

Perancangan pit dan penjadwalan tambang batubara menurut analisis sensitivitas Break Even Stripping Ratio

Pit Design and Mine Scheduling of Coal Mine Based on Sensitivity Analysis of Break Even Stripping Ratio

Diyan Adiatma, Eko Santoso, Sari Melati*

Program Studi Teknik Pertambangan, FT Universitas Lambung Mangkurat
Jalan Achmad Yani KM 35,5 Banjarbaru, Kalimantan Selatan, Indonesia , Kode Pos 70714
e-mail: diyanadiatma8@gmail.com, eko@ulm.ac.id, sari@ulm.ac.id

ABSTRAK

Sektor pertambangan merupakan salah satu sektor usaha yang memiliki potensi pendapatan tinggi, namun juga diikuti oleh tingkat risiko yang besar. Risiko tersebut dapat berasal dari fluktuasi kondisi ekonomi, khususnya perubahan harga komoditas, serta keterbatasan dan karakteristik bahan galian yang ditambang. Oleh karena itu, sebelum kegiatan penambangan dilakukan, diperlukan beberapa alternatif desain pit agar rencana penambangan dapat disesuaikan dengan kondisi ekonomi yang terjadi selama umur tambang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sensitivitas Break Even Stripping Ratio (BESR) sebagai kriteria utama dalam perancangan Pit Alfa, merancang Pit Alfa berdasarkan tiga nilai BESR, serta menyusun penjadwalan penambangan untuk masing-masing desain pit. Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan nilai BESR sebesar $\pm 10\%$. Alternatif rancangan pit disusun dalam tiga skenario, yaitu kondisi yang diharapkan, kondisi peningkatan sebesar 10%, dan kondisi penurunan sebesar 10%. Perancangan pit dilakukan menggunakan perangkat lunak Minescape dengan model topografi dan endapan batubara yang telah tersedia. Geometri lereng Pit Alfa mengikuti geometri lereng yang diterapkan pada Pit Clara. Tahapan penambangan dirancang untuk memenuhi target produksi sebesar 50.000 ton batubara per bulan. Hasil analisis menunjukkan bahwa BESR paling sensitif terhadap perubahan harga batubara. Pada harga batubara USD 42,39/ton, Pit Alfa dirancang dengan BESR 5,31, menghasilkan luas pit 24,4 ha, cadangan batubara 770.135 ton, dan umur tambang 14 bulan. Pada kondisi harga turun 10%, BESR sebesar 4,24 menghasilkan luas pit 18,2 ha, cadangan 546.884 ton, dan umur tambang 11 bulan. Sebaliknya, pada harga naik 10%, BESR sebesar 6,39 menghasilkan luas pit 30 ha, cadangan 936.780 ton, dan umur tambang 18 bulan.

Kata kunci : analisis sensitivitas, *BESR*, penjadwalan tambang, perancangan pit

ABSTRACT

The mining sector is one of the industries with high revenue potential; however, it is also associated with significant risks. These risks arise from fluctuations in economic conditions, particularly changes in commodity prices, as well as the availability and characteristics of the mined mineral resources. Therefore, prior to mining operations, several alternative pit designs must be prepared to allow flexibility in adapting to economic conditions throughout the mine life.

This study aims to analyse the sensitivity of the *Break Even Stripping Ratio* (BESR) as a key criterion in the design of Pit Alfa, to develop Pit Alfa designs based on three BESR values, and to establish mining schedules for each pit design. The sensitivity analysis was conducted by varying the BESR parameter by $\pm 10\%$. Three pit design scenarios were evaluated, representing the expected condition, a 10% increase, and a 10% decrease.

Pit design was performed using Minescape software, utilizing available topographic and coal deposit models. The slope geometry of Pit Alfa was designed to follow the slope geometry applied at Pit Clara. Mining stages were developed to achieve a production target of 50,000 tons of coal per month.

The results indicate that BESR is most sensitive to changes in coal price. At a coal price of USD 42.39 per ton, Pit Alfa was designed with a BESR of 5.31, resulting in a pit area of 24.4 ha, coal reserves of 770,135 tons, and a mine life of 14 months. When coal prices decrease by 10%, a BESR of 4.24 produces a pit area of 18.2 ha, coal reserves of 546,884 tons, and a mine life of 11 months. Conversely, when coal prices increase by 10%, a BESR of 6.39 yields a pit area of 30 ha, coal reserves of 936,780 tons, and a mine life of 18 months.

Keywords: sensitivity analysis, break even stripping ratio, mine scheduling, pit design

PENDAHULUAN

Perkembangan penelitian dalam perencanaan tambang menunjukkan pergeseran dari pendekatan manual tradisional ke metode yang mengintegrasikan optimasi, simulasi, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan kinerja desain pit dan penjadwalan produksi. Studi terkini mengaplikasikan perangkat lunak berbasis mine scheduling untuk merancang pit yang mampu mencapai target produksi dengan akurasi tinggi tanpa proses trial and error yang memakan waktu [1]. Selain itu, model optimasi produksi terbuka berbasis Python telah dikembangkan untuk menghasilkan jadwal tambang yang transparan, adaptif terhadap kondisi operasional, dan memperhatikan keberlanjutan [2]. Penelitian lain menggunakan optimasi evolusioner multi-tujuan untuk menangani ketidakpastian geologi sekaligus menyeimbangkan nilai ekonomi dan risiko dalam penjadwalan besar [3]. Inovasi lebih lanjut melibatkan sistem dukungan keputusan berbasis pembelajaran mesin dan GPU yang mampu mengevaluasi skenario geologi secara berskala besar untuk menghasilkan solusi jadwal yang lebih resilient [4]. Selain itu, integrasi simulasi dan optimasi dalam perencanaan jangka pendek membantu memprioritaskan berbagai target operasional secara holistik [5]. Keseluruhan temuan ini menandai tren perencanaan tambang responsif

terhadap ketidakpastian, berorientasi pada hasil ekonomi, dan didukung teknologi canggih, mencerminkan arah penelitian modern dalam desain tambang terbuka.

Perancangan pit dan penjadwalan tambang merupakan tahapan penting dalam perencanaan tambang batubara karena sangat memengaruhi kelayakan teknis dan ekonomis suatu kegiatan penambangan. Salah satu parameter utama yang digunakan dalam perancangan pit adalah Break Even Stripping Ratio (BESR), yang merepresentasikan batas maksimum perbandingan pengupasan tanah penutup terhadap batubara agar kegiatan penambangan tetap ekonomis. Nilai BESR sangat dipengaruhi oleh faktor ekonomi, khususnya harga batubara dan biaya penambangan, yang bersifat dinamis dan fluktuatif. Perubahan nilai BESR akan berdampak langsung pada batas pit, cadangan tertambang, umur tambang, serta penjadwalan produksi. Oleh karena itu, diperlukan analisis sensitivitas BESR untuk menghasilkan rancangan pit dan penjadwalan tambang yang adaptif terhadap perubahan kondisi ekonomi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) bagaimana pengaruh perubahan nilai Break Even Stripping Ratio terhadap rancangan pit tambang batubara?; (2) bagaimana hasil perancangan pit tambang batubara berdasarkan variasi nilai BESR dari analisis sensitivitas?; (3) Bagaimana penjadwalan tambang yang optimal untuk setiap rancangan pit hasil analisis sensitivitas BESR?

Penelitian ini memiliki urgensi tinggi karena dapat menjadi dasar pengambilan keputusan dalam perencanaan tambang batubara yang lebih fleksibel dan berkelanjutan. Dengan memahami sensitivitas BESR terhadap perubahan kondisi ekonomi, perusahaan tambang dapat meminimalkan risiko kerugian, mengoptimalkan cadangan tertambang, serta menyusun penjadwalan produksi yang realistis dan efisien. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam perancangan pit tambang batubara yang adaptif terhadap ketidakpastian ekonomi.

METODOLOGI

Ketidakpastian kondisi ekonomi mempengaruhi parameter *Break Even Stripping Ratio* sehingga diperlukan rancangan pit dan jadwal penambangan yang fleksibel, terdiri atas rancangan pada kondisi yang diharapkan dan alternatif. Data yang diperlukan adalah biaya pembongkaran *overburden*, biaya penambangan batubara, harga jual batubara, model topografi, model endapan batubara, geometri lereng pit, spesifikasi Alat gali muat angkut.

Pengolahan data diawali dengan perhitungan BESR dan analisis sensitivitas parameter BESR yang digunakan sebagai batas pit optimum. Persamaan (1) merupakan formula yang dipakai pada saat perhitungan. Dimana E mewakili pendapatan /ton bijih (recoverable value / ton ore), F mewakili ongkos produksi /ton bijih (production cost / ton ore), G mewakili ongkos pengupasan tanah / ton waste (stripping cost / ton waste) [6].

$$\text{BESR} = \frac{E-F}{G} \quad (1)$$

Selanjutnya dilakukan pemilihan kriteria BESR sebagai alternatif desain. BESR yang menjadi kriteria rancangan dan penjadwalan disediakan pada 3 kondisi, yaitu (1) kondisi yang diprediksi atau diharapkan (expected condition), (2) kondisi jika terjadi kenaikan 10% dari semua parameter BESR; dan (3) kondisi jika terjadi penurunan 10% dari semua parameter BESR. Selanjutnya, dilakukan perancangan pit, perhitungan volume OB dan tonase batubara, serta penjadwalan tambang menurut 3 analisis BESR tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

BESR sebagai kriteria desain Pit mengacu pada perubahan tiga parameter yaitu harga batubara, biaya pembongkaran *overburden*, dan biaya penambangan batubara yang dibandingkan dan dilihat yang mana lebih berpengaruh terhadap BESR. Data yang digunakan adalah data operasional perusahaan pada tahun 2017 yaitu biaya pembongkaran *overburden* sebesar 8,66 US/ton, biaya penambangan batubara sebesar 2,48 USD/ton dan harga jual sebesar 42,39

Contoh perhitungan BESR menggunakan persamaan (1) untuk mendapatkan kriteria BESR pada expected condition, diperoleh BESR 5,31.

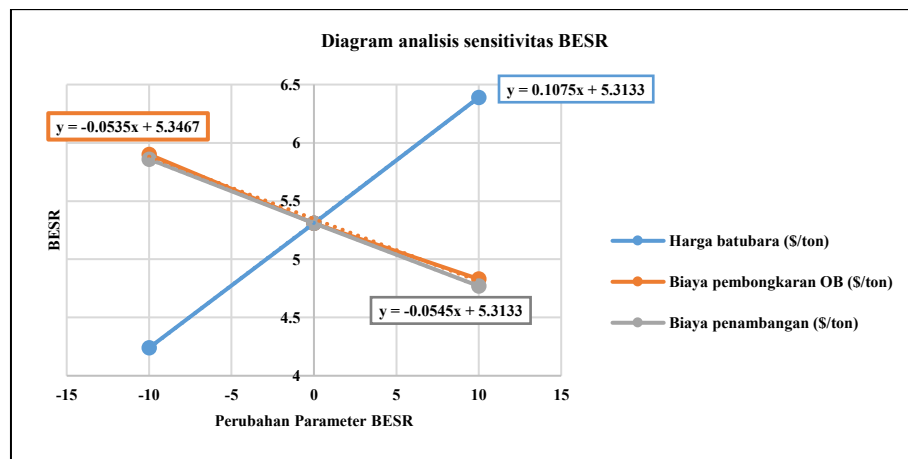
$$\begin{aligned} \text{BESR} &= \frac{\frac{\$42.39}{\text{ton}} \text{ coal} - \frac{\$21.48}{\text{ton}} \text{ coal}}{\frac{\$8.66}{\text{ton}} \text{ overburden}} \\ \text{BESR} &= \frac{\frac{\$20.91}{\text{ton}} \text{ coal}}{\frac{\$8.66}{\text{ton}} \text{ overburden}} \\ \text{BESR} &= 2.42 \frac{\text{ton overburden}}{\text{ton coal}} \times 2.20 \frac{\text{BCM overburden}}{\text{ton overburden}} \\ \text{BESR} &= 5.31 \frac{\text{BCM Overburden}}{\text{ton coal}} \end{aligned}$$

Tabel-1 mencantumkan hasil perhitungan BESR pada berbagai kondisi perubahan parameter BESR. Plot hasil perhitungan BESR disajikan pada Gambar-2 yang menunjukkan bahwa parameter harga batubara paling berpengaruh terhadap perubahan BESR, diikuti oleh biaya penambangan dan biaya pengupasan *overburden*. Ini dibuktikan dari nilai kemiringan garis (gradien) lurus 10,76 untuk parameter harga batubara, -5,453 untuk parameter biaya penambangan batubara, -5,365 untuk parameter biaya pembongkaran *overburden*. Karena parameter harga batubara yang paling berpengaruh, maka parameter inilah yang digunakan sebagai kriteria pembuatan desain Pit. BESR pada kondisi yang diharapkan 5.31; BESR pada kondisi terburuk (harga jual turun -10%) 4.24; dan BESR pada kondisi terbaik (harga jual naik +10%) 6.39. Kolom

yang disorot dengan warna hijau muda dan *peach* merupakan nilai SR yang akan dirancang, sebagai batas SR tertinggi pada kondisi terbaik (6.39) dan SR terendah pada kondisi terburuk (4.24) menurut harga batubara. Ini karena BESR paling sensitif terhadap perubahan harga batubara.

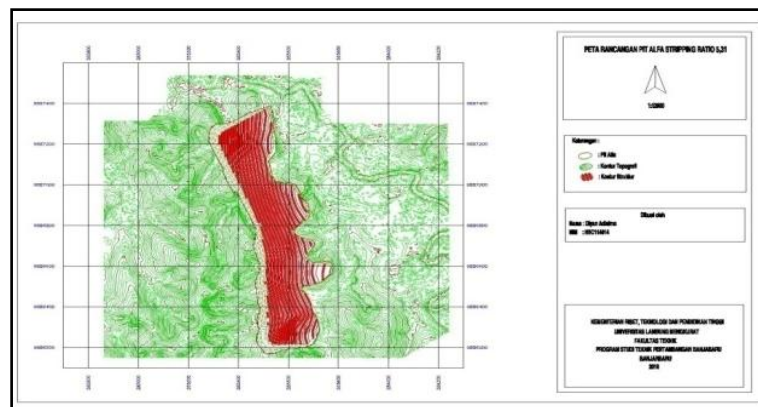
Tabel-1. Hasil perhitungan sensitivitas BESR pada berbagai kondisi ekonomi

No.	Perubahan parameter BESR (\$)	Penurunan (-10%)	Expected value	Kenaikan (+10%)
1	Harga batubara	4.24	5.31	6.39
2	Biaya pembongkaran overburden	5.90	5.31	4.83
3	Biaya penambangan	5.86	5.31	4.77



Gambar-1. Grafik Sensitivitas BESR

Setelah mendapatkan batas optimum yang akan dirancang yaitu BESR normal (expected condition), dengan SR sebesar 5,31, BESR kenaikan 10% dengan SR sebesar 6,39, serta BESR penurunan 10% dengan SR sebesar 4,24. Selanjutnya membuat rancangan pit sesuai dengan batas pit tersebut. Gambar-3 menunjukkan contoh rancangan pit dengan SR 5.31 yang dibuat menurut kriteria BESR pada *expected condition*.



Gambar-2. Rancangan Pit SR 5,31

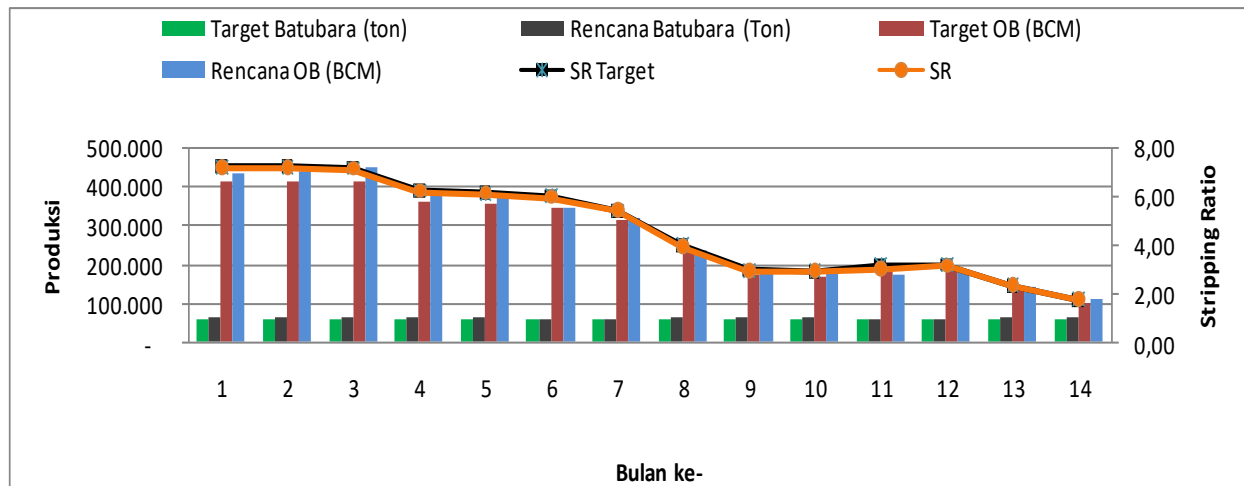
Dari perhitungan volume overbuden dan volume batubara menggunakan metode triangulasi yang dilakukan terhadap ketiga rancangan pit (SR 4.24, SR 5.31, dan SR 6.39), didapatkan volume *overburden* dan cadangan batubara seperti tercantum pada Tabel-2. Semakin besar SR, semakin besar pula volume OB, tonase batubara, dan luas pit hasil perancangan.

Tabel-2. Volume OB, tonase batubara, dan luas pit hasil desain

SR	Kondisi	Volume overbuden (BCM)	Tonase batubara (ton)	Luas pit (ha)	Panjang pit (m)	Lebar pit (m)	Elevasi minimum s.d. maksimum (msl)
4.24	Best Condition	2.380.571	546.884	18.2	1.178	183	6 s.d. 46
5.32	Expected condition	3.935.704	845.895	24.4	1.188	233	1 s.d. 51
6.39	Worst condition	5.623.190	936.780	30	1219	301	-2 sd. 48

Gambar-3 menunjukkan grafik rencana produksi pada Pit Alfa dengan nilai *Stripping Ratio* 5,31. Seperti terlihat pada 3 bulan pertama penambangan, rencana *overburden* yang dibongkar relatif besar (sekitar 400.000 BCM) karena demi

memenuhi target produksi batubara pada bulan-bulan tersebut. Selanjutnya pada bulan-bulan berikutnya mengalami penurunan pengupasan *overburden* karena sudah dikupas pada awal-awal penambangan. Fokus berikutnya adalah menambang batubara yang sudah dikupas *overburden*nya. Walaupun demikian, penurunan pengupasan dirancang bertahap. Rencana penambangan Pit Stripping Ratio 5,31 ini membutuhkan waktu penambangan selama ± 14 bulan.



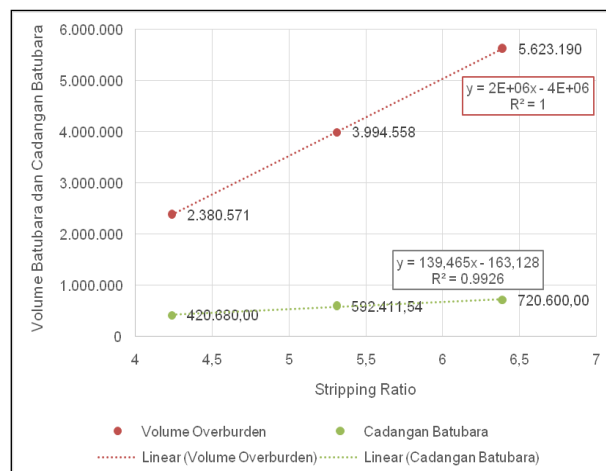
Gambar-3. Grafik jadwal produksi Pit Alfa dengan SR 5,31

Berdasarkan rancangan pit dan jadwal penambangan dari 3 kondisi selanjutnya dapat dianalisis pengaruh perubahan *stripping ratio* terhadap parameter perancangan pit dan penjadwalan tambang. Peningkatan *stripping ratio* berbanding lurus terhadap peningkatan volume *overburden* yang harus dibongkar dan cadangan batubara yang akan diperoleh seperti terlihat pada Gambar-4. Perubahan *stripping ratio* sangat berpengaruh terhadap perubahan volume *overburden* yang ditunjukkan oleh koefisien determinasi (R^2) = 1 dan kecenderungan data memenuhi persamaan linier positif :

$$\text{volume overburden} = 2.10^6 \text{ stripping ratio} - 4.10^6 \quad (2)$$

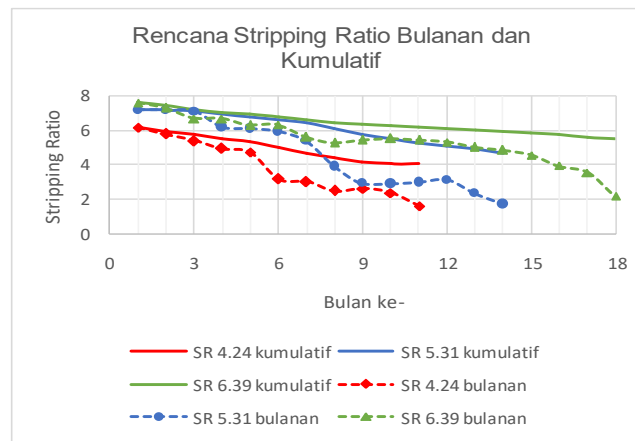
Perubahan *stripping ratio* sangat berpengaruh terhadap perubahan cadangan batubara yang ditunjukkan oleh koefisien determinasi (R^2) = 0.99 dan kecenderungan data memenuhi persamaan linier positif :

$$\text{cadangan batubara} = 139,456 \text{ stripping ratio} - 163,128 \quad (4)$$



Gambar-4. Pengaruh Perubahan Stripping Ratio terhadap Volume *Overburden* dan Cadangan Batubara

Berdasarkan Gambar-5, terlihat bahwa perubahan *stripping ratio* bulanan pada rancangan pit dengan SR 4.24, SR 5.31 SR 6.39, cenderung menurun seiring perubahan umur tambang. Demikian juga halnya dengan *stripping ratio* kumulatif yang penurunannya nyaris cenderung konstan. Selain itu, pemilihan *pushback* yang mudah dalam operasionalnya juga mempengaruhi konstannya *stripping ratio* yang akan digali per bulan. Sejauh target penambangan batubara tercapai, perluasan pit ke arah *strike*, *dip direction*, maupun dengan menurunkan elevasi lantai pit masih memungkinkan untuk dilakukan semua secara bersamaan.



Gambar-5. Rencana *Stripping Ratio* bulanan dan kumulatif

KESIMPULAN

1. Nilai sensitivitas BESR pada Pit Alfa yakni pada keadaan yang diharapkan adalah dengan *stripping ratio* 5,31 dan dengan *stripping ratio* 6,39 pada keadaan naik 10% serta *stripping ratio* 4,24 pada keadaan turun 10%
2. Rancangan Pit Alfa dengan tiga keadaan sesuai dengan sensitivitas BESR sebagai berikut :
 - a. Rancangan Pit pada keadaan yang diharapkan yaitu *stripping ratio* 5,31 dengan luas 24,4 ha, panjang 1188 meter, lebar 233 meter dan memiliki elevasi terendah 1 meter di atas permukaan laut serta memiliki volume *overburden* sebesar 3.935.704 BCM dan cadangan batubara sebesar 845.895 ton.
 - b. Rancangan Pit pada keadaan naik 10% yaitu *stripping ratio* 6,39 dengan luas 30 ha, panjang 1219 meter, lebar 301 meter dan memiliki elevasi terendah -2 meter di atas permukaan laut serta memiliki volume *overburden* sebesar 5.623.190 BCM dan cadangan batubara sebesar 936.780 ton.
 - c. Rancangan Pit pada keadaan turun 10% yaitu *stripping ratio* 4,24 dengan luas 18,2 ha, panjang 1178 meter, lebar 183 meter dan memiliki elevasi terendah 6 meter di atas permukaan laut serta memiliki volume *overburden* sebesar 2.380.571 BCM dan cadangan batubara sebesar 546.884 ton.
3. Menyusun penjadwalan pada Pit Alfa dengan tiga keadaan yang sesuai dengan sensitivitas BESR sebagai berikut:
 - a. Penjadwalan Pit Alfa pada keadaan yang diharapkan yaitu *stripping ratio* 5,31 dengan lama penambangan 14 bulan dengan memiliki 32 blok dan 11 strip serta 662 *cell*.
 - b. Penjadwalan Pit Alfa pada keadaan naik 10% yaitu *stripping ratio* 6,39 dengan lama penambangan 18 memiliki 32 blok dan 11 strip serta 877 *cell*.
 - c. Penjadwalan Pit Alfa pada keadaan turun 10% yaitu *stripping ratio* 4,24 dengan lama penambangan 11 bulan dengan memiliki 31 blok dan 10 strip serta 495 *cell*.

Reklomendasi dari hasil penelitian ini untuk perusahaan yaitu: rancangan pit dan jadwal penambangan yang dihasilkan dari penelitian ini dapat diterapkan sesuai kondisi ekonomi yang berlaku saat penambangan berlangsung. Apabila saat penambangan Pit Alfa nilai parameter BESR sesuai kondisi sekarang, rancangan yang diterapkan Pit dengan SR 5,31 dengan umur tambang selama 14 bulan. Apabila terjadi perubahan harga jual batubara, biaya penambangan, maupun biaya pengupasan *overburden*, perlu disediakan rancangan pit dan tahapan penambangan (*pushback*) yang baru dengan kriteria BESR dapat sesuai grafik analisis sensitivitas. Sebagai rencana alternatif, pada penelitian ini telah disediakan rancangan pit dan tahapan penambangan untuk menghadapi kondisi terbaik dan kondisi terburuk dengan *stripping ratio* 6,39 dan 4,24.

Saran untuk penelitian selanjutnya terkait penelitian ini yaitu dapat dilakukan:

1. analisis pengaruh bentuk topografi dan kemiringan endapan batubara terhadap tahapan tambang (*pushback*),
2. analisis pengaruh besar margin (keuntungan) yang diharapkan terhadap *stripping ratio* ekonomis,
3. analisis ekonomi skenario tahapan pengupasan *overburden* dan batubara pada tahapan penambangan,
4. perancangan ulang atau desain lanjutan pit yang telah tergalai ketika terjadi perubahan parameter BESR ketika batas pit akhir belum tercapai atau kemajuan penambangan masih berlangsung selama periode tertentu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pimpinan seluruh staff PT Hamparan Mulya, yang terletak di Kecamatan Teweh Baru, Kabupaten Barito Utara, Kalimantan Tengah, atas fasilitas dan dukungan sumber daya (data, perangkat, sarana, analisis, dan pendampingan) untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.Ismail, M.G.D. Devedo, dan A.J. Pontus. Design of Pit X based on production targets using mine scheduling concept at PT Y. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*, 8.2, pp. 70-80, 2025.
- [2] J.S. Lotsu, G.Y. Bimpong, dan K. Boakye. A Scalable Python-Based Optimization Model for Sustainable Open-Pit

Mine Production Scheduling. *Preprints*, 2025.

- [3] I.H. Pathiranage, dan A. Neumann. Bi-Objective Evolutionary Optimization for Large-Scale Open Pit Mine Scheduling Problem under Uncertainty with Chance Constraints. *Computer Science: Neural and Evolutionary Computing*, 2025.
- [4] Rahimi, I. Deep Learning Decision Support System for Open-Pit Mining Optimisation: GPU-Accelerated Planning Under Geological Uncertainty. *Computer Science: Artificial Intelligence*, 2025.
- [5] A.G. Martins, M.J.F. Souza, and P.S. Assis. An integrated simulation and optimization tool for short-term mining planning problems with different prioritization among competing plant targets. *Computers & Industrial Engineering*, 19, pp. 110-115, 2024.
- [6] S. Melati dan Nurhakim. *Buku Ajar Perencanaan dan Permodelan Tambang*. Universitas Lambung Mangkurat, 2011.