

Penentuan Batas Pit Tambang Terbuka Bijih Nikel Berbasis Estimasi Cadangan Inverse Distance Weighting Menggunakan Surpac

Muh. Ikmal¹, Ruth Bunga Ranggu², Muh Arif Idhan³

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia, Indonesia

muhammad.ikmal010420@gmail.com¹

Abstrak

Kata Kunci:

Estimasi Cadangan, Inverse Distance Weighting, Batas Pit Tambang Terbuka.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil estimasi cadangan bijih nikel laterit serta penentuan batas pit tambang terbuka berdasarkan hasil estimasi tersebut pada Blok III Batuawu PT. Tambang Bumi Sulawesi. Estimasi cadangan dilakukan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) pada perangkat lunak Surpac 6.3 dengan memanfaatkan data hasil pemboran berupa data *assay*, *collar*, *geology*, dan *survey*. Tahapan penelitian meliputi pengolahan database, pemodelan blok endapan, penerapan *Cut Off Grade* (COG), hingga perancangan pit penambangan. Hasil penelitian menunjukkan total sumberdaya sebesar 1.369.191 ton dengan kadar rata-rata 1,03% Ni dan 31,56% Fe. Setelah penerapan COG sebesar 1,3%, diperoleh cadangan tertambang sebesar 404.771 ton dengan kadar rata-rata 1,52% Ni dan 21,55% Fe. Berdasarkan hasil tersebut dirancang desain pit dengan parameter geoteknik tinggi jenjang 6 m, lebar jenjang 3 m, dan sudut lereng 55°, yang menghasilkan luas penambangan 9,81 Ha dengan elevasi 38,4–124,4 m. Pembongkaran *overburden* sebesar 964.421 ton menghasilkan nilai *stripping ratio* 1,6 : 1 yang masih memenuhi kriteria ekonomis penambangan.

Abstract

Key Word:

Reserve Estimation, inverse Distane Weighting, Open Pit Limit

This study aims to determine the estimated reserves of lateritic nickel ore and to define the open pit mining boundary based on the obtained estimation results at Block III Batuawu, PT. Tambang Bumi Sulawesi. The reserve estimation was carried out using the Inverse Distance Weighting (IDW) method in Surpac 6.3 software by utilizing drilling data including assay, collar, geology, and survey data. The research stages consisted of database processing, ore body block modeling, application of Cut Off Grade (COG), and open pit design. The results show that the total resource is 1,369,191 tons with an average grade of 1.03% Ni and 31.56% Fe. After applying a COG of 1.3%, an extractable reserve of 404,771 tons was obtained with an average grade of 1.52% Ni and 21.55% Fe. Based on these results, an open pit design was developed with geotechnical parameters of 6 m bench height, 3 m bench width, and 55° slope angle, covering an area of 9.81 Ha with elevation ranges of 38.4–124.4 m. The required overburden removal is 964,421 tons with a stripping ratio of 1.6 : 1, indicating economically feasible mining conditions.

PENDAHULUAN

Permintaan bijih nikel yang terus meningkat seiring perkembangan industri energi dan baterai mendorong pentingnya perencanaan tambang yang akurat dan efisien. Salah satu aspek krusial dalam perencanaan tambang terbuka adalah estimasi cadangan dan penentuan batas pit (*pit limit*), karena kedua hal tersebut secara langsung memengaruhi kelayakan teknis dan ekonomi suatu kegiatan penambangan (Mwangi et al., 2020).

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji estimasi cadangan bijih nikel menggunakan berbagai metode interpolasi, seperti *inverse distance weighting* (IDW), *kriging*, dan *nearest neighbour*, yang umumnya difokuskan pada peningkatan akurasi estimasi kadar dan tonase (Liu et al., 2021). Di sisi lain, penelitian mengenai desain pit lebih banyak menitikberatkan pada aspek geoteknik dan optimasi ekonomi secara terpisah (Adrien Rimélé et al., 2018). Namun demikian, integrasi antara metode estimasi cadangan dengan penentuan batas pit dalam satu alur analisis yang sistematis masih relatif terbatas, khususnya pada endapan nikel laterit.

Keterbatasan tersebut menunjukkan adanya kesenjangan (*research gap*) dalam pendekatan perencanaan tambang, di mana hasil estimasi cadangan belum sepenuhnya dioptimalkan sebagai dasar dalam penentuan batas pit secara komprehensif. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang mampu mengintegrasikan hasil estimasi cadangan dengan perancangan pit untuk menghasilkan desain tambang yang lebih representatif terhadap kondisi geologi dan ekonomis.

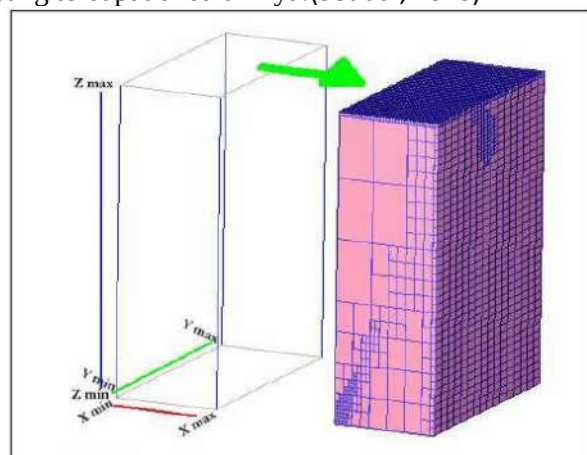
Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi cadangan bijih nikel menggunakan metode *inverse distance weighting* (IDW) serta menentukan batas pit tambang terbuka berdasarkan hasil estimasi tersebut dengan memanfaatkan perangkat lunak Surpac. Kebaruan (*novelty*) dalam penelitian ini terletak pada integrasi langsung antara pemodelan blok berbasis IDW dengan perancangan batas pit menggunakan parameter geoteknik dan *cut off grade* dalam satu alur kerja terintegrasi pada studi kasus Blok III Batuawu PT. Tambang Bumi Sulawesi.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan tujuan mengestimasi cadangan bijih nikel dan menentukan batas pit tambang terbuka berdasarkan hasil estimasi tersebut. Penelitian dilakukan pada Blok III Batuawu, PT. Tambang Bumi Sulawesi, Kabupaten Bombana, Sulawesi Tenggara, pada periode Agustus–September 2025.

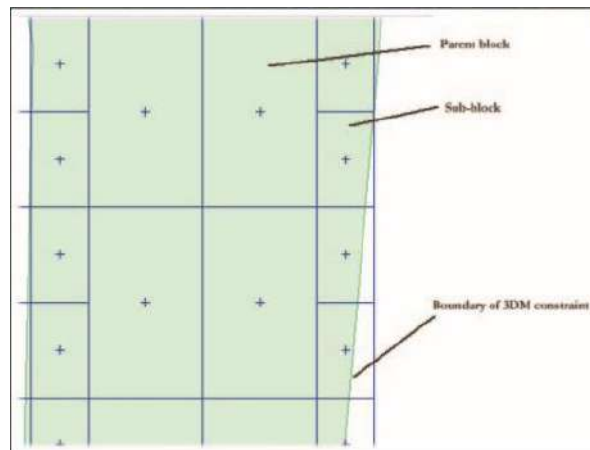
Data yang digunakan terdiri atas data primer dan sekunder. Data primer meliputi data pemboran berupa *collar* (koordinat dan elevasi), *geology* (litologi dan zona laterit), serta *survey* (arah dan kemiringan lubang bor). Data sekunder meliputi data topografi, *specific gravity*, *cut off grade* (COG), *assay* (kadar), serta parameter geometri lereng. Spasi pemboran yang digunakan adalah 40 m × 40 m dengan kedalaman lubang bor mencapai ±32 m, menyesuaikan ketebalan profil laterit.

Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak Surpac 6.3 melalui beberapa tahapan. Tahap pertama adalah penyusunan database dengan mengintegrasikan data *assay*, *collar*, *geology*, dan *survey* ke dalam sistem basis data terstruktur (Sinha et al., 2026). Selanjutnya dilakukan pemodelan geologi dan pembuatan blok model tiga dimensi (3D block model) dengan ukuran blok yang disesuaikan terhadap sebaran data pemboran dan geometri endapan (Guo et al., 2021). Blok model memperkirakan nilai volume, *specific gravity*, dan rata-rata atribut yang terdapat di dalamnya. (Setiadi, 2020)



Gambar 1. Ruang Blokmodel Dasar

Menurut (Setiadi, 2020) sebuah blok model terdiri dari beberapa cell dengan ukuran tertentu yang merupakan inti dari pusat blok yang mengandung massa dimana semua data yang disimpan di dalamnya dalam bentuk bijih, jenis batuan. Kadar unsur, dll.



Gambar 2. Parent Blok, Sub Blok dan Batas Dengan Suatu Constrain

1. 3D koordinat untuk nilai maksimum X,Y,Z dan nilai minimum X,Y,Z
2. Sub blok size adalah ukuran cell lebih kecil dari parent blok untuk meningkatkan Tingkat akurasi dari interpolasi dan perhitungan di dalam blok model
3. Parent blok merupakan blok utama dalam model, yang ukurannya ditentukan saat awal pembuatan blok model
4. Boundary of 3DM constraint merupakan batas tiga dimensi dari suatu bentuk geologi, misalnya batas endapan bijih atau volume tambang.

Estimasi kadar bijih dilakukan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW), di mana nilai kadar pada setiap blok dihitung berdasarkan pembobotan jarak terhadap titik bor di sekitarnya (Liu et al., 2024). Parameter estimasi yang digunakan meliputi nilai *power* (p) yang mengontrol pengaruh jarak terhadap bobot, serta radius pencarian yang ditentukan berdasarkan distribusi data pemboran (Meng et al., 2021). Metode ini mengacu pada pendekatan interpolasi yang telah umum digunakan dalam estimasi sumberdaya mineral.

Persamaan IDW yang digunakan dalam Pembobotan adalah sebagai berikut (Isaaks & Srivastava, 1989)

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Untuk menghitung nilai titik yang ditaksir digunakan persamaan berikut:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot Z_i$$

Variabel $\hat{Z}_0$ merupakan nilai yang ditaksir atau hasil estimasi pada titik yang belum diketahui nilainya, sedangkan w_i merupakan faktor bobot dari titik ke- i yang menunjukkan tingkat pengaruh masing-masing titik terhadap hasil penaksiran. Selanjutnya, Z_i merupakan nilai dari titik penaksir atau titik sampel ke- i (C_i) yang digunakan sebagai dasar dalam proses estimasi, sementara d_i merupakan jarak antara titik penaksir (C_i) dengan titik yang akan ditaksir (TB_i) yang berperan dalam menentukan besar kecilnya pengaruh suatu titik. Adapun p merupakan faktor eksponen (*power*) yang digunakan dalam perhitungan bobot, biasanya bernilai 1, 2, 3, 4, atau 5, yang berfungsi untuk mengatur tingkat pengaruh jarak terhadap bobot.

Selanjutnya dilakukan penerapan *cut off grade* (COG) sebesar 1,3% Ni untuk memisahkan material bijih (*ore*) dan bukan bijih (*waste*). Berdasarkan hasil tersebut, dilakukan perhitungan volume dan tonase cadangan menggunakan nilai *specific gravity* yang telah ditentukan.

Tahap berikutnya adalah perancangan pit tambang terbuka berdasarkan hasil blok model dan distribusi cadangan. Parameter geoteknik yang digunakan dalam desain pit meliputi tinggi jenjang 6 m, lebar jenjang 3 m, dan sudut lereng 55°. Desain pit dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan batas ekonomis penambangan serta kestabilan lereng.

Setelah desain pit terbentuk, dilakukan perhitungan cadangan tertambang (*mineable reserve*) serta volume *overburden* yang harus dikupas. Nilai *stripping ratio* dihitung sebagai perbandingan antara volume *overburden* terhadap volume bijih yang tertambang (Oubah et al., 2024). Seluruh tahapan analisis dilakukan secara terintegrasi dalam perangkat lunak Surpac untuk memastikan konsistensi antara estimasi cadangan dan desain pit penambangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa data pemboran yang digunakan mampu merepresentasikan kondisi geologi dan sebaran kadar bijih nikel pada Blok III Batuawu. Berdasarkan pengolahan data assay, collar, geology, dan survey, diperoleh model sebaran endapan nikel laterit yang terdiri atas zona limonit dan saprolit dengan distribusi kadar yang bervariasi.



Gambar 2. Peta Penyebaran Titik Bor Pada Blok III Pit Batuawu

Data Assay

Assay adalah data kadar dari unsur mineral berharga seperti nikel (Ni), besi (Fe), kobalt (Co), dan unsur pengotor lainnya, yang diperoleh dari analisis laboratorium terhadap sampel bor (Aldiyansyah & Husain, 2024).

Data Collar

Data ini berisi informasi geografis dari setiap lubang bor yang telah dibuat, mencakup koordinat X,Y dan Z (elevasi) untuk menentukan posisi pasti setiap lubang bor di permukaan tanah (Shi et al., 2022).

Data Geologi

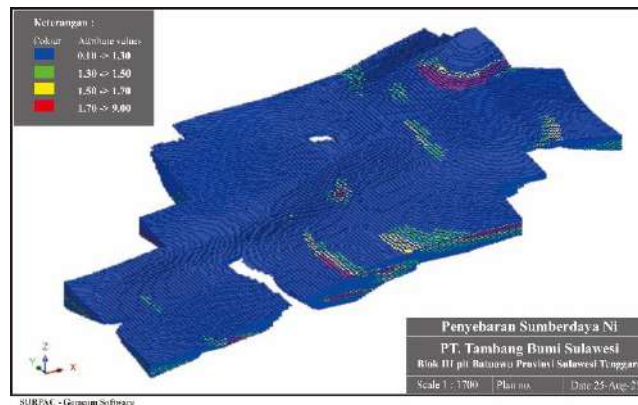
Data geologi mencatat jenis batuan (lithology), lapisan tanah, dan karakteristik geologi lainnya di setiap kedalaman bor. Informasi ini penting untuk mengidentifikasi lapisan, menentukan di mana batuan induk (batuan ultramafik), saprolit (lapisan bijih nikel laterit), dan limonit berada (Arif et al., 2022).

Data Survey

Data survey merupakan data yang berkaitan dengan topografi dan orientasi lubang bor, data survey ini sendiri terdiri dari arah dan kemiringan lubang bor (Roonwal, 2018).

Hasil Estimasi Sumberdaya

Sumberdaya adalah bagian dari cebakan mineral pada kerak bumi di mana densitas, kuantitas dan kualitas tertentu pada suatu konsentrasi atau keterjadian dari suatu mineral yang memiliki nilai ekonomi dan keprospekan yang beralasan untuk pada akhirnya dapat diekstraksi secara ekonomis (Otto, 2020). Dalam penelitian ini sumberdaya didapatkan dari data eksplorasi dan diolah menggunakan metode inverse distance weighting (IDW) dengan ukuran blok 5x5x1 dan ukuran blok minimum 2.5 x 2.5 x 0.5 dengan luasan area 7.84 Ha.



Gambar 3. Sebaran Sumberdaya Nikel Laterit

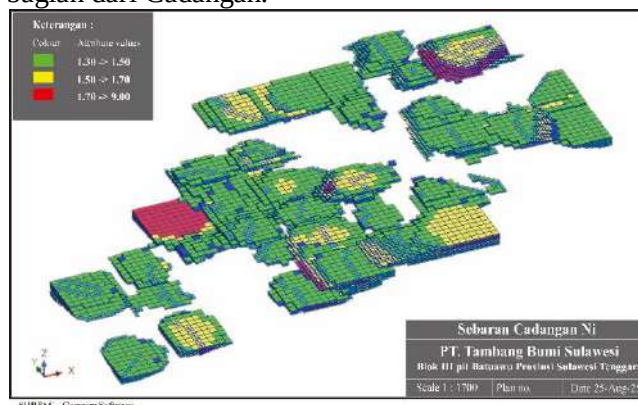
Tabel 1. Total Penyebaran Sumberdaya

Kadar Ni	Volume	Tonnes	Ni	Fe
0.1 -> 1.3	642947	964420	0.83	35.76
1.3 -> 1.5	162444	243666	1.4	21.58
1.5 -> 1.7	63106	94659	1.58	22.28
1.7 -> 9.0	44297	66445	1.86	20.39
Grand Total	912,794	1,369,191	1.03	31.56

Dari hasil pemodelan endapan didapatkan hasil estimasi Sumberdaya dengan total 1,369,191 Ton.

Hasil Estimasi Cadangan

Dari hasil perhitungan, kita mendapatkan model cadangan yang didasarkan pada data analisis kadar. Perhitungan ini mempertimbangkan berbagai parameter penting, seperti ketebalan bijih, kadar (*grade*), dan massa jenis (*density*). Model ini merupakan kelanjutan dari hasil studi sumberdaya, namun dengan penekanan pada kadar batas (*Cut Off Grade*) sebesar 1.3%. Artinya, kita hanya memperhitungkan material yang memiliki kadar di atas 1.3% sebagai bagian dari Cadangan.



Gambar 4. Sebaran Cadangan Nikel Laterit

Tabel 2. Penyebaran Cadangan

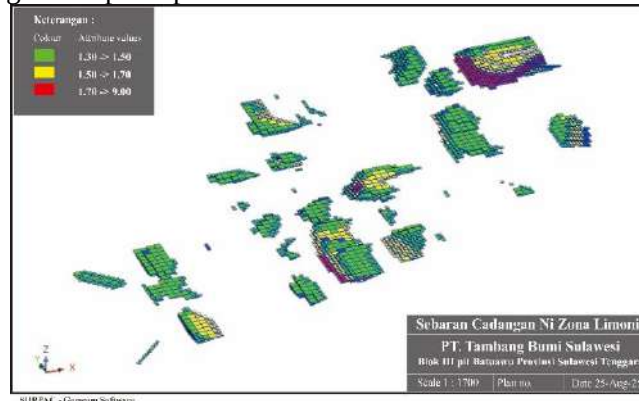
Kadar Ni	Volume	Tonnes	Ni	Fe
1.3 -> 1.4	82575	123863	1.35	21.98
1.4 -> 1.5	79869	119803	1.45	21.16
1.5 -> 1.6	39906	59859	1.55	22.74
1.6 -> 1.7	23200	34800	1.64	21.5
1.7 -> 1.8	18944	28416	1.76	21.49
1.8 -> 1.9	12297	18445	1.84	20.86
1.9 -> 2.0	5738	8606	1.94	19.5
2.0 -> 2.1	6044	9066	2.07	17.32
2.1 -> 2.2	1175	1763	2.17	18.11
2.2 -> 2.3	100	150	2.22	18.35

Kadar Ni	Volume	Tonnes	Ni	Fe
Grand Total	269,848	404,771	1.52	21.55

Dari hasil pemodelan endapan didapatkan hasil estimasi Cadangan dengan total 404,771 Ton

Hasil Cadangan Zona Limonit

Cadangan zona limonit memiliki kadar nikel rata-rata sekitar 1.54% dengan tonase 56.066 ton. Walau kadar Ni-nya tergolong sedang, kandungan Fe yang tinggi membuat zona ini lebih cocok untuk proses *blanding*. Karena penyebaran datanya masih jarang (Spasi 40x40 m), hasil estimasi ini sebaiknya dianggap sebagai perkiraan awal yang masih perlu pemadatan titik bor.



Gambar 5. Sebaran Cadangan Nikel Laterit Zona Limonit

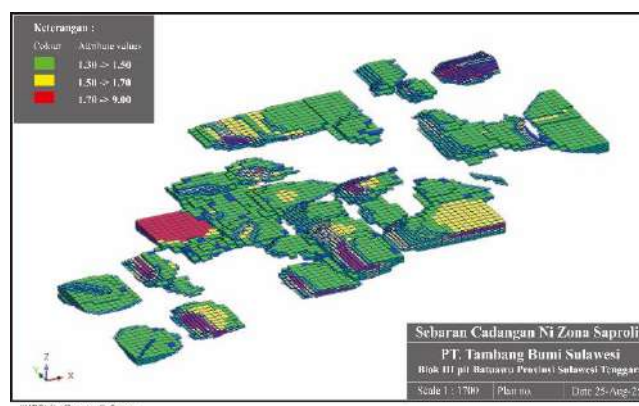
Tabel 3. Total Cadangan Zona Limonit

Kadar Ni	Volume	Tonnes	Ni	Fe
1.3 -> 1.4	11647	17470	1.35	29.74
1.4 -> 1.5	8172	12258	1.45	27.08
1.5 -> 1.6	6619	9928	1.56	26.1
1.6 -> 1.7	4088	6131	1.64	23.55
1.7 -> 1.8	2144	3216	1.75	20.82
1.8 -> 1.9	2278	3417	1.86	18.29
1.9 -> 2.0	366	548	1.94	19.56
2.0 -> 2.1	2066	3098	2.09	15.92
Grand Total	37,380	56,066	1.54	25.76

Dari hasil pemodelan endapan didapatkan hasil estimasi Cadangan zona limonit dengan total 56,066 Ton.

Hasil Cadangan Zona Saprolit

Zona saprolit memiliki potensi Cadangan lebih besar sekitar 348.703 ton dengan kadar Ni rata-rata 1,51%. Karakteristiknya yang lebih kompak dan mudah digali menjadikannya lebih potensial untuk smelter feronikel. Namun kadar Mg dan variasi mineral perlu dikontrol agar proses pengolahan tetap stabil dan efisien.



Gambar 6. Sebaran Cadangan Nikel Laterit Zona Saprolit

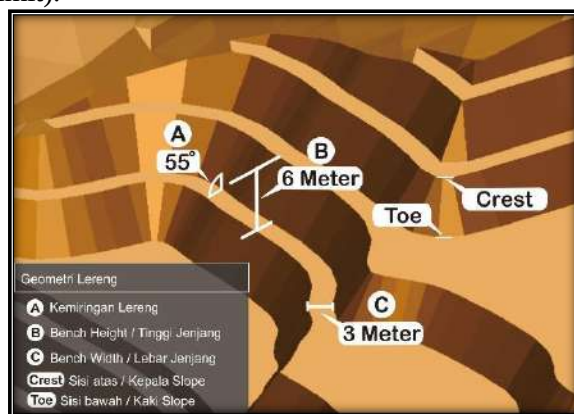
Tabel 4. Total Cadangan Zona Saprolit

Kadar Ni	Volume	Tonnes	Ni	Fe
1.3 -> 1.4	70928	106392	1.35	20.71
1.4 -> 1.5	71697	107545	1.45	20.49
1.5 -> 1.6	33288	49931	1.55	22.07
1.6 -> 1.7	19113	28669	1.64	21.06
1.7 -> 1.8	16800	25200	1.76	21.58
1.8 -> 1.9	10019	15028	1.84	21.44
1.9 -> 2.0	5372	8058	1.94	19.5
2.0 -> 2.1	3978	5967	2.06	18.04
2.1 -> 2.2	1175	1763	2.17	18.11
2.2 -> 2.3	100	150	2.22	18.35
Grand Total	232,470	348,703	1.51	20.87

Dari hasil pemodelan endapan didapatkan hasil estimasi Cadangan zona *Saprolite* dengan total 348,703 Ton.

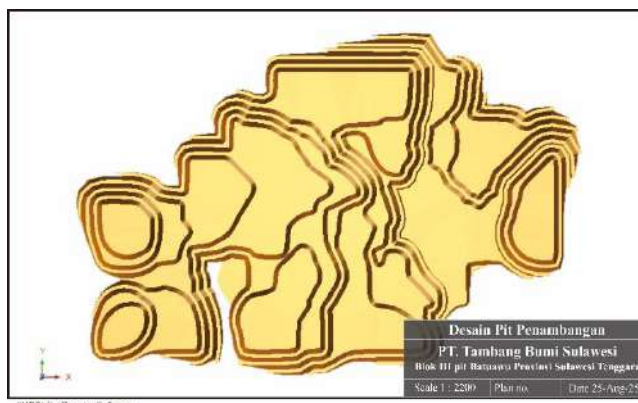
Desain Pit Penambangan

Dalam dunia pertambangan, desain pit berfokus pada pembuatan model yang mencakup geometri lereng dan batas penambangan (pit limit).



Gambar 7. Geometri Desain Penambangan

Untuk mendesain pit yang aman, parameter utama yang diperhatikan adalah geometri lereng itu sendiri. Berdasarkan rekomendasi stabilitas lereng dari perusahaan, desain pada blok penambangan menggunakan geometri lereng dengan tinggi 6 meter, lebar bench 3 meter, dan sudut kemiringan bench 55° .

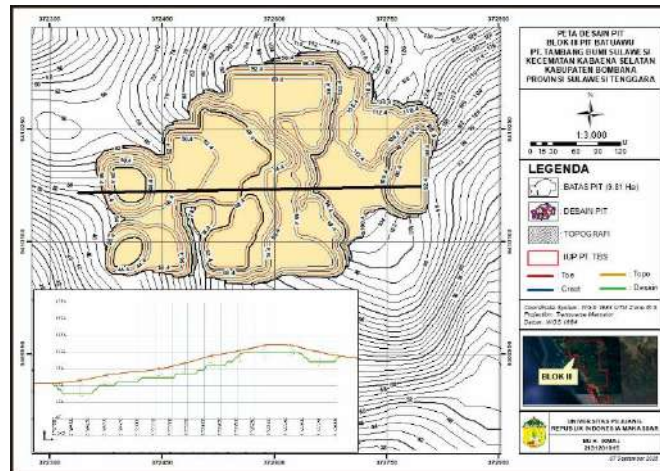


Gambar 8. Desain Pit Penambangan Blok III Batuawu

Desain pit yang telah dibuat akan digunakan dalam perhitungan untuk menentukan Cadangan yang akan ditambang dan *overburden* yang akan dikupas.

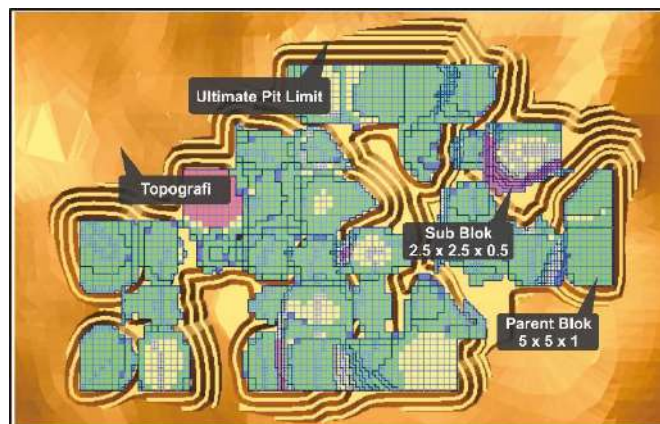
Rancangan Batas Akhir Penambangan (Ultimate Pit Limit) Blok III

Berdasarkan hasil perhitungan cadangan, desain pit dapat dibuat sesuai dengan model endapan bijih. Desain ini mencakup area seluas 9.81 Ha dengan rentang elevasi dari 38.4m hingga 124.4m. Rata-rata kedalaman dari lubang bor yaitu 18 meter serta menggunakan parameter yang direkomendasikan oleh perusahaan.



Gambar 9. Peta Desain Pit dan Batas Pit Blok III Batuawu

Penentuan batas akhir penambangan atau *ultimate Pit Limit* mempertimbangkan jumlah Cadangan bijih (dalam tonase dan kadar) yang dapat ditambang secara maksimal dari total endapan yang ada. Beberapa parameter utama yang dipertimbangkan dalam merancang batas akhir penambangan ini adalah *Cut Off Grade* (COG) atau nilai kadar batas ekonomis tambang sebesar 1.3% dengan rata-rata 1.5%, *striping ratio* (SR) yang diizinkan oleh perusahaan, yaitu 2:1 dan rekomendasi geoteknik untuk kemiringan jenjang akhir yakni 55° . Untuk memperkirakan volume *overburden* dan bijih nikel yang dirancang, digunakan metode perhitungan dengan bantuan *software gemcom surpac 6.3*, perhitungan ini menggunakan *blockmodel 3 dimensi* untuk menentukan volume berdasarkan batas-batas pit yang dibuat.



Gambar 10. Ukuran Blokmodel dan Batas Pit Blok III Batuawu

Striping Rasio

Dari hasil desain pit penambangan maka didapatkan Cadangan Ni dengan total 404,771 ton dengan total pembongkaran *overburden* 964,421 ton.

Tabel 5. Cadangan dan Overburden Blok III Batuawu

Report	Volume	Tonnes	Ni	Fe
Cadangan	269,848	404,771	1.52	21.55
Overburden	642,948	964,421	0.82	35.76
Grand Total	912,796	1,369,192	1.03	31.56

Striping Ratio (SR) adalah rasio perbandingan antara jumlah lapisan penutup (*overburden*) yang harus digali dengan jumlah bijih (*ore*) yang didapatkan dalam satu ton deposit, hingga mencapai batas akhir penambangan (*ultimate pit limit*). *Striping Ratio* dapat dijabarkan dengan rumus sebagai berikut:

$$SR = \frac{\text{Jumlah Overburden (bcm)}}{\text{Jumlah Ore (ton)}}$$

$$SR = \frac{642,948 \text{ bcm}}{404,771 \text{ ton}}$$

$$SR = \frac{1.6 \text{ bcm}}{1 \text{ ton}}$$

Jadi perbandingan antara volume overburden yang harus dibuang untuk memperoleh endapan bijih (Stripping Ratio) sebesar 1.6:1.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian diperoleh total sumberdaya sebesar 1.369.191 ton dengan kadar rata-rata 1,03% Ni dan 31,56% Fe. Setelah penerapan *cut off grade* (COG) sebesar 1,3%, diperoleh cadangan tertambang sebesar 404.771 ton dengan kadar rata-rata 1,52% Ni dan 21,55% Fe. Berdasarkan hasil tersebut, desain pit penambangan yang dirancang dengan mempertimbangkan parameter geoteknik menghasilkan luas area penambangan sebesar 9,81 Ha dengan tinggi jenjang 6 m, lebar jenjang 3 m, dan sudut lereng 55°. Perhitungan menunjukkan nilai *stripping ratio* sebesar 1,6 : 1, yang mengindikasikan bahwa setiap 1 ton bijih nikel yang ditambang memerlukan pengupasan *overburden* sebesar 1,6 ton, sehingga masih tergolong layak secara ekonomis untuk kegiatan penambangan terbuka.

DAFTAR REFERENSI

- Adrien Riméle, M., Dimitrakopoulos, R., & Gamache, M. (2018). A stochastic optimization method with in-pit waste and tailings disposal for open pit life-of-mine production planning. *Resources Policy*, 57, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.006>
- Aldiyansyah, & Husain, J. R. (2024). Analisis Perbandingan Kadar Nikel Hasil Pengeboran dengan Hasil Penambangan pada PT Ghanesa Wana Utama. *Journal of Mining Insight*, 2(1), 19–23. <https://doi.org/10.58227/jmi.v2i1.259>
- Arif, A., Lama, L., & Nurfasiha, N. (2022). Karakteristik Zona Laterit Berdasarkan Data Sumur Uji di Kecamatan Bungku Pesisir, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah. *Jurnal Teknologi Sumberdaya Mineral (JENERAL)*, 3(2), 40. <https://doi.org/10.19184/jeneral.v3i2.34473>
- Guo, J., Wang, X., Wang, J., Dai, X., Wu, L., Li, C., Li, F., Liu, S., & Jessell, M. W. (2021). Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm. *Engineering Geology*, 284, 106047. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106047>
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *Applied Geostatistics*.
- Liu, Z.-N., Lu, C.-L., Tian, R., Deng, Y.-Y., Liu, Z.-H., & Zhang, P.-W. (2024). Evaluation method of ore grade estimation effectiveness. *PLOS ONE*, 19(9), e0309696. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309696>
- Liu, Z.-N., Yu, X.-Y., Jia, L.-F., Wang, Y.-S., Song, Y.-C., & Meng, H.-D. (2021). The influence of distance weight on the inverse distance weighted method for ore-grade estimation. *Scientific Reports*, 11(1), 2689. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82227-y>
- Meng, Y., Yu, R., Cao, J., Cai, S., & Pan, G. (2021). Study on the impact of calculation radius on IDW gravity modelling. *E3S Web of Conferences*, 290, 02015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129002015>

- Mwangi, A. D., Jianhua, Zh., Gang, H., Kasomo, R. M., & Innocent, M. M. (2020). Ultimate Pit Limit Optimization Methods in Open Pit Mines: A Review. *Journal of Mining Science*, 56(4), 588–602. <https://doi.org/10.1134/S1062739120046885>
- Otto, J. (2020). Resources and reserves: thoughts on their evolution. *Mineral Economics*, 33(1–2), 253–255. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00187-2>
- Oubah, R., Ouadif, L., Zerradi, Y., Soufi, A., & Driouch, A. (2024). Strip mining in thick overburden context: A review. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*, 133(4), 291–304. <https://doi.org/10.1177/25726668241289045>
- Roonwal, G. S. (2018). *Survey in Exploration* (pp. 155–175). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5604-8_5
- Setiadi, A. (2020). *Mine Plan Design for Nickel*. 166–185.
- Shi, T., Jiao, L., & Song, Y. (2022). Drilling process optimization and borehole geospatial database design based on big data. *2022 International Conference on Applied Physics and Computing (ICAPC)*, 431–438. <https://doi.org/10.1109/ICAPC57304.2022.00090>
- Sinha, D. K., Sarkar, B. C., & Majumder, T. (2026). Mineral Inventory Database through Computer—An Integral Part of Total Mine Planning System. In *Computers in Mineral Industry* (pp. 127–148). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003761068-13>