



OPTIMALISASI CADANGAN BATUBARA MELALUI DIVERSI SUNGAI LENGKUPI STUDI KASUS PIT GAB 02 PT BUMI MERAPI ENERGI

COAL RESERVE OPTIMIZATION BY DIVERSION OF THE LENGKUPI RIVER: A CASE STUDY OF PIT GAB 02 AT PT BUMI MERAPI ENERGI

R. B. Hibaturrahman¹, E. Ibrahim^{2*}, E. Sutriyono³, T. Toha⁴, F. Mahdyrianto⁵

¹⁻³Program Studi Magister Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya

⁴Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Tridinianti

⁵Program Studi Teknik Pertambangan Batubara, Politeknik Akamigas Palembang

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

⁴Jl. Kapten Marzuki Jl. Kamboja No.2446, 20 Ilir D. III, Kec. Ilir Tim. I, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30129

⁵Area Diklat Plaju, Jl. Kebon Jahe, Komperta, Kec. Plaju, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30268

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

ABSTRAK

Diversi sungai pada wilayah tambang terbuka tidak hanya berfungsi sebagai upaya pengendalian lingkungan, tetapi juga berpotensi menjadi strategi teknis untuk meningkatkan pemanfaatan cadangan batubara. Penelitian ini mengkaji secara komprehensif pengaruh diversifikasi Sungai Lengkupi terhadap peningkatan cadangan batubara serta implikasinya terhadap kelayakan ekonomi penambangan di Pit GAB 02 PT Bumi Merapi Energi. Pendekatan penelitian dilakukan melalui integrasi analisis geologi, pemodelan sumber daya, desain pit optimasi, serta penerapan faktor pengubah sesuai SNI 5015:2019. Estimasi cadangan dilakukan dengan membandingkan kondisi eksisting sebelum dan sesudah penerapan desain diversifikasi sungai, dengan mempertimbangkan batas pit ekonomis dan parameter teknis penambangan. Selanjutnya, evaluasi keekonomian dilakukan menggunakan metode *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PBP) untuk menilai dampak finansial dari skenario diversifikasi sungai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan diversifikasi Sungai Lengkupi secara signifikan meningkatkan luas area tertambang dan volume cadangan batubara yang dapat diekstraksi secara ekonomis. Perubahan batas pit akibat eliminasi kendala alur sungai lama menghasilkan penurunan rasio kupas marginal serta peningkatan nilai NPV dan IRR proyek, disertai dengan percepatan periode pengembalian modal. Temuan ini mengindikasikan bahwa perencanaan diversifikasi sungai yang terintegrasi dengan optimasi pit dapat berfungsi sebagai instrumen strategis dalam peningkatan nilai proyek tambang, tanpa mengabaikan aspek teknis dan lingkungan.

Kata kunci: diversifikasi sungai, optimasi pit, estimasi cadangan, analisis keekonomian, tambang batubara

ABSTRACT

River diversion in open-pit mining areas serves not only as an environmental control measure but also as a technical strategy to enhance the utilization of coal reserves. This study comprehensively evaluates the impact of the Lengkupi River diversion on the increase in coal reserves and its implications for the economic feasibility of mining operations at Pit GAB 02, PT Bumi Merapi Energi. The research methodology integrates geological analysis, resource modeling, pit optimization design, and the application of modifying factors in accordance with SNI 5015:2019. Coal reserve estimation was conducted by comparing existing conditions before and after the implementation of the river diversion design, considering economic pit limits and technical mining parameters. Furthermore, economic evaluation was performed using Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period (PBP) to assess the financial impacts of the river diversion scenario. The results indicate that the implementation of the Lengkupi River diversion significantly increases the mineable area and the volume of coal reserves that can be economically extracted. The modification of pit boundaries resulting from the removal of constraints imposed by the original river channel leads to a reduction in marginal stripping ratio and a substantial improvement in project NPV and IRR, accompanied by an accelerated payback period. These findings demonstrate that river diversion planning, when integrated with pit optimization, can function as a strategic instrument for enhancing mining project value without compromising technical and environmental considerations.

Keywords: river diversion, pit optimization, reserve estimation, economic analysis, coal mining



PENDAHULUAN

Cadangan batubara merupakan bagian dari sumber daya terukur dan/atau tertunjuk yang secara teknis dan ekonomis dapat ditambang sesuai SNI 5015:2019. Indonesia memiliki sumber daya batubara yang sangat besar, yaitu sekitar 125,28 miliar ton, namun hanya sekitar 32,36 miliar ton yang telah diklasifikasikan sebagai cadangan tertambang [1]. Kondisi ini menunjukkan bahwa masih terdapat peluang signifikan untuk meningkatkan cadangan melalui optimalisasi teknis dan perencanaan tambang yang lebih adaptif.

PT Bumi Merapi Energi (selanjutnya disebut sebagai lokasi penelitian) sebagai pemegang Izin Usaha Pertambangan batubara di Kabupaten Lahat, Sumatera Selatan, mengelola wilayah konsesi seluas 1.851 ha yang terbagi ke dalam Blok Kungkulan dan Blok Serelo. Blok Serelo, yang hanya memiliki satu lapisan batubara utama (Seam E), memiliki keterbatasan cadangan, khususnya di Pit Gunung Agung Barat 02. Salah satu faktor pembatas utama pengembangan pit di area ini adalah keberadaan Sungai Lengkupi yang membelah wilayah rencana penambangan dan membatasi desain pit secara teknis.

Diversi sungai pada tambang terbuka umumnya dipandang sebagai upaya pengelolaan lingkungan, namun apabila direncanakan secara terintegrasi, strategi ini juga berpotensi meningkatkan luas area tambang dan cadangan batubara yang dapat ditambang secara ekonomis. Meskipun beberapa penelitian telah membahas pemindahan sungai dalam konteks kelayakan finansial dan keberlanjutan tambang, kajian yang secara langsung mengaitkan diversifikasi sungai dengan optimisasi pit dan evaluasi cadangan berbasis standar pelaporan SNI 5015:2019 masih sangat terbatas.

Penelitian terdahulu lebih banyak menitikberatkan pada aspek hidrologi dan desain teknis pemindahan sungai, khususnya dalam perencanaan *diversion channel*, analisis stabilitas geometri saluran, serta pengendalian debit aliran agar tetap memenuhi kapasitas hidraulika yang aman. Penelitian oleh Mendrofa et al. [2] menitikberatkan pada aspek hidrologi dalam analisis pemindahan alur sungai, khususnya dalam mengevaluasi karakteristik aliran dan kapasitas saluran untuk menjamin stabilitas sistem drainase tambang. Pendekatan serupa juga dikembangkan oleh Flatley & Markham [3] yang tidak hanya mengkaji aspek hidrologi, tetapi juga mengintegrasikan pertimbangan geoteknik dalam desain geomorfik saluran pengalihan sungai, sehingga menghasilkan desain yang lebih stabil secara morfologi dan berkelanjutan secara lingkungan.

Selanjutnya, penelitian oleh Pica & Dombrowski [4] menegaskan pentingnya aspek geoteknik dalam desain pemindahan sungai, terutama dalam menjaga stabilitas lereng dan struktur saluran terhadap potensi erosi dan

longsoran. Sementara itu, Turner [5] lebih menyoroti isu lingkungan yang timbul akibat kegiatan pemindahan sungai, termasuk dampaknya terhadap ekosistem dan perlunya evaluasi dampak lingkungan secara komprehensif dalam setiap tahapan desain dan implementasi diversifikasi sungai.

Di sisi lain, kajian yang berfokus pada optimisasi pit dan estimasi cadangan batubara ditunjukkan oleh beberapa penelitian seperti Wibowo & Hermawan (2021), Cao et al. (2023), serta Hardiman et al. (2024). Wibowo & Hermawan [6] mengkaji optimisasi cadangan pada area tambang yang dibatasi oleh alur sungai, dengan menunjukkan bahwa keberadaan sungai menjadi faktor pembatas utama dalam penentuan batas pit. Cao et al. [7] mengembangkan pendekatan optimisasi batas tambang berdasarkan rasio kupas (*stripping ratio*) secara sektoral, sedangkan Hardiman et al. [8] mengintegrasikan aspek ekonomi melalui pendekatan *discounted cash flow* dalam menentukan batas pit optimum yang adaptif terhadap fluktuasi harga batubara. Meskipun demikian, ketiga penelitian tersebut masih memperlakukan kondisi hidrologi, khususnya keberadaan sungai, sebagai batasan tetap yang tidak dimodifikasi.

Upaya integrasi awal antara pemindahan sungai dengan aspek ekonomi tambang dilakukan oleh Syahrin & Prasetyo [9], yang menunjukkan bahwa diversifikasi sungai dapat meningkatkan kelayakan finansial proyek melalui peningkatan akses terhadap cadangan marginal. Namun, penelitian ini masih terbatas pada analisis ekonomi tanpa mengaitkannya secara komprehensif dengan perubahan desain pit, estimasi cadangan, serta perencanaan umur tambang. Sementara itu, Suparto [10] mengkaji pemindahan sungai dalam konteks optimisasi pit dan konservasi cadangan dari sisi teknis operasional, namun belum mengintegrasikan aspek ekonomi, penjadwalan tambang (*mine scheduling*), maupun standar pelaporan cadangan seperti SNI atau KCMI.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa penelitian-penelitian terdahulu masih cenderung dilakukan secara parsial, dengan fokus terpisah antara aspek hidrologi, geoteknik, optimisasi pit, estimasi cadangan, dan kelayakan ekonomi. Belum terdapat kajian yang secara simultan mengintegrasikan seluruh variabel tersebut dalam satu kerangka analisis yang komprehensif, termasuk mempertimbangkan perbandingan kondisi sebelum dan sesudah pemindahan sungai serta penerapan standar pelaporan cadangan berbasis SNI/KCMI.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui pendekatan terintegrasi yang mencakup analisis hidrologi pemindahan sungai, evaluasi geoteknik, optimisasi pit, estimasi cadangan, analisis ekonomi tambang, penjadwalan produksi, integrasi diversifikasi sungai terhadap peningkatan cadangan, penerapan standar SNI/KCMI, serta analisis komparatif kondisi pra dan pasca



pemindahan sungai. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan kontribusi yang lebih komprehensif dalam perencanaan tambang terbuka, khususnya dalam memaksimalkan pemanfaatan cadangan batubara pada area yang memiliki kendala aliran sungai.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (*applied research*) berbasis studi kasus yang mengembangkan pendekatan integratif dalam perencanaan tambang terbuka dengan menggabungkan aspek hidrologi, geoteknik, optimasi pit, estimasi cadangan, evaluasi keekonomian, serta penjadwalan tambang dalam satu kerangka analisis terpadu. Secara metodologis, penelitian ini termasuk dalam studi berbasis intervensi (*intervention-based study*), di mana modifikasi kondisi fisik berupa pemindahan alur sungai digunakan sebagai variabel strategis dalam proses optimasi tambang, bukan sekadar sebagai kendala tetap. Pendekatan yang digunakan bersifat kuantitatif komparatif, dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah intervensi untuk mengukur perubahan parameter teknis dan ekonomi seperti batas pit, cadangan tertambang, rasio kupas, serta indikator kelayakan finansial (NPV, IRR, dan *payback period*). Dengan karakteristik tersebut, penelitian ini dapat dikategorikan sebagai *integrated intervention-based mine planning optimization study* yang tidak hanya menghasilkan solusi praktis pada kasus nyata, tetapi juga memberikan kontribusi metodologis dalam pengembangan paradigma perencanaan tambang yang lebih dinamis dan adaptif terhadap modifikasi kondisi fisik lapangan.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder yang mendukung analisis optimisasi pit, penjadwalan penambangan, serta estimasi cadangan batubara sebelum dan sesudah penerapan diversifikasi Sungai Lengkupe di Pit GAB 02 PT Bumi Merapi Energi. Data primer meliputi data topografi hasil survei terbaru, data geometri dan desain rencana diversifikasi Sungai Lengkupe, serta data teknis operasional penambangan yang digunakan sebagai dasar penyusunan desain pit dan penjadwalan produksi. Data ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi aktual lapangan dan skenario perubahan desain tambang akibat pemindahan alur sungai. Sedangkan data sekunder mencakup data geologi regional dan lokal, data eksplorasi batubara (lubang bor, kualitas batubara, dan model sumber daya), data batas wilayah izin usaha pertambangan, serta parameter teknis dan ekonomis penambangan. Data sekunder ini digunakan dalam pemodelan sumber daya, optimisasi pit menggunakan metode *Block Ranking* dan *Break Even Stripping Ratio* (BESR), serta evaluasi cadangan dan keekonomian berdasarkan SNI 5015:2019.

Verifikasi Estimasi Sumber Daya Batubara

Verifikasi dan validasi sumber daya batubara dilakukan untuk memastikan keberadaan, kontinuitas, dan kelayakan sumber daya pada Area Sungai Lengkupe sebelum dilakukan estimasi cadangan. Data yang digunakan berasal

dari hasil eksplorasi terdahulu, data geologi, topografi, serta dokumen resmi PT Bumi Merapi Energi, yang kemudian diverifikasi terhadap kondisi eksisting melalui pemetaan ulang dan pengecekan spasial pada area terdampak rencana diversifikasi sungai.

Data topografi hasil pembaruan digunakan sebagai dasar analisis spasial dan perencanaan pit. Pengendalian mutu dilakukan melalui perbandingan dengan kondisi lapangan dan elevasi *collar bor*, dengan deviasi tidak melebihi ± 50 cm, sehingga data dinilai akurat dan representatif terhadap morfologi Sungai Lengkupe dan desain pit hasil optimisasi. Data pengeboran diverifikasi terhadap laporan resmi eksplorasi dan divalidasi berdasarkan konsistensi, kelengkapan, sebaran, serta kesesuaian dengan kondisi geologi setempat. Interpretasi geologi menunjukkan Seam E sebagai lapisan utama yang dikontrol oleh struktur sinklin, sedangkan Seam F memiliki sebaran terbatas. Pemodelan geologi dilakukan secara sistematis menggunakan perangkat lunak MineScope 5.7.

Klasifikasi sumber daya dilakukan sesuai SNI 5015:2019 dengan radius 250 m (terukur), 500 m (tertunjuk), dan 750 m (tereka). Hasil estimasi menunjukkan total sumber daya batubara pada Blok Serele sebesar 63,55 juta ton, terdiri atas 57,95 juta ton terukur, 1,02 juta ton tertunjuk, dan 4,58 juta ton tereka. Perhitungan sumber daya tersebut dilakukan berdasarkan kondisi geologi eksisting, yaitu Sungai Lengkupe masih berada pada jalur aliran alami dan belum dilakukan kegiatan pengalihan (diversi). Pada tahap estimasi sumber daya, keberadaan sungai tidak mengubah besaran sumber daya batubara karena perhitungan sumber daya hanya didasarkan pada kontinuitas geologi, data pemboran, serta parameter kualitas batubara, tanpa mempertimbangkan batasan teknis penambangan. Dengan demikian, keberadaan Sungai Lengkupe hanya menjadi faktor pembatas pada tahap perancangan tambang dan perhitungan cadangan, bukan pada tahap estimasi sumber daya. Hasil ini menunjukkan bahwa sumber daya batubara di Area Sungai Lengkupe memiliki tingkat keandalan yang memadai sebagai dasar perhitungan cadangan.

Diversi Sungai Lengkupe

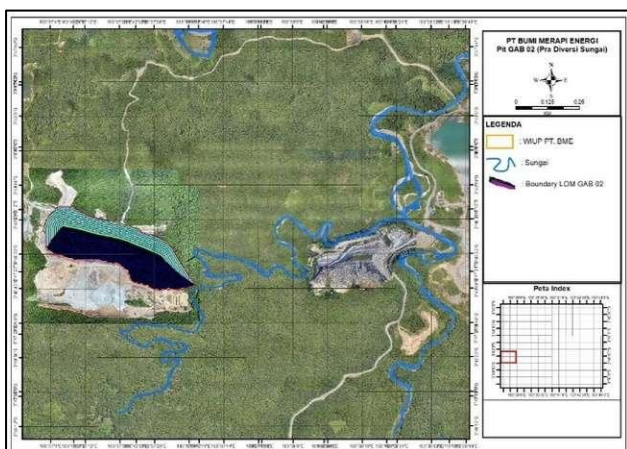
Diversi sungai merupakan pendekatan teknis yang umum diterapkan pada pertambangan terbuka ketika alur sungai berfungsi sebagai *surface constraint* yang membatasi pengembangan pit dan konversi sumber daya menjadi cadangan. Keberadaan sungai di dalam area tambang berpotensi menyebabkan sebagian sumber daya tidak dapat ditambang secara optimal akibat pertimbangan teknis, keselamatan, dan lingkungan. Oleh karena itu, perencanaan pemindahan alur sungai yang terintegrasi dengan desain pit dan optimisasi tambang menjadi aspek penting dalam upaya peningkatan cadangan batubara yang dapat ditambang.

Pemindahan sungai harus dirancang berdasarkan kajian hidrologi, hidraulika, morfologi, serta ketentuan regulatif guna menjamin stabilitas alur dan keberlanjutan fungsi

sungai. Perubahan alur sungai akibat aktivitas pertambangan dapat memengaruhi karakteristik aliran dan sistem hidrologi lokal, sehingga desain alur baru perlu disesuaikan dengan kondisi aliran rencana dan kondisi permukaan akhir tambang. Dengan pendekatan teknis yang terintegrasi, diversifikasi sungai tidak hanya berperan sebagai upaya pengelolaan lingkungan, tetapi juga sebagai strategi optimisasi pit yang mendukung peningkatan cadangan batubara secara aman dan berkelanjutan (Gambar 1).



Gambar 1. Foto Udara Kondisi Aktual Sungai Lengkupi



Gambar 2. Peta LOM Sebelum Pemindahan Sungai

Pemindahan Sungai Lengkupi merupakan tahapan awal yang esensial sebelum optimisasi Pit Gunung Agung Barat 02, karena sungai berfungsi sebagai batas permukaan utama yang mempengaruhi geometri pit dan area tambang yang dapat ditambang secara aman (Gambar 2). Penetapan permukaan akhir pasca-diversi diperlukan untuk menghilangkan ketidakpastian batas operasional dan memastikan optimisasi pit dilakukan secara komprehensif. Simulasi pemindahan sungai dilakukan untuk menghasilkan kondisi permukaan akhir yang realistis dan implementatif, sehingga desain pit hasil optimisasi tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga selaras dengan aspek teknis, lingkungan, dan operasional.

Skema pemindahan sungai yang diterapkan telah dievaluasi secara teknis dan ekonomis dengan mempertimbangkan keseimbangan *cut and fill*, stabilitas saluran, dan keterlaksanaan konstruksi, serta dinilai paling optimal dalam membuka potensi sumber daya dan cadangan tanpa menimbulkan kendala teknis pada tahap penambangan berikutnya.

Optimalisasi Cadangan Batubara

Metode optimalisasi cadangan batubara dalam penelitian ini dilakukan dengan mengintegrasikan perencanaan pemindahan sungai sebagai bagian dari batasan permukaan (*surface constraint*) dalam proses optimisasi pit. Penetapan jalur sungai baru yang realistis dan stabil secara hidraulik digunakan sebagai dasar kondisi permukaan akhir (*final surface condition*), sehingga proses optimisasi pit dapat merepresentasikan kondisi desain pasca tata guna lahan secara lebih akurat.

Skema pemindahan sungai menghasilkan pembaruan terhadap batasan permukaan yang selanjutnya digunakan dalam penentuan limitasi *pit shell*. Batasan permukaan yang telah diperbarui ini memungkinkan proses optimisasi pit dilakukan secara teknis realistis serta mendukung evaluasi potensi peningkatan cadangan batubara. Selain aspek teknis, perencanaan pemindahan sungai juga menghasilkan estimasi kuantitas material pengupasan yang diperlukan untuk pembentukan alur sungai baru. Data tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan biaya awal (*capital cost*) pemindahan sungai yang selanjutnya diintegrasikan ke dalam parameter ekonomi optimisasi pit. Dengan demikian, seluruh parameter teknis dan ekonomis yang diperlukan dalam proses optimisasi pit telah terdefinisi secara kuantitatif. Berdasarkan parameter tersebut, proses optimisasi pit dilakukan untuk memperoleh batas pit yang optimal secara teknis dan ekonomis, sehingga dapat menggambarkan potensi cadangan batubara yang layak ditambang setelah penerapan skema pemindahan sungai.

Parameter teknis untuk optimalisasi cadangan, sebagai data input awal yaitu model geologi diperoleh dari PT Bumi Merapi Energi (PT BME) dan telah melalui proses verifikasi serta validasi sebagaimana dijelaskan pada subbab sebelumnya. Model geologi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses estimasi dan optimisasi cadangan batubara. Selain model geologi, parameter penambangan (*mining parameters*) yang digunakan meliputi ketebalan batubara (*coal thickness*), ketebalan *overburden* minimum, *mining loss*, *dilution*, serta *global recovery*. Seluruh parameter tersebut diperoleh langsung dari PT Bumi Merapi Energi melalui koordinasi dengan tenaga ahli terkait. Pertimbangan operasional turut dimasukkan dalam proses optimisasi, khususnya karakteristik endapan yang menentukan lebar penambangan minimum (*minimum mining width*). Selain itu, faktor geoteknikal seperti batas kedalaman penambangan maksimum juga dijadikan sebagai batasan desain (*design constraint*) dalam penentuan pit yang optimal.

Proses optimasi pit dilakukan melalui pembuatan desain pit menggunakan *software MineScape 5.7* dan *Minex*. Metode yang digunakan dalam optimasi meliputi *block ranking* berdasarkan nilai ekonomi serta analisis *Break Even Stripping Ratio* (BESR) untuk menentukan batas kelayakan penambangan secara ekonomis. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi blok batubara yang memiliki nilai tambah ekonomi setelah mempertimbangkan biaya pengupasan dan batasan teknis yang berlaku. Selanjutnya, perhitungan estimasi cadangan batubara dilakukan dengan mengacu pada desain pit hasil optimasi yang telah disesuaikan dengan kondisi pasca-diversi sungai. Estimasi cadangan mempertimbangkan parameter geoteknik, nilai *stripping ratio*, serta berat jenis batubara sebagai dasar konversi volume menjadi tonase. Perubahan desain pit akibat penerapan skema pemindahan sungai menjadi faktor utama dalam evaluasi potensi peningkatan cadangan yang layak ditambang secara teknis dan ekonomis.

Evaluasi Kelayakan Ekonomi

Analisis ekonomi selanjutnya dikembangkan dalam bentuk model finansial tambang yang disusun berdasarkan parameter teknis hasil optimasi pit dan estimasi cadangan batubara. Model finansial ini mencakup proyeksi arus kas (*cash flow*) tambang yang memperhitungkan biaya awal pemindahan sungai, biaya operasional penambangan, serta pendapatan dari produksi batubara sesuai rencana produksi hasil desain pit pasca-diversi.

Evaluasi kelayakan finansial dilakukan menggunakan beberapa indikator utama, yaitu *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PBP). Perhitungan NPV digunakan untuk menilai nilai kini bersih dari arus kas proyek terhadap tingkat diskonto tertentu, sedangkan IRR digunakan untuk mengukur tingkat pengembalian internal proyek. Sementara itu, PBP digunakan untuk mengevaluasi jangka waktu yang diperlukan untuk mengembalikan investasi awal pemindahan sungai. Hasil evaluasi indikator finansial tersebut digunakan sebagai dasar dalam menilai dampak penerapan skema pemindahan sungai terhadap kelayakan ekonomi tambang serta optimalisasi cadangan batubara yang dilaporkan sesuai dengan ketentuan SNI 5015:2019.

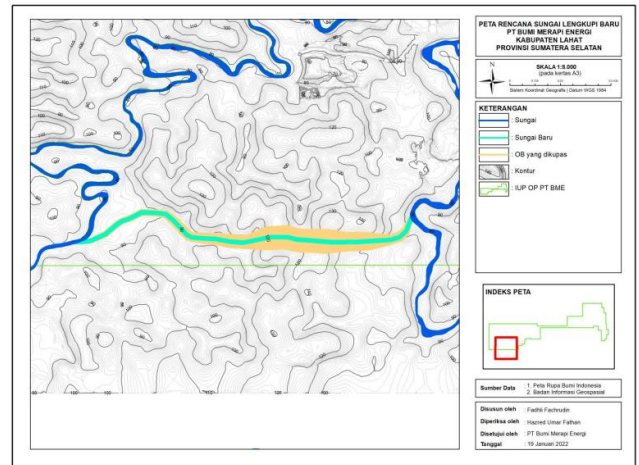
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan difokuskan pada hasil penerapan skema pemindahan sungai dan pengaruhnya terhadap optimasi pit serta estimasi cadangan batubara yang mengacu pada SNI 5015:2019, disertai evaluasi kelayakan finansial tambang untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai implikasi teknis dan ekonomi dari desain pit pasca-diversi sungai yang diusulkan.

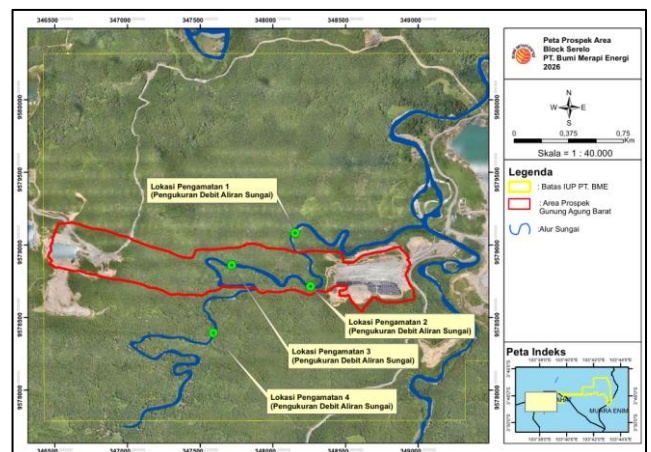
Pemindahan Sungai Lengkuپی dan Pengaruhnya Terhadap Optimasi Pit GAB 02

Hasil perencanaan pemindahan Sungai Lengkuپی menunjukkan perubahan signifikan terhadap batasan

permukaan (*surface constraint*) pada Pit Gunung Agung Barat 02. Jalur sungai hasil diversifikasi yang digunakan sebagai kondisi permukaan akhir (*final surface condition*) memungkinkan area yang sebelumnya terbatas oleh alur sungai eksisting untuk dimasukkan ke dalam proses optimasi pit. Peta alur pemindahan Sungai Lengkuپی sesuai dengan regulasi yang ada dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta Pemindahan Alur Sungai Lengkuپی



Gambar 4. Peta Lokasi Pengamatan Debit Aliran Sungai

Sungai Lengkuپی berada di bagian barat dari IUP OP PT BME yang terbentang sepanjang $\pm 5,70$ km di dalam IUP dan bermuara ke Sungai Serelo. Pengambilan data eksisting Sungai Lengkuپی dilakukan sebagai dasar pembandingan dalam perencanaan pemindahan alur sungai dari kondisi lama ke jalur sungai baru. Pengukuran debit aliran dilakukan secara langsung di lapangan menggunakan metode apung (*float method*) dengan alat bantu bola pingpong dan *stopwatch*. Pengukuran dilakukan sebanyak delapan kali pada empat (4) titik sepanjang Sungai Lengkuپی yang berada di dalam wilayah IUP OP PT BME (Gambar 4).

Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh waktu tempuh rata-rata sebesar 198,25 detik untuk panjang lintasan tetap 50 m, sehingga kecepatan aliran rata-rata Sungai Lengkupi eksisting sebesar 0,41 m/s. Nilai ini menunjukkan bahwa Sungai Lengkupi memiliki karakter aliran relatif sedang, dengan variasi kecepatan yang dipengaruhi oleh kondisi penampang dan morfologi sungai pada masing-masing lokasi pengukuran.

Pengukuran geometri sungai menunjukkan bahwa Sungai Lengkupi eksisting memiliki lebar basah berkisar antara 12,20–24,00 m dan kedalaman aliran antara 0,18–2,73 m. Variasi dimensi penampang ini menghasilkan luas penampang basah rata-rata sebesar 19,26 m². Dengan menggunakan *float area method* dan koefisien pelampungan sebesar 0,895, diperoleh debit rata-rata Sungai Lengkupi sebesar 4,25 m³/s, dengan debit maksimum mencapai 7,8 m³/s pada penampang tertentu. Nilai debit maksimum ini digunakan sebagai acuan utama dalam perencanaan kapasitas Sungai Lengkupi Baru.

Perencanaan Sungai Lengkupi Baru dilakukan dengan pendekatan *area-velocity method* untuk memastikan kapasitas aliran mampu mengalirkan debit eksisting secara aman. Sungai Lengkupi Baru dirancang memiliki panjang 1,78 km dengan beda elevasi antara hulu dan hilir sebesar 4 m, sehingga diperoleh kemiringan rata-rata sebesar 0,225%. Berdasarkan konversi kemiringan terhadap kecepatan aliran mengacu pada studi Wesli (2008), Sungai Lengkupi Baru direncanakan memiliki kecepatan aliran sebesar 0,4 m/s.

Geometri Sungai Lengkupi Baru ditentukan berdasarkan kajian geoteknik PT BME dan perhitungan di studio, dengan sudut lereng 55°, tinggi jenjang 4 m, dan lebar jenjang 2 m. Berdasarkan parameter tersebut, luas penampang basah Sungai Lengkupi Baru direncanakan sebesar 114 m², dengan kecepatan aliran sebesar 0,4 m/s, diperoleh kapasitas debit Sungai Lengkupi Baru sebesar 45,6 m³/s (Tabel 1).

Tabel 1. Kondisi Sungai Lengkupi Sebelum dan Setelah diversifikasi

Parameter	Sebelum Diversifikasi	Setelah Diversifikasi
Sumber data	Survei topografi	Kajian geoteknik
Tipe penampang	Alami (<i>natural channel</i>)	Trapesium berjenjang (<i>engineered channel</i>)
Sudut lereng	30°-40°	55°
Tinggi jenjang	Tidak berjenjang	4 meter
Lebar jenjang	Tidak ada	2 meter
Lebar dasar sungai	12,20-24 meter	30 meter
Kedalaman rata-rata	0,18-2,73 meter	3,8 meter
Sistem perkuatan	Tanah/vegetasi alami	geomembran
Luas penampang	72,59 m ²	114 m ²
Debit aliran	29,85 m ³ /s	45,60 m ³ /s

Hasil ini menunjukkan bahwa kapasitas Sungai Lengkupi Baru secara signifikan lebih besar dibandingkan debit maksimum Sungai Lengkupi eksisting, sehingga secara hidraulik desain sungai baru dinilai aman dan mampu mengakomodasi aliran eksisting. Kondisi ini memberikan dasar teknis yang kuat dalam penerapan pemindahan Sungai Lengkupi serta mendukung pembaruan *surface constraint* pada proses optimasi pit Gunung Agung Barat 02. Berdasarkan hasil pengolahan data lapangan dan perhitungan di studio, diperoleh perbandingan karakteristik hidraulik antara Sungai Lengkupi Lama dan Sungai Lengkupi Baru sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Hidraulik Sungai Lengkupi Sebelum dan Setelah Diversifikasi

Karakteristik Hidraulik	Lengkupi Lama	Lengkupi Baru
Luas Penampang (m ²)	72,59	124
Kecepatan Aliran (m/s)	0,41	0,40
Debit Air (m ³ /s)	29,85	49,92

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kapasitas aliran Sungai Lengkupi Baru secara signifikan lebih besar dibandingkan dengan Sungai Lengkupi Lama. Kondisi ini mengindikasikan bahwa alur sungai hasil pemindahan mampu mengalirkan debit dari hulu secara aman tanpa menimbulkan limpasan atau potensi banjir, sehingga memenuhi kriteria teknis perencanaan saluran terbuka.

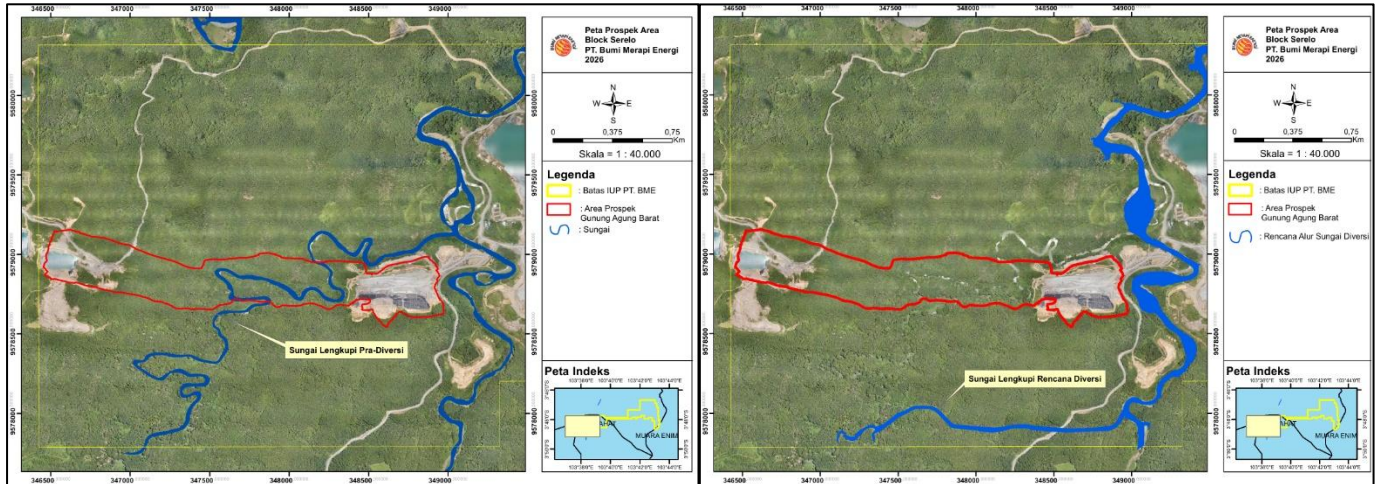
Pemindahan alur Sungai Lengkupi memerlukan pekerjaan dalam jumlah besar yang direpresentasikan oleh volume *cut and fill* sebesar ±2.354.953 BCM. Volume ini mencerminkan total material yang harus digali, dipindahkan, dan ditimbun untuk membentuk alur sungai baru sesuai dengan desain geometrik dan elevasi rencana. Kegiatan *cut* dilakukan pada area dengan elevasi topografi yang lebih tinggi untuk membentuk penampang sungai dan kemiringan dasar alur agar aliran air dapat berlangsung secara gravitasi. Sebaliknya, kegiatan *fill* dilakukan pada area dengan elevasi lebih rendah serta untuk penutupan alur sungai lama yang tidak lagi difungsikan, sekaligus membentuk tanggul dan stabilisasi sisi sungai. Besarnya volume *cut and fill* tersebut menjadikan pemindahan Sungai Lengkupi sebagai komponen pekerjaan yang berpengaruh signifikan dari sisi teknis maupun ekonomi. Oleh karena itu, estimasi volume pekerjaan tanah ini digunakan sebagai parameter utama dalam perhitungan biaya awal (*capital cost*) pemindahan sungai dan selanjutnya diintegrasikan ke dalam perencanaan tambang serta analisis kelayakan ekonomi secara keseluruhan.

Optimasi Teknis dan Ekonomis Pasca-diversifikasi Sungai

Optimasi teknis dan ekonomis pascadiversifikasi Sungai Lengkupi dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan batasan permukaan (*surface constraint*) terhadap pengembangan pit dan potensi cadangan batubara di Pit

Gunung Agung Barat 02. Penetapan jalur sungai baru sebagai *final surface condition* memberikan batas desain

yang lebih realistis sehingga memungkinkan dilakukannya optimasi pit secara optimal (Gambar 5).



Gambar 5. Peta sebelum (kiri) dan sesudah diversifikasi (kanan) Sungai Lengkupi

Hasil optimasi digunakan untuk menilai perubahan batas pit, nilai *stripping ratio*, serta peningkatan potensi cadangan batubara, dengan mengacu pada kaidah SNI 5015:2019 guna memastikan kelayakan teknis dan keekonomian penambangan. Parameter teknis yang digunakan sebagai dasar estimasi cadangan batubara mencakup aspek geologi, operasional, dan geoteknik yang ditetapkan berdasarkan kondisi aktual endapan dan batasan teknis penambangan (Tabel 3).

Tabel 3. Parameter Teknis

No	Input Data	Keterangan
1	Model Geologi & Limitasi Sumberdaya	Telah terverifikasi dan validasi
2	<i>Surface Constrain</i>	IUP
3	<i>Minimal coal thickness</i>	0,3 m
	<i>Minimal overburden thickness</i>	0,2 m
	<i>Mining losses</i>	0,2 m dari ketebalan
	Dilusi	0,02 m
	<i>Global recovery</i>	95%
4	<i>Minimum Mining Width</i>	50 m
5	<i>Maximum Mining Depth</i>	120 m

Parameter ekonomis yang digunakan dalam analisis diperoleh langsung dari *Competent Person* PT BME, meliputi biaya operasional, biaya modal, dan harga batubara. Tambahan biaya yang timbul akibat kegiatan pemindahan Sungai Lengkupi diperhitungkan pada subbab ini dan diklasifikasikan sebagai *capital cost*. Biaya pekerjaan sungai dihitung berdasarkan penawaran dari

Kontraktor PT BME yaitu Rp 28.000/Bcm, biaya pembebasan lahan berdasarkan harga lahan yang dipetakan dengan luasan yang diperlukan untuk pemindahan sungai, serta biaya pembuatan dokumen izin yang diperoleh dari penawaran konsultan jasa (IUJP) (Tabel 4).

Tabel 4. *Capital Cost* Pemindahan Sungai Lengkupi

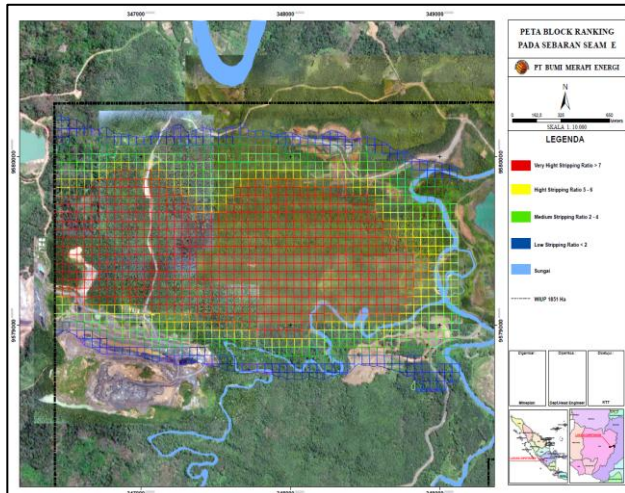
No.	Uraian Biaya	Biaya (Rp)
1.	Pembebasan Lahan	25.000.000.000
2.	Pekerjaan <i>cut & fill</i> pemindahan sungai	65.938.684.000
3.	Pembuatan dokumen izin diversifikasi sungai	3.000.000.000
Total Biaya		93.938.684.000

Penentuan *Pit Shell Ultimate*

Optimasi pit dilakukan dengan menggunakan kombinasi metode *Break Even Stripping Ratio* (BESR) dan *block ranking* untuk menentukan batas pit yang paling optimal secara teknis dan ekonomis. Melalui proses optimasi tersebut, dihasilkan beberapa alternatif *pit shell*, dimana *pit shell* dengan nilai *cashflow* tertinggi dipilih sebagai *ultimate pit shell* yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam penyusunan *practical pit design* PIT GAB 02 pasca diversifikasi Sungai Lengkupi. Distribusi nilai *stripping ratio* hasil proses *block ranking* pada sebaran batubara di wilayah PT BME ditunjukkan pada Gambar 6.

BESR didefinisikan sebagai perbandingan antara volume *overburden* terhadap produksi satu ton batubara pada kondisi titik impas, dimana penerimaan sama dengan total biaya produksi. Perhitungan BESR dilakukan dengan

mempertimbangkan parameter ekonomi yang digunakan dalam perencanaan tambang, meliputi harga jual batubara dan biaya operasi.



Gambar 6. Block Ranking Stripping Ratio pada persebaran Batubara di PT BME

Biaya operasi digunakan sebagai dasar dalam penyusunan analisis keekonomian tambang, khususnya dalam perhitungan *cash flow* untuk memperoleh parameter kelayakan investasi seperti NPV, IRR, dan PBP. Struktur biaya operasi dibagi menjadi dua, yaitu biaya *overburden* dan *coal*. Biaya *overburden* meliputi kegiatan *stripping*, *overhaul distance*, dan *dozer ripping*, yang secara langsung dipengaruhi oleh geometri pit dan nilai SR. Sementara biaya *coal* mencakup *coal getting*, *hauling*, pengelolaan *stockpile*, transportasi hingga *jetty*, serta komponen biaya tetap seperti royalti, CSR, dan pajak produksi (Tabel 5).

Perubahan batas pit akibat penerapan diversifikasi Sungai Lengkupi berimplikasi langsung terhadap perubahan volume *overburden* dan cadangan batubara tertambang. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan struktur biaya, khususnya pada komponen biaya *overburden* yang sensitif terhadap jarak angkut dan jumlah material yang dipindahkan. Di sisi lain, peningkatan cadangan batubara akibat perluasan area tambang berpotensi meningkatkan produksi dan pendapatan. Oleh karena itu, biaya operasi berfungsi sebagai variabel kunci dalam mengevaluasi dampak diversifikasi sungai terhadap efisiensi biaya dan peningkatan nilai ekonomi tambang secara keseluruhan.

Tabel 5. Biaya Produksi PT Bumi Merapi Energi

No	Deskripsi	Tarif (Rp)	Satuan	Biaya (Rp)	Biaya (Incl PPN) (Rp)
A Biaya Overburden					
1	Rate Stripping Overburden	40,745	5	203,725	226,135
2	Overhaul Distance OB (200 m)	1,520	5	38,000	42,180
3	Dozer Ripping	7,759	5	38,795	43,062
B Biaya Coal					
4	Coal Getting	22,825		22,825	25,336
5	Overhaul Distance Coal Getting	14,460		14,460	16,051
6	Stockpile Management	6,066		6,066	6,733
7	Fuel Back Charge	1,769		1,769	1,964
8	Back Charge Fuel and Others	1,317		1,317	1,462
9	Hauling PIT – Inpit Dump PT MAS	2,000	12.3	24,600	27,306
10	Trainset dan Jetty PT WBS	361,000	1	361,000	400,710
11	Transshipment & Floating Crane	106,000	1	106,000	117,660
12	Surveyor	3,000	1	3,000	3,330
13	Royalty	185,000	1	185,000	185,000
14	CSR	5,000	1	5,000	5,000
15	Pengurusan Dokumen	3,000	1	3,000	3,330
16	PBB Produksi	10,000	1	10,000	10,000
17	Jamrek	10,000	1	10,000	10,000
Total Biaya COGS FOB MV				1,034,557	1,125,258

Dalam penelitian ini, kualitas batubara PIT GAB 02 memiliki nilai kalori rata-rata sekitar 5.400 kcal/kg GAR (*Gross As Received*) berdasarkan hasil pengujian kualitas batubara pada saat pemuatan di tongkang. Nilai kalori tersebut merepresentasikan kondisi aktual batubara yang dipasarkan, sehingga menjadi dasar yang relevan dalam penentuan asumsi harga yang mengacu pada indeks ICI 2. Berdasarkan proyeksi harga batubara rata-rata tahun 2025 (*forecast Wood Mackenzie*) untuk kualitas ICI 2 sebesar Rp1.312.000/ton, total biaya produksi batubara sebesar

Rp754.037/ton, serta biaya pengupasan *overburden* sebesar Rp50.024/BCM, diperoleh nilai BESR sebesar 8. Nilai tersebut menunjukkan bahwa setiap satu ton batubara yang ditambang memerlukan pengupasan sekitar delapan BCM material penutup agar operasi berada pada kondisi impas. Parameter BESR ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses *block ranking* dan evaluasi keekonomian pit pada tahap optimasi pascadiversifikasi Sungai Lengkupi.

Berdasarkan hasil optimasi pit, *pitshell* 4 ditetapkan sebagai

batas pit optimum karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan cadangan batubara dan konsekuensi teknis berupa kenaikan SR. Pitshell 4 menghasilkan cadangan sebesar 2.858.617 ton dengan nilai SR increment 6,46 dan SR kumulatif 4,55, yang berada dalam batas ekonomis untuk ditambang (Tabel 6).

Tabel 6. Hasil Optimasi *Pitshell* berdasarkan aspek teknis

Opsi Pit	OB (BCM)	Coal (Ton)	SR Incr	SR Cumm
Pitshell1	5.560.188	1.453.034	3,89	3,83
Pitshell2	6.944.409	1.796.000	4,04	3,87
Pitshell3	9.154.565	2.262.334	4,74	4,05
Pitshell4	13.003.652	2.858.617	6,46	4,55
Pitshell5	15.827.150	3.208.750	8,06	4,93
Practical	11.675.065	2.368.365		4,93

Berdasarkan aspek keekonomian, Pitshell 4 juga menunjukkan hasil yang optimal dibandingkan opsi lainnya, dengan *total revenue* sebesar Rp2.013.633.154.886 dan *profit margin* tertinggi mencapai Rp247.948.694.762. Meskipun total biaya operasi meningkat seiring dengan bertambahnya volume material yang ditambang, peningkatan *revenue* yang dihasilkan dari tambahan cadangan pada Pitshell 4 mampu mengompensasi kenaikan biaya tersebut secara signifikan.

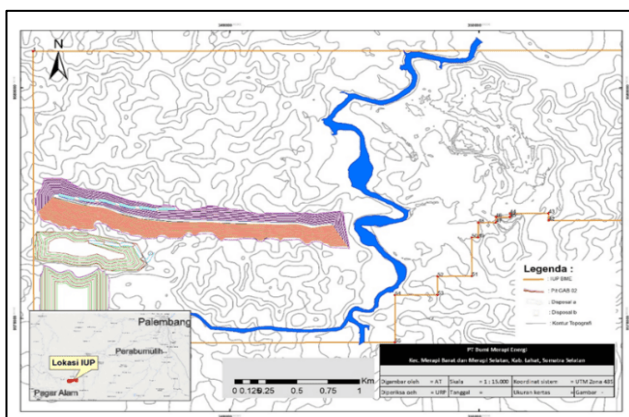
Hal ini menunjukkan bahwa pada konfigurasi pit ini terjadi kondisi optimum secara ekonomi, di mana *marginal revenue* masih lebih besar dibandingkan *marginal cost*. Peningkatan profit margin pada Pitshell 4 menegaskan bahwa optimasi pit yang dipengaruhi oleh diversifikasi sungai memberikan dampak positif terhadap nilai ekonomi tambang (Tabel 7).

Tabel 7. Tabel Pitshell Berdasarkan *Cost and Profit Margin*

Opsi Pit	Total Cost	Revenue	Profit Margin
Pitshell1	Rp 876,219,456,701	Rp 1,023,529,210,081	Rp 147,309,753,380
Pitshell2	Rp 1,078,189,373,786	Rp 1,265,117,287,200	Rp 186,927,913,414
Pitshell3	Rp 1,364,246,216,863	Rp 1,593,606,892,800	Rp 229,360,675,937
Pitshell4	Rp 1,765,684,460,124	Rp 2,013,633,154,886	Rp 247,948,694,762
Pitshell5	Rp 2,007,543,261,273	Rp 2,242,333,383,576	Rp 234,790,122,303
Practical	Rp 1,513,189,557,325,68	Rp 1,667,388,590,400,00	Rp 154,199,033,074

Practical Design PIT GAB 02 Pasca Diversi Sungai

Practical pit design disusun melalui penyempurnaan terhadap *ultimate pit shell* terpilih hasil optimasi yaitu *Pitshell 4*, dengan tujuan menghasilkan rancangan yang aplikatif dan siap diimplementasikan di lapangan. Penyusunan desain mengacu pada desain eksisting serta mempertimbangkan aspek teknis dan operasional, termasuk penentuan lokasi *pit exit* dan *overburden disposal* (OPD) *entry* secara strategis guna mendukung efisiensi sistem angkut dan keselamatan operasi (Gambar 7).



Gambar 7. Peta *Practical Design* Pit GAB 02 Pasca Diversi Sungai Lengkupe

Perbandingan antara desain pit hasil optimasi (*Pitshell 4*) dengan *practical design* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh intervensi berupa diversifikasi sungai terhadap kinerja teknis penambangan. Hasil analisis menunjukkan bahwa *Pitshell 4* menghasilkan volume *overburden* sebesar 13.003.652 BCM dan cadangan batubara sebesar 2.859.617 ton, lebih tinggi dibandingkan *practical design* yang hanya sebesar 11.675.065 BCM untuk *overburden* dan 2.368.365 ton untuk batubara. Meskipun terjadi peningkatan volume material penutup, nilai SR pada Pitshell 4 justru lebih rendah, yaitu sebesar 4,55 dibandingkan dengan 4,93 pada kondisi aktual. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan *intervention-based optimization* yang diterapkan tidak hanya meningkatkan jumlah cadangan tertambang, tetapi juga memberikan perbaikan kinerja teknis secara keseluruhan dibandingkan dengan desain aktual (Tabel 8).

Tabel 8. Perbandingan *Volume Pitshell Ultimate 4* dengan *Practical Design*

Area PIT	Overburden (BCM)	Coal (MT)	SR
<i>Pitshell 4</i>	13.003.652	2.859.617	4.55
<i>Practical Design</i>	11.675.065	2.368.365	4.93

Penjadwalan produksi disusun sebagai tahap lanjutan setelah estimasi cadangan batubara ditetapkan, dengan

tujuan memastikan keterlaksanaan penambangan sesuai kemampuan operasional. Penjadwalan produksi dibagi menjadi dua periode semester guna memudahkan pengendalian dan evaluasi, serta disusun untuk horizon rencana selama tiga tahun. Distribusi aktivitas pengupasan *overburden* dan *coal getting* pada periode tersebut menjadi dasar evaluasi ketercapaian target produksi, rasio kupasan, serta kesesuaian antara estimasi cadangan dan rencana penambangan yang layak secara teknis dan operasional.

Berdasarkan hasil perhitungan umur tambang, penerapan desain tambang pasca diversifikasi menunjukkan perubahan signifikan terhadap durasi operasi. Umur tambang diproyeksikan selama 2 tahun 3 bulan dengan rata-rata produksi batubara sekitar ± 91.000 ton per bulan. Dengan kondisi tersebut, kegiatan penambangan dapat direncanakan

secara lebih efisien baik dari sisi pengupasan *overburden* maupun pengambilan batubara. Hal ini turut mendukung peningkatan efektivitas operasi tambang serta memberikan dasar perencanaan produksi yang lebih realistis terhadap potensi cadangan yang tersedia pada area PIT GAB 02.

Financial Model

Durasi operasi tambang selama 2 tahun 3 bulan digunakan sebagai variabel utama dalam penyusunan model finansial pasca diversifikasi. Umur tambang dan profil produksi yang dihasilkan menjadi dasar dalam pembentukan aliran kas proyek, khususnya dalam penentuan periode penerimaan dan pengeluaran selama umur operasi. Evaluasi kelayakan ekonomi proyek dilakukan menggunakan metode *DCF* dengan mempertimbangkan konsep *time value of money* untuk menilai kinerja finansial proyek (Tabel 9).

Tabel 9. Finansial Model *Loss and Profit* (dalam juta rupiah)

Deskripsi	Tahun	Sem. 1 Tahun Ke-1	Sem. 2 Tahun Ke-1	Sem. 1 Tahun Ke-2	Sem. 2 Tahun Ke-2	Sem. 1 Tahun Ke-3	Total
Profit & Loss	Unit						
Revenue	Rupiah	218,487	683,014	763,741	681,636	760,416	3,107,295
Operating Cost	Rupiah	213,774	581,167	649,856	579,995	629,846	2,654,637
Investment	Rupiah	93,939	-	-	-	-	93,939
EBITDA	Rupiah	(89,225)	101,847	113,885	101,642	130,570	358,719
Depreciation	Rupiah	-	-	-	-	-	-
Taxable Income	Rupiah	(89,225)	101,847	113,885	101,642	130,570	358,719
Corporate Tax (@25%)	Rupiah	-	25,462	28,471	25,410	32,642	111,986
Net Profit After Tax	Rupiah	(89,225)	76,386	85,414	76,231	97,927	246,733
(+) Depreciation	Rupiah	-	-	-	-	-	-
Net Cash Flow	Rupiah	(89,225)	76,386	85,414	76,231	97,927	246,733
Cummulative Net Cash Flow (Undiscounted)	Rupiah	(89,225)	(12,839)	72,574	148,806	246,733	366,049
Discount Factor	12%	1.00	1.00	0.89	0.89	0.80	0.92
Present Value Net Cashflow	Rupiah	(89,225)	(12,839)	64,798	132,862	196,694	292,290

Hasil pemodelan finansial menunjukkan bahwa proyek PIT GAB 02 layak dikembangkan secara ekonomi. Nilai NPV sebesar Rp.292.290.417.886 yang bernilai positif mengindikasikan bahwa proyek mampu memberikan nilai tambah pada tingkat diskonto yang digunakan. Nilai IRR sebesar 22% berada di atas MARR, sehingga memenuhi kriteria kelayakan investasi. Sementara itu, PBP tercapai dalam waktu 1 tahun, yang masih berada dalam rentang umur tambang hasil desain pasca diversifikasi Sungai Lengkupe. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa pemindahan sungai tidak hanya meningkatkan cadangan dan umur tambang, tetapi juga memperkuat kelayakan ekonomi proyek secara menyeluruh (Tabel 10).

Tabel 10. NPV, IRR, and PBP Project Pit GAB02 Pasca Diversi Sungai Lengkupe

Keterangan	Satuan	Hasil
NPV @ $r=12\%$	Rupiah	292,290,417,886
IRR	%	22%
Payback period	Semester	1.54

Estimasi Cadangan

Estimasi cadangan batubara pada PIT GAB 02 pascapemindahan Sungai Lengkupe dilakukan dengan mengacu pada topografi terbaru dan sejumlah asumsi parameter teknis, meliputi ketebalan batubara minimum 0,30 m, *mining losses* total 0,20 m (masing-masing 0,10 m pada *roof* dan *floor*), *mining dilution* sebesar 0,02 m, ketebalan *parting minimum* 0,10 m, serta *global mining recovery* sebesar 95%. Estimasi cadangan dibatasi oleh poligon sumber daya tertunjuk dan terukur, dengan perhitungan tonase menggunakan nilai densitas batubara berbasis in-situ.

Perbandingan antara kondisi pra dan pasca diversifikasi Sungai Lengkupe dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pemindahan alur sungai terhadap perubahan batas pit dan potensi penambahan area yang dapat ditambang. Parameter utama yang digunakan dalam analisis ini adalah volume batubara, karena secara langsung memengaruhi umur tambang dan kinerja finansial proyek. Perbandingan estimasi cadangan Pit GAB 02 Pra-Diversi dan Pasca Diversi Sungai Lengkupe dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Perbandingan Cadangan, Umur Tambang, dan Profit Pra dan Pasca Pemandahan Sungai Lengkuhi

	OB (BCM)	Coal (MT)	Umur (Bulan)	Profit (Rp)
Pra-diversi sungai	2.759.202	558.543	6	86 miliar
Pasca-diversi sungai	11.675.065	2.368.365	27	292 miliar

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemindahan alur Sungai Lengkuhi merupakan intervensi strategis yang mampu menghilangkan *surface constraint* utama, sehingga memungkinkan optimasi batas dan geometri pit PIT GAB 02 dilakukan secara lebih optimal dan aman. Hasil optimasi pasca diversifikasi menunjukkan peningkatan cadangan batubara yang signifikan, dari 558.543 ton menjadi 2.368.365 ton atau meningkat sekitar 324%, dengan nilai *stripping ratio* yang tetap berada dalam batas kelayakan teknis dan ekonomis. Dari aspek operasional, penjadwalan penambangan menunjukkan peningkatan efisiensi dengan rata-rata produksi sekitar 91.000 ton per bulan dan umur tambang selama 2 tahun 3 bulan. Sementara itu, dari sisi keekonomian, intervensi ini terbukti memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap peningkatan profit proyek, yaitu dari Rp86.391.576.067 menjadi Rp292.290.417.886. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan *intervention-based optimization* melalui pemindahan alur sungai tidak hanya meningkatkan akses terhadap cadangan batubara, tetapi juga mampu meningkatkan efisiensi operasional dan nilai ekonomi tambang secara komprehensif.

Sebagai tindak lanjut, penelitian ke depan disarankan untuk mengembangkan analisis yang lebih komprehensif dengan memasukkan aspek ketidakpastian (*uncertainty analysis*), seperti fluktuasi harga batubara, variasi biaya operasional, serta risiko geoteknik dan hidrologi yang dapat mempengaruhi kinerja proyek. Selain itu, diperlukan kajian lanjutan terkait dampak lingkungan dan keberlanjutan, khususnya terhadap perubahan sistem hidrologi dan ekosistem akibat pemindahan sungai. Integrasi metode optimasi lanjutan, seperti *stochastic optimization* atau pendekatan berbasis simulasi, juga direkomendasikan untuk meningkatkan robustitas hasil perencanaan tambang. Dengan demikian, penelitian selanjutnya diharapkan dapat menghasilkan model perencanaan tambang yang tidak hanya optimal secara teknis dan ekonomis, tetapi juga adaptif terhadap dinamika kondisi lapangan dan prinsip keberlanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Haryadi, S., & Suciyantri, R. (2018). *Potensi sumber daya dan cadangan batubara di Indonesia*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

[2] Mendrofa, Y. C., Cahyadi, T. A., Haq, S. R., Ernawati, R., Nurkhamim, & Wicaksono, E. (2023). Analysis of river flow diversions in coal mining area in South Sumatra. *Journal of Mining and Environmental Studies*, 5(2), 87–98.

[3] Flatley, A., & Markham, A. (2023). Establishing geomorphic reference criteria for design of river diversions around mine pits in the Pilbara, Western Australia. *Mine Water and the Environment*, 42, 293–311.

[4] Pica, A. J., & Dombrowski, T. (2011). Geotechnical considerations in river diversion design for mining projects. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(5), 485–499.

[5] Turner, J. P. (2016). Environmental issues in river diversion projects. *Environmental Impact Assessment Review*, 58, 23–35.

[6] Wibowo, J., & Hermawan, S. (2021). Optimasi cadangan batubara pada area penambangan yang dibatasi alur sungai. *Jurnal Rekayasa Pertambangan*, 6(1), 11–20.

[7] Cao, B., Wang, J., Guo, X., Li, W., & Liu, G. (2023). Research on boundary optimization of adjacent mining areas in open pit coal mine based on calculation of sectional stripping ratio. *Scientific Reports*, 13(1).

[8] Hardiman, V., et al. (2024). Pemilihan optimum pit limit berdasarkan volatilitas harga batubara menggunakan discounted cash flow. *Jurnal Pertambangan*, 8(1), 1–10.

[9] Syahrin, S. A., & Prasetyo, A. D. (2022). Financial feasibility study for a river diversion project to optimize the Pit P marginal reserve. *Proceedings of ICSST 2021*.

[10] Suparto, M., Handayani, Rr, H. E., Iskandar, H. (2020) *Kajian Teknis Pemandahan alur Sungai Dalam Rangka Konservasi Cadangan Batubara Dan Optimasi Pit Pada Area Penambangan Pt. Bumi Merapi Energi Kabupaten Lahat Sumatera Selatan*. Undergraduate thesis, Sriwijaya University.

[11] Wesli. (2008). *Drainase Perkotaan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.