teknis penambangan, rasio pengupasan, keselamatan lereng, dan konservasi sumber daya mineral dan batubara [1]. Cadangan yang berada pada area marginal, seperti *sidewall*, *bottom pit*, atau batas akhir penambangan, sering kali belum terakomodasi secara optimal dalam desain *existing* sehingga berpotensi menjadi *coal loss* apabila tidak dievaluasi kembali melalui pendekatan teknis yang tepat [2].

Desain pit menjadi salah satu komponen utama dalam perencanaan tambang terbuka karena menentukan batas penambangan, volume cadangan tertambang, volume *overburden*, geometri lereng, akses jalan tambang, serta nilai *stripping ratio*. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa optimasi geometri lereng dan redesign area penambangan dapat meningkatkan stabilitas desain serta mendukung pemanfaatan material atau cadangan yang sebelumnya belum optimal [3]. Kajian *Life of Mine* juga menegaskan bahwa desain tambang perlu disusun secara sekuensial dengan mempertimbangkan aspek kestabilan lereng, geometri rekomendasi, dan potensi cadangan marginal agar rencana penambangan tetap dapat dijalankan secara aman [4]. Selain itu, rancangan ulang *ultimate pit limit* dapat menjadi strategi penting ketika terjadi perubahan asumsi teknis maupun ekonomi, karena perubahan tersebut dapat memengaruhi batas penambangan dan cadangan yang dapat diambil [5].

Dalam pengembangan desain tambang terbuka, optimalisasi bentuk pit dan geometri *pitwall* telah banyak dikaji untuk meningkatkan nilai teknis dan ekonomi kegiatan penambangan tanpa mengabaikan aspek keselamatan lereng [6]. Studi lain menunjukkan bahwa pemodelan desain pit menggunakan perangkat lunak tambang, seperti Minescape, dapat membantu proses perancangan pit, perhitungan volume batubara, perhitungan *overburden*, dan evaluasi *stripping ratio* berdasarkan data topografi serta model geologi yang tersedia [7]. Perencanaan desain pit pada tambang batubara juga memerlukan integrasi antara data pemodelan batubara, geometri lereng, batas penambangan, jalan tambang, dan *stripping ratio* agar desain yang dihasilkan dapat menggambarkan potensi cadangan tertambang secara lebih akurat [8]. Dengan demikian, *redesign pit* berbasis data geologi dan topografi aktual menjadi pendekatan yang relevan untuk mengevaluasi ulang cadangan marginal pada area tambang yang mendekati batas akhir penambangan.

Permasalahan tersebut ditemukan pada area *Life of Mine (LOM) Bottom pit* Jatiluhur, Pit Central NT Tutupan, PT Saptaindra Sejati Jobsite PT Adaro Indonesia. Berdasarkan desain *existing* perusahaan, batas akhir penambangan pada area tersebut direncanakan hingga elevasi -96 mdpl karena lapisan batubara target utama dianggap telah habis tertambang. Namun, evaluasi geologi aktual dan interpretasi model batubara terbaru menunjukkan adanya penebalan *seam C* pada beberapa bagian *sidewall* dan *bottom pit*. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa masih terdapat potensi cadangan marginal yang belum sepenuhnya terakomodasi dalam desain penambangan sebelumnya. Posisi dan kondisi *seam C* pada area *Bottom pit* Jatiluhur ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi Seam C pada Area Bottom pit Jatiluhur

Gambar 1 menunjukkan area seam C yang menjadi fokus optimalisasi pada Bottom pit Jatiluhur. Keberadaan seam C pada area sidewall dan bottom pit menunjukkan perlunya evaluasi desain existing agar cadangan yang masih berpotensi ditambang tidak tertinggal sebagai coal loss. Dalam konteks ini, desain existing belum dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar pengambilan keputusan karena belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi geologi aktual terbaru. Oleh sebab itu, diperlukan redesign pit yang mampu mengakomodasi potensi cadangan seam C hingga batas mine out dengan tetap mempertimbangkan aspek geoteknik dan standar geometri lereng perusahaan.

Secara operasional, lokasi penelitian berada pada Pit Central NT Tutupan sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Gambar tersebut memberikan gambaran spasial mengenai area pit yang menjadi konteks pelaksanaan optimalisasi, termasuk kondisi bukaan tambang, area kerja, dan batas operasional yang terkait dengan perencanaan redesign pit.



Gambar 2. Lokasi Pit Central NT Tutupan sebagai Area Penelitian

Optimalisasi pada area bottom pit perlu memperhatikan dua aspek utama, yaitu peningkatan reserve recovery dan pengendalian risiko geoteknik. Pada satu sisi, pendalaman atau perluasan batas penambangan dapat meningkatkan cadangan tertambang. Pada sisi lain, perubahan geometri pit dapat memengaruhi kestabilan lereng sehingga memerlukan validasi melalui analisis faktor keamanan. Penelitian mengenai desain pit jangka pendek menunjukkan bahwa rancangan pit harus memperhitungkan geometri lereng, kemampuan operasional alat, dan volume cadangan agar rencana penambangan dapat diterapkan secara teknis [9]. Studi estimasi cadangan marginal menunjukkan bahwa cadangan marginal perlu diidentifikasi

melalui kegiatan *pit optimization* dan dapat berada pada rentang antara *pit shell* dengan *stripping ratio* optimum dan *pit shell* pada batas *break-even stripping ratio* sehingga pemanfaatannya perlu mempertimbangkan perubahan faktor teknis dan ekonomi [10]. Oleh karena itu, optimalisasi cadangan marginal *seam C* perlu dikaji secara terintegrasi antara aspek cadangan, *stripping ratio*, dan kestabilan lereng.

Analisis kestabilan lereng menjadi bagian penting dalam *redesign pit* karena perubahan geometri lereng dan pendalaman pit berpotensi menurunkan nilai faktor keamanan. Kajian kestabilan lereng tambang terbuka menunjukkan bahwa metode limit equilibrium dan analisis risiko dapat digunakan untuk menunjang perencanaan infrastruktur tambang dan mengevaluasi potensi ketidakstabilan lereng [11]. Selain itu, pengembangan metode optimasi batas pit yang mempertimbangkan biaya ekologis, keselamatan lereng, dan manfaat ekonomi menunjukkan bahwa optimasi pit tidak cukup hanya dilihat dari jumlah cadangan yang diperoleh, tetapi juga harus mempertimbangkan faktor keselamatan dan keberlanjutan desain [12]. Dengan demikian, *redesign pit* pada area LOM *Bottom pit* Jatiluhur perlu divalidasi tidak hanya berdasarkan peningkatan cadangan dan penurunan *stripping ratio*, tetapi juga berdasarkan pemenuhan kriteria kestabilan lereng.

Berdasarkan sintesis penelitian terdahulu, kajian mengenai optimalisasi cadangan batubara telah banyak membahas desain pit, *sidewall optimization*, *ultimate pit limit*, *stripping ratio*, dan kestabilan lereng. Namun, kajian yang secara spesifik mengintegrasikan evaluasi kondisi geologi aktual, *redesign pit* pada area *bottom pit* yang mendekati *mine out*, estimasi tambahan cadangan marginal *seam C*, perubahan *stripping ratio*, serta validasi kestabilan lereng pada satu studi terapan masih terbatas. Celah inilah yang menjadi dasar penelitian ini. Kebaruan penelitian terletak pada penerapan *redesign pit* berbasis kondisi geologi aktual terbaru untuk mengoptimalkan cadangan marginal *seam C* pada area LOM *Bottom pit* Jatiluhur yang mendekati kondisi *mine out*.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang *redesign pit* pada area LOM *Bottom pit* Jatiluhur guna mengoptimalkan pemanfaatan cadangan marginal batubara *seam C* berdasarkan kondisi geologi aktual. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi tambahan cadangan batubara yang dapat diperoleh melalui *redesign pit*, mengevaluasi perubahan *stripping ratio* sebagai indikator efisiensi pengupasan *overburden*, serta memvalidasi kestabilan lereng menggunakan faktor keamanan sehingga desain yang diusulkan dapat dinilai secara teknis-geoteknik sebelum diterapkan pada kegiatan penambangan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi teknis terapan yang bertujuan mengoptimalkan cadangan marginal batubara *seam C* melalui *redesign pit* pada area *Life of Mine (LOM) Bottom pit* Jatiluhur, Pit Central NT Tutupan. Pendekatan ini digunakan karena penelitian berfokus pada evaluasi desain *existing*, pemodelan kondisi geologi aktual, perancangan desain pit optimalisasi, estimasi cadangan dan *overburden*, perhitungan *stripping ratio*, serta validasi kestabilan lereng. Tahapan tersebut sejalan dengan prinsip perencanaan pit yang menempatkan desain tambang, geometri lereng, *sequence* penambangan, dan estimasi cadangan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis dalam tambang terbuka [4], [13]. Objek penelitian adalah cadangan marginal batubara *seam C* yang masih tersisa pada area *sidewall* dan *bottom pit* hingga batas akhir penambangan atau *mine out*.

Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer berupa permintaan optimalisasi cadangan dari pihak operasional tambang sebagai dasar dilakukannya evaluasi terhadap desain *existing*. Data sekunder diperoleh dari perusahaan dan digunakan dengan izin untuk kepentingan penelitian akademik. Data tersebut meliputi topografi terbaru, model geologi batubara, desain pit *existing*, parameter geoteknik, hasil analisis kestabilan lereng, standar geometri lereng perusahaan, dan data produksi yang relevan. Seluruh data tersebut

diverifikasi melalui observasi lapangan dan evaluasi teknis untuk memastikan kesesuaian antara model, kondisi aktual, dan batas area penelitian.

Pengolahan data dilakukan menggunakan Minescape 2023. Tahap awal dilakukan melalui import dan validasi data topografi, model geologi batubara, serta desain *existing* untuk memastikan kesesuaian koordinat, elevasi, dan batas area penelitian. Selanjutnya, dilakukan analisis *contour structure seam C* dan pembuatan *cross section* untuk mengidentifikasi penyebaran, ketebalan, kontinuitas lapisan batubara, serta potensi cadangan marginal yang masih tersisa pada area *sidewall* dan *bottom pit*. Penggunaan perangkat lunak tambang dalam desain pit dan estimasi cadangan relevan untuk mengintegrasikan data geologi, topografi, geometri lereng, batas pit, dan *stripping ratio* dalam proses perencanaan tambang [7], [14].

Validasi teknis dilakukan melalui evaluasi geoteknik menggunakan parameter kohesi (c), sudut geser dalam (φ), berat isi material (γ), kondisi muka air tanah, dan geometri lereng yang berlaku pada area penelitian. Analisis kestabilan lereng digunakan untuk memastikan bahwa desain pit optimalisasi yang diusulkan tetap memenuhi kriteria keselamatan lereng. Dalam penelitian ini, desain dinyatakan memenuhi kriteria teknis apabila nilai *Factor of Safety* (FoS) berada di atas batas minimum yang ditetapkan perusahaan dan sesuai dengan acuan teknis pertambangan yang berlaku [11], [15], [16]. Parameter penelitian yang digunakan dalam evaluasi geoteknik disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Geoteknik dan Geometri Lereng untuk Evaluasi Desain Pit Optimalisasi

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Cohesion</i> (c)	1000	kPa
<i>Friction Angle</i> (φ)	15	°
<i>Unit Weight</i> (γ)	22	kN/m ³
<i>Groundwater Condition</i>	<i>Water surface</i>	-
<i>Bench height</i>	16	m
<i>Bench width</i>	8	m
<i>Overall slope angle</i>	16	°
<i>Minimum FoS</i>	1,20	-

Tabel 1 menunjukkan parameter geoteknik dan geometri lereng yang digunakan sebagai dasar evaluasi kestabilan lereng. Parameter tersebut mencakup sifat mekanik material, kondisi muka air tanah, dimensi jenjang, sudut lereng keseluruhan, dan batas minimum FoS. Parameter ini digunakan untuk menilai apakah perubahan desain pit akibat optimalisasi cadangan *seam C* masih berada dalam batas kestabilan lereng yang dapat diterima secara teknis.

Berdasarkan hasil analisis *contour structure* dan *cross section*, dilakukan *redesign pit* dengan mengacu pada parameter geometri lereng perusahaan dan kondisi geologi aktual. Desain yang dihasilkan kemudian digunakan dalam proses *reserving* untuk menghitung volume *overburden*, volume batubara, tonase batubara, dan *stripping ratio*. Hasil estimasi desain optimalisasi dibandingkan dengan desain *existing* untuk mengevaluasi perubahan *reserve recovery* dan efisiensi pengupasan *overburden*. Selanjutnya, desain diverifikasi melalui analisis kestabilan lereng berdasarkan parameter geoteknik yang berlaku.

Estimasi volume batubara dilakukan menggunakan metode *polygon*. Metode ini membagi area penelitian ke dalam beberapa area pengaruh berdasarkan model geologi, data *seam*, dan batas desain pit. Setiap *polygon* merepresentasikan area pengaruh tertentu, sehingga volume batubara dihitung berdasarkan luas area pengaruh dan ketebalan batubara pada area tersebut. Metode *polygon* relevan digunakan untuk estimasi sumber daya atau cadangan batubara karena proses perhitungannya didasarkan pada pembagian area pengaruh, ketebalan *seam*,

dan konversi volume menjadi tonase [17]. Persamaan volume batubara disajikan sebagai berikut.

$$V = A \times t \quad (1)$$

Keterangan:

V = volume batubara (m³)

A = luas area pengaruh (m²)

t = ketebalan batubara (m)

Luas area pengaruh (A) diperoleh dari hasil deliniasi area cadangan yang berada di dalam batas desain pit menggunakan Minescape 2023 dan dinyatakan dalam satuan meter persegi (m²). Ketebalan batubara (t) diperoleh dari model geologi *seam C* yang telah divalidasi melalui analisis *contour structure* dan *cross section* serta dinyatakan dalam satuan meter (m). Total volume batubara diperoleh dari penjumlahan seluruh volume *polygon* yang berada di dalam batas desain pit optimalisasi.

Tonase batubara dihitung dengan mengalikan volume batubara terhadap densitas batubara yang digunakan pada area penelitian. Persamaan tonase batubara disajikan sebagai berikut.

$$T = V \times \rho \quad (2)$$

Keterangan:

T = tonase batubara (ton)

V = volume batubara (m³)

ρ = densitas batubara (ton/m³)

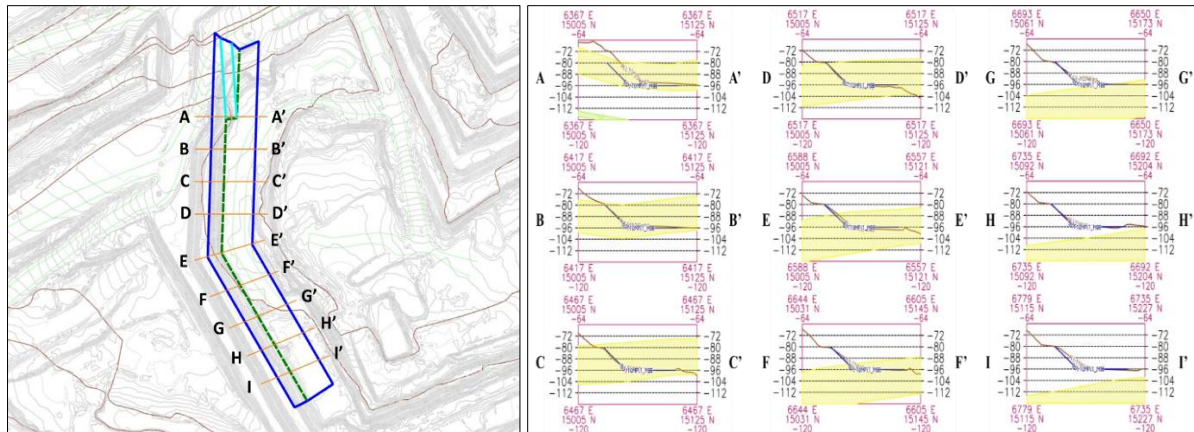
Nilai densitas batubara (ρ) yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 1,26 ton/m³ berdasarkan data kualitas batubara dan parameter densitas yang digunakan oleh PT Saptaindra Sejati Jobsite PT Adaro Indonesia. Nilai tersebut digunakan untuk mengonversi volume batubara hasil estimasi menjadi tonase cadangan agar dapat dibandingkan dengan data perencanaan dan realisasi produksi perusahaan. Meskipun densitas batubara dapat bervariasi akibat perbedaan kualitas batubara, kadar air, dan kondisi geologi setempat, penelitian ini menggunakan nilai densitas rata-rata *seam C* agar perhitungan tonase dilakukan secara konsisten pada seluruh area desain pit optimalisasi.

Analisis akhir dilakukan dengan membandingkan desain *existing* dan desain optimalisasi berdasarkan estimasi cadangan batubara, volume *overburden*, *stripping ratio*, dan nilai FoS. Perbandingan tersebut digunakan untuk menilai apakah *redesign pit* mampu meningkatkan pemanfaatan cadangan marginal *seam C* tanpa mengabaikan batas keselamatan lereng. Dengan demikian, hasil metode ini tidak digunakan untuk menyimpulkan kelayakan ekonomi secara menyeluruh, tetapi dibatasi pada kelayakan teknis-geoteknik berdasarkan estimasi cadangan, *stripping ratio*, dan faktor keamanan lereng.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi *Existing Area* Penelitian

Kondisi awal area penelitian dianalisis melalui penampang desain *existing* dan topografi pada area *Bottom pit* Jatiluhur sebelum dilakukan optimalisasi. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi posisi *seam C* terhadap batas desain *existing* serta menilai potensi cadangan marginal yang belum terakomodasi dalam rancangan penambangan sebelumnya. Hasil *cross section* desain *existing* dan topografi sebelum optimalisasi disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Cross section Desain Existing dan Topografi Sebelum Optimalisasi

Gambar 3 menunjukkan bahwa area berwarna kuning pada penampang merepresentasikan posisi batubara seam C yang menjadi target optimalisasi. Garis berwarna biru menunjukkan batas desain existing yang hanya mencapai elevasi -96 mdpl. Dengan batas tersebut, kegiatan coal getting pada desain existing hanya dapat dilakukan sampai elevasi -96 mdpl. Sementara itu, posisi seam C pada beberapa bagian sidewall dan bottom pit masih menunjukkan potensi cadangan di luar batas desain existing. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian cadangan marginal seam C belum terakomodasi dalam desain sebelumnya dan perlu dievaluasi melalui rancangan desain pit baru yang dapat mencapai batas rencana operasional sampai elevasi -128 mdpl.

Hasil Estimasi Cadangan Batubara dan Overburden Berdasarkan Desain Existing

Estimasi cadangan batubara dan volume overburden pada desain existing dihitung berdasarkan model geologi dan topografi terbaru. Ringkasan hasil reserving pada desain existing disajikan pada Tabel 2.

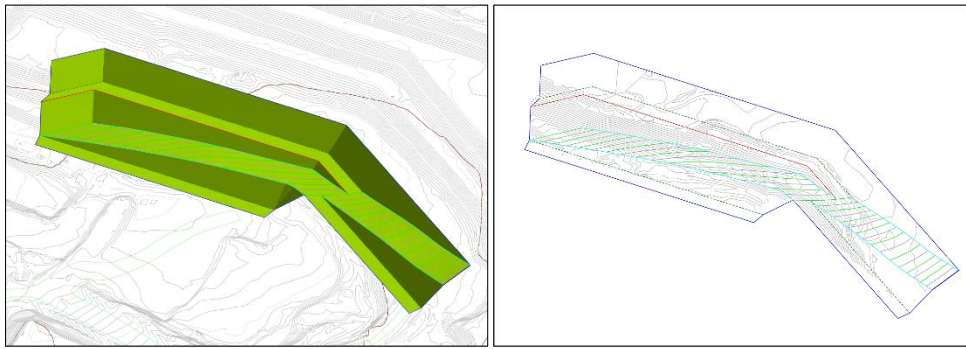
Tabel 2. Estimasi Cadangan Batubara dan Overburden pada Desain Existing

Desain	Seam	Elevasi Batas Desain	Cadangan Batubara (ton)	Volume Overburden (BCM)	Stripping Ratio
Existing	C	-96 mdpl	53.270	16.569	0,31

Tabel 2 menunjukkan bahwa desain existing menghasilkan estimasi cadangan batubara sebesar 53.270 ton dan volume overburden sebesar 16.569 BCM. Berdasarkan nilai tersebut, stripping ratio yang diperoleh adalah 0,31. Hasil ini menjadi kondisi pembandingan untuk menilai perubahan cadangan batubara, volume overburden, dan stripping ratio setelah dilakukan redesign pit.

Rancangan Desain Optimalisasi

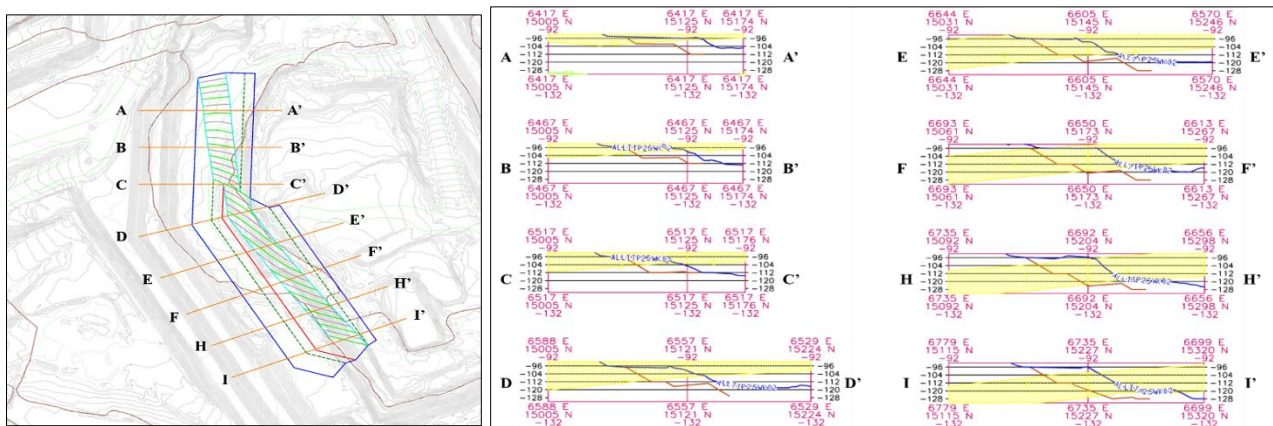
Rancangan desain pit optimalisasi disusun berdasarkan evaluasi kondisi geologi aktual, posisi seam C, batas rencana operasional, serta parameter geometri lereng yang telah ditetapkan dalam metode penelitian. Rancangan desain pit optimalisasi disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rancangan Desain Pit Optimalisasi

Gambar 4 menunjukkan rancangan desain pit optimalisasi yang membentuk akses ramp dan mengikuti posisi lapisan batubara seam C pada area Bottom pit Jatiluhur. Desain ini diarahkan untuk mencapai batas mine out hingga elevasi -128 mdpl. Luas area optimalisasi yang direncanakan adalah 3,72 ha. Rancangan tersebut kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan cadangan batubara, volume overburden, stripping ratio, dan evaluasi geoteknik.

Hasil cross section desain optimalisasi dan topografi sebelum pelaksanaan optimalisasi disajikan pada Gambar 5. Penampang ini digunakan untuk memperlihatkan hubungan antara desain optimalisasi, posisi seam C, dan elevasi target penambangan.



Gambar 5. Cross section Desain Optimalisasi dan Topografi Sebelum Optimalisasi

Gambar 5 menunjukkan bahwa desain optimalisasi mencapai elevasi mine out seam C Bottom pit Jatiluhur hingga -128 mdpl. Garis berwarna oranye merepresentasikan desain optimalisasi, sedangkan posisi seam C ditampilkan sebagai target coal getting pada penampang. Berdasarkan penampang tersebut, rancangan desain optimalisasi memungkinkan kegiatan coal getting dilakukan lebih dalam dibandingkan desain existing.

Hasil Estimasi Cadangan Batubara dan Overburden Berdasarkan Desain Optimalisasi

Berdasarkan hasil reserving menggunakan desain optimalisasi, diperoleh estimasi cadangan batubara dan volume overburden pada area Bottom pit Jatiluhur sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

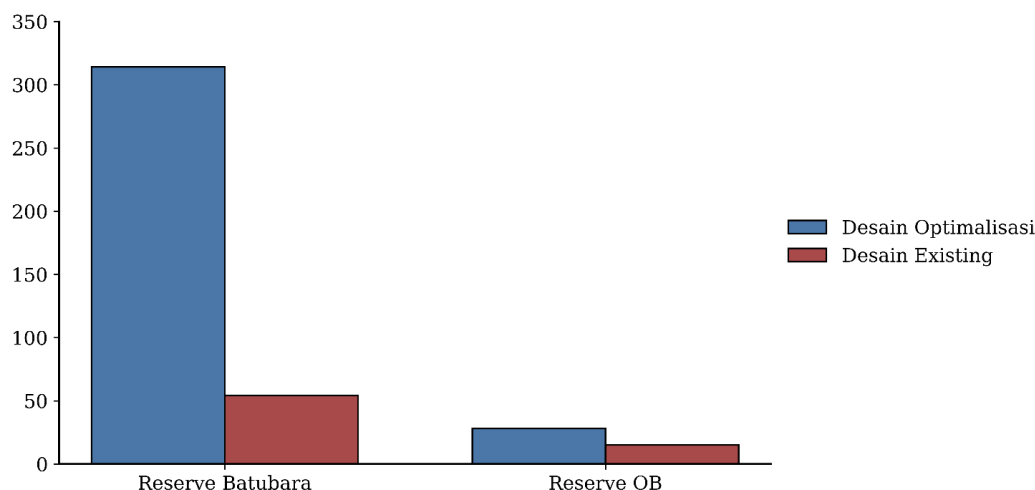
Tabel 3. Estimasi Cadangan Batubara dan Overburden pada Desain Optimalisasi

Desain	Seam	Elevasi Batas Desain	Cadangan Batubara (ton)	Volume Overburden (BCM)	Stripping Ratio
Optimalisasi	C	-128 mdpl	313.979	27.868	0,09

Tabel 3 menunjukkan bahwa desain optimalisasi menghasilkan estimasi cadangan batubara sebesar 313.979 ton dan volume *overburden* sebesar 27.868 BCM. Nilai *stripping ratio* yang diperoleh adalah 0,09. Hasil ini menunjukkan adanya peningkatan estimasi cadangan batubara setelah batas desain diperluas hingga elevasi -128 mdpl.

Perbandingan Estimasi Cadangan Batubara dan *Overburden* antara Desain *Existing* dan Desain Optimalisasi

Perbandingan antara desain *existing* dan desain optimalisasi dilakukan untuk melihat perubahan estimasi cadangan batubara, volume *overburden*, dan *stripping ratio*. Perbandingan tersebut disajikan secara visual pada Gambar 6.

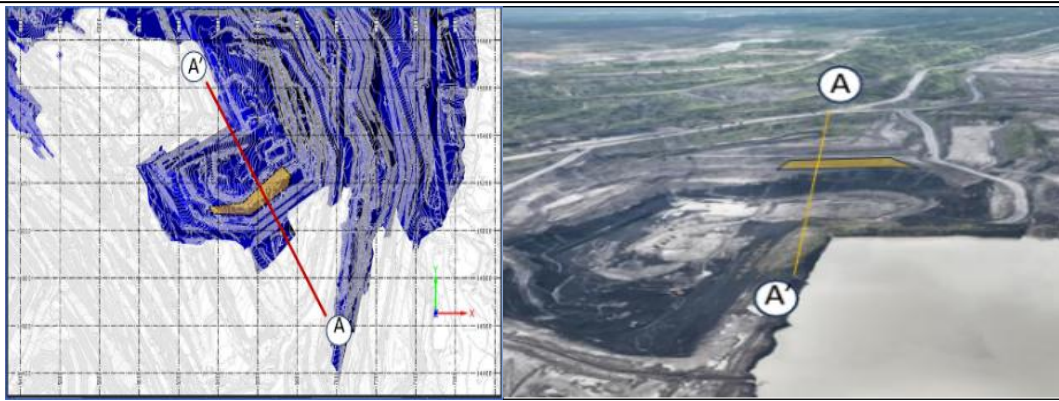


Gambar 6. Perbandingan Estimasi Cadangan Batubara dan Volume *Overburden* antara Desain *Existing* dan Desain Optimalisasi dalam Skala Ribuan

Gambar 6 menunjukkan perbedaan estimasi cadangan batubara dan volume *overburden* antara desain *existing* dan desain optimalisasi. Pada desain *existing*, cadangan batubara diestimasi sebesar 53.270 ton, sedangkan pada desain optimalisasi meningkat menjadi 313.979 ton. Dengan demikian, terdapat tambahan estimasi cadangan batubara sebesar 260.709 ton atau sekitar 489,4%. Volume *overburden* juga meningkat dari 16.569 BCM menjadi 27.868 BCM, atau bertambah sebesar 11.299 BCM. Meskipun volume *overburden* bertambah, nilai *stripping ratio* menurun dari 0,31 menjadi 0,09, atau turun sekitar 70,97%. Secara deskriptif, hasil ini menunjukkan bahwa desain optimalisasi menghasilkan estimasi cadangan batubara yang lebih besar dengan *stripping ratio* yang lebih rendah dibandingkan desain *existing*.

Hasil Analisis Keamanan Desain Optimalisasi

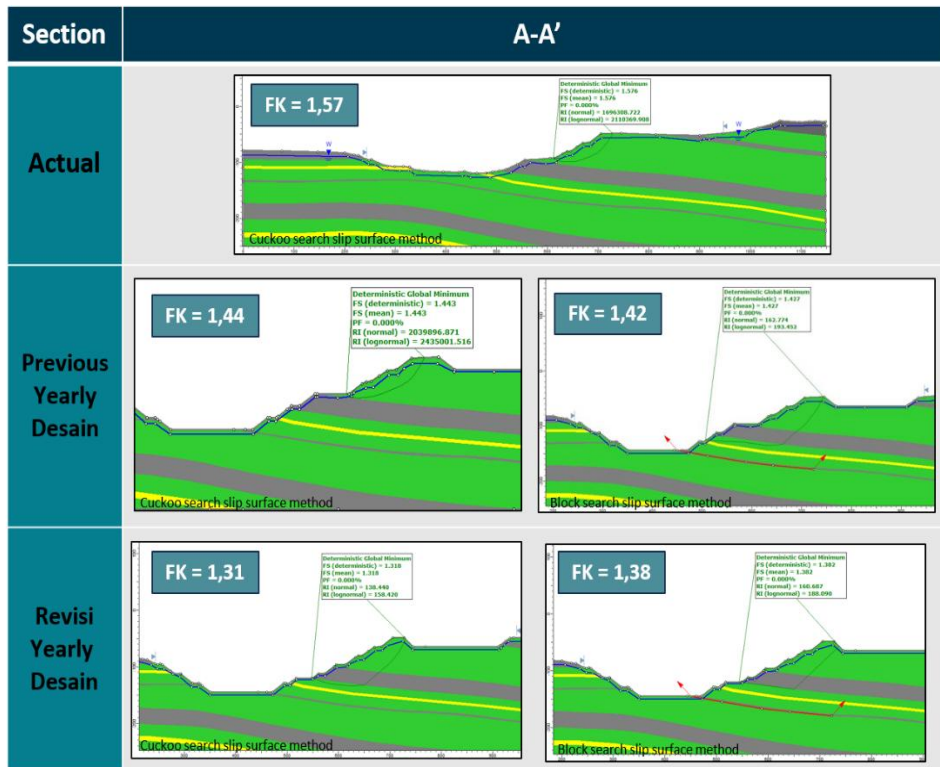
Analisis keamanan desain optimalisasi dilakukan melalui evaluasi kestabilan lereng pada area *loading seam C Bottom pit* Jatiluhur. Lokasi *line section A-A'* yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Lokasi Line section A-A' pada Area Bottom pit Jatiluhur

Gambar 7 menunjukkan posisi line section A-A' pada area Bottom pit Jatiluhur yang digunakan sebagai acuan dalam analisis kestabilan lereng. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kondisi kestabilan lereng pada area loading seam C tahun 2025 dengan menggunakan data SCT 33A dari tim geoteknik perusahaan.

Hasil analisis kestabilan lereng pada area loading seam C Bottom pit Jatiluhur disajikan pada Gambar 8.



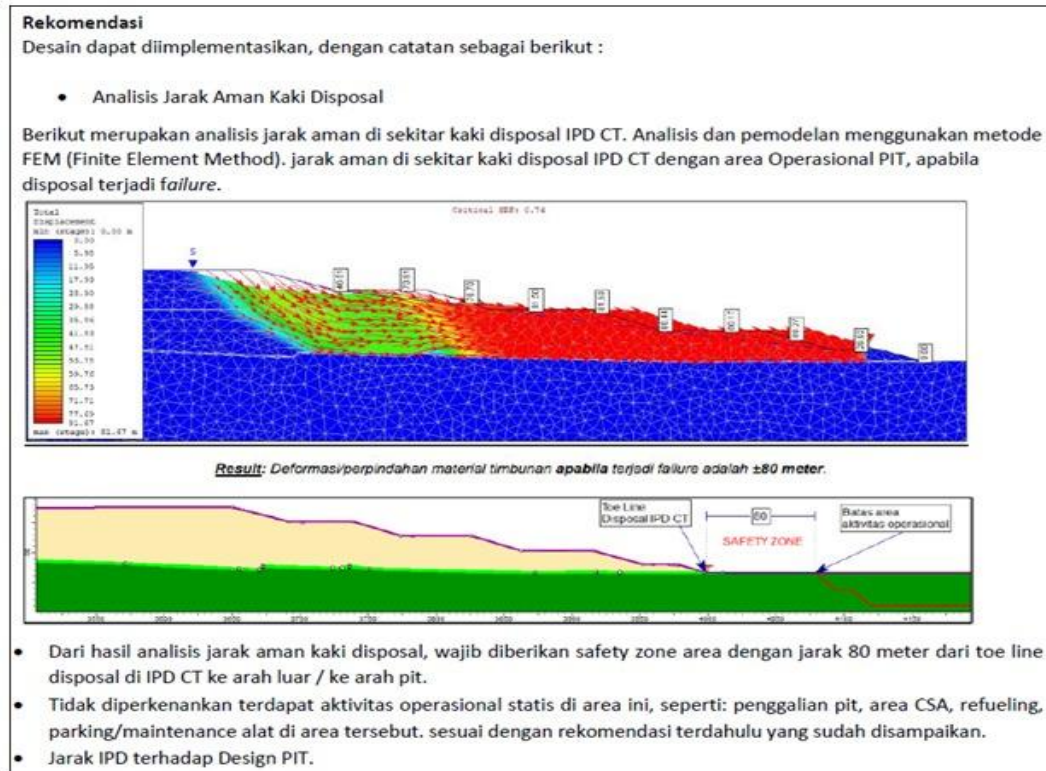
Gambar 8. Hasil Slope Stability Analysis pada Area Loading seam C Bottom pit Jatiluhur

Gambar 8 menunjukkan bahwa kondisi aktual berdasarkan topografi update Week 2 tahun 2025 memiliki nilai Factor of Safety (FoS) sebesar 1,57. Pada desain sebelumnya, nilai FoS adalah 1,42 berdasarkan metode block search dan 1,44 berdasarkan metode cuckoo search. Pada desain optimalisasi, nilai FoS menjadi 1,38 berdasarkan metode block search dan 1,31 berdasarkan metode cuckoo search. Nilai FoS pada desain optimalisasi lebih rendah dibandingkan kondisi aktual dan desain sebelumnya. Namun, seluruh nilai FoS masih berada di atas batas minimum perusahaan sebesar 1,20. Dengan demikian, desain optimalisasi masih memenuhi kriteria kestabilan lereng berdasarkan parameter geoteknik yang digunakan dalam penelitian.

Rekomendasi geoteknik dari tim *owner* terhadap desain optimalisasi disajikan pada Gambar 9.

Dari diskusi kami di tim AI, silahkan di eksekusi,

Berikut rekomendasi geoteknik kami terhadap design yearly maupun lom :



Mohon dibantu **report detail TC yang loading** di area tersebut dan dilaporkan ke kami,

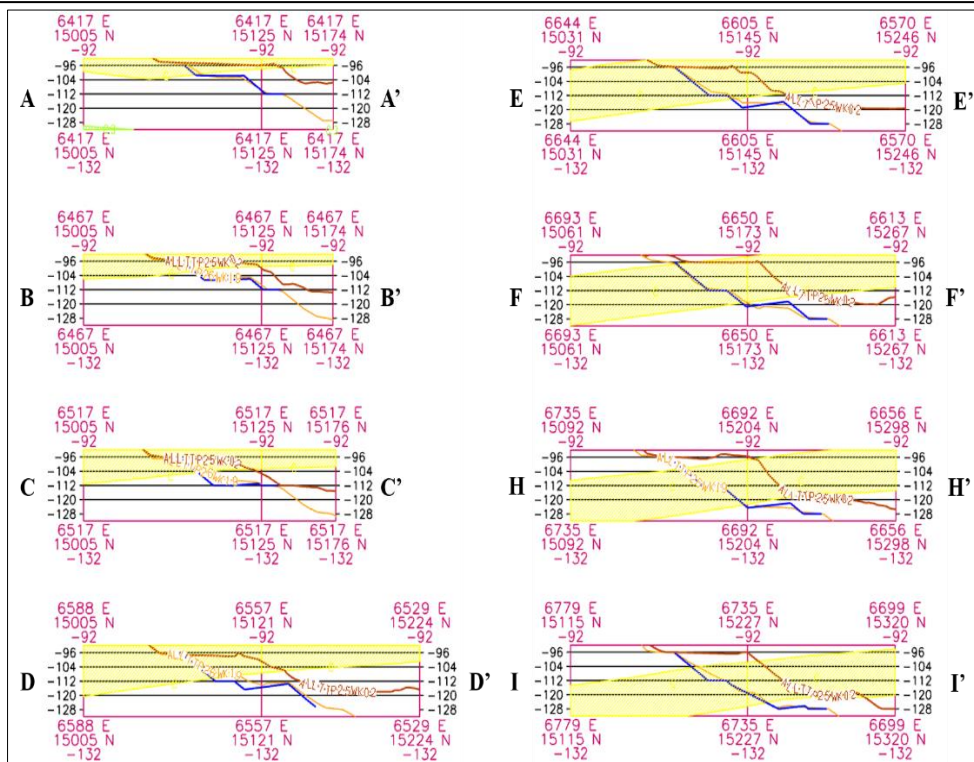
Salam,

Gambar 9. Rekomendasi Geoteknik *Owner* terhadap Desain Optimalisasi

Gambar 9 menunjukkan rekomendasi tim geoteknik *owner* terkait implementasi desain optimalisasi. Berdasarkan dokumen rekomendasi tersebut, desain dapat diimplementasikan dengan tetap memperhatikan pengendalian kondisi lereng dan pemantauan geoteknik selama kegiatan penambangan berlangsung. Rekomendasi tersebut juga mencakup pengaturan zona aman pada area sekitar kaki disposai untuk mengurangi potensi risiko terhadap aktivitas operasional. Data rekomendasi geoteknik yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari dokumen teknis internal perusahaan yang digunakan dengan izin untuk kepentingan akademik, sedangkan informasi yang bersifat rahasia tidak ditampilkan secara rinci dalam manuscript.

Kondisi Area Setelah Optimalisasi Pit

Kondisi area setelah pelaksanaan optimalisasi dievaluasi melalui perbandingan antara desain optimalisasi, topografi sebelum optimalisasi, dan topografi setelah optimalisasi. Hasil *cross section* setelah optimalisasi disajikan pada Gambar 10.

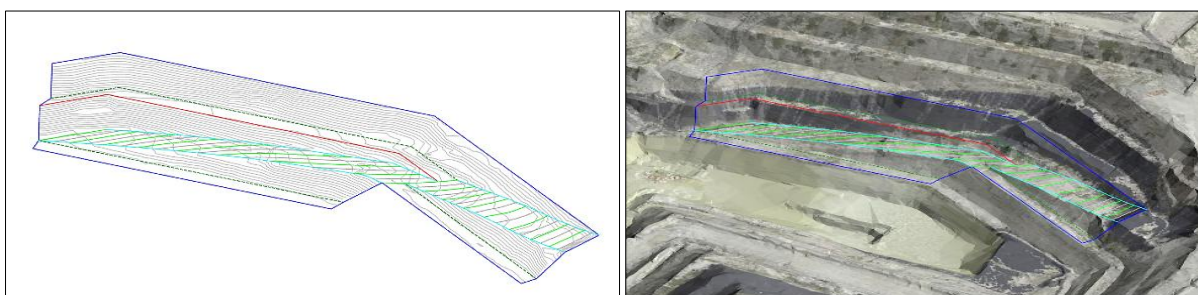


Gambar 10. Cross section Desain Optimalisasi, Topografi Sebelum Optimalisasi, dan Topografi Setelah Optimalisasi

Gambar 10 menunjukkan perbandingan penampang antara desain optimalisasi dan topografi aktual setelah pelaksanaan optimalisasi. Garis berwarna oranye merepresentasikan topografi aktual setelah optimalisasi, sedangkan garis berwarna biru merepresentasikan batas desain optimalisasi. Kesesuaian bentuk penampang antara topografi aktual dan batas desain menunjukkan bahwa pelaksanaan optimalisasi *seam C Bottom pit* Jatiluhur mengikuti rancangan desain hingga elevasi *mine out* -128 mdpl.

Pelaksanaan Optimalisasi Batubara Seam C pada Sisi Sidewall Bottom pit Jatiluhur

Pelaksanaan optimalisasi *seam C* pada sisi *sidewall Bottom pit* Jatiluhur dilakukan melalui kegiatan *coal getting* pada setiap bench *sidewall*. Kondisi aktual setelah pelaksanaan optimalisasi disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Kondisi Aktual Setelah Pelaksanaan Optimalisasi Batubara Seam C Bottom pit Jatiluhur

Gambar 11 menunjukkan kondisi aktual area setelah pelaksanaan optimalisasi batubara *seam C* pada *Bottom pit* Jatiluhur. Visual tersebut memperlihatkan batas desain dan kondisi aktual area penambangan setelah proses optimalisasi dilaksanakan. Kondisi area setelah optimalisasi juga didokumentasikan melalui foto drone sebagaimana disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Foto Drone Area Setelah Pelaksanaan Optimalisasi

Berdasarkan hasil eksekusi desain optimalisasi di lapangan, total tonase batubara *seam C* yang tertambang hingga EoM Juli 2025 mencapai 339.959 ton, sedangkan volume *overburden* yang tertambang mencapai 27.178 BCM. Nilai *stripping ratio* aktual yang diperoleh adalah 0,08. Jika dibandingkan dengan estimasi desain optimalisasi sebesar 313.979 ton, realisasi batubara tertambang memiliki selisih sebesar 25.980 ton atau deviasi sekitar 8,27%. Sementara itu, realisasi volume *overburden* sebesar 27.178 BCM lebih rendah 690 BCM dibandingkan estimasi desain optimalisasi sebesar 27.868 BCM. Perbedaan antara estimasi dan realisasi menunjukkan adanya variasi antara model desain dan kondisi aktual di lapangan. Pada tahap hasil, data tersebut disajikan sebagai pembandingan teknis antara estimasi desain optimalisasi dan realisasi penambangan, sedangkan penafsiran lebih lanjut mengenai penyebab deviasi dan implikasinya dibahas pada bagian Pembahasan.

Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *redesign pit* pada area LOM *Bottom pit* Jatiluhur dapat membuka kembali potensi cadangan marginal *seam C* yang belum terakomodasi dalam desain *existing*. Berdasarkan Gambar 3, batas desain *existing* hanya mencapai elevasi -96 mdpl, sedangkan posisi *seam C* masih terlihat pada beberapa bagian *sidewall* dan *bottom pit*. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa desain *existing* belum sepenuhnya merepresentasikan potensi cadangan yang masih dapat dievaluasi berdasarkan data geologi aktual. Dalam perencanaan tambang terbuka, penentuan batas pit dan pengaturan *pushback* merupakan bagian penting karena batas tersebut menentukan cadangan tertambang, volume material penutup, dan urutan kegiatan penambangan. Studi mengenai *open-pit optimization* menunjukkan bahwa penentuan *ultimate pit limit* dan *pushback* sangat bergantung pada model blok, geometri pit, serta algoritma optimasi yang digunakan untuk menentukan batas penambangan yang paling rasional secara teknis [18], [19].

Rancangan desain optimalisasi yang ditampilkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan bahwa batas penambangan dapat diperluas hingga elevasi -128 mdpl dengan mengikuti posisi *seam C*. Temuan ini memperlihatkan bahwa pendekatan *redesign pit* tidak hanya berfungsi sebagai perubahan bentuk geometri pit, tetapi juga sebagai proses evaluasi ulang terhadap hubungan antara model geologi aktual dan batas desain penambangan. Hasil ini memperluas arah penelitian sebelumnya yang banyak berfokus pada optimasi batas pit berbasis algoritma, harga batubara, atau parameter ekonomi. Wang dkk. [20], misalnya, menekankan bahwa batas tambang terbuka dapat berubah secara dinamis mengikuti kondisi

teknis dan ekonomi, sedangkan Suparno dkk. [21] menunjukkan bahwa penentuan *ultimate pit limit* pada tambang batubara perlu mempertimbangkan *stripping ratio* dan regulasi harga batubara. Berbeda dari penelitian tersebut, penelitian ini tidak membangun algoritma optimasi baru atau melakukan simulasi ekonomi, tetapi menerapkan *redesign pit* secara terapan pada area *bottom pit* yang mendekati *mine out* dengan dasar kondisi geologi aktual dan validasi geoteknik.

Secara deskriptif, perbandingan [Tabel 2](#) dan [Tabel 3](#) menunjukkan perubahan yang jelas antara desain *existing* dan desain optimalisasi. Estimasi cadangan batubara meningkat dari 53.270 ton menjadi 313.979 ton, atau bertambah sebesar 260.709 ton. Pada saat yang sama, volume *overburden* meningkat dari 16.569 BCM menjadi 27.868 BCM, tetapi *stripping ratio* menurun dari 0,31 menjadi 0,09. Pola pada [Gambar 6](#) memperlihatkan bahwa tambahan cadangan batubara yang diperoleh jauh lebih besar dibandingkan tambahan *overburden* yang harus dipindahkan. Penurunan *stripping ratio* ini penting karena SR merupakan salah satu indikator teknis yang menggambarkan hubungan antara material penutup yang harus dikupas dan batubara yang dapat diperoleh. Bakkula dkk. [22] menjelaskan bahwa perubahan SR pada tambang batubara dipengaruhi oleh model geologi, optimasi pit, perubahan *sequence*, *redesign pit*, dan faktor operasional. Sementara itu, Lv dkk. [23] menegaskan bahwa *stripping ratio* berkaitan langsung dengan batas penambangan, pemanfaatan cadangan, dan kontinuitas kegiatan tambang terbuka. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *redesign pit* dapat memperbaiki rasio pengupasan pada area penelitian, tetapi hasil tersebut tetap perlu dibaca sebagai indikator teknis, bukan sebagai bukti langsung mengenai keuntungan ekonomi.

Hasil realisasi lapangan setelah optimalisasi juga memberikan gambaran penting mengenai kesesuaian antara desain dan pelaksanaan. Berdasarkan [Gambar 10](#), bentuk topografi aktual setelah optimalisasi menunjukkan kesesuaian dengan batas desain optimalisasi hingga elevasi -128 mdpl. [Gambar 11](#) dan [Gambar 12](#) memperkuat bahwa kegiatan optimalisasi *seam C* telah dilaksanakan pada area *sidewall Bottom pit* Jatiluhur. Realisasi batubara tertambang hingga EoM Juli 2025 mencapai 339.959 ton dengan volume *overburden* 27.178 BCM dan SR aktual 0,08. Jika dibandingkan dengan estimasi desain optimalisasi sebesar 313.979 ton, terdapat deviasi sebesar 25.980 ton atau sekitar 8,27%. Deviasi ini mengindikasikan adanya perbedaan antara estimasi desain dan kondisi aktual di lapangan. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena variasi ketebalan *seam*, perubahan kondisi geologi aktual, keterbatasan resolusi model awal, atau dinamika operasional selama *coal getting*. Dalam konteks perencanaan tambang, Ismail dkk. [24] menunjukkan bahwa perbedaan antara rancangan pit dan target produksi dapat dipengaruhi oleh metode desain, integrasi data reserve, parameter alat, kalender tambang, dan kesesuaian model terhadap kondisi operasional. Oleh karena itu, deviasi 8,27% dalam penelitian ini lebih tepat dimaknai sebagai indikator pembanding antara desain dan realisasi, bukan sebagai bukti mutlak bahwa model geologi telah sepenuhnya akurat.

Dari aspek geoteknik, hasil pada [Gambar 7](#) dan [Gambar 8](#) menunjukkan bahwa pendalaman pit dan perubahan geometri desain menurunkan nilai FoS dibandingkan kondisi aktual dan desain sebelumnya. Nilai FoS pada desain optimalisasi berada pada 1,38 berdasarkan metode *block search* dan 1,31 berdasarkan metode *cuckoo search*. Meskipun mengalami penurunan, nilai tersebut masih berada di atas batas minimum perusahaan sebesar 1,20. Hal ini menunjukkan bahwa desain optimalisasi masih memenuhi kriteria kestabilan lereng berdasarkan parameter geoteknik yang digunakan dalam penelitian. Namun, interpretasi ini perlu dibatasi karena kestabilan lereng tidak hanya ditentukan oleh nilai FoS, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi muka air tanah, kualitas massa batuan, struktur geologi, geometri lereng, dan perubahan kondisi operasional. Alemayehu dkk. [25] menunjukkan bahwa optimasi geometri lereng pada tambang terbuka dapat meningkatkan kestabilan, tetapi penilaian tersebut memerlukan dukungan data geologi dan geoteknik yang memadai. Akbar dan Wiyono [26] juga menekankan bahwa evaluasi lereng tambang terbuka perlu memperhatikan faktor

keamanan, probabilitas longsor, dan karakteristik massa batuan. Dengan demikian, hasil FoS dalam penelitian ini cukup untuk menunjukkan pemenuhan kriteria teknis-geoteknik, tetapi belum cukup untuk menghilangkan kebutuhan pemantauan lereng selama implementasi.

Rekomendasi geoteknik *owner* pada [Gambar 9](#) semakin menegaskan bahwa implementasi desain optimalisasi memerlukan pengendalian lapangan, terutama pada area yang berhubungan dengan kaki disposal dan zona aman operasional. Hal ini penting karena desain yang memenuhi kriteria FoS tetap dapat mengalami perubahan risiko ketika kondisi aktual tambang berubah, misalnya akibat perubahan muka air, aktivitas alat berat, getaran operasional, atau perubahan material pada lereng dan disposal. Kajian terbaru mengenai *slope stability monitoring* menunjukkan bahwa pemantauan lereng tambang terbuka perlu dilakukan secara berkelanjutan karena tidak ada satu metode pemantauan yang sepenuhnya unggul untuk semua kondisi lapangan; setiap metode memiliki keterbatasan dalam akurasi, cakupan spasial, cakupan temporal, kompleksitas operasional, dan biaya [27]. Oleh karena itu, hasil penelitian ini tidak hanya menekankan peningkatan cadangan dan penurunan SR, tetapi juga menunjukkan pentingnya menghubungkan desain optimalisasi dengan rekomendasi geoteknik dan pemantauan operasional.

Secara akademik, posisi penelitian ini berada pada ranah studi terapan perencanaan tambang terbuka, khususnya optimalisasi cadangan marginal berbasis *redesign pit* pada area LOM yang mendekati *mine out*. Kontribusi penelitian tidak terletak pada pengembangan algoritma optimasi baru, melainkan pada integrasi antara evaluasi geologi aktual, *redesign pit*, estimasi reserve dan *overburden*, perbandingan *stripping ratio*, validasi FoS, serta perbandingan terhadap realisasi penambangan. Dengan posisi tersebut, penelitian ini memberikan contoh kasus bahwa cadangan marginal pada area *bottom pit* masih dapat dievaluasi ulang selama didukung oleh model geologi terkini, desain yang mengikuti parameter geometri perusahaan, dan validasi kestabilan lereng. Namun, karena penelitian ini belum memasukkan analisis biaya, *break-even stripping ratio*, sensitivitas harga batubara, produktivitas alat, dan parameter ekonomi lainnya, kesimpulan yang dapat ditarik sebaiknya dibatasi pada manfaat teknis dan geoteknik, bukan pada kelayakan ekonomi menyeluruh.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Penelitian ini menghasilkan rancangan *redesign pit* pada area LOM *Bottom pit* Jatiluhur, Pit Central NT Tutupan, untuk mengoptimalkan pemanfaatan cadangan marginal batubara *seam C* berdasarkan kondisi geologi aktual. Hasil *redesign pit* menunjukkan peningkatan estimasi cadangan batubara dari 53.270 ton menjadi 313.979 ton, atau bertambah sebesar 260.709 ton. Pada saat yang sama, nilai *stripping ratio* menurun dari 0,31 menjadi 0,09. Hasil analisis geoteknik menunjukkan bahwa desain optimalisasi masih memenuhi kriteria kestabilan lereng dengan nilai *Factor of Safety* di atas batas minimum perusahaan sebesar 1,20. Realisasi penambangan hingga EoM Juli 2025 mencapai 339.959 ton batubara, dengan deviasi sekitar 8,27% terhadap estimasi desain optimalisasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *redesign pit* berbasis kondisi geologi aktual dapat menjadi pendekatan teknis untuk meningkatkan pemanfaatan cadangan marginal pada area *Life of Mine*, dengan tetap mempertimbangkan batas keselamatan lereng.

Saran

Penelitian ini masih terbatas pada evaluasi teknis dan geoteknik, sehingga belum mencakup analisis ekonomi secara rinci. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji kelayakan ekonomi melalui analisis biaya dan keuntungan, sensitivitas terhadap perubahan

harga batubara, serta *break-even stripping ratio*. Selain itu, evaluasi lanjutan terhadap variasi parameter geoteknik, pembaruan data topografi dan geologi, serta perbandingan berkala antara estimasi desain dan realisasi penambangan perlu dilakukan untuk meningkatkan ketepatan model dan mendukung pengambilan keputusan pada periode penambangan berikutnya.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] S. K. Singh and D. Kumar, "Optimizing Coal Mine Planning and Design for Sustainable Development in the Context of Mass Exploitation of Coal Deposits," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, article e28524, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28524.
- [2] J. Wibowo and S. Hermawan, "Optimasi Cadangan Batubara pada Area Dekat Sungai," *Jurnal Dimensi Insinyur Profesional*, vol. 3, no. 2, pp. 15–25, 2025, doi: 10.9744/jdip.3.2.15-25.
- [3] R. Pebrianto, A. A. Louisa, E. Harsiga, and H. Waristian, "Optimasi Desain Geometri Lereng Material Old Dump pada Usaha Penggalian Ulang Pit X PT. Bukit Asam Tbk," *MINERAL*, vol. 9, no. 1, pp. 16–24, 2024, doi: 10.33019/mineral.v9i1.5298.
- [4] W. Wibowo and Nurhakim, "Kajian Teknis Design *Life of Mine* (LOM) Tambang dengan Potensi Kerjasama Sharing Wall Project Melalui Pendekatan Analisis Kestabilan Lereng," *Jurnal Teknologi Berkelanjutan*, vol. 11, no. 1, pp. 7–20, 2022, doi: 10.20527/jtb.v11i01.208.
- [5] M. F. Seprizal, Juventa, Ericson, and A. Yanottama, "Rancangan ulang *ultimate pit limit* dengan mempertimbangkan fluktuasi Harga Batubara Acuan pada Pit GAR 2900," *Jurnal Pertambangan*, vol. 9, no. 1, pp. 10–19, Feb. 2025.
- [6] S. Utili, A. Agosti, N. Morales, C. Valderrama, R. Pell, and G. Albornoz, "Optimal *Pitwall* Shapes to Increase Financial Return and Decrease Carbon Footprint of Open Pit Mines," *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 39, no. 1, pp. 335–355, 2022, doi: 10.1007/s42461-022-00546-8.
- [7] M. Adiwarmar, R. Cahyadi, Yusuf, and K. M. A. Isnaeni, "Pemodelan Desain Pit pada Bulan Juni 2023 dengan Menggunakan Software Minescape 5.7 di PT Cahaya Riau Mandiri Site Duta Alam Sumatra, Kabupaten Lahat, Provinsi Sumatra Selatan," *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, vol. 1, no. 3, pp. 167–172, 2024, doi: 10.62278/jits.v1i3.28.
- [8] M. Oktavia, M. Arofa, R. Arafat, and D. Rahmawati, "Perencanaan Desain Pit Tambang di PT. Winner Prima Sekata Kecamatan Tebo Ilir Kabupaten Tebo, Provinsi Jambi," *Jurnal Pertambangan dan Lingkungan*, vol. 4, no. 1, pp. 16–23, 2023, doi: 10.31764/jpl.v4i1.15871.
- [9] H. Sani, T. Tappang, R. Bunga, and G. A. P. Alhabsyi, "Rancangan Desain Pit Short Term di Pit Panel II PT. Karunia Armada Indonesia Jobsite PT. Indonesia Pratama, Kecamatan Tabang, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur," *Jurnal Teknik AMATA*, vol. 6, no. 1, pp. 1–5, 2025, doi: 10.55334/jtam.v6i1.324.
- [10] E. Wicaksono and Waterman SB, "Estimasi cadangan marginal batubara dalam rangka penerapan aspek konservasi mineral dan batubara," in *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVI Tahun 2021 (ReTII)*, Nov. 2021, pp. 15–21
- [11] Irianto and M. M. T. Afasedanya, "Stabilitas Lereng Tambang Terbuka Menggunakan Metode Limit Equilibrium dan Analisis Risiko untuk Menunjang Perencanaan Infrastruktur Tambang," *INTAN: Jurnal Penelitian Tambang*, vol. 8, no. 2, pp. 35–41, 2025, doi: 10.56139/intan.v8i2.316.
- [12] X. Xu, Z. Zhu, Y. Ye, X. Gu, Q. Wang, Y. Zhao, J. Zhao, and S. Liu, "*Ultimate pit limit Optimization* Method with Integrated Consideration of Ecological Cost, Slope Safety and Benefits: A Case Study of Heishan Open Pit Coal Mine," *Sustainability*, vol. 16, no. 13, article 5393, 2024, doi: 10.3390/su16135393.

-
- [13] D. Yulhendra, F. Sandrio, and A. Octova, "Development Mine Scheduling Concept in Making Pit Design," *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 269–282, 2023, doi: 10.46574/motivection.v5i2.208.
- [14] Desmawita, Hanafi, and M. Oktavia, "Perencanaan Desain Pit Limit di PT Era Perkasa Mining Kecamatan Peranap Kabupaten Indragiri Hulu Provinsi Riau," *JTK: Jurnal Teknik Kebumihan*, vol. 11, no. 02 Maret, pp. 12–21, 2024, doi: 10.22437/jtk.v11i02_MARET.34673.
- [15] W. Liu, G. Sheng, X. Kang, M. Yang, D. Li, and S. Wu, "Slope Stability Analysis of Open-Pit Mine Considering Weathering Effects," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 18, article 8449, 2024, doi: 10.3390/app14188449.
- [16] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik," Indonesia, 2018.
- [17] I. Baihaki, M. El Hakim, J. Wiratama, and R. Yovanda, "Estimasi Sumberdaya Batubara berdasarkan Metode *Polygon* di PT Bumi Indo Power, Kabupaten Tanjung Jabung Barat, Provinsi Jambi," *Jurnal Teknik Kebumihan*, vol. 13, no. 02, pp. 49–57, 2025, doi: 10.22437/jtk.v13i02.47456.
- [18] G. Ares, C. Castañón Fernández, D. Arias, and A. B. Díaz, "Open Pit *Optimization* Using the Floating Cone Method: A New Algorithm," *Minerals*, vol. 12, no. 4, article 495, 2022, doi: 10.3390/min12040495.
- [19] G. Ares, C. Castañón Fernández, and I. D. Álvarez, "Ultimate Pit-Limit *Optimization* Algorithm Enhancement Using Structured Query Language," *Minerals*, vol. 13, no. 7, article 966, 2023, doi: 10.3390/min13070966.
- [20] S. Wang, B. Cao, R. Bai, and G. Liu, "Mid-Long Term Boundary Dynamic *Optimization* of Open-Pit Coal Mine Considering Coal Price Fluctuation," *PLOS ONE*, vol. 19, no. 2, article e0296932, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0296932.
- [21] F. A. D. Suparno, S. Aminah, H. Haeruddin, R. Lestari, K. D. Mulyani, E. Manek, and U. R. S. Rini, "Determination Coal Mine *Ultimate pit limit* Based on Kepmen ESDM No. 227.K/MB.01/MEM.B/2023 and PP 26 2022," *Journal of Earth and Marine Technology*, vol. 5, no. 2, 2025, doi: 10.31284/j.jemt.2025.v5i2.7236.
- [22] O. Bakkula, D. Wibisono, and M. Siallagan, "Examining the Drivers of Changes in *Stripping ratio* in Open Pit Coal Mining: A System Dynamics Model to Optimize the Coal Discrepancy," *Discover Applied Sciences*, vol. 7, article 627, 2025, doi: 10.1007/s42452-025-07227-3.
- [23] S. Lv, R. Zhang, Y. Tao, Z. Meng, S. Wang, and Z. Liu, "Sustainable Mining of Open-Pit Coal Mines: A Study on Intelligent Strip Division Technology Based on Multi-Source Data Fusion," *Sustainability*, vol. 17, no. 20, article 9049, 2025, doi: 10.3390/su17209049.
- [24] A. Ismail, M. G. D. Devedo, A. J. Pontus, and A. O. L. P. G. M. Thomas, "Design of Pit X Based on Production Targets Using Mine Scheduling Concept at PT Y," *INTAN: Jurnal Penelitian Tambang*, vol. 8, no. 2, pp. 70–80, 2025, doi: 10.56139/intan.v8i2.349.
- [25] E. Alemayehu, E. T. Chala, N. Z. Jilo, T. Tiyasha, and B. Moges, "Optimizing Design and Stability of Open Pit Slopes in Tolay Coal Mine, Ethiopia," *Scientific Reports*, vol. 15, article 1570, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-86034-7.
- [26] W. N. Akbar and B. Wiyono, "Evaluation of Rock Slope Using Q-Slope, Limit Equilibrium and Failure Probability at Andesite Mine of Sidomulyo Village," *Indonesian Mining Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 1–17, 2023, doi: 10.30556/imj.Vol26.No1.2023.1329.
- [27] R. Le Roux, M. Sepehri, S. Khaksar, and I. Murray, "*Slope stability monitoring* Methods and Technologies for Open-Pit Mining: A Systematic Review," *Mining*, vol. 5, no. 2, article 32, 2025, doi: 10.3390/mining5020032.
-

Halaman ini sengaja di kosongkan