

**OPTIMASI VALUASI EKONOMI ENDAPAN NIKEL LATERIT  
MEMPERHITUNGGAN BIAYA LINGKUNGAN****OPTIMIZATION OF THE ECONOMIC VALUATION OF LATERITIC NICKEL DEPOSITS  
CONSIDERING ENVIRONMENTAL COSTS****Wahyu Sasongko dan Rheva Dwiky Adhitya**Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
wahyu\_sas@ugm.ac.id**ABSTRAK**

Optimasi valuasi ekonomi mineral bertujuan untuk menentukan nilai sekarang bersih maksimum suatu proyek selama umur tambang. Model optimasi valuasi ekonomi dalam penelitian ini adalah pengembangan dari model Lane (1988) dan Sasongko (2013) dengan memperhitungkan biaya lingkungan serta mengacu rerangka aliran kas. Metode penelitian ini meliputi tahapan sebagai berikut: (1) pemodelan dan estimasi sumber daya, (2) pemodelan valuasi ekonomi mineral, (3) penentuan solusi model, dan (4) valuasi ekonomi mineral. Pemodelan sumberdaya dalam bentuk model blok ukuran 25 m x 25 m x 1 m. Estimasi kadar blok menggunakan metode interpolasi *inverse distance weighting* (IDW). Pemodelan optimasi valuasi ekonomi dalam penelitian ini adalah pemodelan dalam rerangka aliran kas dengan mempertimbangkan biaya lingkungan dan kebijakan pemerintah seperti pajak, royalti, dan depresiasi. Optimasi *cut-off grade* adalah suatu usaha untuk menentukan kadar optimum yang akan menghasilkan keuntungan atau nilai sekarang bersih (*net present value, NPV*) maksimum. Solusi model dalam hal ini meliputi optimasi *cut-off grade* untuk optimasi profit dan optimasi *NPV*. Solusi model untuk menentukan kadar batas optimum tergantung pada batasan kapasitas penambangan, konsentrasi, dan pemurnian. Penentuan solusi model optimasi kadar batas menggunakan metode analitik. Pada studi kasus, estimasi sumberdaya terukur sejumlah US\$4.253.566 ton bijih nikel. Pada laju penambangan konstan pada kadar batas optimum 0,95 %, maka umur tambang 4,85 tahun dengan *NPV* US\$811.248.447. Optimasi valuasi ekonomi dengan indikator *NPV*, umur tambang 4,44 tahun dan dihasilkan *NPV* maksimum sebesar US\$841,596.460. Nilai *cut-off grade* berbeda-beda di setiap tahun penambangan, yaitu tahun ke-1 kadar 0,99%; tahun ke-2 kadar 0,99%; tahun ke-3 kadar 0,98%; tahun ke-4 kadar 0,97%; tahun ke-5 kadar 0,95%. Optimasi valuasi ekonomi *NPV* memiliki nilai lebih besar dan waktu yang lebih pendek, dibandingkan dengan optimasi keuntungan (*profit*).

**Kata kunci:** Endapan nikel laterit, model valuasi ekonomi, kadar batas optimum, biaya lingkungan

**ABSTRACT**

*Optimization of mineral economic valuation aims to determine the maximum net present value of a project over the life of mine. The economic valuation optimization model in this study is the development of the Lane (1988) and Sasongko (2013) model by considering environmental costs and referring to the cash flow framework. The research methods are include the following: (1) resource modeling and estimation, (2) mineral economic valuation modeling, (3) solution model determination, and (4) mineral economic valuation. Resource modeling in the block model with a size of 25 m x 25 m x 1 m. The block content estimation uses the inverse distance weighting (IDW) interpolation method. Economic valuation optimization modeling in this research is modeling in terms of cash flow by considering environmental costs and government policies such as taxes, royalties, and depreciation. Optimizing cut-off grade is an attempt to determine the optimum grade that will produce the maximum profit or net present*

value (NPV). The solution model in this case includes cut-off grade optimization for profit optimization and NPV optimization. The model solution to determine the optimum cut-off grade depends on constraints of the mining, concentrating and refining. Determination of the cut-off grade optimization model solution using analytical methods. In the case study, the estimated amount is US\$4,253,566 tons of nickel ore. At a constant mining rate at an optimum level of 0.95%, the mine life is 4.85 years with an NPV of US\$811,248,447. Optimization of economic valuation with NPV indicator, the life of mine of 4.44 years and maximum NPV of US\$841,596,460. The cut-off grade value varies in each mining year: the 1<sup>st</sup> year with a grade of 0.99%; 2<sup>nd</sup> year level 0.99; 3<sup>rd</sup> year level 0.98%; 4<sup>th</sup> year level 0.97%; 5<sup>th</sup> year the rate is 0.95%. NPV economic valuation optimization has a greater value and shorter time, compared to profit optimization (profit).

**Keywords:** Lateritic nickel deposit, economic valuation model, optimum limit content, environmental costs

## PENDAHULUAN

Endapan nikel laterit merupakan produk residu dari pelapukan kimia batuan beku ultramafik, seperti dunit dan piroksenit, yang kemudian mengalami pengayaan unsur Ni. Logam nikel memiliki nilai ekonomi strategis dan dimanfaatkan terutama dalam industri elektronika, baterai, pesawat, kapal, peralatan militer, pelindung baja dan tembaga, peralatan rumah tangga, dan uang koin.

Sebelum tahap penambangan nikel laterit, dilakukan pemodelan sumberdaya berdasarkan data eksplorasi geologi dan diperlukan valuasi ekonomi mineral. Optimasi valuasi ekonomi mengacu pada hasil proses penentuan kadar batas optimum (*optimum cut-off grade*). Kadar batas optimum kemudian dipergunakan sebagai penentuan sebaran cadangan dan valuasi ekonomi cadangan nikel mengacu standar penyusunan aliran kas.

Kadar batas optimum didefinisikan sebagai suatu parameter yang digunakan untuk memisahkan antara kriteria material yang termasuk ke dalam bijih (*ore*) dan material yang termasuk ke dalam limbah/buangan (*waste*) (Lane, 1964, 1988; Sasongko, 2013; Cetin, 2013) yang ditulis dalam satuan persen untuk bijih nikel. Tujuan penentuan kadar batas optimum adalah untuk mendapatkan keuntungan maksimal dari proyek pertambangan. Sasongko *et al.* (2013) menyatakan bahwa kadar batas optimum bersifat dinamis, terutama

bergantung pada harga jual logam, biaya-biaya tambang, dan kebijakan. Biaya-biaya tambang dipengaruhi proses sepanjang struktur rantai tambang yang tergantung pada karakteristik model dan ketersediaan sumberdaya mineral serta sistem penambangan. Biaya eksternal yang mempengaruhi valuasi ekonomi mineral adalah kebijakan dan ketentuan pemerintah tentang kewajiban finansial perusahaan kepada negara (perpajakan, royalti dan depresiasi), tingkat suku bunga dan inflasi.

Analisis penentuan kadar batas optimum mineral mengacu pada persamaan Lane (1988) yang didasarkan pada aliran kas dasar (*base cash flow*) dan biaya operasional utama saja. Gholamnejad (2008) menyatakan bahwa aspek lingkungan merupakan salah satu aspek krusial yang harus dipertimbangkan dalam optimasi valuasi ekonomi mineral.

Pada penelitian ini akan mengembangkan model penentuan kadar batas optimum (Lane, 1988), Setiawan & Sasongko (2015) dan pertimbangan faktor biaya lingkungan (Gholamnejad, 2008; Osanloo *et al.*, 2008; Rahimi *et al.*, 2014; Rahimi & Ghasemzadeh, 2015), dan kebijakan-ketentuan pemerintah, sebagai dasar dalam usaha optimasi valuasi ekonomi mineral bijih nikel. Indikator optimasi adalah nilai sekarang bersih (*net present value; NPV*) dari aliran kas terproyeksi (*projected cash flow*) (Kržanović *et al.*, 2015). Biaya lingkungan yang dimaksud

pada penelitian ini adalah biaya pengupasan dan penanganan tanah/material penutup (*waste*), pembuangan dan penanganan *tailing* dan reklamasi tambang.

Pemodelan sumberdaya menggunakan data pengeboran dari penelitian terdahulu, Asy'ari (2011) yang berlokasi di Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah. Penentuan parameter dalam pemodelan mengacu pada penelitian terdahulu dan asumsi-asumsi. Pada penelitian ini lebih ditekankan pada metodologi dan pemodelan.

**GEOLOGI DAERAH PENELITIAN**

Lokasi untuk studi kasus penelitian berada di Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah, yaitu pada Blok A PT X dengan luas daerah penelitian sekitar 247,63 hektar. Lokasi termasuk ke dalam Peta Geologi Lembar Bungku 2213-14. Morfologi daerah penelitian terdiri dari perbukitan bergelombang dengan ketinggian berkisar antara 100 meter hingga 400 meter di atas permukaan laut.

Daerah penelitian termasuk ke dalam Mandala Sulawesi Timur Formasi Tomata yang tersusun atas batuan sedimen dan kompleks ultramafik (Simanjuntak, 1994). Asy'ari (2011) menyatakan daerah penelitian didominasi oleh harzburgit yang merupakan bagian dari kompleks batuan ultramafik yang tersingkap setempat-setempat sebagian besar tertutup tipis oleh batuan sedimen karbonat.

**METODE**

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu pemodelan dan estimasi sumberdaya endapan bijih nikel laterit, pengembangan model optimasi valuasi ekonomi, penentuan solusi model, dan valuasi ekonomi.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**HASIL**

**Pemodelan dan Estimasi Sumberdaya**

Pemodelan sumberdaya endapan bijih nikel menggunakan data topografi, data *assay*, data *collar*, data survei, dan data geologi. Data pengeboran tersebut digunakan sebagai basis data pembuatan model blok dan penaksiran kadar. Penaksiran kadar dilakukan dengan interpolasi menggunakan metode estimasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) pangkat 2. Rumus dari perhitungan IDW adalah,

Taksiran ( $Z^*$ ) adalah  $Z^* = \sum_{i=1}^j W_j Z_i$

Faktor pembobot,

$$W_{j_n} = \frac{\frac{1}{d_j^n}}{\sum_{i=1}^j \frac{1}{d_i^n}}$$

Keterangan:

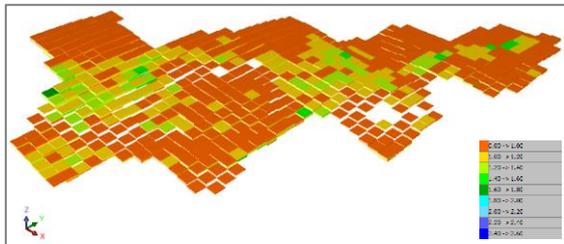
- $d$  : jarak titik yang ditaksir
- $Z_i$  : titik data yang diketahui
- $W_j$  : faktor pembobotan

Pembuatan model blok berukuran dimensi disesuaikan dengan jarak atau spasi antara titik lubang bor, yaitu 25 m x 25 m x 1 m. Dimensi model blok akan memengaruhi perhitungan dan estimasi sumberdaya. Semakin kecil dimensi model blok, semakin meningkat pula keakuratan estimasi sumberdaya.

Setelah model blok dibuat, atribut ditambahkan pada model blok sebagai *handle* untuk menyimpan informasi di setiap bloknya. Atribut yang ditambahkan disesuaikan pada kebutuhan penelitian, seperti kadar nikel, litologi, berat jenis, dan lain-lain. Sedangkan untuk mendapatkan blok-blok yang termasuk ke dalam lokasi penelitian, perlu dibatasi suatu pembatas yang disebut '*constraint*'.

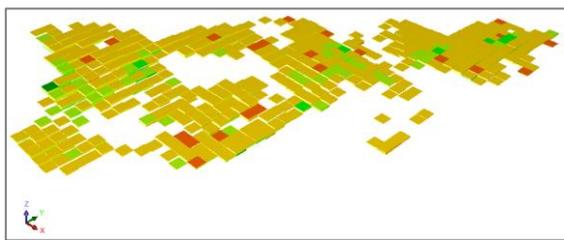
Beberapa kategori zona lapisan dalam penelitian ini, yaitu RL atau *red limonite* (limonit merah), YL atau *yellow limonite* (limonit kuning), SP atau saprolit, dan BZ atau *bed zone* (batuan dasar). Yang dijadikan *input* pada jendela *constraint* adalah topografi, batas bawah zona limonit merah, batas bawah zona limonit kuning, dan batas atas zona batuan dasar.

Model blok yang dibuat dengan menggunakan batasan (*constraints*) yang menyisakan lapisan limonit kuning dan saprolit, terlihat kadar rendah ditandai dengan blok berwarna coklat pada lapisan-lapisan atas/limonit kuning (Gambar 1).



**Gambar 1.** Sebaran kadar Ni pada lapisan limonit kuning dan saprolit

Dengan mengeliminasi blok yang atribut Ni-nya <1,0% pada lapisan limonit dan saprolit, sisa model blok secara umum didominasi oleh kadar 1,0% s.d. 1,2% (Gambar 2).

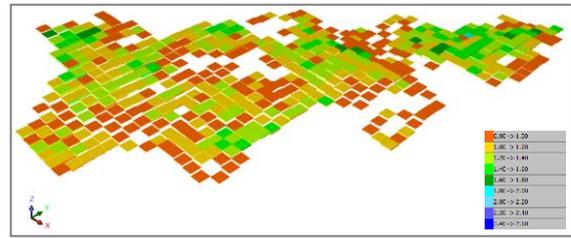


**Gambar 2.** Sebaran kadar Ni >1% pada lapisan saprolit dan limonit kuning

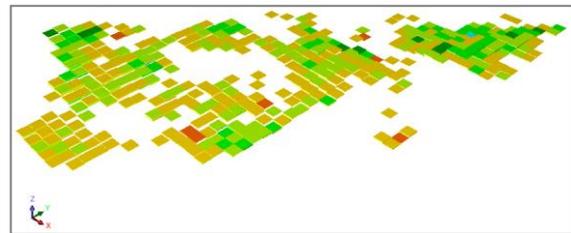
Sebaran kadar nikel pada saprolit terlihat cukup beragam, dengan kadar berkisar 1,4% dengan blok berwarna jingga, kuning, dan hijau muda (Gambar 3).

Dengan mengeliminasi blok yang atribut Ni-nya <1,0% menggunakan batasan, pada lapisan saprolit, model blok secara umum

didominasi oleh kadar 1,0% s.d. 1,4% (Gambar 4).



**Gambar 3.** Sebaran kadar Ni pada lapisan saprolit



**Gambar 4.** Sebaran kadar Ni >1% pada lapisan saprolit

Hasil dari estimasi pada blok model kemudian diekspor dalam bentuk data tabel. Data tersebut disusun berdasarkan rentang kadar yang terdapat pada atribut masing-masing blok (Tabel 1).

**Tabel 1.** Hasil estimasi sumberdaya terukur dalam rentang kadar

Rentang kadar	Volume	Sumberdaya Terukur	Rata-rata kadar Ni
%	m <sup>3</sup>	ton	%
0,0 - 0,1	13.750	21.313	0,00
0,2 - 0,3	1.875	2.875	0,26
0,3 - 0,4	9.375	14.250	0,36
0,4 - 0,5	19.375	29.625	0,45
0,5 - 0,6	71.250	108.000	0,55
0,6 - 0,7	176.875	266.875	0,65
0,7 - 0,8	298.750	451.188	0,75
0,8 - 0,9	385.625	584.625	0,85
0,9 - 1,0	460.625	702.125	0,95
1,0 - 1,1	426.250	651.875	1,04
1,1 - 1,2	373.750	576.063	1,14
1,2 - 1,3	257.500	399.813	1,24
1,3 - 1,4	143.125	223.000	1,34
1,4 - 1,5	71.875	112.750	1,44
1,5 - 1,6	40.625	64.438	1,54
1,6 - 1,7	18.125	28.813	1,64
1,7 - 1,8	6.875	10.938	1,74
1,8 - 1,9	1.875	3.000	1,84
1,9 - 5,0	1.250	2.000	2,23
<b>Total</b>	<b>2.778.750</b>	<b>4.253.566</b>	<b>0,99</b>

Sumberdaya terukur bijih nikel dalam satuan ton berdasarkan kadar batas (Tabel 2).

**Tabel 2.** Hasil estimasi sumberdaya terukur berdasarkan kadar batas, tonase, dan rata-rata kadar

COG	Volume	Sumberdaya Terukur	Rata-rata Kadar Ni
%	m <sup>3</sup>	ton	%
0,0	2.778.750	4.253.566	0,99
0,1	2.765.000	4.232.253	1,00
0,3	2.763.125	4.229.378	1,00
0,4	2.753.750	4.215.128	1,00
0,5	2.734.375	4.185.503	1,00
0,6	2.663.125	4.077.503	1,02
0,7	2.486.250	3.810.628	1,04
0,8	2.187.500	3.359.440	1,08
0,9	1.801.875	2.774.815	1,13
1,0	1.341.250	2.072.690	1,19
1,1	915.000	1.420.815	1,26
1,2	541.250	844.752	1,34
1,3	283.750	444.939	1,43
1,4	140.625	221.939	1,52
1,5	68.750	109.189	1,61
1,6	28.125	44.751	1,70
1,7	10.000	15.938	1,82
1,8	3.125	5.000	2,00
1,9	1.250	2.000	2,23

**Pengembangan Model Valuasi Ekonomi**

Pengembangan model optimasi valuasi ekonomi mengacu pada model Lane (1988), model Gholamnejad (2008) dan memperhitungkan biaya lingkungan serta kebijakan pemerintah (legislasi dan regulasi). Dalam pengembangan model valuasi ekonomi mineral bijih nikel melibatkan struktur rantai proses tambang yang teraktualisasikan dalam rerangka aliran kas.

Penyederhanaan dari penjabaran persamaan aliran kas (Crundwell, 2008; Sasongko, 2013) di atas adalah,

- Pendapatan  $R$
- Royalti (x)  $S = xR$
- = Pendapatan bersih  $NR = R - S = (1-x)R - R$
- Biaya operasi total  $TC$
- = Keuntungan  $P = NR - TC$
- Penyusutan & amortisasi  $D$
- = Laba sebelum pajak  $TI = P - D$
- Pajak  $IT = t(P - D)$
- = Laba setelah pajak  $NI = TI - IT = (1-t)(P - D)$
- + Penyusutan & amortisasi  $D$
- = Aliran kas terproyeksi  $CF = (1-t)(P - D) + D = (1-t)P + tD$

Berdasarkan diagram aliran kas di atas hasil akhir,

$$CF = (1 - t)P + tD \quad (\text{Pers. 1})$$

Notasi-notasi yang digunakan dalam pemodelan dijabarkan dalam Tabel 3 berikut.

**Tabel 3.** Notasi pemodelan

Notasi	Satuan	Definisi
s	\$/ton	Harga jual unit
m	\$/ton	Biaya penambangan
c	\$/ton	Biaya pengonsentrasian
r	\$/ton	Biaya pemurnian
f	\$/tahun	Biaya tetap ( <i>fixed costs</i> )
Q <sub>m</sub>	ton/tahun	Material yang ditambang
Q <sub>c</sub>	ton/tahun	Material yang dikonsentrasikan
Q <sub>r</sub>	ton/tahun	Material yang dimurnikan
M	ton/tahun	Kapasitas penambangan
C	ton/tahun	Kapasitas pengonsentrasian
R	ton/tahun	Kapasitas pemurnian
T	tahun	Umur tambang; waktu dalam notasi n = 0, 1, ..., T
x	%	Royalti
t	%	Pajak ( <i>tax</i> )
y	%	Faktor perolehan
d	%	Tingkat suku bunga diskonto
D	\$/tahun	Depresiasi dan amortisasi

Rantai tambang secara umum terbagi atas tiga tahap (*stage*), yaitu tahap penambangan (*mining stage*), tahap pengonsentrasian (*processing/concentrating/ milling stage*), dan tahap pemurnian (*refinery stage*). Menurut Lane (1964, 1988), persamaan profit dirumuskan dalam bentuk:

$$P = (s - r)Q_r - mQ_m - cQ_c - fT \quad (\text{Pers. 2})$$

Berdasarkan uraian Pers. 1 dan Pers. 2, aliran kas (*cash flow, CF*) dapat dirumuskan menjadi (Pers. 2):

$$CF = (1 - t)((s - r)Q_r - mQ_m - cQ_c - fT) + tD \quad (\text{Pers. 3})$$

Jumlah dari material yang masuk ke tahap pemurnian tergantung oleh jumlah material dari tahap pengonsentrasian, dan jumlah dari material yang masuk ke tahap pengonsentrasian tergantung oleh jumlah material dari tahap penambangan, sehingga  $Q_r = \bar{g}yQ_c$ . Dengan memperhitungkan biaya lingkungan, pajak dan royalti, dan depresiasi, maka Pers. 3 dituliskan menjadi,

$$CF = (1 - t)((1 - x)(s - r)\bar{g}yQ_c - mQ_m - w(Q_m - Q_c) - cQ_c - fT) + tD \quad (\text{Pers. 4})$$

Dengan memperhitungkan *discount rate* (*d*) pada aliran kas tahunan, aliran kas terdiskonto atau *discounted cash flow* (DCF) (Pers. 5 dan Pers. 6), maka dapat dituliskan persamaan:

$$DCF = CF \left( \frac{1}{(1 + d)^n} \right) \quad \text{Pers. 5}$$

$$DCF = \left( (1 - t) \left( ((1 - x)(s - r))\bar{g}yQ_c - mQ_m - w(Q_m - Q_c) - cQ_c - fT \right) + tD \right) \left( \frac{1}{(1 + d)^n} \right) \quad \text{Pers. 6}$$

Nilai sekarang bersih (*net present value, NPV*) merupakan metode valuasi ekonomi yang memerhatikan nilai waktu terhadap uang yang ditulis dengan persamaan:

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{CF}{(1 + d)^n} \quad \text{Pers. 7}$$

Keterangan:

*NPV* = nilai sekarang bersih (*net present value*)

*CF* = aliran kas (*cash flow*)

*d* = tingkat suku bunga/ diskonto (*discount rate*)

*n* = indeks tahun ( $n = 0, \dots, N$ )

Metode perhitungan *NPV* menggunakan suku bunga diskonto yang akan mempengaruhi aliran kas (*cash inflow*) (Frederick, 1984). *NPV* menganggap aliran kas di masa yang akan datang dapat diprediksi, meski hal tersebut sebenarnya cukup sulit dilakukan. Optimasi *NPV* yang melibatkan aliran kas terdiskonto, Lane (1988) mendefinisikan *value* (*v*) sebagai fungsi dari dua faktor, yaitu cadangan dan laju ekstraksi (Minnit, 2004). Kedua faktor tersebut juga memengaruhi umur tambang (*T*).

### Kadar Batas Optimum

Metode solusi optimum valuasi ekonomi yang digunakan pada penelitian ini didasarkan pada model dan metode Lane (1988) yang diaplikasikan pada model optimasi valuasi ekonomi (Pers. 6) yang ditujukan untuk mendapatkan *NPV* maksimal.

Pada model optimasi valuasi ekonomi (Pers. 6) merupakan fungsi yang memiliki variabel tunggal, yaitu kadar batas rata-rata ( $\bar{g}$ ). Nilai kadar rata-rata yang akan menghasilkan NPV optimum selama umur tambang, secara matematis dapat dicari dengan syarat turunan pertama dari model fungsi NPV terhadap kadar sama dengan nol dan turunan kedua bernilai lebih kecil dari nol.

Solusi model sebagai usaha optimasi dengan hasil sebagai berikut:

- o Jika kapasitas penambangan menjadi batasan optimasi, maka  $T = \frac{Q_m}{M}$ , sehingga

$$g_m = \bar{g} = \frac{c - w}{(1 - x)(s - r)y} \quad (\text{Pers. 8})$$

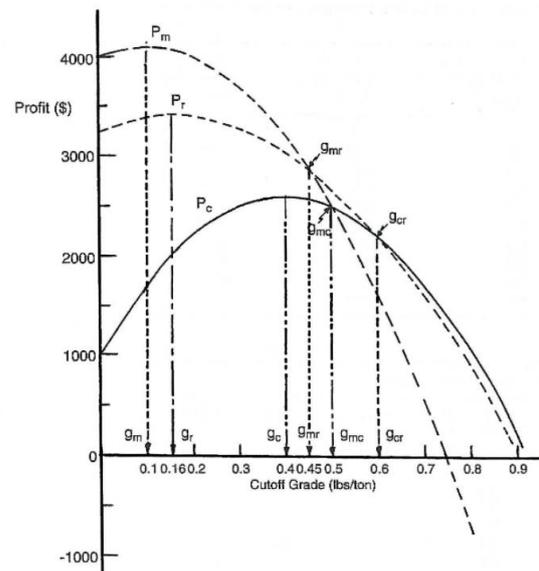
- o Jika kapasitas pengonsentrasian menjadi batasan, maka  $T = \frac{Q_c}{C}$ , sehingga

$$g_c = \bar{g} = \frac{c - w + \frac{f + \frac{tD}{1-t}}{C}}{(1 - x)(s - r)y} \quad (\text{Pers. 9})$$

- o Jika kapasitas pemurnian menjadi batasan optimasi, maka  $T = \frac{Q_r}{R} = \frac{\bar{g}yQ_c}{R}$ , sehingga

$$g_r = \bar{g} = \frac{c - w}{\left( (1 - x)(s - r) - \frac{f + \frac{tD}{1-t}}{R} \right) y} \quad (\text{Pers. 10})$$

Menurut Lane (1964, 1988), kadar batas optimum adalah satu dari 6 kandidat kadar batas, yaitu 3 kadar ekonomis ( $g_m$ ,  $g_c$ , dan  $g_r$ ) dan 3 kadar penyeimbang ( $g_{mc}$ ,  $g_{mr}$ , dan  $g_{cr}$ ). Kandidat-kandidat tersebut dapat dibuat dalam grafik (Gambar 5) untuk mencari perpotongan nilai kadar yang merupakan nilai optimumnya.



Gambar 5. Contoh kurva profit sebagai fungsi kadar batas (Hustrulid et al., 2013)

Kadar batas paling optimum dapat dicari setelah keenam kadar batas diketahui, yaitu  $g_m$ ,  $g_c$ ,  $g_r$ ,  $g_{mc}$ ,  $g_{cr}$ , dan  $g_{mr}$  dan akan hanya menyisakan tiga kandidat sebagai kadar batas optimum. Ada tiga syarat untuk menjadi kadar batas optimum pada kadar yang berpasangan ( $g_{mc}$ ,  $g_{cr}$ , dan  $g_{mr}$ ), yaitu:

$$G_{mc} \begin{cases} g_m & \text{if } g_{mc} \leq g_m \\ g_c & \text{if } g_{mc} \geq g_c \\ g_{mc} & \text{selain di atas} \end{cases}$$

$$G_{cr} \begin{cases} g_c & \text{if } g_{cr} \leq g_c \\ g_r & \text{if } g_{cr} \geq g_r \\ g_{cr} & \text{selain di atas} \end{cases}$$

$$G_{mr} \begin{cases} g_m & \text{if } g_{mr} \leq g_m \\ g_r & \text{if } g_{mr} \geq g_r \\ g_{mr} & \text{selain di atas} \end{cases}$$

Nilai kadar batas optimum  $G$  adalah nilai tengah dari ketiga kadar di atas.

$$G = \text{nilai tengah } (G_{mc}, G_{mr}, G_{rc}) \quad (\text{Pers. 11})$$

### Solusi Model Optimasi Valuasi Ekonomi

Karena PV memperhitungkan tingkat suku bunga diskonto (*discount rate*) yang memengaruhi nilainya terhadap waktu, maka ada perbedaan nilai ( $v$ ) pada saat

$t = 0$ , dan  $t = T$  (Hustrulid dan Kuchta, 1995 dalam Osanloo *et al.*, 2003), maka untuk optimasi NPV atau optimasi valuasi ekonomi dituliskan menjadi (Lane, 1988):

$$v = P - VTd \tag{Pers. 12}$$

Dengan cara yang sama seperti sebelumnya, ditentukan  $g_m$ ,  $g_c$ , dan, namun masih memiliki variabel  $Vd$  yang nilai  $V$  tersebut belum diketahui. Nilai  $V$  tersebut tergantung oleh kadarnya, sementara kadarnya tergantung oleh *net present value*. Untuk mendapatkan nilai optimum diperlukan proses iterasi.

Solusi model optimasi kadar batas pada untuk memaksimalkan NPV di dapat:

- o Jika kapasitas penambangan menjadi batasan, maka  $T = \frac{Q_m}{M}$ , sehingga

$$g_m = \bar{g} = \frac{c - w}{(1 - x)(s - r)y} \tag{Pers. 13}$$

- o Jika kapasitas pengonsentrasian menjadi batasan, maka  $T = \frac{Q_c}{C}$ , sehingga

$$g_c = \bar{g} = \frac{c - w + \frac{f - \frac{tD - Vd}{1 - t}}{C} - h}{(1 - x)(s - r)y} \tag{Pers. 14}$$

- o Jika kapasitas pemurnian yang menjadi batasan, maka  $T = \frac{Q_r}{R} = \frac{\bar{g}yQ_c}{R}$  sehingga

$$g_r = \bar{g} = \frac{c - w}{\left( (1 - x)(s - r) - \frac{f - \frac{tD - Vd}{1 - t}}{R} \right) y} \tag{Pers. 15}$$

PEMBAHASAN

Optimasi Profit

Perhitungan kadar batas optimum untuk optimasi profit ditentukan menggunakan solusi model Pers. 8 s.d. Pers. 10, serta asumsi parameter ekonomi seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter ekonomi dan nilainya

Notasi	Keterangan	Biaya
$s$	Harga jual	12.665 \$/ton
$m$	Biaya penambangan	2,60 \$/ton
$c$	Biaya pengonsentrasian	1,15 \$/lbs
$r$	Biaya pemurnian	1,41 \$/lbs
$w$	Biaya penanganan buangan (waste) dan limbah	2,00 \$/ton
$f$	Biaya tetap	2,61 \$/ton
$M$	Batasan penambangan	1.000.000 ton/thn
$C$	Batasan pengonsentrasian	500.000 ton/thn
$R$	Batasan pemurnian	250.000 ton/thn
$T$	Umur tambang	
$g$	Kadar	
$Sr$	Stripping ratio	
$x$	Royalti	4%
$p$	Pajak	30%
$y$	Recovery rate	30%
$d$	Discount rate	5,75%
$D$	Depresiasi	612.759 \$/tahun

Perhitungan kadar batas untuk profit optimum dengan menggunakan solusi model Pers. 8, Pers 9 dan Pers. 10), sebagai berikut:

$$g_m = \frac{c - w}{((1 - x)(s - r))y} = 0,948\%$$

$$g_c = \frac{c - w + \frac{f - \frac{tD}{1 - t}}{C}}{((1 - x)(s - r))y} = 0,95\%$$

$$g_r = \frac{c - w}{\left( (1 - x)(s - r) - \frac{f - \frac{tD}{1 - t}}{R} \right) y} = 0,949\%$$

Perhitungan profit optimum dilakukan untuk setiap kadar batas dengan distribusi jumlah sumberdaya terukur dan kadar nikel (Tabel 2), seperti pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Perhitungan profit pada masing-masing batasan kapasitas

g (%)	Profit		
	Pm (\$)	Pc (\$)	Pr (\$)
0,0	339.706.683	331.156.171	338.073.863
0,1	378.108.446	369.643.621	376.475.626
0,2	378.108.446	369.643.621	376.475.626
0,3	381.867.464	373.414.197	380.236.447
0,4	397.789.886	389.393.910	396.171.244
0,5	425.822.652	417.545.780	424.236.168
0,6	507.484.940	499.642.272	506.041.743
0,7	658.539.099	651.769.374	657.514.350
0,8	828.135.931	823.180.160	827.927.461
0,9	936.740.606	934.135.260	937.730.853
0,948	953.741.699	952.491.307	955.480.837
0,949	953.735.894	952.513.730	955.491.091
0,95	953.709.275	952.515.340	955.480.557
1,0	933.684.045	933.901.521	936.283.300
1,1	819.304.389	822.142.661	823.539.021
1,2	608.704.996	613.859.270	614.523.773
1,3	386.526.769	393.288.449	393.541.457
1,4	220.207.402	227.865.630	227.942.915
1,5	114.679.247	122.790.775	122.806.411
1,6	42.117.576	50.488.171	50.484.118
1,7	4.194.166	12.680.601	12.674.694
1,8	(12.281.878)	(3.751.469)	(3.755.441)
1,9	(17.371.180)	(8.828.709)	(8.831.427)

- $g_m = 0,948\%$ , profit optimum US\$953.741.699 (batasan laju penambangan),
- $g_c = 0,95\%$ , profit optimum US\$952.515.340 (batasan laju pengonsentrasian)
- $g_r = 0,949\%$ , profit optimum US\$955.491.091 (batasan laju pemurnian).

Untuk menentukan kadar batas optimum dibuat grafik kurva total profit terhadap fungsi kadar batas. Perpotongan pada kurva menjadi kadar batas penyeimbang yang dipengaruhi lebih dari satu batasan (Gambar 6).

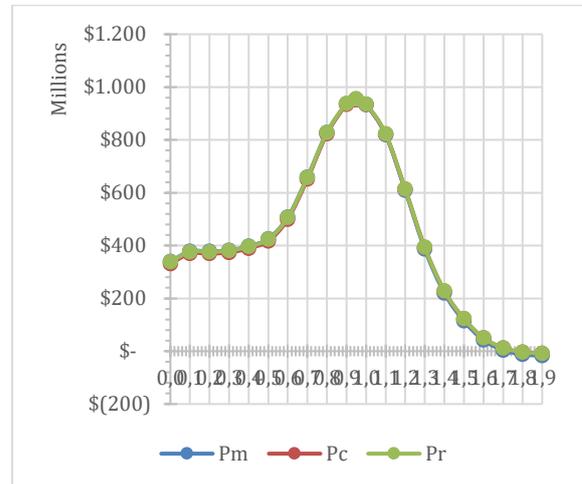
Merujuk pada kurva (Gambar 6), kadar batas yang menjadi penyeimbang nilainya berkisar 0,817% yang ditulis dalam bentuk

variabel  $g_{cr}$ . Tiga kadar batas penyeimbang adalah sebagai berikut:

$$g_{mc} = 0,992\% \sim 0,99\%$$

$$g_{cr} = 1,2\%$$

$$g_{mr} = 0,817\% \sim 0,82\%$$



**Gambar 6.** Kurva total profit berdasarkan fungsi kadar batas dipengaruhi beberapa batasan

Tiga kadar batas dengan batasan kapasitas tunggal dan tiga kadar batas penyeimbang adalah kandidat kadar batas optimum

$$g_m = 0,948\%$$

$$g_c = 0,95\%$$

$$g_r = 0,949\%$$

$$g_{mc} = 0,99\%$$

$$g_{cr} = 1,2\%$$

$$g_{mr} = 0,82\%$$

Mengikuti syarat kadar batas optimum dari keenam kandidat kadar batas yang sudah didapatkan, maka nilai kadar batas optimum G adalah nilai tengah dari ketiga kadar di atas (Pers 11).

$$G = \text{nilai tengah } (G_{mc}, G_{mr}, G_{rc}) = 0,95\%$$

Kadar G 0,95% memiliki nilai kadar rata-rata 1,16%. Laju penambangan 100% menghasilkan,

$$Q_m = 4.253.566$$

$$Q_c = 2.423.753$$

$$Q_r = 843.104$$

Batasan kapasitas mengatur laju dari tahap produksi sehingga lama operasi penambangan pada kapasitas maksimum untuk kadar batas 0,95% adalah 4,85 tahun, dengan profit adalah  $P = \$952.515.340$  dengan profit tahunan yaitu  $P_y = \$196.495.999$

NPV profit tahunan dengan laju diskonto 5,75% menghasilkan

$$NPV = \$196.495.999 \cdot \frac{(1 + 5,75\%)^{4,85} - 1}{5,75\% \cdot (1 + 5,75\%)^{4,85}}$$

**NPV = \$811.248.447**

## Optimasi Valuasi Ekonomi (Optimasi NPV)

Perhitungan kadar batas optimum untuk optimasi NPV ditentukan menggunakan solusi model Pers. 13 s.d. Pers. 15, serta asumsi paramter ekonomi seperti pada Tabel 4.

Perhitungan kadar batas optimum sebelumnya menghasilkan nilai kadar batas 0,95%. Adanya beberapa batasan kapasitas memengaruhi NPV yang paling optimal. NPV tersebut dipengaruhi oleh kadar batas optimum yang berubah-ubah sepanjang umur tambang sehingga menghasilkan profit tahunan yang juga berbeda-beda. Metode perhitungan untuk optimasi NPV dijabarkan dalam tahap:

Tahap 1: Kadar batas dihitung dengan mempertimbangkan adanya batasan kapasitas.

$$g_m = 0,948\%$$

$$g_c = \frac{2579,74 - 0,00000016V}{2.716} \quad (\text{Pers. 16})$$

$$g_r = \frac{2574}{2712,57 - 0,0000001V} \quad (\text{Pers. 17})$$

Kadar batas optimum adalah satu di antara enam kandidat kadar batas. Tiga di antara kandidat tersebut adalah kadar batas penyeimbang yang didasarkan pada

sebaran kadar material yang ditambang dan kapasitas (Tabel 2). Sedangkan untuk tiga kadar batas lainnya yang didasarkan pada kapasitas dan biaya/harga, pada tahap ini dihitung dengan menggunakan ketiga persamaan di atas. Dari ketiga kadar batas dengan batasan tunggal di atas,  $g_c$  dan  $g_r$  memiliki variabel  $V$  yang nilainya belum diketahui, sementara untuk mencari nilai  $V$ ,  $g$  perlu diketahui. Perhitungan ini menggunakan proses iterasi.

Tahap 2: Perhitungan iterasi dilakukan pada operasi penambangan maksimal, yaitu  $Q_m = 1.000.000$  ton hingga total material 4.253.566 ton yang akan ditambang habis pada tahun ke- $n$ . Proses iterasi pada penambangan 1.000.000 ton pertama adalah,

1. Iterasi ke-1,  $V = 0$

$$g_{mc} = 0,992\%$$

$$g_{cr} = 1,2\%$$

$$g_{mr} = 0,817\%$$

$$g_m = 0,948\%$$

$$g_c = \frac{2579,74 - 0,00000016V}{\frac{2.716}{2574}} = 0,95\%$$

$$g_r = \frac{2574}{2712,57 - 0,0000001V} = 0,949\%$$

Mengikuti syarat kadar batas optimum dari keenam kandidat kadar batas, didapat kadar batas optimum pada iterasi pertama  $V = 0$  adalah 0,95%. Kadar 0,95% memiliki nilai  $Q_c$  sebesar 569.817 ton pada penambangan  $Q_m$  maksimum 1.000.000 ton. Dengan batasan kapasitas  $M = 1.000.000$  ton dan  $C = 500.000$ , maka nilai  $Q_c$  ini melebihi batasan kapasitasnya dan menjadi pengontrol lamanya operasi penambangan. Profitnya dalam 1 tahun adalah 196.495.999 dengan NPV US\$811.248.447. Nilai  $V$  ini digunakan untuk iterasi kedua.

2. Iterasi ke-2,  $V = \$811.248.447$

$$g_c = \frac{2579,74 - 0,00000016V}{\frac{2.716}{2574}} = 1,0\%$$

$$g_r = \frac{2574}{2712,57 - 0,0000001V} = 0,98\%$$

Mengikuti syarat kadar batas optimum dari keenam kandidat kadar batas, didapat kadar batas optimum pada iterasi kedua 0,992% . Jumlah material  $Q_m$  dan  $Q_c$  dengan mempertimbangkan kapasitasnya masing-masing adalah adalah 1.000.000 ton dan 500.000 ton. Keduanya tidak melebihi kapasitas maksimum sehingga tidak diperlukan penyesuaian. Kapasitas penambangan  $Q_m$  menjadi pengontrol laju penambangan, sehingga profitnya adalah  $US\$223.190.918$  dengan NPV  $US\$821.517.493$ .

Nilai  $V$  ini kemudian digunakan untuk iterasi ketiga. Iterasi ketiga menghasilkan nilai kadar batas yang sama yaitu 0,99% sehingga iterasi dihentikan. Kadar batas optimum pada penambangan 1.000.000 ton di tahun pertama adalah 0,99% dengan jumlah material

$$Q_m = 1.000.000 \text{ ton}$$

$$Q_c = 500.000 \text{ ton}$$

$$Q_r = 178.200 \text{ ton}$$

Penambangan pertama sejumlah 1.000.000 ton, ada 487.283 ton material nilainya berada di atas kadar batas optimum 0,99% dengan profit sebesar  $US\$223.190.918$ . 1.000.000 ton yang ditambang dari total 4.253.566 ton

menyisakan material untuk ditambang pada tahun berikutnya sebesar,

$$4.253.566 - 1.000.000 = 3.253.566 \text{ ton}$$

Metode iterasi ini dilakukan setiap tahunnya hingga pada tahun ke-5 didapatkan kadar batas 0,95%. Keseluruhan perhitungan iterasi kadar batas optimum dan  $V$  menghasilkan lama penambangan 4,44 tahun.

NPV keseluruhan tambang berdasarkan profit tahunannya dengan laju diskonto 5,75% adalah,

$$NPV = \frac{\$223.190.918}{(1 + 5,75\%)^1} + \frac{\$221.329.296}{(1 + 5,75\%)^2} + \frac{\$220.288.643}{(1 + 5,75\%)^3} + \frac{\$219.640.734}{(1 + 5,75\%)^4} + \frac{\$90.648.609}{(1 + 5,75\%)^{4,44}}$$

$$NPV = \$841.596.460$$

Pada kadar batas 0,95%, material yang masuk ke pengonsentrasian adalah 2.423.753 ton dari 4.253.566 ton total material. Jumlah material buangnya adalah 1.829.814 ton (Tabel 6) sehingga rasio pengupasannya bernilai 0,75.

Tabel 6. Distribusi kadar dan material yang ditambang setiap tahun

g	T = 1	T = 2	T = 3	T = 4	T = 5
	0,99	0,99	0,98	0,97	0,95
0,0-0,1					
0,1-0,2					
0,2-0,3					
0,3-0,4					
0,4-0,5	500.000	487.704	456.625	421.663	168.040
0,5-0,6					
0,6-0,7					
0,7-0,8					
0,8-0,9					
0,9-1,0	12.717	18.709	33.853	12.717	30.675
1,0-1,1	153.254	151.369	146.606	153.254	59.397
1,1-1,2	135.431	133.765	129.556	135.431	52.489
1,2-1,3	93.995	92.839	89.918	93.995	36.430
1,3-1,4	52.427	51.782	50.153	52.427	20.319
1,4-1,5	26.507	26.181	25.357	26.507	10.273
1,5-1,6	15.149	14.963	14.492	15.149	5.871
1,6-1,7	6.774	6.691	6.480	6.774	2.625
1,7-1,8	2.571	2.540	2.460	2.571	997
1,8-1,9	705	697	675	705	273
1,9-5,0	470	464	450	470	182
<b>Total</b>	<b>1.000.000</b>	<b>987.704</b>	<b>956.625</b>	<b>921.663</b>	<b>387.574</b>

Kadar batas optimum pada penambangan tahun ke-1 adalah 0,99%. Kadar batas ini terus menurun hingga 0,95% pada tahun ke-5, lama penambangan adalah 4,44 tahun dengan nilai sekarang bersih/ *NPV* optimum sebesar US\$841.596.460 (Tabel 7).

**Tabel 7.** Jadwal rencana produksi

T	COG	$Q_m$	$Q_c$	P (\$)
1	0,99	1.000.000	500.000	223.190.918
2	0,99	987.704	500.000	221.329.296
3	0,98	956.625	500.000	220.288.643
4	0,97	921.663	500.000	219.640.734
5	0,95	387.574	219.533	90.648.609

Optimasi valuasi ekonomi endapan bijih nikel dengan asumsi-asumsi dan parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 8.

## KESIMPULAN

- Model blok dengan ukuran 25 m x 25 m x 1 m yang dibuat dengan metode estimasi IDW menunjukkan bahwa lokasi didominasi oleh nikel berkadar rendah < 1,0%, terutama pada lapisan limonit. Sebaran kadar > 1,0% tidak terlalu dominan, namun lebih banyak jumlahnya pada lapisan saprolite.

- Model yang dihasilkan merupakan pengembangan model Lane (1988) dan Setiawan & Sasongko (2015) dengan mempertimbangkan royalti, pajak, depresiasi, dan biaya lingkungan.
- Sebagai usaha optimasi profit, dengan asumsi-asumsi parameter yang diberikan, kadar batas optimum adalah 0,948% jika dibatasi oleh kapasitas penambangan, 0,95% jika dibatasi oleh kapasitas pengonsentrasian, dan 0,949% jika dibatasi oleh kapasitas pemurnian, dengan umur tambang adalah 4,85 tahun dengan profit tahunan sebesar US\$196.495.999. *NPV* selama umur tambang adalah US\$811.248.447.
- Optimasi valuasi ekonomi tambang (optimasi *NPV*) menghasilkan kadar batas yang berubah-ubah selama operasi pertambangan; 0,99% pada tahun ke-1; 0,99% pada tahun ke-2; 0,98% pada tahun ke-3, 0,97% pada tahun ke-4; dan 0,95% pada tahun ke-5. Lama operasi tambang adalah 4,44 tahun dengan *NPV* maksimal sebesar US\$841.596.460.
- Perbedaan antara optimasi profit (US\$811.248.447) dan optimasi *NPV* (US\$841.596.460) sebesar US\$30.348.013.

**Tabel 8.** Aliran kas terproyeksi

Parameter	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3	Tahun 4	Tahun 5
Pendapatan	\$ 2.256.903.000	\$ 2.253.103.500	\$ 2.250.823.800	\$ 2.249.304.000	\$ 975.916.205
- Royalti	\$ 90.276.120	\$ 90.124.140	\$ 90.032.952	\$ 89.972.160	\$ 39.036.648
= Pendapatan bersih	\$ 2.166.626.880	\$ 2.162.979.360	\$ 2.160.790.848	\$ 2.159.331.840	\$ 936.879.557
- Total biaya operasi	\$ 1.848.045.323	\$ 1.847.057.262	\$ 1.846.355.398	\$ 1.845.821.974	\$ 807.496.848
= Keuntungan	\$ 318.581.557	\$ 315.922.098	\$ 314.435.450	\$ 313.509.866	\$ 129.382.709
- Penyusutan & amortisasi	\$ 612.759	\$ 612.759	\$ 612.759	\$ 612.759	\$ 269.042
= Laba sebelum pajak	\$ 317.968.798	\$ 315.309.339	\$ 313.822.691	\$ 312.897.107	\$ 129.113.667
- Pajak	\$ 95.390.639	\$ 94.592.802	\$ 94.146.807	\$ 93.869.132	\$ 38.734.100
= Laba setelah pajak	\$ 222.578.159	\$ 220.716.537	\$ 219.675.884	\$ 219.027.975	\$ 90.379.567
+ Penyusutan & amortisasi	\$ 612.759	\$ 612.759	\$ 612.759	\$ 612.759	\$ 269.042
= Aliran kas	\$ 223.190.918	\$ 221.329.296	\$ 220.288.643	\$ 219.640.734	\$ 90.648.609
= Aliran kas terdiskonto	\$ 211.055.241	\$ 197.914.745	\$ 186.273.459	\$ 175.627.040	\$ 70.725.975

DAFTAR PUSTAKA

- Asy'ari, M. A. 2011. Geologi dan Estimasi Sumberdaya Endapan Nikel Laterit Dengan Metode IDW (Inverse Distance Weight) dan Kriging Pada Daerah Bahodopi, Kabupaten Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah. Tesis. Yogyakarta: Program Pasca Sarjana Teknik Geologi FT UGM.
- Cetin, E., dan P. A. Dowd. 2013. *Multi-mineral cut-off grade optimization by grid search*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy Vol. 113 (8). h. 659–665.
- Crundwell, F. K. 2008. *Finance for Engineers: Evaluation and Funding of Capital Projects*. London: Springer-Verlag London Limited. 622 h.
- Gholamnejad, Javad. 2008. *Determination of the Optimum Cutoff Grade Considering Environmental Cost*. J. Int. Environmental Application & Science Vol. 3 (3). h. 186–94.
- Hustrulid, M., Kuchta, R., Martin. 2013, *Open pit Mine Planning & Design*. CRC Press/Balkema: London
- Kržanović, Daniel, Božo Kolonja, & Dejan Stevanović. 2015. *Maximizing the net present value by applying an optimal cut-off grade for long-term planning of the copper open pits*. Acta Montanistica Slovaca Vol. 20 (1). h. 49–61.
- Lane, K. F.. 1964. *Choosing the Optimum Cut-Off Grade*. Quarterly of the Colorado School of Mines. h. 811–829.
- Lane, K. F.. 1988. *The economic definition of ore, cut-off grade in theory and practice*. 156 h.
- Osanloo, M., dan M. Ataei. 2003. *Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits*. Minerals Engineering Vol. 16 (8). h. 771–776.
- Osanloo, M., F. Rashidinejad, dan B. Rezai. 2008. *Incorporating environmental issues into optimum cut-off grades modeling at porphyry copper deposits*. Resources Policy Vol. 33 (4). h. 222–229.
- Rahimi, Esmaeil, dan Hasan Ghasemzadeh. 2015. *A new algorithm to determine optimum cut-off grades considering technical, economical, environmental and social aspects*. Resources Policy Vol.46. Elsevier. h. 51–63.
- Rahimi, Esmaeil, Kazem Oraee, Zia Aldin Shafahi Tonkaboni, dan Hasan Ghasemzadeh. 2014. *Considering environmental costs of copper production in cut-off grades optimization*. Arabian Journal of Geosciences Vol. 8 (9): h. 7109–7123.
- Rashidinejad, F., M. Osanloo, dan B. Rezai. 2009. *Cutoff grades optimization with environmental management; a case study: Sungun copper project*. IUST International Journal of Engineering Science Vol. 19 (5). h. 1–13.
- Sasongko, W., A. Idrus, dan L. Lintjewas. 2013. *Kajian Kadar Batas Optimum (Optimum Cut-Off Grade) pada Penambangan Nikel Laterit dengan Penjualan dalam Bentuk Material Biji Mentah*. Annual Engineering Seminar 2013. h. 89–92.
- Setiawan, Eko Billy, dan Sasongko, W. 2015. *Pemodelan kadar batas optimum endapan nikel laterit dengan penjualan dalam bentuk konsentrat dan memperhitungkan biaya pengupasan material penutup*. Proceeding Seminar Nasional Kebumihan ke-8. h. 854–864.
- Simanjuntak, T. O., E. Rusmana, dan J. B. Supandjono. 1994. *Geologi Lembar Bunku Skala 1:250.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. 13 h.

Diterima	: 18 Maret 2022
Direvisi	: 20 April 2022
Disetujui	: 31 Mei 2022