

DOI: doi.org/10.21009/0305020607

TERMODINAMIKA DALAM MEMAHAMI PROSES PENGOLAHAN MINERAL

Stephanie Tarumingkeng^{1,a)}, Enjang Jaenal Mustopa^{1,b)}, Lilik Hendrajaya^{1,c)}

¹Prodi Fisika FMIPA Institut Teknologi Bandung,
Jalan Ganesha No 10, Bandung 40132

Email: ^{a)}stephanie_tarumingkeng@yahoo.com, ^{b)}enjangjaenalmustopa@gmail.com,
^{c)}lilikhendrajaya@gmail.com,

Abstrak

Indonesia merupakan negara dengan sumber daya alam yang melimpah, terutama mineral. Pengolahan mineral di Indonesia adalah wajib sesuai dengan peraturan pemerintah, dilakukan dengan menggunakan proses metalurgi yang terdiri dari pirometalurgi (ekstraksi dengan temperatur tinggi), hidrometalurgi (ekstraksi dengan temperatur rendah melalui pelindian) dan elektrometalurgi (ekstraksi dengan memanfaatkan prinsip elektrokimia). Bagi ilmu fisika, untuk mengikuti secara komprehensif adalah melalui termodinamika dimana variabel-variabel (yang terukur) terlibat dalam proses kimia tersebut. Variabel-variabel fisika ini perlu dikendalikan guna memperoleh keluaran mineral yang optimum. Termodinamika kesetimbangan dari suatu reaksi kimia (potensial Gibbs) diperlukan untuk melihat variabel-variabel termodinamika yang saling berkaitan. Dari kaitan ini, pengendalian dilakukan melalui instrumen alat ukur, dipasang di reaktor (smelter) dan dihubungkan dengan peralatan lain (mekanik) yang kemudian melakukan perubahan keadaan sesuai dengan apa yang diharuskan agar proses berlangsung stabil.

Kata-kata kunci: *pengolahan mineral, metalurgi, termodinamika kesetimbangan, smelter*

Abstract

Indonesia is a country with abundant natural resources, especially minerals. Mineral processing in Indonesia is mandatory in accordance with government regulations, carried out using metallurgical process consisting of pyrometallurgy (extraction at high temperature), hydrometallurgical (low-temperature extraction through leaching) and electrometallurgy (extraction by utilizing electrochemical principle). For physics, to follow a comprehensive manner is through a thermodynamic wherein the variables (measurable) is involved in the chemical processes. These physical variables need to be controlled in order to obtain optimum mineral output. Thermodynamic equilibrium of a chemical reaction (Gibbs potential) is required to view the thermodynamic variables are interrelated. From this connection, the control is carried out instrumen gauges, installed in the reactor (smelter) and connected to other equipment (mechanical) which then performs the state change according to what is required so that the process is stable.

Keywords: *mineral processing, metallurgy, thermodynamic equilibrium, smelter.*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara dengan sumber daya alam yang melimpah, terutama mineral. Akan tetapi Indonesia hanya memiliki 4 atau 5 saja smelter yang digunakan untuk mengolah mineral tersebut. Smelter ini sangat penting guna mengekstraksi mineral komersial. Setelah dipelajari secara sesaat, proses kimia yang terjadi di reaktor smelter dimana melibatkan variabel fisika seperti tekanan, temperatur, volume, komponen dan sebagainya dikaji berdasarkan pada termodinamika multikomponen multifasa.

Di kurikulum S1 dan S2 fisika, informasi pengetahuan tersebut secara formal tidak ada dalam perkuliahan. Proses pengolahan (ekstraksi) mineral

dilakukan dengan tiga cara yaitu pirometalurgi, hidrometalurgi dan elektrometalurgi [2].

- Pirometalurgi adalah proses ekstraksi menggunakan temperatur tinggi untuk kriteria mineral berkadar tinggi. Pirometalurgi digunakan beberapa perusahaan besar dalam memproduksi logam yang komersial, diantaranya nikel, timah, besi dan baja. Tahapan-tahapan dalam proses pirometalurgi yaitu pengeringan (penghilangan kandungan air dalam bijih), kalsinasi (penghilangan air kristal dalam bijih), peleburan dan pemurnian (peningkatan kadar suatu logam).
- Hidrometalurgi adalah proses ekstraksi yang dilakukan pada temperatur yang relatif rendah dengan cara pelindian dengan media cairan untuk kriteria

bijih mineral berkadar rendah. tahapan proses hidrometalurgi yaitu pengeringan, reduksi, pelindihan (melarutkan satu atau lebih mineral tertentu dari suatu bijih, konsentrat atau produk metalurgi lainnya) dan pemurnian serta *recovery*.

- Elektrometalurgi adalah proses ekstraksi yang melibatkan penerapan prinsip elektrokimia, baik pada temperatur rendah maupun pada temperatur tinggi. Prinsip kerja elektrometalurgi yaitu suatu elektrolisa dimana penggunaan energi listrik untuk mengendapkan suatu metal atau logam pada salah satu elektrodanya [5]. Pekerjaan elektrolisa ini terdiri dari 2 tingkatan, yaitu : *Electro winning* (proses elektrokimia yang digunakan untuk mereduksi kation logam ke permukaan katoda dari larutan air yang berasal dari proses pencucian kimia) dan *Electro refinery* (memurnikan logam).

Pengolahan mineral ini menjadi komoditas utama yang perlu diadakan karena adanya peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) no. 11 tahun 2012 tentang peningkatan nilai tambah mineral melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral. Oleh karena itu, perlu suatu pengkajian secara rinci dan akademik tentang peran fisika dalam hal ini termodinamika dalam masalah pengolahan mineral.

Dalam penelitian ini, termodinamika kesetimbangan dari suatu reaksi kimia (potensial Gibbs) diperlukan untuk melihat variabel-variabel termodinamika yang saling berkaitan.

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian studi literatur. Penelitian ini dimulai dengan kajian studi literatur tentang konsep dasar termodinamika yang dilanjutkan dengan mempelajari proses pengolahan mineral. Pengolahan mineral yang ditinjau adalah pengolahan nikel dengan menggunakan pirometalurgi. Setelah melakukan studi literatur, diperoleh data sekunder berupa data termodinamika yang dianalisis untuk mengetahui nilai perubahan energi bebas Gibbs guna menunjukkan apakah proses berlangsung atau tidak serta mengetahui variabel-variabel pengendali proses. Hasil analisa studi literatur akan menggambarkan suatu hubungan keterkaitan antara variabel-variabel termodinamika. Hubungan keterkaitan ini dapat memberikan gambaran bagaimana cara pengendalian proses pengolahan nikel agar menghasilkan keluaran yang optimal.

2.1 Analisis Nilai Perubahan Energi Bebas Gibbs

Reaksi dapat berlangsung atau tidak bergantung pada nilai perubahan energi bebas Gibbs standard (ΔG^0). Perumusan perubahan energi bebas Gibbs yang bergantung temperatur diberikan oleh persamaan Gibbs-Helmholtz [3] ,

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (1)$$

Jika nilai ΔG^0 adalah negatif maka reaksi tersebut dikatakan berlangsung yang artinya adalah reaksi akan berlangsung ke arah produk. Sebaliknya ketika nilai ΔG^0 adalah positif maka reaksi tidak berlangsung atau reaksi akan berlangsung ke arah reaktan.

2.2 Penentuan Variabel Termodinamika Pengendali Proses Pengolahan Nikel

Di dalam proses pengolahan nikel, berlangsung dengan stabilnya proses tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya temperatur dan tekanan kesetimbangan

2.2.1 Temperatur

Temperatur adalah sifat fisik dari materi yang secara kuantitatif menyatakan tingkat panas atau dingin. Dalam proses pengolahan nikel, temperatur harus disesuaikan dengan tahapan-tahapan yang dilalui.

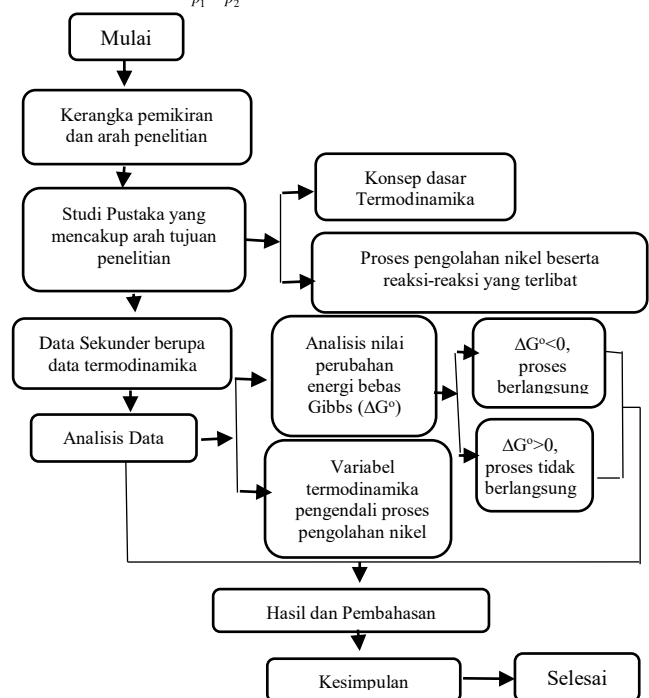
2.2.2 Tekanan Kesetimbangan

Tekanan merupakan gaya yang bekerja pada suatu bidang per satuan luas bidang tersebut, dimana tekanan ini dapat dihubungkan dengan temperatur. Dalam proses pengolahan nikel, hubungan tekanan dan temperatur dapat diperoleh dari persamaan energi bebas Gibbs yang bergantung pada tekanan dan temperatur, dimana persamaannya sebagai berikut ini [3] :

$$P = P_o + \left[\frac{T\Delta S^o - \Delta H^o - RT \ln K}{\Delta V} \right] \quad (2)$$

Dimana: $K = \frac{a_{p_2} P_{g_2}}{a_{p_1} P_{g_1}}$ (reaksi padat-gas) (3)

Dan $K = \frac{a_{p_3} a_{p_4}}{a_{p_1} a_{p_2}}$ (reaksi padat-padat) (4)



Seminar Nasional Fisika 2016 **Gambar 1.** Alur kerja penelitian
 Prodi Pendidikan Fisika dan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Jakarta

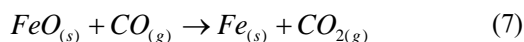
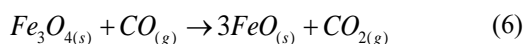
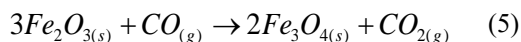
3. Hasil dan Pembahasan

Pengolahan mineral menjadi logam komersil umumnya dilakukan melalui proses pirometalurgi yaitu menggunakan suhu yang relatif tinggi. Pengolahan mineral secara pirometalurgi dilakukan melalui beberapa tahapan, diantaranya pengeringan, kalsinasi, peleburan, dan pemurnian. Dalam tahapan pengolahan mineral menjadi logam komersil (nikel), terdapat proses kimia yang melibatkan aspek termodinamika. Aspek termodinamika ini menggambarkan keterkaitan antara variabel-variabel fisika yang menjadi pengendali dalam memproduksi logam nikel yang optimum.

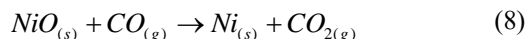
Proses pengeringan yaitu proses penghilangan kandungan air atau moisture dari bijih nikel menggunakan temperatur yang tidak terlalu tinggi [1]. Dalam tahapan ini, tidak ada aspek termodinamika yang ditinjau karena proses ini hanya melakukan penguapan sebagian kandungan air dalam bijih tanpa adanya reaksi kimia.

Setelah melalui proses pengeringan, bijih selanjutnya melalui proses kalsinasi yaitu proses penghilangan air, karbon dioksida atau gas lain yang mempunyai ikatan kimia dengan bijih, sebagai contoh hidrat atau karbonat [1]. Proses ini dilakukan di dalam tanur putar (*rotary kiln*). Proses ini dilakukan pada temperatur tinggi namun bijih itu tidak mengalami leleh. Pada tahapan ini terjadi proses pra-reduksi yang bertujuan menghilangkan ikatan oksigen dari bijih laterit dengan menggunakan gas sebagai reduktornya. Reaksi kimia yang terjadi pada proses pengolahan ini berupa reaksi padatan dan gas. Reduksinya terdiri dari reduksi nikel oksida dan reduksi besi oksida [6].

a. Reduksi besi oksida



b. Reduksi nikel oksida

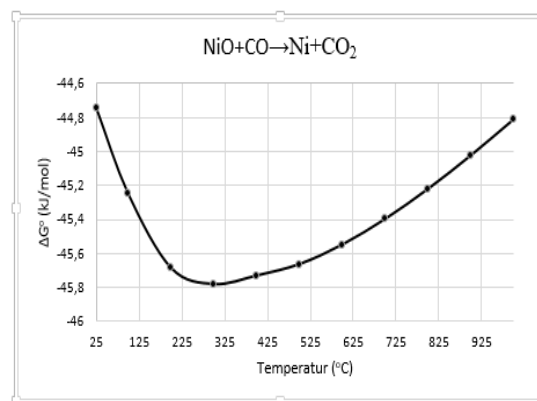


Analisis nilai perubahan energi bebas Gibbs pada reduksi nikel oksida menjadi logam nikel dapat dilihat pada tabel 1 yang dialurkan pada gambar 2.

Berdasarkan tabel 1, harga ΔG° bernilai negatif yang artinya proses pada tahapan ini berlangsung secara spontan. Akan tetapi terlihat anomali pada gambar 2 dimana kecenderungan harga ΔG° makin negatif ketika temperatur meningkat dari 25°C sampai dengan ± 325°C selanjutnya menjadi kurang negatif seiring bertambahnya temperatur. Artinya bahwa hasil reaksi memproduksi sejumlah molekul gas yang lebih sedikit daripada pereaksi sehingga menurunkan entropi.

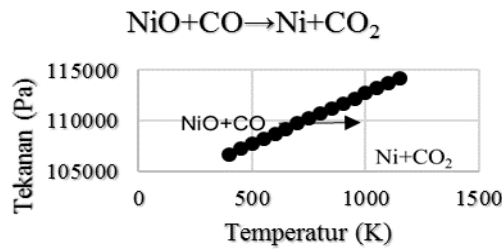
Tabel 1. Data termodinamika reduksi NiO oleh gas CO pada suhu 25-1000°C [6]

T (°C)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/(mol.K))	ΔG° (kJ/mol)
25	-42,386	7,903	-42,5836
100	-43,09	5,794	-43,6694
200	-44,381	2,762	-44,9334
300	-46,038	-0,447	-45,9039
400	-45,975	-0,362	-45,8302
500	-46,395	-0,946	-45,922
600	-46,732	-1,356	-45,9184
700	-47,009	-1,657	-45,8491
800	-47,241	-1,884	-45,7338
900	-47,438	-2,06	-45,584
1000	-47,607	-2,198	-45,409



Gambar 2. Hubungan ΔG° terhadap temperatur pada reaksi reduksi NiO oleh gas CO pada 25-1000°C

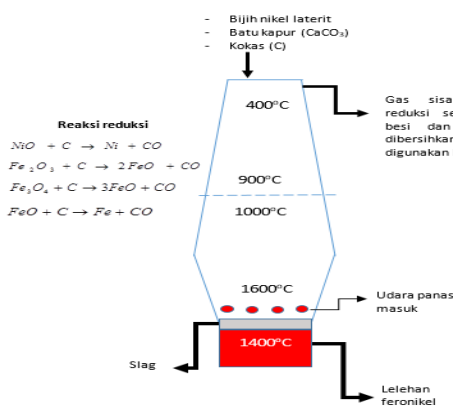
Dalam proses ini, tekanan ikut berperan dalam proses reduksi besi oksida dan nikel oksida. Keterlibatan tekanan dapat terlihat melalui reaksi kesetimbangan. Hal ini bisa terlihat pada persamaan (2). Dengan meninjau reaksi reduksi nikel oksida diperoleh grafik hubungannya sebagai berikut ini.



Gambar 3. Diagram Kesetimbangan P-T pada proses pra reduksi di tahapan kalsinasi

Berdasarkan gambar 3, terlihat bahwa kesetimbangan akan cenderung kearah produk. Terlihat juga keterkaitan antara temperatur dan tekanan. Keterkaitannya bisa menjadi pedoman bagaimana mengendalikan proses pra reduksi ini agar berjalan dengan baik. Kita bisa melakukan pengontrolan tekanan berdasarkan temperatur yang digunakan. Jika reaksi belum berjalan dengan baik berarti ada variabel yang harus kita kendalikan, misalnya mengubah-ubah tekanan atau temperatur sehingga diperoleh kesetimbangannya.

Setelah proses kalsinasi, selanjutnya bijih diolah melalui proses peleburan yang merupakan inti dari proses pengolahan nikel melalui pirometalurgi. Proses ini bertujuan memisahkan lelehan logam dengan slag [4]. Lelehan logam dan slag akan terpisah berdasarkan berat jenisnya. Proses peleburan adalah proses reduksi lanjutan dari proses pra-reduksi di tanur putar. Gambar 4 dapat memperlihatkan bagaimana proses peleburan terjadi di dalam tungku pemanas.



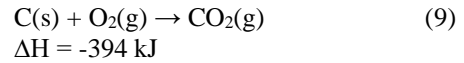
Gambar 4. Ilustrasi proses peleburan

Tahapan-tahapan yang terjadi pada proses peleburan dalam pembuatan feronikel berdasarkan gambar 4 adalah sebagai berikut:

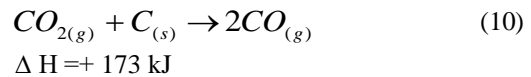
1. Bahan-bahan (biji laterit, batu kapur, dan batubara/kokas) dimasukkan ke dalam tungku dari puncak tanur. Bijih nikel laterit ini akan direduksi

oleh kokas. Sedangkan batu kapur berfungsi mengikat zat-zat pengotor.

2. Selanjutnya udara panas dialirkan melalui dasar tanur sehingga mengoksidasi karbon menjadi gas CO₂.



Reaksi ini sangat eksoterm (menghasilkan panas), sehingga panas yang dibebaskan akan menaikkan suhu bagian bawah tanur sampai mencapai 1.600°C. Kemudian gas CO₂ bergerak naik dan bereaksi lagi dengan kokas menjadi CO.



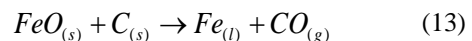
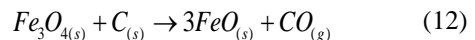
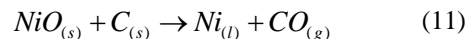
Reaksi yang terjadi adalah endoterm (memerlukan panas). Gas CO yang terbentuk ini akan mereduksi kembali kalsin bijih nikel dan sisa gas CO dan CO₂ yang tidak sempat mereduksi dan tereduksi akan keluar sebagai gas tanur listrik bersama gas-gas yang lainnya.

3.

anur listrik memiliki elektroda bersuhu tinggi, maka terjadilah reaksi reduksi yang terdiri dari reaksi reduksi langsung dan reaksi reduksi tak langsung [6].

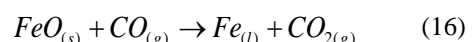
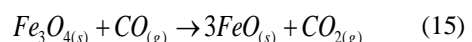
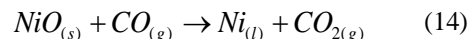
1) Reaksi reduksi langsung

Reaksi reduksi langsung adalah reaksi reduksi kalsin bijih nikel yang dilakukan oleh karbon padat secara langsung.

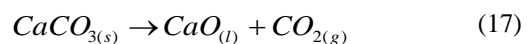


2) Reaksi reduksi tak langsung

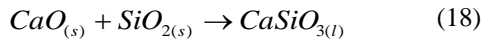
Reaksi reduksi tak langsung merupakan reaksi reduksi lebih lanjut yang dilakukan oleh gas CO (yang sebagian besar dihasilkan dari reaksi reduksi langsung).



4. Larutan logam besi dan nikel yang terbentuk selanjutnya mengalir ke dasar tanur kemudian bercampur membentuk larutan feronikel. Sementara itu dibagian tanur yang bersuhu tinggi, batu kapur CaCO₃ terurai menjadi CaO.

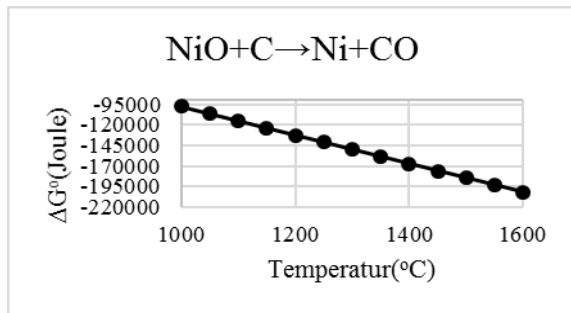


CaO yang terbentuk akan bereaksi dengan pengotor yang bersifat asam yang ada dalam bijih feronikel, seperti pasir silika. Reaksi ini menghasilkan senyawa dengan titik didih rendah yang disebut *slag* (terak). Salah satu contoh reaksinya adalah sebagai berikut ini.

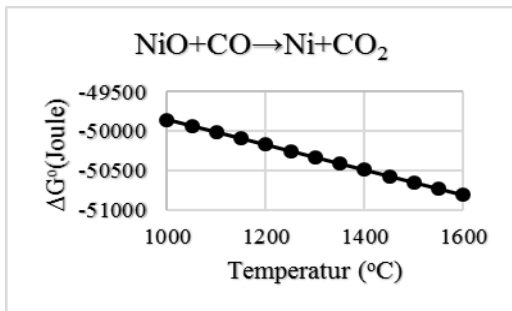


Lelehan *slag* ini kemudian akan mengalir ke bagian bawah tanur. Lelehan *slag* berada di atas lelehan feronikel karena kerapatan lelehan *slag* lebih rendah dibandingkan lelehan feronikel, sehingga keduanya dapat dikeluarkan dari tungku pemanasan secara terpisah. (lelehan *slag* ini melindungi lelehan feronikel dari teroksidasi kembali)

Hasil analisis nilai perubahan energi bebas Gibbs memperlihatkan grafik hubungan sebagai berikut ini:



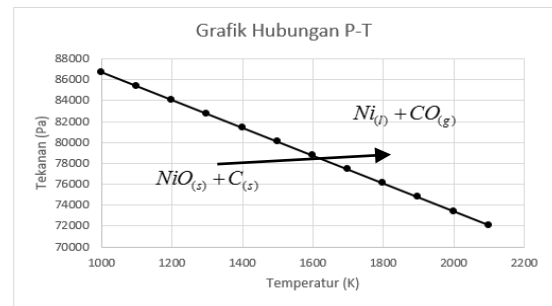
Gambar 5. Grafik hubungan ΔG° terhadap T pada reduksi langsung



Gambar 6. Grafik hubungan ΔG° terhadap T pada reduksi tak langsung.

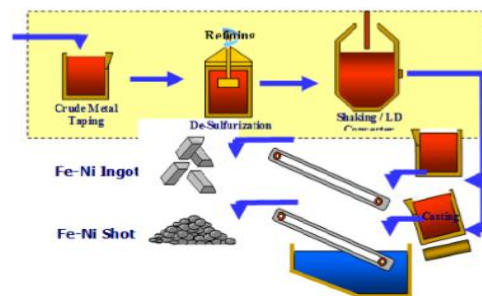
Berdasarkan gambar 5 dan 6 diketahui bahwa proses reduksi berlangsung spontan, karena semakin bertambahnya temperatur, nilai perubahan energi bebas Gibbs semakin negatif. Pada proses ini, temperatur harus dikendalikan dimana temperatur *slag* berselisih 100°C dari temperatur logam cair. Jika temperatur *slag* memiliki kisaran 1500-1600 °C maka temperatur logam cair berkisar 1400 °C [4]. Jika temperatur *slag* terlalu rendah, maka *slag* akan membeku sehingga proses pengolahan nikel tidak optimal. Pada proses reduksi ini, terjadi perubahan

fase dari fase logam padatan menjadi fase logam cair dan gas. Artinya disini ada keterlibatan variabel termodinamika dalam hal ini tekanan dan temperatur. Proses perubahan fase dari suatu logam padatan menjadi logam cair akan melalui reaksi kesetimbangan. Pada kesetimbangan reaksi, untuk reaksi yang melibatkan nikel saja berdasarkan persamaan (2), diperoleh grafik hubungan tekanan dan temperatur :



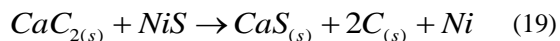
Gambar 7. Diagram kesetimbangan P-T pada proses reduksi langsung di tahapan peleburan.

Hal yang sama juga berlaku pada persamaan reaksi reduksi peleburan yang lainnya. Berdasarkan gambar 7 terlihat bahwa ketika temperturnya semakin besar maka tekanannya akan mengecil. Pengendalian proses pengolahan nikel dapat dilakukan dengan cara mengontrol variabel termodinamika yaitu tekanan dan temperatur. Artinya jika kita menggunakan temperatur yang tinggi tapi proses peleburan belum berlangsung dan belum berubah fasenya maka tekanan yang harus diubah-ubah. Jika pengendalian variabel termodinamika seperti temperatur dan tekanan tidak sesuai maka proses peleburan tidak akan optimal. Setelah melalui proses peleburan, lelehan logam kemudian diolah lagi melalui proses pemurnian guna menaikkan kadar suatu logam. Proses penting dalam pemurnian adalah penghilangan pengotor karbon, silikon, fosfor, sulfur dan terkadang juga penghilangan oksigen terlarut [4]. Pada kasus ini, yang ditinjau hanya proses penghilangan pengotor sulfur atau dikenal dengan istilah desulfurasi. Pada proses desulfurasi ini, yang berperan sebagai agen desulfurasi adalah CaC_2 . Gambar 8 memperlihatkan ilustrasi proses pemurnian.



Gambar 8. Ilustrasi proses pemurnian [7]

Proses pemurnian ini menitikberatkan pada proses menghilangkan pengotor yang ada dalam logam dengan cara memberikan panas. Pemberian panas ini melibatkan aspek termodinamika yaitu temperatur dan tekanan yang mana harus dikendalikan dengan tepat agar mendapat logam yang optimum. Ketika diberikan panas, maka pengotor yang ada dalam logam akan bereaksi dengan agen desulfurasi, seperti reaksi berikut ini :



Dalam proses desulfurasi, temperatur sangat memegang peranan penting karena apabila temperaturnya terlalu rendah maka sebagian logam dapat membeku terlebih dahulu dan akan mengurangi efektivitas proses desulfurisasi [4]. Temperatur yang digunakan berkisar 50 ~ 100°C di atas titik leleh. Titik leleh (MP) ini sangat bergantung dengan komponen yang terkandung di dalam logam hasil peleburan yang akan dimurnikan. Jika temperatur berada di bawah standar yang seharusnya maka pengadukan tidak akan sempurna dikarenakan ada logam cair yang terlebih dahulu membeku.

Dari serangkaian proses pengolahan nikel ini, terdapat pembelajaran bagaimana semestinya perlakuan kepada mineral untuk menghasilkan keluaran yang optimum. Termodinamika kesetimbangan dari suatu reaksi kimia menunjukkan keterkaitan variabel termodinamika yang menggambarkan bahwa di setiap proses pengolahan mineral harus ada pengendalian agar proses berlangsung baik dan menghasilkan keluaran yang optimum.

4. Simpulan

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan sebagai berikut ini :

1. Termodinamika kesetimbangan dari suatu reaksi kimia (potensial Gibbs) dapat memperlihatkan reaksi pada proses pengolahan nikel dapat terjadi secara spontan atau tidak. Jika nilai perubahan energi bebas Gibbs berharga negatif, maka menandakan bahwa reaksi tersebut terjadi secara spontan dan jika nilai perubahan energi bebas Gibbs berharga positif maka menandakan reaksi tersebut tidak berlangsung spontan. Semakin tinggi temperatur yang digunakan maka perubahan energi bebas Gibbs akan semakin negatif.
2. Termodinamika kesetimbangan dari suatu reaksi kimia (potensial Gibbs) juga dapat memperlihatkan keterkaitan antara variabel termodinamika dalam hal ini yaitu temperatur dan tekanan. Temperatur dan tekanan merupakan variabel termodinamika yang dapat diukur sehingga dapat mengendalikan proses pengolahan nikel agar menghasilkan keluaran yang optimum.

Pengendalian dapat dilakukan melalui instrumen alat ukur yang dipasang di reaktor (smelter) dan dihubungkan dengan peralatan lainnya (mekanik) yang kemudian melakukan perubahan keadaan sesuai dengan apa yang diharuskan agar proses berlangsung stabil.

Daftar Acuan

- [1] Iqbal, M. *Laporan Kerja Praktek PT ANTAM*. Pomalaa, PT. Antam Tbk. (2013).
- [2] Prasetyo, P. *Peluang Penelitian Untuk Memperbaiki Teknologi Proses Untuk Mengolah Bijih Nikel Laterit Kadar Rendah Indonesia*. Majalah Metalurgi, 26(2) (2015), p. 79-92.
- [3] Cemič, L. *Thermodynamics in mineral sciences*. Berlin, Springer-Verlag (2005), p. 277-291.
- [4] Gurning, A. *Laporan Kerja Praktek PT ANTAM*. Pomalaa, PT. Antam Tbk. (2015).
- [5] Pagnanelli, F., Garavini, M., Veglio, F., Toro, L., Preliminary screening of Purification Processes of liquor Leach Solutins Obtained from Reductive Leaching of Low-Grade manganese Ores. *Journal of Hydrometallurgy*. 71 (2004), p. 319-327.
- [6] Sutawiratmaja, M.S. *Studi Pengaruh Nisbah Fe/Ni dan waktu tinggal terhadap tingkat reduksi nikel di tanur putar unit II UBP Nikel Pomalaa-PT Aneka Tambang Tbk*. Institut Teknologi Bandung (2009).
- [7] Rembah, R., Analisa Kebutuhan Kalsium Karbid pada proses Desulfurisasi Pemurnian Nikel FeNi II pada PT Aneka Tambang, Tbk UBPN Sultra Provinsi Sulawesi Tenggara, *Jurnal Teknologi Technoscientia*. 5 (2012), p. 68-79.

LAMPIRAN

DAFTAR LAMBANG

P	Tekanan
T	Temperatur
ΔS	Perubahan entropi
ΔG	Perubahan energi bebas Gibbs
ΔH	Perubahan Entalpi
a_i	aktivitas komponen i
K	Konstanta kesetimbangan
ΔV	Perubahan volume molar pada keadaan standar
P_o	Tekanan pada keadaan standar
p_i	Tekanan parsial komponen i