

TUGAS AKHIR –TL184834

**STUDI PENGARUH VARIASI LAJU ALIR OKSIGEN
TERHADAP KADAR Ni, Fe, DAN SENYAWA PRODUK
HASIL PROSES *FIRE REFINING CRUDE* FERONIKEL
*MINI BLAST FURNACE (MBF)***

**KEVIN OKTAVIANDRA
NRP. 0251164000039**

**Dosen Pembimbing
Sungging Pintowantoro, Ph. D.
Fakhreza Abdul, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR –TL 184834

**STUDI PENGARUH VARIASI LAJU ALIR OKSIGEN
TERHADAP KADAR Ni, Fe, DAN SENYAWA PRODUK
HASIL PROSES FIRE REFINING CRUDE FERONIKEL
MINI BLAST FURNACE (MBF)**

KEVIN OKTAVIANDRA
NRP. 0251164000039

Dosen Pembimbing
Sungging Pintowantoro, Ph. D..
Fakhreza Abdul, S.T., M.T

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT–TL 184834

**STUDY ON THE EFFECT OF OXYGEN FLOW
VARIATION ON Ni, Fe, AND COMPOUND LEVELS OF
PRODUCTS FROM FIRE REFINING PROCESS OF MINI
BLAST FURNACE (MBF) FIRE REFINING PROCESS**

KEVIN OKTAVIANDRA
NRP. 0251164000039

Supervisors
Sungging Pintowantoro, Ph. D.
Fakhreza Abdul, S.T., M.T

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page intentionally left blank)

**STUDI PENGARUH VARIASI LAJU ALIR OKSIGEN
TERHADAP KADAR Ni, Fe, DAN SENYAWA PRODUK
HASIL PROSES FIRE REFINING CRUDE FERONIKEL
MINI BLAST FURNACE (MBF)**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

KEVIN OKTAVIANDRA

NRP 02511640000039

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Sungging Pintowantoro, Ph. D..... (Pembimbing I)
2. Fakhreza Abdul, S.T., M.T..... (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**STUDI PENGARUH VARIASI LAJU ALIR OKSIGEN
TERHADAP KADAR Ni, Fe, DAN SENYAWA PRODUK
HASIL PROSES FIRE REFINING CRUDE FERONIKEL
MINI BLAST FURNACE (MBF)**

Nama : Kevin Oktaviandra
NRP : 0251164000039
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Sungging Pintowantoro, Ph. D.
Pembimbing II : Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

Abstrak

Tingginya kebutuhan komoditas nikel untuk pengaplikasian berbagai aspek engineering seperti Stainless Steel, Baterai, paduan dll semakin marak. Menjadi tantangan bagi Indonesia untuk mengembangkan proses pengolahan bijih laterite agar lebih optimal. Salah satu proses alternatif untuk pemurnian nikel laterit adalah Fire Refining. Pemurnian dengan memanfaatkan afinitas metal terhadap oksigen. Laju alir oksigen penting dipelajari karena penggunaan oksigen sebagai oksidator metal. Variabel laju alir oksigen yang digunakan adalah 1,5 liter/min, 2 liter/min, 2,5 liter/min, 3 liter/min dan 3,5 liter/min. Proses Fire Refining diawali preparasi alat dan bahan crude feronikel dan dihitung massanya 20 gr, kemudian dilakukan uji EDX untuk mengetahui kadar dan XRD untuk mengetahui senyawa, setelah itu dilakukan perhitungan mass balance dan heat balance. Selanjutnya dilakukan proses Fire Refining dengan variabel bebas laju alir oksigen dan variabel kontrol tetap laju alir LPG 0,6 m/s dan pada temperatur 1550°C. Dan terakhir dilakukan analisis dengan menggunakan XRD dan EDX untuk menghitung Yield. Pada penelitian ini didapat bahwa kadar unsur meningkat setiap variabel laju oksigen dengan kadar tertinggi pada laju oksigen 3,5 liter/min adalah 36,3%wt. Dan senyawa yang terbentuk pada Fire Refining adalah FeNi. Serta didapat yield

yang tertinggi adalah pada variabel laju oksigen 2liter/min dengan besar yield 89,1%.

Kata Kunci: *Fire Refining, Oksigen, Kadar, Yield.*

**EFFECT OF OXYGEN FLOW RATE VARIATION ON Ni,
Fe LEVELS AND PRODUCT COMPOUNDS FROM FIRE
REFINING CRUDE FERRONICKEL MINI BLAST
FURNACE (MBF)**

Student Name : Kevin Oktaviandra
NRP : 0251164000039
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Sungging Pintowantoro, Ph. D.
Co-Supervisor : Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

Abstract

The high demand for nickel commodities for the application of various aspects such as Stainless Steel, Batteries, alloys etc. It is a challenge for Indonesia to develop laterite ore processing to be more optimal. One alternative process for refining laterite nickel is Fire Refining. Purification by utilizing metal's affinity for oxygen. Oxygen flow rate is important to study because of the use of oxygen as a metal oxidizer. The variable oxygen flow rate used is 1.5 liter / min, 2 liters / min, 2.5 liters / min, 3 liters / min and 3.5 liters / min. The Fire Refining process begins with the preparation of tools and crude ferronickel material and its mass is calculated at 20 grams, then an EDX test is performed to determine the content and XRD to determine the compound, after which the mass balance and heat balance are calculated. Fire Refining process was then carried out with an independent variable oxygen flow rate and a fixed control variable LPG flow rate of 0.6 m / s and at a temperature of 1550 °C. And finally an analysis using XRD and EDX to calculate yield. In this study it was found that the elemental content increased each variable oxygen rate with the highest level at the oxygen rate of 3.5 liters / min was 36.3% wt. And the compound formed in Fire Refining is FeNi. And the highest yield obtained is the variable oxygen rate of 2 liters / min with a large yield of 89,1%.

Keywords: *Fire Refining, Oxygen, Concentrations, Yield .*

(This page intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmatnya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Pengaruh Variasi Laju Alir Oksigen Terhadap Kadar Ni, Fe, Dan Senyawa Produk Hasil Proses *Fire Refining Crude Feronikel Mini Blast Furnace* (MBF)”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan studi yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Material FTI-ITS.

Dengan terbentuknya laporan tugas akhir, ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada

1. Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D selaku Dosen Pembimbing dan Ketua Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material yang telah banyak memberikan arahan dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Bapak Fakhreza Abdul, S.T. M.T yang telah menuangkan segala bimbingan, ilmu dan gembengan mengenai Tugas akhir dan kehidupan.
3. Bapak Sigit Tri Wicaksono., S.Si., M.Si., Ph.D. selaku ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi.
4. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. selaku dosen wali yang selalu memberi arahan selama perkuliahan.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak membaca. Adapun penulis meminta maaf atas segala kesalahan yang ada di Laporan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Januari 2020
Penulis

Kevin Oktaviandra

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Nikel	5
2.2 Nikel <i>Laterite</i>	6
2.3 Teknologi Pengolahan Ekstraksi Nikel <i>Laterite</i>	7
2.3.1 Ekstraksi Biji Nikel <i>Laterite Saprolite</i>	7
2.3.2 Ekstraksi Biji Nikel <i>Laterite Limonitik</i>	10
2.4 Smelting Dengan <i>Mini Blast Furnace</i> (MBF)	12
2.5 <i>Fire Refining</i>	14
2.6 Termodinamika <i>Smelting</i> dan <i>Fire Refining</i>	16
2.6.1 <i>Smelting</i>	18
2.6.2 <i>Fire Refining</i>	20
2.7 <i>Crude Feronikel</i>	21
2.8 EDX dan XRD	23
2.9 Penelitian Sebelumnya.....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir	31
3.2 Bahan Penelitian	32
3.2.1 Feronikel	32
3.2.2 Gas LPG	33

3.2.3	Gas Oksigen	33
3.3	Peralatan Penelitian.....	34
3.3.1	Anemometer	34
3.3.2	Timbangan Digital.....	34
3.3.3	Lance Gas LPG dan Oksigen	35
3.3.4	SiC Crusible	35
3.3.5	Termometer Infrared	36
3.3.6	Valve Untuk Gas LPG dan Oksigen.....	36
3.4	Pelaksanaan Penelitian.....	37
3.4.1	Proses <i>Fire Refining</i>	37
3.4.2	Pengujian Sampel	37
3.5	Perhitungan Yield	39
3.6	Neraca Massa <i>Fire Refining Crude</i> Feronikel	39
3.6	Rancangan Penelitian.....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Karakteristik Bahan Penelitian.....	43
4.2	Pengaruh Variasi Laju Alir Terhadap Kadar Nikel dan Besi.....	46
4.3	Pengaruh Senyawa Terhadap Hasil Fire Refining Pada Crude Feronikel.....	50
4.4	Pengaruh Variasi Laju Alir Terhadap Yield	53
4.5	Pengaruh Variasi Laju Alir Oksigen Terhadap Unsur.....	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	59
DAFTAR PUSTAKA		61
LAMPIRAN		67
UCAPAN TERIMA KASIH.....		91
BIODATA PENULIS		93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi Nikel Ore.....	6
Gambar 2.2	Profil Pelapukan Pada Bijih Nikel <i>Laterite</i>	7
Gambar 2.3	Pengolahan Bijih Nikel <i>Saprolite</i>	11
Gambar 2.4	Proses Ekstraksi Bijih Nikel <i>Limonitik</i>	11
Gambar 2.5	Ilustrasi EAF.....	13
Gambar 2.6	<i>Mini Blast Furnace</i> (MBF).....	14
Gambar 2.7	<i>Pierce-Smith Converter</i>	15
Gambar 2.8	Diagram Ellingham	18
Gambar 2.9	Diagram fas FeO-SiO ₂ -MgO	22
Gambar 2.10	Aliran Fluida Pada <i>Impact Zone</i>	28
Gambar 2.11	Pengaruh Kadar Oksigen Terhadap Kadar Si dan Mn.....	29
Gambar 3.1	Diagram Alir Percobaan	31
Gambar 3.2	Feronikel.....	32
Gambar 3.3	LPG (<i>Liquid Petroleum Gas</i>).....	33
Gambar 3.4	Tabung Oksigen 1m ³	33
Gambar 3.5	Anemometer	34
Gambar 3.6	Timbangan Digital.....	34
Gambar 3.7	<i>Lance Gas</i> LPG dan Oksigen	35
Gambar 3.8	SiC <i>Crusible</i>	35
Gambar 3.9	Termometer <i>Infrared</i>	36
Gambar 3.10	<i>Valve Gas</i> LPG dan Oksigen	36
Gambar 3.11	Instrumen EDX.....	38
Gambar 3.12	Instrumen XRD	39
Gambar 3.13	Rancangan Proses <i>Fire Refining</i>	41
Gambar 4.1	Hasil Pengujian XRD <i>Crude Feronikel</i>	44
Gambar 4.2	Pengaruh Variasi Laju Alir Terhadap Kadar Nikel dan Besi Pada Feronikel	46
Gambar 4.3	Hasil XRD Feronikel	51
Gambar 4.4	Perolehan Yield <i>Fire Refining</i>	54
Gambar 4.5	Pengaruh Variasi Laju Alir Oksigen Terhadap Unsur	56

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi Umpan <i>Smelting</i> Untuk Proses Crude Feronikel	22
Tabel 2.2	Komposisi <i>Crude</i> Feronikel.....	23
Tabel 3.1	Kadar Unsur Spesimen	32
Tabel 3.2	Mass Balance <i>Fire Refining</i>	40
Tabel 3.3	Target <i>Fire Refining Crude</i> Feronikel	40
Tabel 3.4	Rancangan Penelitian.....	41
Tabel 4.1	Hasil Pengujian EDX <i>Crude</i> Feronikel	43
Tabel 4.2	Pengaruh laju alir oksigen terhadap Ni dan Fe	46
Tabel 4.3	Identifikasi Fasa Pada Produk <i>Fire Refining</i> Feronikel	51
Tabel 4.4	Data Hasil <i>Fire Refining</i>	53
Tabel 4.5	Hasil Perhitungan <i>Yield</i>	53
Tabel 4.6	Hasil Unsur Feronikel <i>Fire Refining</i>	55
Tabel 4.7	Reaksi <i>Fire Refining</i>	58

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel sendiri telah diidentifikasi sebagai unsur sejak tahun 1751 oleh Alex Cronstedt. Sebelum ini China menggunakan paduan tembaga dan nikel sebagai pengganti silver. Pengaplikasian pertama pada nikel yaitu pada tahun 1820 di Eropa dalam paduan nikel, tembaga, dan seng yang disebut German Silver. Juga pada tahun 1857 di Amerika Serikat memperkenalkan uang koin satu *cent* terbuat dari paduan tembaga dan nikel. Pertumbuhan Nikel menjadi komoditas kebutuhan logam di abad 20, karena nikel juga telah diaplikasikan sebagai *Stainless Steel*. Pertumbuhan ini berlanjut pada abad 21 sekarang yang didorong dengan industrialisasi yang cepat di India dan China (Crudewell, 2011).

Indonesia juga sedang gencar dalam produksi komoditas nikel, apalagi Indonesia sendiri memiliki program pengembangan motor listrik dan pembuatan baterai. Berdasarkan data US Geological Survey tahun 2016, Indonesia merupakan produsen nikel terbesar nomor 6 di dunia dengan produksi sebesar 168.500 metric ton. Ekspor nikel merupakan salah satu pundi uang pendapatan negara, dimana salah satu BUMN yaitu PT Aneka Tambang (ANTAM) yang salah satu komoditas utamanya yaitu produksi feronikel (ITPC, 2017)

Jenis bijih nikel yang ada dunia ditambang umumnya terbagi menjadi dua yaitu Bijih nikel *laterite* dan Bijih nikel *Sulfide*, namun saat ini Bijih nikel *Laterite* memiliki sumber cadangan 70% didunia yang dapat ditemukan didaerah tropis seperti Indonesia, Philipina dan Cuba namun hanya sekitar 40% yang diproduksi dari bijih nikel *laterite*. Sedangkan Bijih Nikel *Sulfide* ditambang bisa ditemukan didaerah Canada dan Siberia Utara dengan sumber cadangan 30% diseluruh dunia dan sekitar 60 % diproduksi dari bijih *sulfide* (Crudewell, 2011). Penyebabnya tidak lain karena rendahnya kadar nikel dalam bijih *laterite* (1-2,5%) dan kompleksitas proses produksi serta pemurniannya (Farrokhpay *et*

al, 2018). Pada saat ini cadangan bijih nikel *sulfide* di dunia semakin menipis, sehingga produksi menggunakan bijih nikel *laterite* untuk mendapatkan nikel semakin digencarkan. Sehingga pembuatan nikel menggunakan bijih nikel *laterite* belum optimal dan masih perlu pengembangan sehingga dapat diperoleh potensi maksimal dari bijih nikel *laterite*. (Jungah, 2010).

Peningkatan nilai tambah produk tambang, khususnya nikel merupakan keharusan, sesuai dengan UU No 4 Tahun 2009, dimana Indonesia harus melakukan pemrosesan lebih lanjut untuk mendapatkan manfaat paling banyak serta potensi yang ada (Ijang, 2018). Pada era pemerintah Jokowi Indonesia sekarang sedang gencar dalam pembuatan kendaraan listrik, namun belum ada pengoptimalan dari segi produksi baterai. Salah satu teknologi baterai menggunakan material katodanya yang berbeda, yaitu *NMC* (lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide) yang memiliki performa kerja yang tinggi (*Energy density* sebesar 0,6 kWh/kg) dan memiliki biaya pembuatan yang paling rendah serta terbukti memiliki *life cycle* yang lebih lama, yaitu 2000-3000 kali (ZMc. Kinsey, 2017). Salah satu unsur yang paling banyak digunakan dalam baterai *NMC* ialah nikel. Persentase berat Nikel yang digunakan ialah sebesar 80%, Cobalt sebesar 10% dan Mangan sebesar 10%. Nikel yang digunakan dalam pembuatan baterai *NMC* bukanlah berupa logam Ni, melainkan berupa senyawa *Nickel (II) Sulphate Hexahydrate* ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Selama ini, untuk memproduksinya membutuhkan logam nikel dengan grade yang tinggi (kelas 1) kemudian dilarutkan kedalam asam sulfat dan untuk memproduksi logam nikel kelas 1 ini membutuhkan bijih nikel jenis *sulfide* yang mana saat ini cadangannya sudah terbatas. Di Indonesia sendiri, cadangan bijih nikel jenis *sulfide* sangat sedikit. Di sisi lain, cadangan bijih nikel jenis *laterite* sangat melimpah. Oleh karenanya, perlu dilakukan penelitian untuk mengolah bijih nikel *laterite* dari Indonesia ini untuk mensintesis *Nickel (II) Sulphate Hexahydrate*. Salah satu metode yang bisa digunakan, yaitu melalui gabungan proses pirometalurgi dan hidrometalurgi. Metode tersebut yaitu melalui rute *Smelting – Fire*

refining – Leaching seperti penelitian yang dilakukan oleh Jennifer pada tahun pada tahun 2014. Variabel penelitian yang digunakan yaitu laju alir oksigen yang digunakan saat *fire refining*. Oleh karena itu dilakukanlah penelitian dengan judul Studi Pengaruh Variasi Laju Alir Oksigen Terhadap Kadar Ni, Fe, dan Senyawa Produk Hasil Proses *Fire Refining Crude Feronikel Mini Blast Furnace (MBF)*.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah yang ada pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi laju alir oksigen pada proses *fire refining* terhadap komposisi kimia dalam produk?
2. Bagaimana pengaruh variasi laju alir oksigen pada proses *fire refining* terhadap senyawa dalam produk?
3. Bagaimana pengaruh variasi laju alir oksigen pada proses *fire refining* terhadap perolehan *Yield* Nikel?

1.3 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Crude Feronikel* berasal dari penelitian sebelumnya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi.
2. Jenis dan komposisi *crude* feronikel yang digunakan diasumsikan homogen.
3. Pengaruh penurunan dan peningkatan temperatur sebagai akibat perbedaan laju oksigen saat proses *fire refining* diabaikan
4. Laju hitung penggunaan Oksigen dan bahan bakar dianggap ideal

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian adalah sebagai berikut

1. Menganalisa pengaruh variasi laju alir oksigen pada proses *fire refining* terhadap komposisi kimia dalam produk
2. Menganalisa pengaruh variasi laju alir oksigen pada proses *fire refining* terhadap senyawa dalam produk
3. Menganalisa pengaruh variasi laju alir oksigen pada proses *fire refining* terhadap perolehan *Yield*.

1.5 Manfaat Penelitian

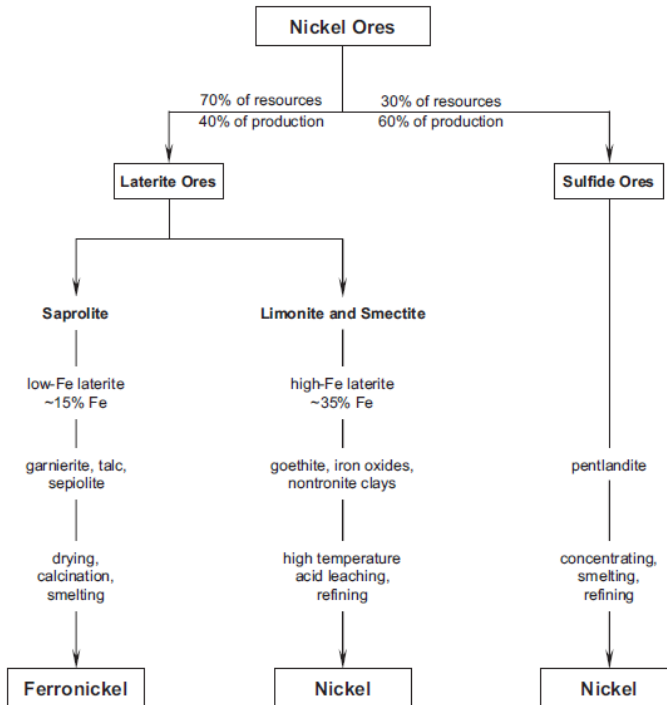
Hasil penelitian ini diharapkan memberikan analisis empiris mengenai bagaimana pengaruh laju oksigen pada *fire refining* terhadap komposisi dalam produk, senyawa dalam produk dan perolehan *Yield* yang maksimal.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nikel

Nikel (nomor atom 28; nomor massa 56,6934) termasuk dalam golongan VIIIB dalam Tabel periodik unsur bersama besi dan kobalt dan dikenal dengan sebutan “Tiga Serangkai”, sehingga sifat ketiganya cenderung mirip. Konfigurasi elektron kulit terluar dari unsur nikel adalah $3d^8 4s^2$ yang membuat valensinya +2. Karakteristik fisik dari logam dengan densitas $8,92 \text{ g/cm}^3$ ini antara lain memiliki temperatur lebur sebesar 1455°C dan titik didih $\pm 2915^\circ\text{C}$ (Polyakov, 2013). Nikel diperoleh secara komersial dari pentlandite dan pirotit di Kawasan Sudbury Ontario, yang menghasilkan 30% kebutuhan nikel dunia. Dan deposit lainnya dapat ditemukan didaerah Australia, Cuba, Indonesia dan Keledonia Baru. Nikel digunakan secara luas untuk produksi *stainless steel* ($\pm 58\%$), paduan logam berbasis nikel ($\pm 14\%$), pengecoran dan paduan baja ($\pm 9\%$), *electroplating* ($\pm 9\%$) dan baterai ($\pm 5\%$) (Mudd, 2010).

Nikel pada umumnya terbagi dua bijih yaitu *Laterite* dan *Sulfide* cadangan bijih nikel *laterite* di dunia ini lebih besar daripada bijih nikel *sulfide*, dimana bijih nikel *laterite* memiliki cadangan sebesar 70% dari total cadangan bijih nikel di dunia. Walaupun demikian, produksi nikel di dunia didominasi oleh bijih nikel *sulfide*, dimana produksi nikel dari bijih nikel *sulfide* menyumbang 60% dari total produksi nikel dunia. (Crundwell, 2011)

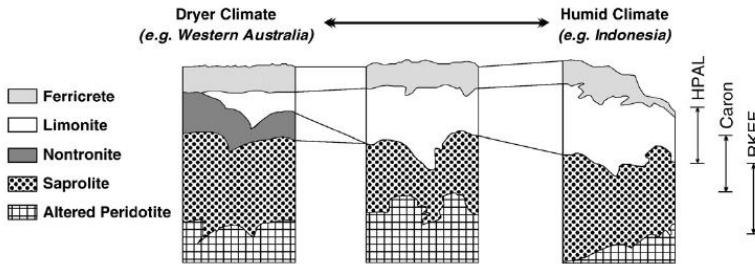


Gambar 2.1 Klasifikasi nikel ore (Crundwell,2010)

2.2 Nikel *Laterite*

Nikel *laterite* kebanyakan ditambang di daerah tropis seperti Indonesia, Philipina, dan Cuba. Nikel *Laterite* umumnya terbentuk di dekat permukaan akibat pelapukan batuan ultramafik yang kaya akan besi dan magnesium. Mineral *laterite* yang mengandung nikel umumnya terkandung dalam *limonit* dan *goethite*, kelompok *nickelferrous* dengan rumus senyawa $(\text{Fe},\text{Ni})\text{O}(\text{OH})$, dan biasanya ditambang dengan metode penambangan terbuka. Berbanding terbalik dengan *laterite*, mineral *sulfide* nikel biasanya ditemukan di bawah tanah dan umumnya membutuhkan infrastruktur pertambangan dan pekerja

bawah tanah dalam proses ekstraksinya. Mineral utama *sulfide* antara lain *pentlandite* ($[\text{Fe},\text{Ni}]_9\text{S}_8$), *pyrrhotite* (Fe_7S_8), *chalcopyrite* (CuFeS_2) (Hoatson *et al.*, 2006 dan Khoo *et al.*, 2017).



Gambar 2.2 Profil pelapukan pada biji nikel *laterite* (Pickles *et al.*, 2014)

Nikel *Laterite* memiliki dua klasifikasi berdasarkan komposisi dari biji Nikel *Laterite*. Yaitu *Saprolite* dan *Limonite*. Biji *Saprolite* memiliki besi dengan kadar rendah sekitar $<15\%$ dan konten MgO yang tinggi sekitar 70% . Kadar pada ore *Saprolite* biasanya ketika ditambang terletak dibawah lapisan *Limonite* yang mana semakin dalam galian maka konten MgO makin tinggi. Mineral yang dapat ditemukan pada *Saprolite* seperti *magnesium hydroxysilicates* yang terdiri *chysotile* $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Sedangkan ore *Limonite* memiliki konten besi yang tinggi berkisar pada $40\%-60\%$ dan konten MgO sekitar 3% (Crundwell, 2011). Kadar *Limonite* sendiri memiliki rumus senyawa $(\text{Fe},\text{Ni})\text{O}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ merupakan jenis *laterite* berbasis oksida yang paling dekat dengan permukaan dan tersebar pada daerah tropis maupun sub-tropis di sekitar garis katulistiwa. Biji *limonite* mengandung banyak besi hidroksida dalam bentuk *goethite* ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$). Laterit limonitik juga terasosiasi dengan dengan mineral silikat dan magnesium oksida yang mengantarkan pada rumitnya mineralogi sehingga sulit dibenefikasi secara fisik. (Pickles *et al.*, 2014). Namun antara biji nikel *Saprolite* dan *Limonite* memiliki kadar nikel sebesar $1.3\%-2.5\%$ (Crundwell, 2011)

Laterite sendiri akan memiliki 2 route proses yaitu proses *smelting* untuk memproduksi feronikel dan proses *leaching* dan *refining* untuk memproduksi nikel metal. *Saprolite* memiliki alasan kenapa harus di proses *smelting* yaitu:

1. *Saprolite* memiliki konten besi yang kecil sekitar 15% sehingga menghasilkan produk feronikel (20%-30% Ni)
2. *Saprolite* memiliki MgO yang tinggi sehingga jika di *leaching* akan menghasilkan asam sulfat yang berlebih

Limonite harus di proses *Leaching* karena

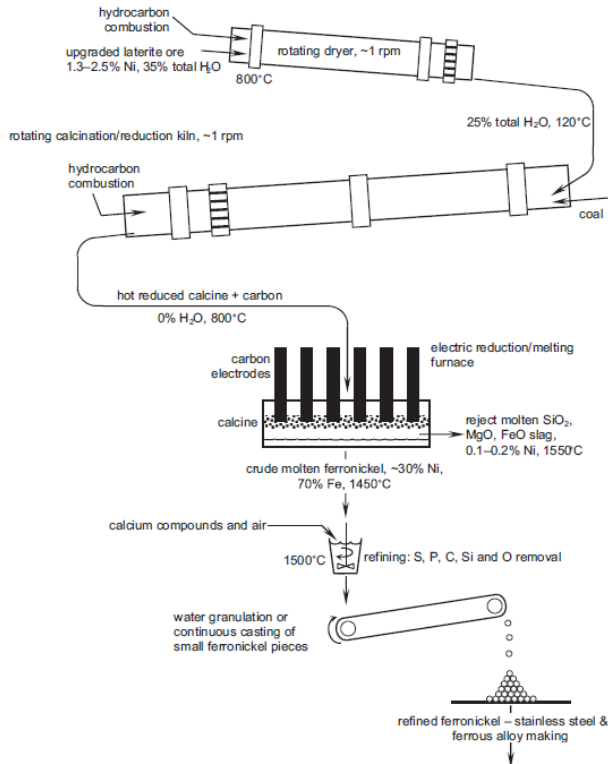
1. *Geothite* di *limonite* larut efisien di asam sulfat panas, jika suhunya cukup tinggi besi yang merupakan kandungan *limonite* sekitar (40%-60%) mengendap sebagai *hematit* atau *jarosit*
2. *Limonite* memiliki kandungan MgO yang rendah sekitar 3%. Yang berarti konsumsi asam sulfat rendah

2.3 Teknologi Pengolahan Ekstraksi Nikel *Laterite*

Nikel *laterite* dengan kadar 1.3%-2.5% nikel yang merupakan senyawa kompleks sehingga diperlukan cara yang berbeda dalam pengolahan tiap tipe *ore* nikel *laterite*. Jenis-jenis biji nikel *laterite* tersebut adalah bijih nikel *limonit* dan bijih nikel *saprolite*:

2.3.1 Ekstraksi Biji Nikel *Laterite Saprolite*

Bijih Nikel *Saprolite* diolah dengan tujuan untuk memproduksi feronikel, Feronikel adalah hasil dari proses setelah Biji Nikel mendapatkan proses *Smelting* dengan komposisi target kadar nikel feronikel adalah 30%. Feronikel akan diaplikasikan sebagai bahan campuran *alloy* untuk pembuatan *Stainless Steel*. Adapun proses pengolahan ekstraksi pada biji nikel *saprolite* disajikan pada Gambar 2.3



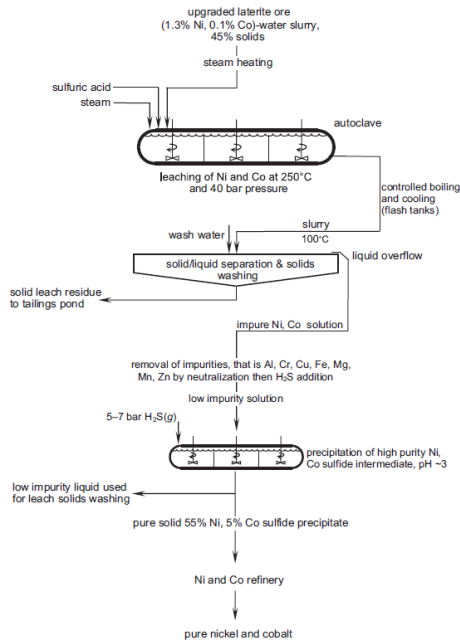
Gambar 2.3 Pengolahan biji nikel *saprolite* (Crundwell, 2010)

Bijih Nikel *Saprolite* ditambang bijih nikel tersebut masih mengandung kadar nikel yang rendah yaitu sekitar 1.3%-2.5% Ni. *Saprolite* haruslah ditingkatkan atau *Upgrading* kadarnya dengan cara 1. *crushing* 2. Memisahkan partikel mineral yang kaya-nikel, lunak, berkepadatan rendah dari batuan *prekursor* yang besar, keras, padat, tanpa-nikel, tidak-berserat, serta produk - produk samping, seperti kuarsa. Target dari *Upgrading* dengan kadar nikel 3%. *Feed* dari proses *Upgrading* tersebut biasanya dalam keadaan basah dan lembab (1.5%-3% Ni). Setelah itu *feed* tersebut akan di

Dewatering atau biasa disebut pengeringan di *Rotating Kiln* dengan 4m diameter dan panjang 30 m. *Kiln* tersebut dipanaskan dengan *coal*, *fuel oil* atau gas alam. Tujuan dari *Dewatering* adalah mengurangi 22% air dari *feed* tersebut. *Feed* kering tersebut dikirim langsung ke proses selanjutnya yaitu ke *Calcination Kilns* dengan diameter 5m dan Panjang 100m serta reduksi dengan reduktor karbon berupa batu bara di temperatur 800°C dengan tujuan memastikan *feed* tersebut kering 100% serta memastikan jumlah karbon cukup pada saat reduksi di proses *smelting* selanjutnya. Selanjutnya *feed* ini dilakukan proses *smelting* kedalam *furnace* yang berbentuk lingkaran dengan diameter 15m-20m, *Feed* tersebut dicampur dengan reduktor berupa batubara dan *fluks* berupa *limestone* serta ditingkatkan temperatur sampai diatas 1600°C. Pada proses *smelting* akan menghasilkan residu/sisa yang disebut *Slag* berupa lelehan SiO₂, MgO, FeO dan kadar nikel yang sangat kecil 0.1%-0.2% Ni. Lelehan *Fluks* dan lelehan Feronikel bersifat *immiscible* sehingga bisa dipisahkan dengan instrument *furnace* yang namanya *Taphole* karena memanfaatkan perbedaan densitas yang mana *Fluks* lebih ringan dari pada lelehan feronikel. Hasil dari Feronikel yaitu dengan target kadar nikel yaitu 20%-40% Ni. Pada tahap ini sebenarnya produk sudah bisa disebut sebagai feronikel namun belum bisa diterima dipasar karena adanya *impurities* yang tak diinginkan melalui proses *Refining* yaitu dimana *molten* feronikel tersebut ditembakkan udara dan senyawa kalsium sehingga kandungan Fosfor, Sulfur, Karbon, Silika, dan Oksigen yang tersisa terikat ke senyawa kalsium dan dapat dipisahkan dari feronikel. (Crundwell, 2011)

2.3.2 Ekstraksi Nikel *Laterite Limonitik*

Ore Limonitik biasanya di *leaching* dengan asam sulfat di temperatur 250°C dengan tekanan 40 bar. Pada temperatur tersebut Fe akan mengendap menjadi *hematite* Proses ekstraksi bijih nikel *limonitik* terdapat pada Gambar 2.4



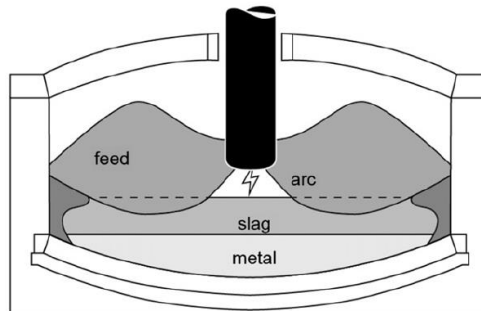
Gambar 2.4 Proses ekstraksi bijih nikel *Limonitik* (Crundwell,2010)

Prinsip ekstraksi *leaching* dikarenakan *ore Limonitik* memiliki kandungan Fe yang tinggi dan kadar MgO yang rendah. Proses diawali dengan pemanasan bijih *limonit* berupa *slurry* (45% Padatan). *Slurry* tersebut dimasukkan ke *autoclave* dengan asam sulfur dan uap panas pada temperatur 250°C dan dengan tekanan 40 bar. Dengan keadaan tersebut nikel akan larut dalam asam. Asam yang mengandung nikel tersebut akan keluar dari tank namun padatan yang tak larut akan berada dibawah tank yang akan dibuang ke kolam *tailing*. Namun campuran yang berisi nikel tersebut harus ditekan jumlah pengotornya dengan cara menambahkan H₂S sehingga kadar Al, Cr, Cu, Fe, Mg, Zn akan turun. Larutan yang sudah memiliki *purities* Nikel akan dipresipitasi dalam bentuk Nikel *sulfide* pH 3, serta memasukkan

kedalam *autoclave* yang diisikan gas H_2S dengan tekanan 5 – 7 bar. Hasil dari proses presipitasi adalah padatan presepsitasi nikel *sulfide* dengan kadar nikel 55% nikel dan cobalt 5%. Presipitat ini kemudian akan di *refining* menjadi nikel murni proses tersebut biasanya disebut dengan istilah HPAL (*High Pressure Acid Leaching*) (Crundwell, 2011). *Ore Limonitik* bukan hanya diolah secara hydrometalurgi saja, bisa gabungan antra hydrometalurgi dan pyrometalurgi yang biasa disebut *The Caron Proses* setelah bijih dikeringkan sekaligus direduksi pada suhu $\pm 700^\circ C$, logam akan diekstrak melalui *leaching* dalam lingkungan ammonia bertemperatur tinggi dengan umpan berupa larutan kaya kandungan logam (Dalvi, 2004)

2.4 *Smelting Dengan Mini Blast Furnace (MBF)*

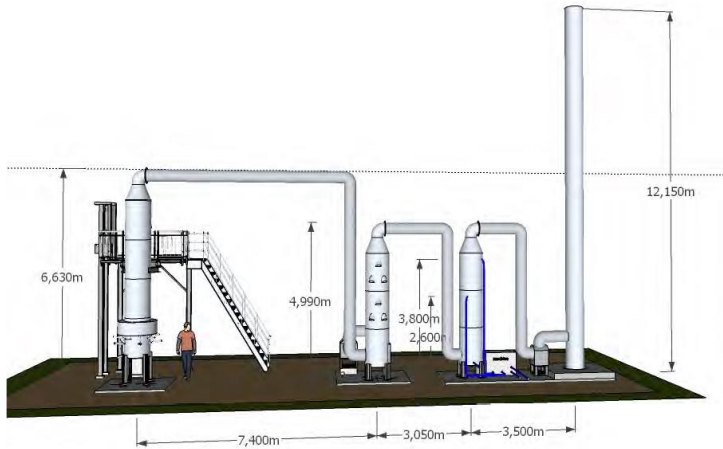
Produksi feronikel dari bijih *laterite* memerlukan energi tinggi, karena bijih *laterite* atau bijih pra-reduksi umumnya langsung dilebur untuk menghasilkan sejumlah kecil produk feronikel dan sejumlah besar *slag*. Tidak seperti bijih nikel *sulfide*, bijih nikel *laterite* tidak dapat di *upgrade* dengan penghalusan (*grinding*) dan metode lain yang bersifat fisik benefisiasi (Ameya, 2019). Karenanya hampir semua proses pengolahan nikel *laterite* menggunakan proses pirometalurgi terhadap kandungan nikel yang diatas 1.5%. Padahal lebih dari 50% cadangan dunia mempunyai kandungan $Ni < 1.45\%$. sehingga kurang menguntungkan bila diolah dengan proses pirometalurgi (Iwan, 2016). Dengan upaya itu banyak teknologi dengan prinsip reduksi langsung terhadap *ore* nikel salah satunya yaitu *Electric Arc Furnace (EAF)* dimana bijih yang telah di *upgrade* melalui *rotary kiln* dimasukkan ke EAF dilebur dengan tenaga listrik yang dikonversi ke energi panas dengan tujuan untuk mencapai titik reduksi dan leleh yaitu pada sekitar $1450^\circ C$ dimana terjadi reaksi reduksi langsung dengan karbon, biasanya EAF memiliki batang *anoda* yaitu berupa grafit yang bisa ditambah karena *anoda* tersebut bersifat *consumable*. (Crundwell, 2011)



Gambar 2.5 Ilustrasi EAF (Crundwell, 2010)

Salah satu teknologi *smelting* yaitu *Mini Blast Furnace*, Prinsip kerjanya hampir sama dengan *Blast Furnace* dimana terdiri dari 5 daerah yakni: daerah *well*, pembakaran, reduksi, pelelehan dan *preheating*. Daerah *well* adalah daerah paling bawah dari *Blast Furnace* yang menyimpan lelehan logam sampai di *tap* (pengeluaran lelehan metal). Daerah pembakaran adalah dimana udara ditiupkan kedalam *Blast Furnace* yang terjadi reaksi dengan karbon monoksida sehingga pada daerah ini adalah daerah terpanas pada *Blast Furnace*. Daerah reduksi adalah tempat oksida logam direduksi menjadi logam dengan memerhatikan kinetika dan termodinamika. Daerah pelelehan adalah daerah diantara daerah reduksi dan daerah *preheat*, daerah ini dibatasi oleh titik teratas *coke bed* dan titik awal terjadinya pelelehan logam. Daerah *preheat* adalah daerah ketika *feed* mendapatkan panas sehingga terjadi peningkatan temperatur. Pada *Mini Blast Furnace* adalah versi mini dari *Blast Furnace* yang tak mengubah prinsip dasar teknologi yang sudah ada yang dimana memiliki kelebihan seperti keuntungan secara ekonomi dan simplisitas. Karena ukuran dari *Mini Blast Furnace* lebih kecil sehingga proses kontrol dari pada *Blast Furnace*. Beberapa modifikasi pada *Mini Blast Furnace* yaitu menambahkan saluran bahan bakar gas apabila dibutuhkan untuk pencairan batuan atau logam yang membutuhkan panas yang sangat tinggi. Juga menambahkan *water scrubber* dengan cara mengalirkan gas buang ke dalam *drum drum* yang berisi air yang

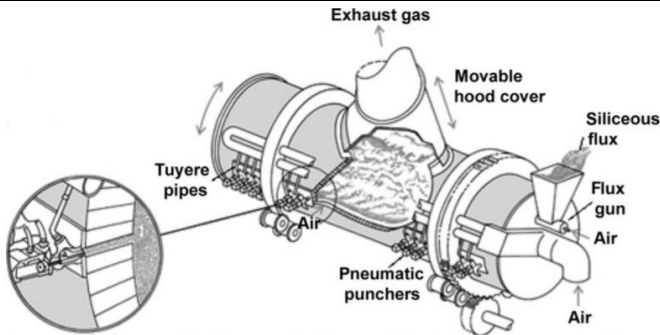
akan mereduksi gas partikel logam. Hasil dari proses ini yaitu *crude Feronikel* (Chainstain,2000)



Gambar 2.6 Mini Blast Furnace (MBF) (Abdul,2014)

2.5 Fire Refining

Pirometalurgi bekerja pada panas yang menghasilkan transformasi fisik dan kimia. Salah satunya yaitu proses *fire refining* (Haldar,2018) *Fire refining* adalah proses dengan tujuan menghilangkan sulfur dan oksigen didalam konverter atau *furnace* dalam dua tahap : tahap pertama Sulfide dioksidasi menjadi uap oksida dengan udara. Tahap kedua adalah menghilangkan oksigen yang berikatan dengan metal menggunakan gas hidrokarbon (Havlik,2008). Salah satu teknik *Fire Refining* juga dilakukan pada Industri tembaga yang menggunakan konverter *Pierce-Smith* (Gambar 2.5) yang menghilangkan sulfur dan oksigen pada *blister* tembaga. Yaitu dengan cara menembakkan udara O₂ untuk oksidasi dan bahan bakar hidrokarbon seperti LPG untuk reduksi (Davenport,2002).



Gambar 2.7 *Pierce-Smith Converter* (Seshadri, 2012)

Fire refining menggunakan rendaman turbulen yang diinduksi secara mekanis dan udara yang diperkaya oksigen menunjukkan bahwa konversi langsung nikel sulfide dimungkinkan secara komersial. Setelah penghilangan secara oksidasi zat besi (Fe), peniupan dan agitasi mekanis bisa menurunkan kandungan sulfur menjadi sekitar 2% dengan temperatur 3000 F atau 1648,889 °C. (O'Neil, 1970). Proses pemurnian Nikel *matte* juga menggunakan konverting oxidazing yang tujuannya adalah untuk menghilangkan Fe di cairan nikel *matte* yaitu dengan cara menghembuskan udara ke *molten matte* yang baru saja di *tapped* dari *blast furnace* dimana proses bersifat *exothermic*, yang tak membutuhkan energi/panas luar karena panas energi berasal dari proses oksidasi di *converter* (Crundwell, 2011). Semakin murni logam yang diinginkan maka akan sulit proses pemurniannya, hal tersebut terlihat pada persamaan 2.1 menunjukkan bahwa entropi suatu komposisi kimia larutan akan berubah pada saat keenceran yang tinggi, dan sehingga akan makin sulit menghilangkan banyak impuritiesnya. Disisi lain *Ore Oksida* tak akan menghasilkan reaksi panas, memerlukan penggunaan energi dari sumber lain untuk peleburan. (Budworh,C,1994)

$$S_A^m = -\frac{G_A^m}{T} = -R \ln N \quad (2.1)$$

Dimana S_A^m Entropi elemen A, G_A^m adalah energi bebas gibbs molar elemen A, T adalah temperature, R adalah ketetapan gas dan N adalah aktivitas dari elemen A (Budworh, C, 1994).

Adapun kelebihan dari *Fire Refining* adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan efesiensi operasi dengan keadaan operasi *melting (Exothermic)*
2. Penambahan oksigen pada tekanan rendah menguntungkan karena mengurangi kebutuhan untuk menggabungkan semua oksigen yang diperlukan untuk desulfurisasi akhir selama perlakuan hembusan oksigen ke permukaan karena itu bisa menghindari masalah kemungkinan terbentuknya sampah oksida nikel yang tak diinginkan

Fire refining sendiri adalah teknologi lama yang dipakai dalam dunia pemurnial logam. Untuk mencapai hasil maksimal dilakukan perhitungan *Yield* atau rendemen sesuai persamaan dibawah (Ricson,2015):

$$\text{Yield} = \frac{\text{Massa hasil } fire \text{ refining} \times \%Ni \text{ dalam Feronikel}}{\%Ni \text{ dalam Crude Feronikel} \times \text{Massa sampel}} \times 100\% \quad (2.2)$$

2.6 Termodinamika *Smelting* dan *Fire Refining*

Diagram Ellingham berisi plot dari gibbs standar *free energy* pembentukan kelompok senyawa terhadap temperatur. Pada Gambar 2.6, oksida yang paling tidak stabil berada dibagian atas diagram dan paling stabil adalah bagian bawah. Semua garis bisa dilihat dengan persamaan $A + O_2 = AO_2$ dimana satu mol gas oksigen terlibat, untuk menunjukkan tekanan oksigen dalam keadaan setimbang. Diagram tersebut dibentuk dari plot ΔG° (perubahan energy bebas gibss) terhadap temperatur (T). Dengan persamaan :

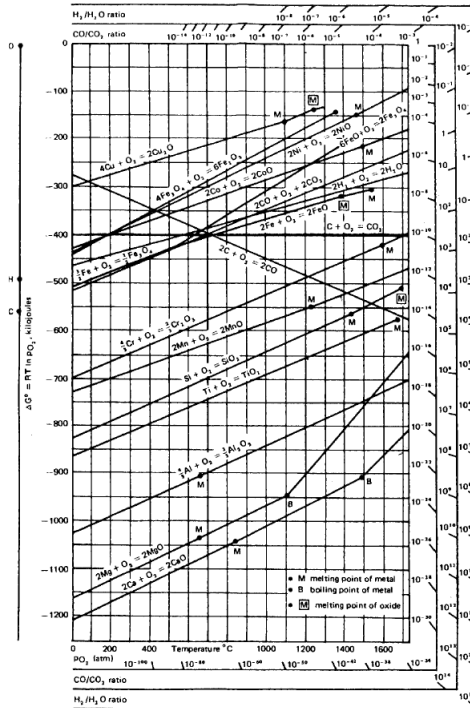
$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.3)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (2.4)$$

Dimana ΔG° adalah Standar Gibss Energy, ΔH° adalah enthalpi, ΔS° adalah standar perubahan entropi, K adalah

konstanta ekuilibrium, dan n adalah nomor elektron. ΔG° dengan nilai negatif menunjukkan bahwa suatu reaksi terjadi secara spontan tanpa energi luar dan melepaskan energi atau eksotermik, Serta makin sukar membentuk oksida atau sulit dioksidasi dan mudah di reduksi sementara reaksi dengan ΔG° positif menunjukkan reaksi tak akan terjadi secara spontan dan membutuhkan energi luar atau endotermik, serta makin tak stabil dalam bentuk oksida atau mudah dioksidasi (Jeffes,2001). Dari diagram Ellingham dapat diketahui temperatur minimal untuk terjadinya suatu reaksi. Termodinamika hanya dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu reaksi dapat berjalan spontan atau tidak pada temperature tertentu berdasarkan energi bebas Gibss yang dimiliki, namun tidak dengan laju reaksi yang dimiliki. Secara umum diagram Ellingham memiliki 4 kegunaan:

1. Untuk menentukan tingkat kemudahan reduksi logam oksida menjadi logam
2. Untuk menentukan tekanan parsial oksigen pada temperature tertentu agar logam oksida dapat tereduksi
3. Untuk menentukan rasio karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) pada temperatur tertentu agar logam oksida dapat tereduksi
4. Untuk menentukan rasio hydrogen (H) dan karbon dioksida pada temperatur tertentu agar logam oksida dapat tereduksi (Stratton, 2013)



Gambar 2.8 Diagram Ellingham (Jeffes, 2001)

Pada Gambar 2.6 dilihat bahwa nikel memiliki afinitas oksigen yang lebih rendah daripada besi, silica, dan sulfur. Sehingga cenderung nikel lebih sulit untuk dioksidasi. Hal ini dimanfaatkan pada proses *fire refining*.

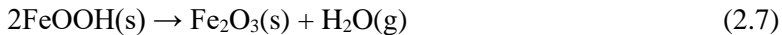
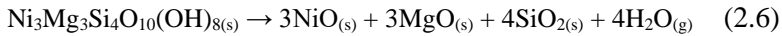
Dalam proses *Smelting* sampai *Fire Refining*, terjadi beberapa reaksi yang melibatkan feronikel, diantaranya:

2.6.1 *Smelting*

Dalam proses *Smelting* terjadi beberapa reaksi dalam pembentukan *Crude Feronikel*. Penguapan air dalam liquid menuju gas pada temperatur 100°C

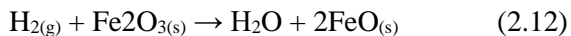
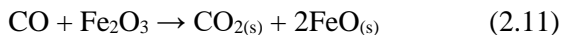
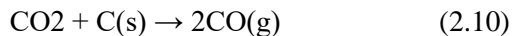
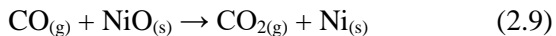
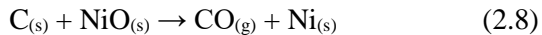


Disosiasi dari *ore laterite* menjadi oksida dan $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ pada temperatur 700°C



(Crundwell, 2010)

Reduksi dari hasil oksida dengan batu bara/*coal* dan reduksi langsung gas pada temperatur 800°C

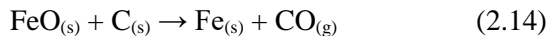


(Warner et al,2006)

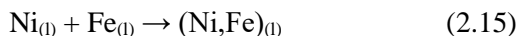
Reduksi Nikel Oksida menjadi nikel logam pada temperatur 900°C - 1400°C



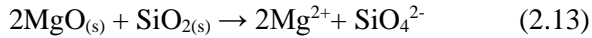
Reduksi besi oksida menjadi besi logam pada temperature 900°C - 1450°C



Lelehan dari nikel dan besi membentuk lelehan feronikel pada temperature 1450°C



Reaksi lelehan dan pepaduan sisa oksida (SiO_2 , MgO , FeO), membentuk *slag* pada temperature 900°C - 1550°C

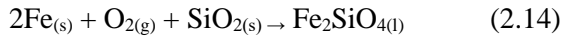


(Crundwell,2011)

2.6.2 *Fire Refining*

Dalam proses *fire refining* terjadi beberapa reaksi yang melibatkan *crude* feronikel, diantaranya :

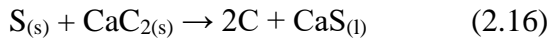
Reaksi Oksidasi Fe dan penambahan *flux* untuk pengikatan Fe menjadi *slag*



Reaksi oksidasi sulfur pada temperature 1400°C

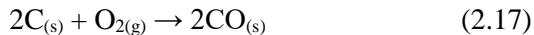


Sulfur bisa dihilangkan dari feronikel dengan cara menambahkan kalsium carbide CaC_2 pada temperature 1550°C

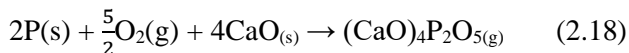


(Kellog,1987)

Reaksi oksidasi karbon dengan memberikan oksigen pada temperatur 1550°C

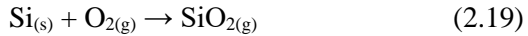


Reaksi penghilangan Phosphor dengan cara pembentukan dari Feronikel menjadi *slag* cair dengan mereaksikan dengan *limestone*, CaO dan Oksigen



(Kellog, 1987)

Reaksi penghilangan silika dengan cara oksidasi pembentukan silika Oksida pada temperatur 1550°C

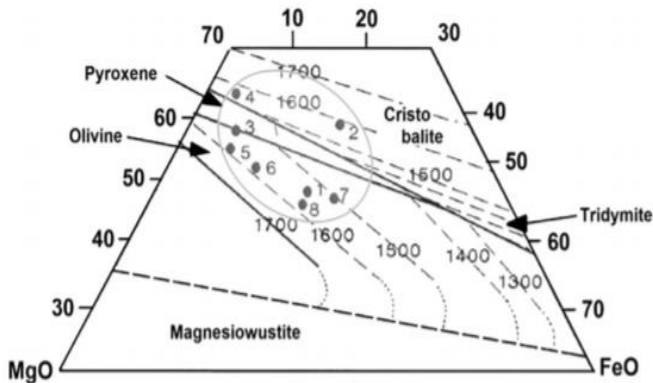


Produk akhir dari *fire refining* ore laterite dengan proses smelting didapatkan dengan 39%Ni, Co 0,93%, 0,06%C, 0,04%S, 0,35%Si, 0,01%P, 0,02%Cr, Fe *remainder*

(Crundwell, 2010)

2.7 Crude Feronikel

Crude Feronikel merupakan hasil dari proses *smelting* dengan *ore laterite* yang memiliki komposisi berdasarkan Tabel 2.1, *Melting* temperatur yang dipakai kisaran 1400°C-1450°C, namun *feed* umpan input untuk proses *smelting* memiliki spesifikasi sesuai pada Tabel 2.2 (Solar, 2008). *Slag* feronikel sendiri adalah berupa ionik yang meleleh pada temperatur 1500°C, yang pada umumnya terdiri dari kation Mg^{+2} dan Fe^{+2} , serta anionnya umumnya adalah SiO_4^{4-} . Komposisi *Slag* dari feronikel adalah sebagai berikut 40–55% SiO_2 , 20–35% MgO , 5–20% FeO , 1–7% CaO dan 1–2% Al_2O_3 namun juga tergantung pada umpan pada *smelter*. Komposisi feronikel bervariasi dari Ni 20%-40% dan Fe 60%-80% (Crundwell, 2010). Kebanyakan feronikel digunakan untuk perusahaan baja sebagai bahan baku pembuatan *stainless* dan *heat-resistant steels* khususnya dari pengolahan *ore laterite* (Rauf 2014). *Slag Feronikel* juga digunakan banyak untuk aplikasi konstruksi industri seperti pemakaian *slag* pada beton dan konstruksi jalan sebagai pengganti *limestone*.



Gambar 2.9 Diagram fasa dari FeO-SiO₂-MgO
(Komnitsas, 2009)

Gambar 2.9 diatas menjelaskan tentang nominal *slag* dari komposisi pengolahan feronikel. Dari sana bisa dilihat komposisi *slag* kaya akan iron oxide (38-40wt%), Al₂O₃ (8-11wt.%), MgO (2-6wt%), CaO(3-4wt%) dan Chromium oxide (2-3wt%) dan juga sejumlah kecil nikel (0,09%) (Komnitsas, 2007). Dengan tingginya silika dan alumina membuat *slag* sangat memungkinkan memproduksi semen aktif alkali (Maria, 2017). Secara ekonomi dan biaya operasi pembuatan feronikel melalui *smelter* lebih murah dibandingkan *leaching*. Komposisi *Crude Feronikel* terdapat pada Tabel 2.2

Tabel 2.1 Komposisi umpan smelting untuk proses *crude* feronikel

Unsur	Persentase umpan (%)
Ni	1.5-3
Co	0.04-0.08
Fe	15
O	5 (berikatan dengan Ni,Co, dan Fe)
SiO ₂	40
MgO	25

Al ₂ O ₃	1
Ikatan kimia dengan H ₂ O	11

Tabel 2.2 Komposisi *Crude* Feronikel (Crundwell, 2010)

Unsur	Persentase Feronikel (%)
Ni	22
Fe	73
Co	0,9
C	1,55
Si	0,65
P	0,012
S	0,38
Cr	0,49

2.8 EDX-SEM dan XRD

Banyak pengujian yang bisa dilakukan untuk menganalisis sebuah unsur ataupun fasa, adapun dari mereka sebagai berikut

2.8.1 EDX-SEM

Energy Dispersive X-Ray atau EDX adalah sebuah teknik analisis unsur yang terkait dengan mikroskop electron berdasarkan generasi karakteristik Xrays yang mengungkapkan keberadaan unsur-unsur yang ada dalam specimen, spektrum analisis mikro EDX berisi informasi semi-kualitatif dan semi-kuantitatif. EDX dapat dianggap sebagai alat yang berguna dalam semua pekerjaan yang membutuhkan penentuan elemen, endogen atau eksogen, dalam jaringan, sel atau sampel lainnya. Instrumen SEM adalah salah satu analisis yang paling banyak dan populer dipakai, SEM terdiri dari senapan electron yang memproduksi berkas electron pada tegangan sebesar 2-30 Kv. Berkas electron tersebut dilewatkan pada beberapa lensa elektromagnetik untuk menghasilkan gambar berukuran kecil 10nm pada sampel yang ditampilkan dalam bentuk film fotografi atau tabung layer. Adapun cara kerja dari SEM adalah *electron gun* memproduksi *electron beam*, anoda menangkap *electron*

beam untuk kemudian diarahkan ke sampel kemudian serangkaian lensa magnetik memfokuskan beam ini dan menembakkan ke sampel, *scanner* membaca struktur permukaan sampel selanjutnya menangkap sinyal dari *secondary* dan *back scattered electron* untuk dikirim ke sistem kontrol sehingga dapat dilihat gambarnya pada monitor dan dapat dicetak bila diperlukan (Agus, 2012).

2.8.2 XRD

Difraksi sinar-x (XRD) merupakan metode analisa yang memanfaatkan interaksi antara sinar-x dengan atom yang tersusun dalam sebuah system kristal. XRD merupakan analisa yang digunakan untuk menganalisa dan mengidentifikasi keberadaan suatu senyawa dengan mengamati pola pembiasan cahaya akibat dari berkas cahaya yang dibiaskan oleh material yang memiliki susunan atom pada kisi kristalnya. Setiap senyawa terdiri dari atom-atom yang membentuk bidang tertentu. Jika sebuah bidang memiliki bentuk tertentu maka partikel cahaya (foton) yang datang dengan sudut tertentu hanya akan menghasilkan pola pantulan maupun pembiasan yang khas. Dengan kata lain, tidak mungkin foton yang datang dengan sudut tertentu pada sebuah bidang dengan bentuk tertentu akan menghasilkan pola pantulan ataupun pembiasan yang bermacam-macam (Agus,2012)

2.9 Penelitian Sebelumnya

Perbedaan *Fire Refining* dan *Refining* terletak pada proses namun tujuannya sama yaitu mengoksidasi unsur-unsur yang tak diperlukan seperti Fe, Si, S, P, Co dan Ni sesuai kemampuan oksidasi oksida pada diagram Ellingham. Pada penelitian yang dilakukan oleh Charles E. O'Neil dkk pada 1970 bahwa nikel *matte* dan *scrap* lainnya diubah menjadi nikel cair dengan meniupkan udara ke permukaan cairan di bak turbulen menemukan bahwa *impurities* seperti lead, zinc, cadmium, bismuth dan antimon dapat diturunkan keningkat persentase yang sangat rendah, dengan

penelitian dan metode ini memberikan produk nikel dengan kandungan gas terlarut yang rendah, dan cocok untuk pengecoran kontinu. Pemaksimalan juga bisa dengan mengimprovisasi secara termodinamika dan kinetik dengan cara *molten bath* dibuat secara turbulen. Penambahan karbon, silikon, aluminium atau kalsium silikon menyebabkan nikel mengalami deoksidasi (proses pembuangan oksigen berlebih dari cairan logam dengan penambahan material yang mempunyai afinitas yang tinggi terhadap oksigen sehingga oksigen dapat diikat). Deoksidasi Pada penelitian ini diberikan temperatur pada rentang 1200°C sampai 1600°C dan penambahan karbon (O'Neil, 1970)

Penelitian selanjutnya yaitu dari Jennifer tentang produksi Baterai *NMC*, pembuatan nikel untuk *NMC* melalui proses *ore sulfide* yang telah di *smelting* dan *roasting* hasil nikel *sulfide* tersebut di *casting* menjadi anoda dan dibawa ke fasilitas elektrolisis untuk membuat nikel yang *high purity* atau di *roasting* untuk menghasilkan nikel *oxide sinter*. Pemisahan dari *laterite* membutuhkan komponen kimia untuk ekstrak nikel, salah satunya yaitu dengan teknik prometalurgi yang menghasilkan nikel *matte*. Oksidanya bisa diproduksi dari *roasting* atau *refining*. Hidrometalurginya adalah proses *leaching* amonia atau asam sulfat. Beberapa teknik diatas memungkinkan untuk membuat nikel sulfat. Penelitian tersebut memakai nikel *oxide* dicampur dan direaksikan dengan asam sulfat (dalam keadaan aqueous dengan asumsi 9.82%wt) di 49°C. Mereka berasumsi panas *mixing* dan reaksinya dapat diabaikan. Energi kosumsi untuk produksi NiSO_4 adalah energi yang terkait dengan pemanasan reaktan, yang merupakan larutan H_2SO_4 dan NiO dengan menyesuaikan *heat capacity* (CP) 3.84 Jg /°C dengan 9.92 wt% larutan H_2SO_4 . Cp dari NiO dengan temperature 25°C dan 49°C dapat dikalkulasi dengan persamaan 2.22. Dengan ini penelitian ini beranggapan bahwa penambahan gas bumi diperlukan untuk produksi NiSO_4 dengan tingkat efesien 80%. Akibatnya nilai input untuk konsumsi energi produksi NiSO_4 di GREET adalah 0,66 mmBtu / ton NiSO_4 . Jumlah H_2SO_4 dan NiO yang dikonsumsi dalam reaksi didasarkan

pada stoikiometri. Mereka berkesimpulan sulit untuk memperoleh Ni murni dalam keadaan NiO yang dilelehkan dan diberikan oksigen, *fire refining* akan memberikan tampak nikel seperti warna abu-abu kehitaman, lebih baik dikonversi langsung menjadi NiSO₄ (Jeniffer, 2014)

$$C_{p,NiO}=11.3+0.00215T \quad (2.20)$$

Pada penelitian yang dilakukan oleh Barton dan Brimacombe meneliti *driven flow* di permukaan (Marangoni effect) cair tembaga terhadap kinetik proses oksidasi. Dengan menghembuskan oksigen murni 1mm diatas molten metal secara vertikal dengan laju alir 500cm³/min dan 2000cm³/min di temperatur 1200°C. Melaporkan bahwa liquid *copper* mengalami oksidasi linear terhadap waktu. Menggunakan *quartz window* mereka mengobservasi dan menemukan pembentukan *patch* oksida padat ditengah permukaan cair, yang artinya terjadi peningkatan oksidasi akibat efek *Marangoni*. Dengan menggunakan partikel alumina yang jatuh ke permukaan cair, author mengukur kecepatan penyebaran permukaan cair dan menghubungkan koefisien perpindahan massa, dalam hal ini Barton dan Brimacombe menganggap fasa cair menjadi pembatas laju proses oksidasi (Barton, 2000)

Pada penelitian yang dilakukan oleh D.J Progan dan B.W Lewis di NASA dengan judul pengaruh oksidasi kinetik di nikel dengan laju alir oksigen dan nitrogen, penelitian tersebut menggunakan laju alir udara 0,001840595 m³/min, 0,00368119 m³/min, 0,0058049536 m³/min dan 0,007928717m³/min dan temperatur menggunakan variasi 815,5 °C, 954,5°C, 1232,2°C, dan 1371°C didapatkan bahwa laju alir udara tidak ada efek terukur terhadap *rate* dari oksidasi nikel. Laju konstanta *kp* dan energi aktivasi *Ea* menentukan alasan kenapa hal tersebut bisa terjadi. Nilai *Ea* pada peneletian ini diantara 42,3 dan 46,5 kcal/mole. Pengaruh efek O₂ mengindikasikan nilai *kp* tergantung pada P1/nO2 dimana nilai *n* diantara 7.14 sampai 5.14 Secara teori nilai *n* mekanisme difusi dari ion Ni⁺² ke lattice NiO adalah 6, nilai

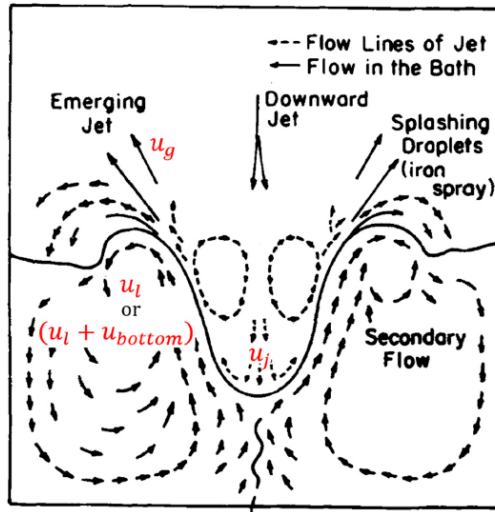
tersebut diperoleh dari penelitian ini yang cenderung mengindikasikan bahwa mekanisme mungkin bertanggung jawab atas sebagian besar laju oksidasi. Mekanisme lain berkontribusi pada tingkat yang bervariasi sesuai temperature dan laju aliran. Penurunan laju rekasi tampaknya menjadi anomaly dengan meningkatnya laju aliran O₂ yang belum dapat dijelaskan tetapi efek seperti itu mungkin disebabkan oleh phenomena permukaan yang berkaitan dengan nukleasi dan kristalisasi (D.J Progan, 1964)

Penelitian oleh Ameya Kadolkar tahun 2019, reaksi oksidasi sangat menguntungkan pada temperature tinggi dan aspek termodinamik. Author menggabungkan antara afinitas dan difusifitas pengotor. Tranfer massa pengotor berkolerasi dengan aliran gas oksigen. Mengasumsikan bahwa kuantitas oksidasi pengotor sesuai setara stoikiometri dari perhitungan oksigen input untuk pemurnian di zona emulsi. Berdasarkan korelasi ini pengukuran laju oksidasi pengotor dalam logam panas yang bersentuhan dengan lapisan FeO yang mengandung *slag* berbeda dari zona tumbukan oksigen dalam pembuatan baja. Pada zona tumbukan oksigen, turbulensi yang kuat dihasilkan karena pelepasan jet oksigen dan ada sejumlah terak yang bersentuhan dengan rendaman logam, karena terak slag dipindahkan oleh O₂ ke arah lateral. Penelitian ini berfokus pada laju *refining* dari *impurities* seperti karbon, silicon, dan mangan di reaksi berbeda untuk memprediksi metal dan *impurities* melalui tiupan oksigen. Author beranggapan laju *refining* dikontrol berdasarkan tranfer massa dari pengotor di logam pada antarmuka gas logam dan logam terak dengan persamaan:

$$W_{[X]} = \frac{J_{[X]}M_X}{1000} = \left(\frac{k_{X-gm}A_{gm}\rho_m}{100} \{ [wt \% X]_b - [wt \% X]_{i-gm} \} \right) + \left(\frac{k_{X-sm}A_{sm}\rho_m}{100} \{ [wt \% X]_b - [wt \% X]_{i-sm} \} \right) \quad (2.21)$$

Dimana $W_{[X]}$ adalah berat larutan terbuang (kg/s), X menunjukkan Si dan Mn terlarut dalam liquid metal. $J_{[X]}$ mole yang larut terbuang per waktu (mol/s), M_x berat molekul terlarut, dan subscript *gm* dan *sm* yang ada di gas metal dan slag metal. A adalah

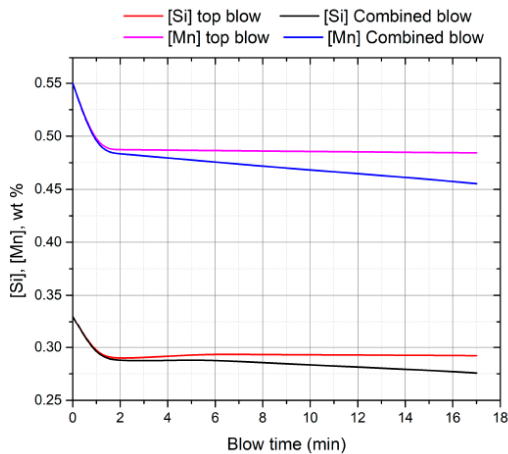
luas permukaan kontak daerah. ρ adalah densitas dari *hot metal*. k_x adalah koefesien massa transfer dari pelarut (m/s). $[\text{wt \% X}]_b$ and $[\text{wt \% X}]_i$ konten terlarut di *bath*.



Gambar 2.10 Aliran fluida pada *Impact Zone* (Ameya,2019)

Gambar diatas menunjukkan fenomena daerah dampak dari oksigen proses *steelmaking*. Tembakan atas gas oksigen membentuk *cavity* dan pemindahan liquid metal karenanya menyebabkan pembaruan terus-menerus. Tembakan oksigen terhambat oleh liquid metal dan kecepatan udara berkurang karena tubrukan u_j . Jet gas muncul dalam arah radial kearah luar dengan kecepatan lebih rendah yang disebut gas *tangensial* u_g . Gesekan gas momentum digunakan untuk menghasilkan tetesan sementara momentum jet gas menginduksi aliran *eddy* bak melingkar yang membawa elemen-elemen seperti C,Si dan Mn ke permukaan logam. Berdasarkan dasaran diatas author menjelaskan dampak jarak antara *lance* dengan permukaan cairan tembakan dimana menurunnya tinggi lance maka akan menurunkan kecepatan alir ke cairan logam namun juga meningkatkan radius dan kedalam

rongga cairan logam serta momentum transfer oleh oksigen ke rongga cairan sehingga energi transfer lebih efisien. Nilai mass transfer koefisien ditentukan oleh tinggi *lance* dan parameter putaran kinetik cairan logam. Efek refining terhadap tiupan dari atas oksigen menyebabkan konten Si, Mn dan C berkurang signifikan dikarenakan oksidasi dengan oksigen dengan perkiraan konten maksimal pada silikon yaitu 0,25wt%

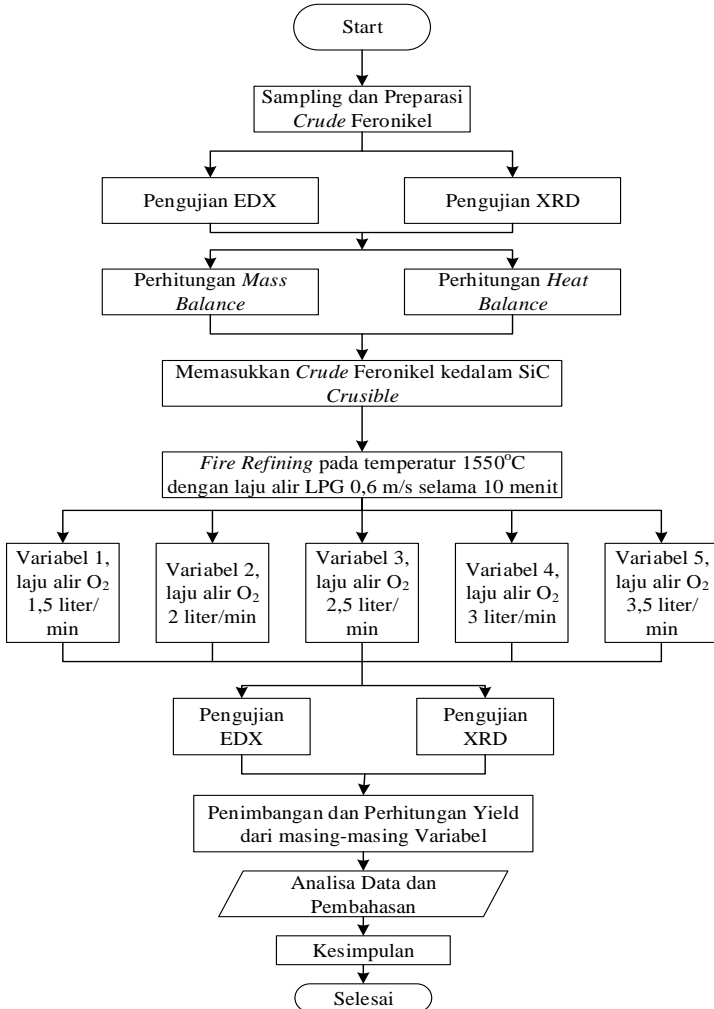


Gambar 2.11 Pengaruh kadar oksigen terhadap kadar Si dan Mn (Ameya, 2019)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Percobaan

3.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang dipergunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Feronikel

Feronikel yang dipakai adalah sampel hasil penelitian *smelting* di departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS dengan persentase unsur pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Kadar unsur spesimen hasil spesimen departemen Teknik Material dan Metalurgi

No	Unsur	Uji 1 (%)	Uji 2 (%)	Uji 3 (%)	Rata-Rata (%)
1	Ni	26.41	23.88	30.57	26.95
2	Fe	70.73	71.8	61.12	67.88
3	S	0.575	1.955	5.95	2.83
4	P	-	0.425	0.42	0.282
5	Co	1.155	-	1.29	1.02
6	Si	1.125	1.94	0.65	1.24
Total					100



Gambar 3.2 Feronikel

3.2.2 Gas LPG

Gas LPG (Liquid Petroleum Gas) untuk pembakaran pada proses *fire refining*



Gambar 3.3 LPG

3.2.3 Gas Oksigen

Gas Oksigen untuk pembakaran dan oksidasi pengotor pada proses *fire refining*



Gambar 3.4 Tabung oksigen 1m³

3.3 Peralatan Penelitian

Adapun peralatan penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

3.3.1 Anemometer

Anemometer adalah alat untuk mengukur kecepatan udara pada gas elpiji



Gambar 3.5 Anemometer

3.3.2 Timbangan Digital

Timbangan digunakan untuk menimbang feronikel dan hasil *fire refining*



Gambar 3.6 Timbangan Digital

3.3.3 Lance Gas LPG dan Oksigen

Lance digunakan adalah Lance Morris dengan Acetylene Cutting Tip model 75051 dengan diameter tip yaitu 5mm untuk mengalirkan gas LPG dan Oksigen serta menciptakan api yang digunakan pada proses fire refining.



Gambar 3.7 Lance

3.3.4 SiC Crucible

SiC *crucible* digunakan sebagai wadah feronikel hasil *MBF* dan berlangsungnya proses *fire refining*



Gambar 3.8 SiC *crucible*

3.3.5 Termometer *Infrared*

Termometer *infrared* digunakan untuk mengetahui temperatur saat proses *fire refining*.



Gambar 3.9 Termometer *infrared*

3.3.6 Valve Untuk Gas LPG dan Oksigen

Valve untuk gas LPG dan oksigen digunakan untuk mengatur laju alir gas oksigen dan LPG yang mengalir dari tabung ke lance.



Gambar 3.10 Valve gas LPG dan oksigen

3.4 Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Proses *Fire Refining*

Adapun preparasi material yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Preparasi sampel crude feronikel hasil *smelting* yang telah diuji EDX dan XRD
2. Memotong Ferronikel tersebut menjadi 5 sampel masing-masing dengan massa 19-21 gram
3. Melakukan perhitungan *mass balance* dan *heat balance*
4. Melakukan proses *fire refining* logam feronickel dengan variabel tetap berupa laju alir gas LPG sebesar 4 m/detik dan waktu selama 10 menit. Variabel bebas yang digunakan ialah laju alir oksigen sebesar 1,5, 2, 2,5, 3 dan 3,5 liter/min
5. Penimbangan produk *fire refining*
6. Pengujian produk *fire refining* masing-masing variabel dengan XRD dan EDX serta perhitungan *yield Ni*
7. Pemilihan variabel proses *fire refining* mana yang memiliki produk dengan kadar Ni tertinggi.

3.4.2 Pengujian Sampel

Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan data yang sesuai dengan tujuan dari penelitian. Pengujian tersebut antara lain:

1 Pengujian EDX

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy atau EDX adalah suatu teknik yang digunakan untuk menganalisa elemen atau karakteristik kimia dari suatu sampel. Prinsip kerja dari alat ini adalah metode spektroskopi, dimana elektron ditembakkan pada permukaan sampel, yang kemudian akan memancarkan X-Ray. Energi tiap-tiap photon X-Ray menunjukkan karakteristik masing-masing unsur yang akan ditangkap oleh detektor EDX, kemudian secara otomatis akan menunjukkan puncak-puncak dalam distribusi energi sesuai dengan unsur yang terdeteksi. Hasil yang didapatkan dari pengujian EDX adalah berupa grafik energi (KeV) dengan counts. Dari data grafik tersebut kita bisa melihat unsur-

unsur yang terkandung di dalam suatu sampel beserta persentasenya. Alat yang digunakan untuk uji EDX ditunjukkan seperti pada Gambar 3.11 EDX yang dipakai adalah EDX di Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS



Gambar 3.11 Instrument EDX

2 Pengujian XRD

Untuk mengetahui struktur kristal dan senyawa secara kualitatif dilakukan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dari sampel hasil reduksi dengan menggunakan alat XRD PAN Analytical. Sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV sampai 1 MeV. Sinar-X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Spektrum sinar X memiliki panjang gelombang 103 - 10 nm, berfrekuensi 1017 - 1020 Hz dan memiliki energi 103 - 106 eV. Panjang gelombang sinar-X memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan sebagai sumber difraksi kristal. XRD digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki orde yang sama. Alat yang digunakan untuk uji XRD PAN Analytical ditunjukkan seperti pada Gambar 3.12.

XRD yang dipakai adalah XRD Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS



Gambar 3.12 Instrument XRD

3.5 Perhitungan *Yield*

Perhitungan *Yield* berdasarkan literatur yang ada dengan mempertimbangkan massa sebelum di *Fire Refining* dan sesudah di *Fire Refining* sesuai yaitu pada Persamaan 4.1

$$Yield = \frac{\text{Massa hasil } fire \text{ refining} \times \%Ni \text{ dalam Feronikel}}{\%Ni \text{ dalam Crude Feronikel} \times \text{Massa sampel}} \times 100\% \quad (4.1)$$

3.6 Neraca Massa *Fire Refining Crude Feronikel*

Proses *Fire Refining* yang akan dilakukan memerlukan perhitungan massa bahan yang akan dijadikan *feed* material. Perhitungan dilakukan berdasarkan persamaan proses *fire refining crude* feronikel dari proses *smelting* di *Mini Blast Furnace* (MBF). Komposisi didapat adalah hasil EDX dan XRD, Kebutuhan oksigen yang diperlukan adalah hasil jumlah mol oksigen untuk pengoksidasian pada keadaan ideal atau sempurna sesuai pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Target *fire refining crude* feronikel

Unsur Input	Massa input (gr)	Mol	Output	Massa Output (gr)
Ni	5,7347093	0,097695	Ni	5,734709
Fe	14,4442326	0,257933	FeO	18,57116
S	0,60219767	0,018819	SO ₂	1,204395
P	0,06000698	0,001936	P ₂ O ₅	0,137435
Co	0,21704651	0,003679	CoO	0,275907
Si	0,26386047	0,009424	SiO ₂	0,565415
O ₂	5,166964508	0,16146764		
Total	26,48902	0,16146764		26,48902

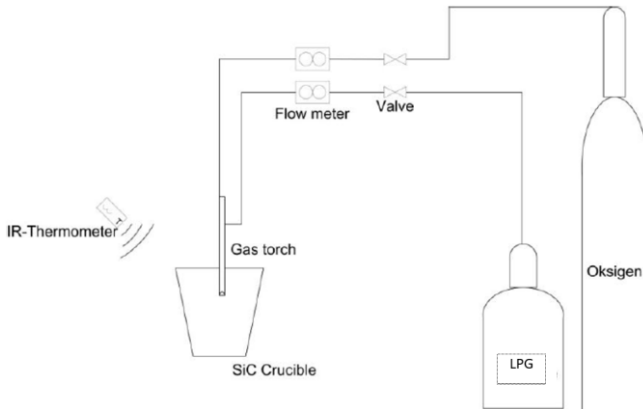
Tabel 3.3 Target *fire refining crude* feronikel

Target	Keterangan	Nilai	Satuan
Reaksi	Fe→FeO	100	Persen (%)
Oksidasi	S→ SO ₂	100	Persen (%)
	2P→ P ₂ O ₅	100	Persen (%)
	Co→ CoO	100	Persen (%)
	Si→ SiO	100	Persen (%)
	Ni→Ni	100	Persen (%)

Berdasarkan Tabel 3.3 target *fire refining* oksigen yang dibutuhkan adalah 0,16 mol untuk pengoksidasian. Volume oksigen dibutuhkan secara ideal adalah 960 liter oksigen dan laju alir volume yang dipakai adalah 1,5liter/min, 2liter/min 2,5liter/min, 3liter/min, dan 3,5liter/min serta t=10 menit dan kecepatan udara LPG adalah 0,6m/s.

3.6 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan penelitian tercantum pada gambar dibawah



Gambar 3.12 Rancangan proses *fire refining*

Pada Gambar 3.12 adalah rancangan penelitian yang dilakukan untuk proses *fire refining* sesuai dengan perhitungan stoikiometri mass balance dan heat balance :

Tabel 3.4 Rancangan penelitian

Variabel	Flow O ₂ (l/min)	EDX	Pengujian XRD	Yield
Pertama	1,5	V	V	V
Kedua	2	V	V	V
Ketiga	2,5	V	V	V
Keempat	3	V	V	V
Kelima	3,5	V	V	V

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Crude Feronikel

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian karakterisasi terhadap bahan-bahan yang digunakan, yaitu *crude* feronikel

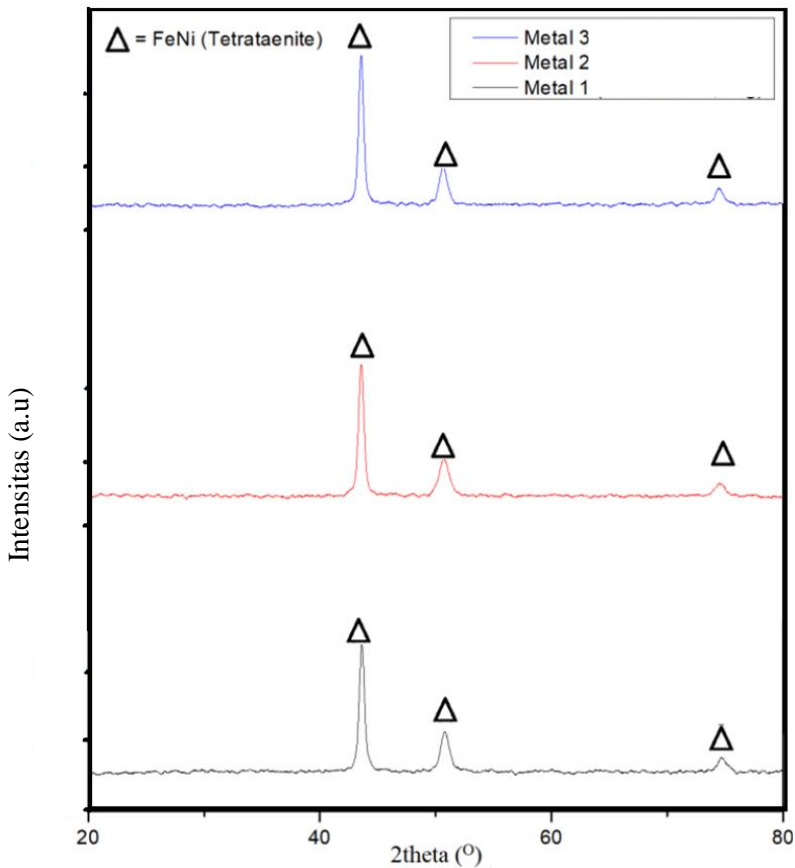
Crude Feronikel yang digunakan adalah hasil dari proses *Smelting* menggunakan *Mini Blast Furnace*. Pengujian komposisi *crude* Feronikel menggunakan mesin EDX. Didapatkan data komposisi *Crude* Feronikel ditunjukkan pada Tabel 4.1 sebagai berikut

Tabel 4.1 Hasil pengujian EDX *crude* feronikel

No	Unsur	Uji 1 (%)	Uji 2 (%)	Uji 3 (%)	Rata-Rata (%)	Standar Deviasi
1	Ni	26,41	23,88	30,57	26,95	3,3
2	Fe	70,73	71,8	61,12	67,88	5,88
3	S	0,575	1,955	5,95	2,8	2,79
4	P	-	0,425	0,42	0,275	0,002
5	Co	1,155	-	1,29	0,815	0,095
6	Si	1,125	1,94	0,65	1,24	0,65
Total					100	

Dari Tabel 4.1 didapat beberapa unsur yang menjadi acuan untuk melakukan perhitungan neraca massa

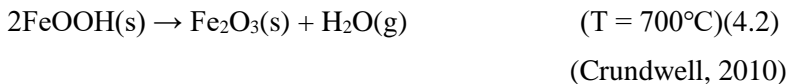
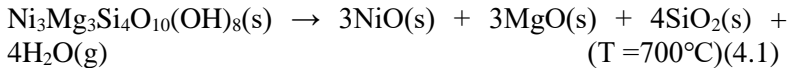
Identifikasi fasa dari *Crude* Feronikel dilakukan menggunakan mesin XRD PAN Analytical. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ dari 10° sampai 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar $1,54056 \text{ \AA}$. Hasil pengujian XRD dari *Crude* Feronikel terdapat pada Gambar 4.1



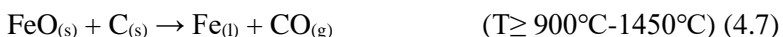
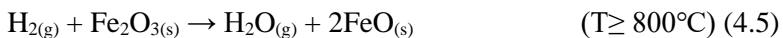
Gambar 4.1 Hasil Pengujian XRD *Crude* Feronikel

Pengujian XRD menghasilkan *peak* senyawa yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hasil pengujian menggunakan *PDF-2 Release 2011*. Dari Gambar 4.1 terlihat bahwa *peak* tertinggi yaitu adanya senyawa FeNi (Tetrataenite). Semakin tinggi *peak* yang terbentuk menandakan banyaknya fasa yang terdapat pada *crude* feronikel yaitu FeNi (Tetrataenite). FeNi tersebut terbentuk dikarenakan adanya selama proses *Smelting* yang

dimulai dari dekomposisi senyawa bijih laterit sesuai persamaan 4.1 dan 4.2 dibawah :



Selanjutnya Nikel Oksida dan Besi Oksida yang terbentuk mengalami reduksi dikarenakan adanya pembakaran batu bara yang mengereduksi melalui gas CO dan H melalui proses *smelting* sesuai Persamaan 4.3 sampai 4.7 dibawah:



(Warner et al,2006)

Fe *liquid* dan Ni *liquid* membentuk paduan FeNi menurut Persamaan 4.8



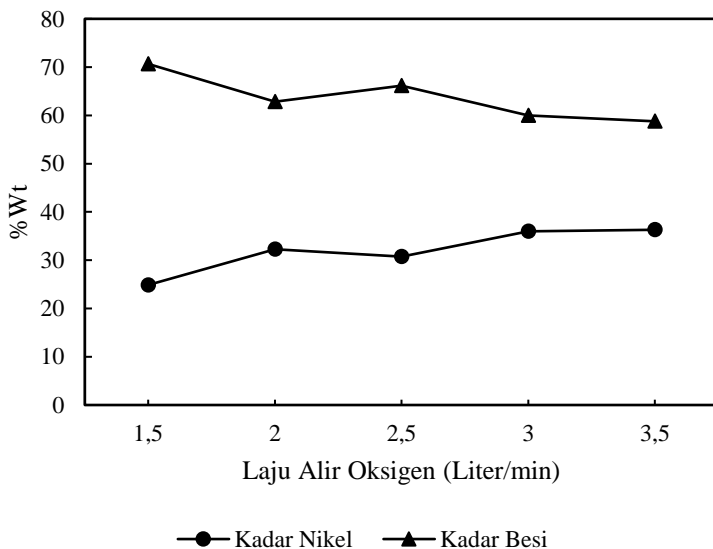
(Crundwell, 2010)

4.2 Pengaruh Variasi Laju Alir terhadap Kadar Nikel dan Besi

Laju alir oksigen mempengaruhi kadar Ni dan Fe sesuai dengan Tabel 4.2. Untuk mengetahui kadar Ni dan Fe pada Feronikel dilakukan uji analisis *Energy Dispersive X-Ray* atau EDX . Diagram pengaruh laju alir oksigen terhadap kadar Ni dan Fe ditunjukkan pada Gambar 4.2

Tabel 4.2 Pengaruh laju alir oksigen terhadap kadar Ni dan Fe

	1,5 liter/min	2 liter/min	2,5 liter/min	3 liter/min	3,5 liter/min
%Wt Ni	24,87	32,26	30,74	35,97	36,3
%Wt Fe	70,66	62,85	66,17	61,64	58,77



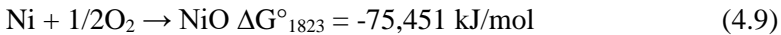
Gambar 4.2 Pengaruh variasi laju alir terhadap kadar nikel dan besi pada feronikel

Sesuai Gambar 4.2 terlihat terjadi peningkatan kadar Nikel setiap penambahan laju alir dengan waktu 10 menit *fire refining*. Dengan kadar nikel pada *Crude Feronikel* atau nikel awal sebelum dilakukan *Fire Refining* adalah dengan rata-rata 26,95 %wt. Pada laju alir 1,5 liter/min tak terjadi peningkatan yang signifikan atau relatif tetap dan sama dikarenakan sewaktu pengoksidasian energi yang dibutuhkan belum cukup untuk mengoksidasi selain Ni (D.J Morgan, 1964). Berikutnya pada laju alir 2 liter/min diperoleh kadar Ni sebesar 32,26% wt dengan peningkatan 5,31% wt. Pada penggunaan laju alir 2,5 liter/min diperoleh kadar Ni sebesar 30,74% wt dengan peningkatan 3,79% wt. Pada penggunaan laju alir 3 liter/min diperoleh kadar Ni sebesar 35,97% wt dengan peningkatan 9,02% wt. Pada penggunaan laju alir 3,5 liter/min diperoleh kadar Ni sebesar 36,3% wt dengan peningkatan 9,35% wt.

Pada laju alir oksigen 1,5 l/min belum ada peningkatan pada kadar nikel, hal tersebut dikarenakan proses *Fire Refining* belum terjadi oksidasi pada unsur selain nikel disebabkan belum cukupnya oksigen untuk mengikat unsur *impurities* yang sesuai dengan perhitungan stoikiometri pada *mass balance* (T.Martin,2005). Nikel memiliki afinitas yang kecil terhadap oksigen daripada Besi (Kellogg,1987). Peningkatan kadar unsur terjadi dikarenakan ketika terjadi pengikatan oksigen dengan unsur-unsur di *crude* feronikel berlangsung dengan ketergantungan dengan afinitas terhadap oksigen, namun sesuai elingham diagram nikel adalah salah satu logam yang sulit membentuk oksida sesuai pada Persamaan 4.9 dikarenakan nikel kurang stabil dalam keadaan oksidain. Logam dengan sifat reaktif tinggi memiliki energi bebas Gibbs (ΔG°) lebih negatif. Logam tersebut membentuk oksida yang terletak pada bagian paling bawah diagram. Sebaliknya, logam yang kurang reaktif memiliki energi bebas positif dan membentuk oksida dengan posisi bagian atas pada diagram. Besar nilai energi bebas (ΔG°) untuk reaksi oksidasi merupakan ukuran afinitas kimia suatu logam terhadap oksigen (Straton,P, 2013). Semakin negatif nilai ΔG suatu logam menunjukkan logam tersebut semakin stabil dalam bentuk oksida. Dan semakin positif

nilai ΔG suatu logam makin sukar membentuk oksida. Pada proses Fire Refining tersebut sesuai teori dikarenakan Nikel pada Feronikel meningkat setiap penambahan laju oksigen. Karena *Fire Refining* adalah proses yang bertujuan untuk mengoksidasi impurities dan memanfaatkan afinitas oksigen dengan logam sehingga Nikel sukar untuk diikat menjadi oksida (Tyroler,1998).

Pada laju alir oksigen 2,5 liter/min terjadi penurunan kadar nikel dari laju alir oksigen 2 liter/min yaitu dari kadar nikel dengan 34,26% wt menjadi 30,74% wt. Hal tersebut dikarenakan *fire refining* bertujuan mengoksidasi yang dimana oksigen mudah larut dalam keadaan *melting* pada temperatur tinggi (Mark E, 2011). Proses *fire refining* dibatasi oleh kinetika reaksi di satu daerah saja, dimana dengan tak adanya *turbulance* memungkinkan oksigen hanya berkontak langsung dengan oksidanya (Ameya,2019), sehingga mempengaruhi dan menghambat laju oksidasi pada daerah *melting*.

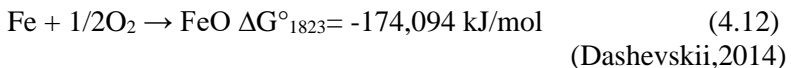


(Dashevskii,2014)

Laju alir oksigen mempengaruhi kadar Fe sesuai dengan Gambar 4.3, Untuk mengetahui kadar Fe pada Feronikel dilakukan uji analisis Energy Dispersive X-Ray atau EDX. Pada Gambar 4.3, dapat dilihat terjadi penurunan kadar Fe penambahan laju alir dengan waktu 10 menit *Fire Refining*. Dengan kadar Fe rata-rata pada *Crude* Feronikel awal yaitu 67,88% wt. Pada laju alir 1,5 liter/min tak terjadi penurunan yang signifikan pada kadar Fe yaitu sebesar 70,66% wt. Pada penggunaan laju alir 2 liter/min diperoleh kadar Fe sebesar 62,85% wt dengan penurunan 5,03% wt. Pada penggunaan laju alir oksigen 2,5 liter/min diperoleh kadar Fe sebesar 66,17% wt dengan penurunan 1,71% wt. Pada penggunaan laju alir 3 liter/min diperoleh kadar Fe sebesar 61,64% wt dengan penurunan 6,24% wt dan pada penggunaan laju alir oksigen 3,5

liter/min diperoleh kadar Fe sebesar 58,77 % wt dengan penurunan mencapai 9,11% wt .

Pada penggunaan laju alir 3,5 liter/min diperoleh kadar Fe sebesar 58,77% wt dengan penurunan 9,11% wt. Hal ini terjadi dikarenakan terjadinya proses oksidasi besi. Reaksi oksidasi Fe menyebabkan eksotermik. FeO adalah hasil dari *Fire Refining* dimana stabil membentuk Oksida. FeO pada *Fire Refining* biasanya berupa percikan atau *iron spray* (Ameya, 2019) Besar Energi Gibbs untuk reaksi oksidasi merupakan ukuran afinitas kimia suatu logam terhadap oksigen. Semakin negatif nilai ΔG suatu logam menunjukkan logam tersebut semakin stabil dalam bentuk oksida, menyebabkan terjadinya pengurangan jumlah Besi menjadi Besi Oksida.



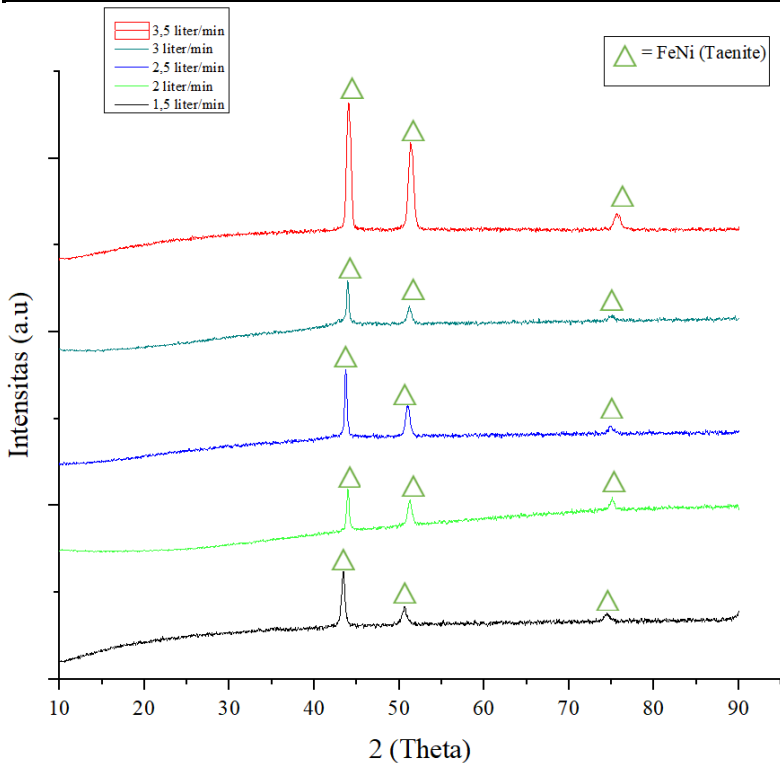
Penurunan kadar besi tak akan mencapai 100% dikarenakan besi memiliki *solubility* atau kelarutan terhadap oksigen (Habashi,1997). Besi memiliki afinitas yang tinggi terhadap oksigen setelah cobalt, nikel dan tembaga (C.R Taylor, 1952). Akibatnya besi lebih mudah teroksidasi terlebih dahulu, sedangkan Ni dan Co masih menjadi unsur yang ada didalam *melting*. Kelarutan besi terhadap kelarutan oksigen pada hasil fire refining temperatur 1550°C adalah 22%wt sesuai dengan perhitungan pada lampiran.

Pada hasil *fire refining* didapat penurunan kadar Fe mencapai 9,11wt% dimana kesesuaian dengan teori bahwa kelarutan besi terhadap oksigen maksimal adalah 22% wt (Habashi, 1997). Dengan terjadinya pengurangan jumlah besi di molten metal akan meningkatkan jumlah nikel dan cobalt pada molten metal, dan menurunkan kadar unsur seperti silika, sulfur, dan carbon (C.R Taylor, 1952).

Pada *refining* laterit melalui *smelting* hasil feronikel mencapai komposisi nikel adalah 40%wt dan Besi adalah 60%wt. Hal tersebut dikarenakan kemampuan besi dalam melarutkan oksigen pada temperatur tinggi terbatas (Crundwell,2010).

4.3 Pengaruh Senyawa Terhadap Hasil *Fire Refining* Pada *Crude Feronikel*

Feronikel merupakan hasil *Fire Refining* dengan variabel laju alir oksigen dari 1,5liter/min sampai 3,5 liter/min, dilakukan identifikasi senyawa menggunakan *XRD PAN Analytical*. Pengujian dilakukan dengan posisi dari 10° sampai 90° dan menggunakan gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1,54056 Å. Hasil identifikasi mesin tersebut berupa grafik, kemudian grafik tersebut dianalisa fasa-fasa yang terbentuk pada Feronikel menggunakan program *PDF-2 Release 2011*. Hasil proses *Fire Refining* dapat dilihat pada Gambar 4.3. Adapun fasa yang telah teridentifikasi dengan pengujian XRD ditunjukkan pada Tabel 4.2.



Gambar 4.3 Hasil XRD feronikel

Tabel 4.3 Identifikasi fasa pada produk *fire refining* feronikel

No	Metal	Fasa	Rumus Kimia
1	Variasi laju alir ke-1	Taenite	FeNi
2	Variasi laju alir ke-2	Taenite	FeNi
3	Variasi laju alir ke-3	Taenite	FeNi
4	Variasi laju alir ke-4	Taenite	FeNi

5	Variasi laju alir Taenite ke-5	FeNi
---	--------------------------------	------

Gambar 4.4 menunjukkan letak puncak 2θ yang relative sama pada Feronikel dengan variasi laju alir oksigen 1,5 liter/min adalah pada 2θ 43,4669; 50,667; 74,418. Feronikel dengan laju alir oksigen 2 liter/min adalah pada 2θ 43,928; 51,0142; 75,0448. Feronikel dengan laju alir oksigen 2,5 liter/min adalah pada 2θ 43,6062; 51,0142; 74,8247. Feronikel dengan laju alir oksigen 3 liter/min adalah pada 2θ 43,938; 51,2239; 74,903. Feronikel dengan laju alir oksigen 3,5 liter/min adalah pada 2θ 44,0792; 51,3226; 75,6207. Identifikasi didapatkan bahwa pada Feronikel hasil *Fire Refining* didapat bahwa fasanya adalah Taenite atau FeNi (ICDD no 00-003-1016)

Merujuk dengan hasil *fire refining* adalah Feronikel dengan fasa Taenite . Feronikel (Taenite) tersebut adalah mineral dengan paduan nikel proporsi nikel antara 20% - 65% (Scorzeli,1994). Pada gambar 4.4 dapat dilihat bahwa puncak difraksi yang muncul adalah FeNi, makin tinggi hasil difraksi menandakan makin kristalin senyawa pada suatu material (Agus,2012). FeNi merupakan senyawa paling banyak pada Feronikel (Crundwell, 2010). Pemurnian *crude* feronikel dengan *fire refining* sesuai teori dimana hasil dari *fire refining* adalah FeNi. Pembentukan FeNi / taenite dimana besi yang mana teroksidasi dan membentuk paduan dengan nikel membentuk taenite (Saeid,2014). Setelah *molten* metal Fe-Ni telah melalui kristalisasi dan pendinginan *molten* membentuk *fcc*, secara termodinamika *molten* akan stabil akan tidak membentuk oksida pada temperature dibawah 800°C dan dimulainya terbentuk *fcc* Taenite (Stepan,2017). Perubahan FeNi Tetrataenite *bcc* menjadi *fcc* Taenite dikarenakan ketika terjadi peningkatan jumlah Nikel dalam molten FeNi metal terjadi distorsi yang besar dalam kisi Besi, yang mengarah pergeseran puncak refleksi menjadi fase *fcc* (Li-Yin Gao, 2019)

4.4 Pengaruh Laju Alir Oksigen Terhadap Perolehan *Yield*

Yield adalah salah satu cara perhitungan untuk mencapai parameter keefektifitas sebuah proses, maka dari itu diperlukan perhitungan *Yield* terhadap pengaruh Laju Alir Oksigen dan dicari *Yield* yang paling maksimal. Pada percobaan kali ini didapat hasil sebagai Tabel 4.2 dibawah.

Tabel 4.4 Data hasil *fire refining*

Laju Alir Oksigen (liter/min)	Kadar Ni (wt %)	Massa awal w_o (gr)	Massa Akhir W_t (gr)
1,5	24,87	21,43	20,5
2	32,26	21,87	16,28
2,5	30,74	23,1	14,88
3	35,97	20,39	7,27
3,5	36,3	20,18	6,3

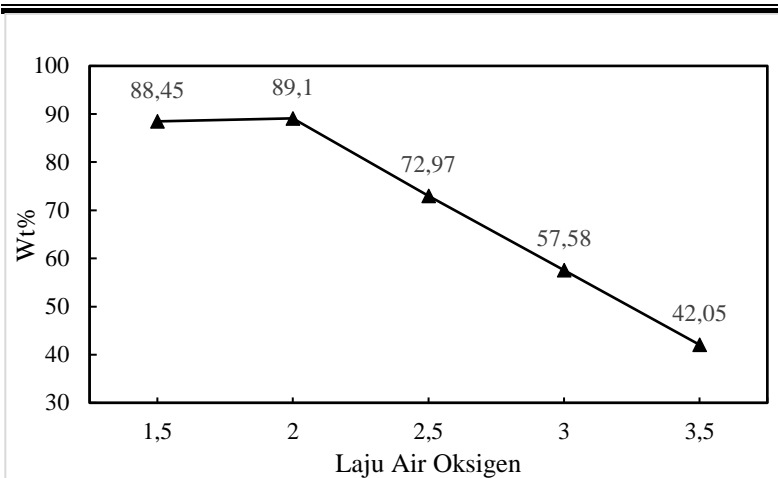
Perhitungan yang digunakan adalah rumus *Yield* sebagai berikut

$$Yield = \frac{\text{Massa hasil } fire \text{ refining} \times \%Ni \text{ dalam Feronikel}}{\%Ni \text{ dalam Crude Feronikel} \times \text{Massa sampel}} \times 100\%$$

Setelah dikalkulasi didapat hasil sebagai berikut pada Tabel 4.5

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan *Yield*

No	Laju alir (liter/min)	Oksigen <i>Yield</i> (%)
1	1,5	88,45
2	2	89,2
3	2,5	72,97
4	3	57,58
5	3,5	42,05



Gambar 4.4 Perolehan yield *fire refining*

Dari Tabel 4.3 didapat variabel laju alir oksigen 1,5 liter/min didapat besaran yield sebesar 88,45%, pada variabel laju alir oksigen 2 liter/min didapat besaran yield sebesar 89,1% terjadi kenaikan dari pada variabel 1,5 liter/min sebesar 0,65%. Selanjutnya pada variabel laju alir oksigen 2,5 liter/min didapat besaran *yield* yaitu 72,97% terjadi penurunan dari variabel 2 liter/min sebesar 16,13%. Selanjutnya pada variabel laju alir oksigen 3 liter/min didapat besaran *yield* yaitu 57,58% terjadi penurunan dari variabel 2,5 liter/min sebesar 15,39%. Selanjutnya pada variabel laju alir oksigen 3,5 liter/min didapat besaran *yield* yaitu 42,05% terjadi penurunan dari variabel 3 liter/min sebesar 15,53%.

Pada data tersebut didapat bahwa didapat laju alir oksigen 2 liter/min memiliki *yield* yang tertinggi yaitu sebesar 89,1% sedangkan yang paling rendah yaitu laju alir oksigen 3,5 liter/min sebesar 42,05%. Didapat bahwa semakin meningkatnya jumlah kadar nikel pada proses *fire refining* akan terjadi penurunan nilai *Yield* yang diikuti dengan perbedaan massa sebelum dan sesudah *fire refining* meningkat setiap variabel laju alir oksigen. Pada

oksidasi target yaitu nikel dengan massa target 5,7 gr, maka dari itu oksidasi berjalan sesuai teori yang didapatkan nikel yang tinggi diangka 36,3% dengan laju alir 3,5 liter/min.

Penurunan *yield* dikarenakan terjadinya penurunan massa setelah dilakukan *Fire Refining*. Yield yang diharapkan adalah sebesar 90% dengan kadar nikel pada feronikel adalah harus lebih besar 20% (Ender,2019). Pada proses *Fire Refining* didapat *Yield* sebesar 89,1% dengan kadar nikel sebesar 34,26% yang sesuai dengan teori.

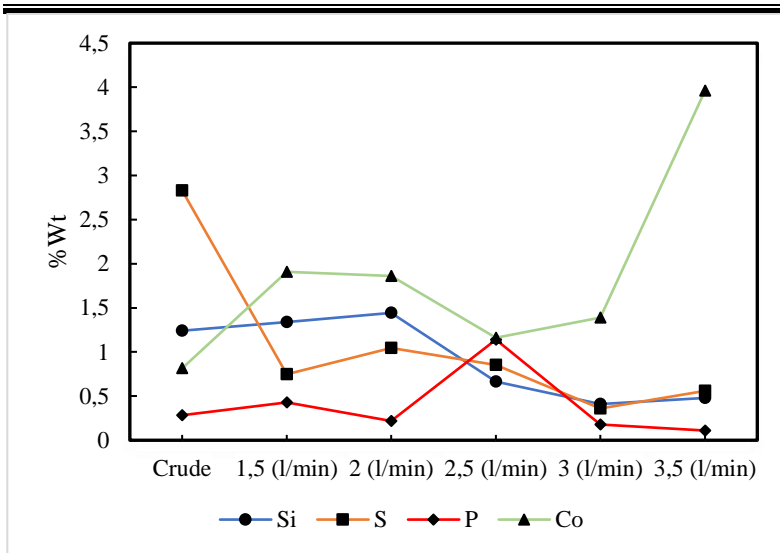
Selain itu didapat *yield* pada variabel laju alir 3,5 liter/min sebesar 42,05% dikarenakan banyaknya penurunan dari massa awal, yang diperkirakan adanya faktor perubahan tinggi dan rendahnya *lance* terhadap molten metalnya. Dekatnya *lence* dengan molten metal meningkatkan kecepatan momentum oksigen dan meningkatkan radius *droplet molten* yang menyebabkan meningkatkan transfer oksigen (Ameya,2019).

4.5 Pengaruh Variasi Laju Alir Oksigen Terhadap Kadar Si, S, P dan Co

Laju alir oksigen mempengaruhi kadar yang ada pada *Crude Feronikel*, ketika komposisi dibandingkan dengan *crude feronikel* sesuai dengan Tabel 4.6 dengan feronikel hasil *fire refining*. Perbedaan kadar unsur dapat terlihat pada Gambar 4.5

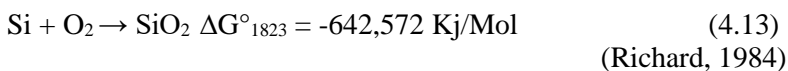
Tabel 4.6 Hasil persentase kadar feronikel *fire refining*

Q (l/min)	Si (%)	S (%)	P (%)	Co (%)
<i>Crude</i> Feronikel	1,24	2,83	0,282	0,815
1,5	1,34	0,746	0,43	1,91
2	1,743	1,046	0,22	1,863
2,5	0,663	0,853	0,14	1,163
3	0,41	0,36	0,18	1,39
3,5	0,48	0,56	0,11	3,96



Gambar 4.5 Pengaruh variasi laju alir oksigen terhadap kadar Si, S, P dan Co

Pada penelitian ini pengaruh laju alir oksigen terhadap Unsur Silika berpengaruh pada jumlah kadar. Pada awalnya jumlah silika pada *Crude Feronikel* adalah 2,83% wt, setelah dilakukan *Fire Refining* terjadi penurunan mencapai 0,48% wt. Hal tersebut mengacu dengan oksidasi impurities di *fire refining* dimana Silica adalah salah satu unsur yang paling mudah membentuk oksida dikarenakan afinitas yang tinggi dengan oksigen (Crundwell, 2010), serta dengan terjadinya penurunan kadar Fe maka terjadi penurunan jumlah silika dalam molten metal. Silika bisa dihilangkan selama oksidasi disertakan penambahan *lime*. Proses selama oksidasi terhadap silika bersifat eksotermik. Hasil produk yaitu SiO_2 bersamaan dengan FeO (Z.Buzek 1969) sesuai persamaan 4.13

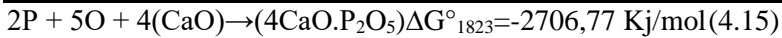


Pada *crude* feronikel kadar sulfur adalah 2,83%. Pada sulphur terjadi penurunan dari 2,83% wt hingga mencapai 0,45% Wt. Keberadaan sulfur dalam *Crude* Feronikel dikarenakan selama proses *smelting* terjadinya reaksi reduksi langsung oleh *Limestone* (Bergmen, 2003). Keberadaan sulphur harus dikurangi karena pada produk Feronikel dapat menurunkan kekuatan, korosi, ketahanan material tersebut (Wamer,2006). Pada kenyataannya sulfur pada feronikel yang disebabkan proses *Fire Refining* dapat turun hingga mencapai 0,02% wt (Bergman,2003).. Sulfur dapat dihilangkan dari molten feronikel ditambahkan calcium carbida, CaC_2 ke molten feronikel. Sesuai pada persamaan dibawah. Berbeda dengan yang reaksi lainnya, desulfurisasi adalah reaksi reduksi. Desulfurisasi bisa diartikan sebagai presipitasi atau pengendapan ketika elemen yang memiliki afinitas tinggi terhadap sulfur ditambahkan. Afinitas yang paling stabil terhadap sulfur adalah calsium karbida (Habashi,1997). Meskipun logam alkali tanah dan logam tanah jarang membentuk sulfida yang relatif stabil, oksidanya jauh lebih stabil. Sulfida terbentuk hanya jika oksigen terlarut telah hilang. Kalsium carbida ditambahkan pada *molten* feronikel membentuk *slag* kalsium sulfida yang terbentuk pada atas *molten*. Sulfur juga dapat dihilangkan dengan CaO , CaCO_3 , CaSi , Na_2O dan Na_2CO_3 (Young, 2009)



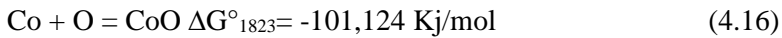
(Crundwel, 2010)

Pada unsur Phospor ada karena adanya *smelting* dengan konten karbon tinggi di feed. Konten Phospor pada *Crude* Feronikel adalah 0,282%wt. Terjadi penurunan signifikan hingga mencapai 0,06%. Namun pada *fire Refining* diharapkan mencapai 0,02%, hal tersebut dapat dicapai dengan penambahan berupa *additive* ataupun *flux* (Crundwel,2010). *Additive* ataupun *flux* yang dapat ditambahkan adalah kalsium oksida sesuai persamaan 4.15 dibawah:



(Eiji, 2013)

Pada unsur Cobalt terjadi peningkatan setiap laju aliran oksigen, hal tersebut dikarenakan cobalt selama proses pemurnian tak akan pernah hilang dari Feronikel, karena *Chemical Properties* dari metal cobalt dan nikel mirip, adapun pembentukan Cobalt *Oxide* pada Persamaan 4.16 (Crundwell, 2010)



(Dashhevskii, 2014)

Fire Refining melibatkan reaksi selektif oksidatif yang mana mengikatkan unsur yang mudah larut ataupun pengikatan menjadi oksida sesuai dengan tingkat afinitas terhadap oksigen, adapun reaksi yang terjadi pada fire refining temperatur 1550°C pada Tabel 4.5 adalah sebagai berikut:

Tabel 4.7 Reaksi Fire Refining

Reaksi	ΔG° (KJ/mol)	Referensi
$Ni + \frac{1}{2} O_2 = NiO$	-75,451	(Dashevskii, 2014)
$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO$	-174,094	(Dashevskii, 2014)
$2P + \frac{5}{2} O_2 = P_2O_5$	-1055,367	(Richard, 1984)
$S + O_2 = SO_2$	-230,785	(Richard, 1984)
$Si + \frac{1}{2} O_2 = SiO_2$	-642,572	(Richard, 1984)
$Co + \frac{1}{2} O_2 = CoO$	-101,124	(Dashevskii, 2014)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian adalah sebagai berikut :

1. Proses *Fire Refining* dapat mempengaruhi hasil kadar unsur Ni dan Fe pada *Crude* feronikel, pada laju alir oksigen 1,5 liter/min didapat kadar Ni 24,87% wt dan Fe 70,66% wt. Pada laju alir oksigen 2 liter/min didapat kadar Ni 34,26% wt dan Fe 62,85% wt. Pada laju alir oksigen 2,5 liter/min didapat kadar Ni 30,74% wt dan Fe 61,64% wt. Pada laju alir oksigen 3 liter/min didapat kadar Ni 35,87% wt dan Fe 61,64% wt dan pada laju alir oksigen 3,5 liter/min didapat kadar Ni 36,3% wt dan Fe 58,77% wt. Kadar Ni tertinggi dan Fe terendah berturut-turut yaitu pada laju alir oksigen 3,5 liter/min dengan kadar nikel sebesar 35,87% wt dan Fe 58,77% wt.
2. Senyawa yang terbentuk pada feronikel dengan variasi laju alir oksigen adalah FeNi (Taenite)
3. Penggunaan variasi laju alir oksigen mempengaruhi perolehan *yield* pada proses *fire refining crude* feronikel *mini blast furnace*. Semakin besar persentase kadar nikel hasil proses *fire refining* maka menurunkan *yield*. Perolehan *yield* tertinggi yang didapat adalah pada laju alir oksigen 2 liter/min dengan kadar besaran *yield* adalah 89,1%.

5.2 Saran

Adapun saran pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian *Fire Refining* dengan alat *converter* agar mengurangi *heat loss*
2. Melakukan penelitian *Fire Refining* dengan mempertimbangkan jauh dan dekatnya *lance*
3. Melakukan penelitian *Fire Refining* dengan penggunaan dan memperhitungkan adanya *flux*

-
4. Melakukan penelitian *Fire Refining* dengan variabel laju alir diatas 3,5 liter/min.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul, F., Pintowantoro, S., Kawigraha, A., Nursidiq, A., 2018, **“Effects of Reduction Temperature to Ni and Fe Content and The Morphology of Agglomerate of Reduced Laterite Limonitik Nickel Ore by Coal-bed Method”**, *AIP Conference Proceeding*, Vol 1945, hal. 1-9.
- Agus Setiabudi 2012, **“Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya Dalam Penelitian Kimia”** : Universitas Pendidikan Indonesia, UPI Press
- Ameya Kodrolkar, 2019, **“Model Development for Refining Rates in Oxygen Steel Making: Impact and Slag-Metal Bulk Zone”**, McMaster Steel Research Centre, Department of Materials Science and Engineering, McMaster University, Hamilton, ON L8S 4L8, Canada
- C. Bergman 2003, **“Nickel Production From Low-iron Lateritic Ores”** : Process description. CIM Bulletin, 96, 127-138
- C.R. Taylor 1952; **“Thermodynamic of Alloys”**, Addison-Wesley
- Charles E.O’Neill , 1970 : **“Fire Refining of Nickel-Containing Metallurgical Intermediates and Scrap, The Internarional Nickel Company”**, Inc. United Patent Office
- Dalvi, A.D., Bacon, W.G., Osborne, R.C., 2004, **“The past and the future of nickel laterites”**, International Convention. Prospectors and Developers Association of Canada, Toronto, Ontario, Canada. 27 pp.
- Davenport, 2002, **”Extractive Metallurgy of Copper”**, Department of Materials Science and Engineering University of Arizona Tucson, AZ, USA
- D.J Progar, B.W Lewis (1964); **“A study of Oxidatation Kinetics of Nickel Metal in Flowinf Air and Oxygen-Nitrogen Mixtures”**, National Aeronautics and Space Administration NASA, Washington, D C.

-
- Eiji Yamasue *et al* 2013; **Direct Determination of Standard Gibbs Energies of the Formation of $4\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ and $3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ by Transpiration Method**, ISIJ International, Vol. 53 No. 10, pp. 1828–1835
- Ender, 2019; **“Nickel Laterite Smelting Processes and Some Example of Recent Possible Modification to the Conventional Route”**, Departement of Metallurgical and Material Engineering, Alitim University, Turkey
- Jungah, K., Gjergj, D., Hideaki, T., Katsunori, O., Seiji, M., Toyohisa, F., 2010. **“Calcination of Low-grade Laterite for Concentration of Ni by Magnetic Separation”**. Minerals Engineering 23. 282–288.
- Frank K.Crundwell ,2011, **“Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals”**, Amsterdam
- Farrokhpay, S., Fornasieroa, D.C., Filippov, L., 2018, **“Upgrading nickel in laterite ores by flotation”**, Minerals Engineering, Vol 12, hal. 100–106.
- Fu et al., **“Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations”**: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metal
- Habashi Fathi, 1997, **“Handbook of Extractive Metallurgy Volume I: Primary Metals”**, Universite Laval, Departement de Mines et de Metallurgie, Canada
- Haldar, S.K 2018 **“Mineral Processing. Mineral Exploration”**, 259-290
- ITCP 2018. HS7501 Nickel, **“International Trade Promotion Centre Osaka”**, hal 12-18 Jepang
- Iwan Setiawan 2016, **“Pengolahan Nikel Laterite Secara Pirometalurgi”**, Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI
- Jang Suherman, 2018 ; **“Supply Chain Analysis For Indonesian Nickel”**, Indonesia Mining Jurnal Vol. 21, No 1 2018: 59-76
- Jennifer 2014, **“Material and Energy Flows in the Production of athode and Anode Materials for Lithium Ion**
-

-
- Batteries**", ANL/EDS Energy System Divisions, Argonne National Laboratory
- J.H.E Jeffes, 2001; "**Ellingham Diagram, Encyclopedia of Material: Science and Technology (Second Edition)**", Pages 2751-2753
- Kellog. H.H, 1987, "**Thermochemistry of Nickel-Matte Converting**". Can. Metall. Q., 26, 285-298
- K.K.Kelley, 1960; "**Contribution To The Data On Theoretical Metallurgy XII. High Temperature Heat-Content, Heat Capacity, and Entropy Data For Element And Inorganic Compunds**", Buletin 584 Bureau of Mines, Series US Dept of The Int Library.
- Komnitsas, K; Zaharaki 2015, "**Effect of Synthesis Parameter on Compressive Strenght of Low Calcium Ferronickel Slag Inorganic Polymer**", J Hazard. 161 (2-3), 760-768
- KL. Rossenmyr 1967: "**The Production of Ferromanganese**", Electr.Furn. Conf Proc. 24 141-145
- Li-Yin Gao 2019, "**Gradient Growth of fcc and bcc Phase Within Fe_xNi_{1-x} ($50 < x < 75$) films during direct-current wafer electroplating**", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Shenzhen Institute of Advanced Electronic Materials, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China
- Maniel Scimeca, 2018, "**Energy Dispersive X-ray (EDX) microanalysis: A powerful tool in biomedical research and diagnosis**", Department of Biomedicine and Prevention, University of Rome, European Journal of Histochemistry 2018: 62:2841
- Mark E. Schesinger, 2011, "**Extractive Metallurgy of Copper 5th Edition**", Elsevier, Chapter 13 Fire Refining (S and O Removal) and Anoda Casting. ISBN 978-0-08-096789-9
- Maria Criando 2017, "**Alternative Inorganic binders Based on Alkali-Activated Metallurgical Slags**", The University of Sheffield Jurnal no 7
-

-
- McKinsey 2017, **“The future of nickel”** : A class act, Basic Materials, Mc Kinsey&Co.
- Mudd, G.M., 2009. **“Nickel sulfide versus laterite: The hard sustainability challenge remains”**, Proceedings of 48th, Annual Conference of Metallurgists, Sudbury
- P.A. Distin, 2013 ; **“Solubility of Oxygen in Liquid From 1785°C to 1960°C. A new Technique For The Study of Slag Metal Equilibria”**, The Canadian Journal of Metallurgy and Material Science,
- Rauf Hurman Ericc, 2014, **“Production of Ferroalloys, School of Chemical and Metallurgical Engineering”** University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa
- R.B. Scorzelli, 1994; **“Phase Composition and Structure of Fe-Ni Alloys in a Unique Antarctic Meteorite Yamato”** 791694, Hyperfine Interactions 942343-2347
- Richard A.Robie 1979. **“Thermodynamic Properties Of Mineral and Related Substance 298K And 1 Bar (10⁵) Pascal Pressure and at Higher Temperature”**, U.S Geological Buletin 1452
- Ricson P Hutagol, 2015, **“Ekstraksi Padat-Cair ZnO Dengan Asam Dari Debu Filter Proses Pembuatan Baja”**, Jurnal Sains Universitas Nusa Bangsa, Vol. 5 no 1 , 1-8
- R.G. Barton and J.K. Brimacombe 1977, **“Influence of Surface Tension-Driven Flow on the Kinetics of Oxygen Absorption in Molten Copper”**, Metall. Trans. B, 8B, pp. 417–427
- Rushendra Paravastu, 2012, **“Synthesis And Characterization of Lithium Cathode Materials in The System (1-x-y)LiNi1/3Mn1/3Co1/3O2 · xLi2MnO3 · yLiCoO2”**; Dapartment of Mechanical Engineering, Colorado State University
- Saeid Pournaderi, 2014, **“Optimization Of Ferronickel Production From Sivrihisar Nickel Laterite Ore”**, Material and Metallurgical Engineering, Middle East Technical University
-

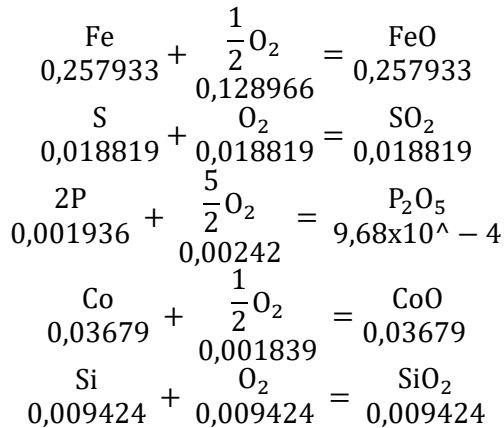
-
- Scorzeli R.B., R.A. Pereira, C.A.C Perez., *et al* 1994, “**Phase Composition and Structure of Fe-Ni Alloys in a Unique Antarctic Meteorite Yamato 791694**”, Hyperline Interaction 942343-2347
- Seshadri Seetharam, 2014, “**Treatise on Process Metallurgy Volume 3: Industrial Processes**”, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- Shindo Daisuke, 2002, *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*, Analytical Electron Microscopy for Material Science pp 81-99
- Sourove, Md Sourvore 2016, “**Study of LPG (Liquefied Petroleum Gas) And CNG (Compressed Natural Gas) Vehicles And It's Future Aspects**”, International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering 2016
- Stepan M. Chernonozhkin 2017, “**Thermal Equilibration Of Iron Meteorite And Pallasite Parent Bodies Recorded At The Mineral Scale By Fe And Ni Isotope Systematics**”, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 217 95-111
- Stratton, P. 2013. “**Ellingham diagrams – their use and misuse**”. *International heat treatment and surface engineering* 31, 112-114
- T. Martin. 2005, “ **The Kinetics and Mechanism of Molten Copper Oxidation by Top Blowing of Oxygen**”, *Research Copper and Nickel Production*
- Tomas Havlik, 2008 ; “**Hydrometallurgy**”, Woodhead Publishing Limited, Cmbridge England
- Tecchio P., Ardente F 2019., ”**Analysis of Material Efficiency Aspect of Personal Computers Product Group**”, JRC Technical Report
- Tyroler, G.P, 1998, “**Extractive Metallurgy of Nickel and Cobalt. New York**” : The Metallurgical Society
-

-
- Untung Sukamto, Dyah Probawati dan Anton Sudiyanto (2012); **“Proses Pengolahan dan Pemurnian Bijih Tembaga dengan Cara Konvensional dan Biomining”**, Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Prosiding Seminar Teknik Kimia “Kejuangan”.
- V.Ya.Dashevskii 2014; **“Thermodynamics of Oxygen Solutions in the Metal Ni-Co system”**, ISSN 00125016, Doklady Physical Chemistry, 2014, Vol. 459, Part 1, pp. 181–184. Pleiades Publishing, Ltd.,
- Wengao Zhao dkk, 2014; **“High Voltage Operation of Ni-Rich NMC Cathodes Enabled by Stable Electrode/Electrolyte Interphase”**; Advance Energy Material
- Warner, A.E. *et al*, 2006 **JOM World Nonferrous Smelter Survey**, part III ; Latertite. *JOM*, 58, 11-20
- Yu Miao , 2019, **“Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements”**, MDPI, Energies 2019,12,1074
- Z. Buzek, 1946; **“Freberg. Forschungsh”**., B 117 59-73
-

LAMPIRAN

A. Perhitungan Stoikiometri *Fire Refining*

Pada setiap reaksi kimia diperlukan kesetimbangan rumus molekul senyawa kimia dengan melibatkan persamaan stoikiometri kesetimbangan kimia. Pada proses *fire refining* terlibat yaitu reaksi oksidasi. Persamaan yang terjadi adalah sebagai berikut:



Dari data EDX persentase berat elemen-elemen dalam crude feronikel adalah sebagai berikut sesuai pada Tabel 1 :

Tabel 1 Hasil EDX Crude Feronikel Mini Blast Furnace

Unsur	Ni	Fe	S	P	Co	Si
%Wt	26,95	67,88	2,83	0,282	1,02	1,24

Massa sampel Feronikel yang digunakan adalah hasil *Smelting Crude Feronikel* dengan massa sebagai berikut pada Tabel 2

Tabel 2. Massa Unsur Pada *Crude* Feronikel

Unsur	Ni	Fe	S	P	Co	Si	Total
Massa	5,7347	14,44	0,6021	0,0600		0,2638	21,3220535
(gr)	093	4232	9767	0698	0,2170	6047	
		6			4651		

Dari perhitungan Stoikiometri didapat mol dari tiap unsur sebagai berikut, dengan Massa Relatif sebagai berikut pada Tabel 3:

Ar: Ni= 58,7, Fe= 56, S=32, P= 31, Co=59, Si=28 O=16

Tabel 3. Mol Unsur *Crude* Feronikel

Unsur	Ni	Fe	S	P	Co	Si
Mol	0,0976	0,2579	0,0188	0,0019	0,0036	0,0094
	95	33	19	36	79	24

Kebutuhan oksidasi didapat berdasarkan perhitungan stoikiometri, perhitungan kebutuhan terdapat pada tabel 4

Tabel 4. Kebutuhan Oksigen untuk oksidasi

	Mol
Oksigen	0,128966
	0,018819
	0,00242
	0,001839
	0,009424
Total	0,161467
Total massa (gr)	5,166964508

Perhitungan input untuk *fire refining* yaitu jumlah antara massa sampel *Crude* Feronikel dan Oksigen sesuai pada Tabel 5:

Tabel 5. Total input *Fire Refining*

Input Crude Feronikel (gr)	21,3220535
Oksigen (gr)	5,166964508
Total (gr)	26,48902

Output produk sesuai pada persamaan stoikiometri, sesuai pada Tabel 6

Tabel 6 Hasil Output Proses *Fire Refining*

Out put	Ni	FeO	SO₂	P₂O₅	CoO	SiO₂	Total
Mas	5,734	18,57	1,204	0,137	0,275	0,565	26,48
sa	709	116	395	435	907	415	902

A. Perhitungan Kebutuhan oksigen untuk Oksidasi (ideal)

Kebutuhan Oksigen dihitung untuk perkiraan oksigen untuk proses oksidasi pada *Fire Refining*

$$V = \frac{n.R.T}{P} = 0,16 \times 0,08206 \times 1823 = 23,9l = 24 \text{ liter/sampel}$$

$$V_{O_2 \text{ total}} = 962,26 \text{ liter}$$

B. Perhitungan Heat Balance

Perhitungan *Heat Balance* dapat memperkirakan kebutuhan LPG sebagai bahan bakar *Fire Refining*, Perhitungan Cp dan ΔH berdasarkan buku *Contributions To The Data On Theoretical Metallurgy High Temperature Heat Content, Heat Capacity, and Entropy Data for the Elements and Inorganic Compounds* oleh KK Kelly

Temperatur T target= 1550°C



$$\Delta H_{298\text{FeO}} = -272043 \text{ J/mol}$$

$$\begin{aligned}
 C_{p_{\text{FeO}}} &= \int_{298}^{1650} 11,66 + 2 \times 10^{-3}T - 0,67 \times 10^5 T^{-2} dt + \\
 &\int_{1650}^{1823} 16,3 dt + 7460 \\
 &= 11,66T + 2 \times 10^{-3}T^2 + 0,67 \times 10^5 T^{-1} \Big|_{298}^{1650} + \\
 &16,3T \Big|_{1650}^{1823} + 7460 \\
 &= 20827,945 + 2819,9 + 7490 = 31137,845 \text{ cal/mol} = 130280,74 \\
 &\text{J/mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{p_{\text{Fe}}} &= \int_{298}^{1033} 3,04 + 7,58 \times 10^{-3}T + 0,6 \times 10^{-5}T^{-2} dt + \\
 &\int_{1033}^{1183} 11,13 dt + \int_{1183}^{1673} 5,8 + 1,98 \times 10^{-3}T dt + \int_{1673}^{1812} 6,74 + \\
 &1,6 \times 10^{-3}T dt + \int_{1812}^{1823} 9,77 + 0,4 \times 10^{-3}T dt + 380 = \\
 &= 3,04T + 3,79 \times 10^{-3}T^2 - 0,6 \times 10^5 T^{-1} \Big|_{298}^{1033} + \\
 &11,13T \Big|_{1033}^{1183} + 5,8T + 0,99 \times 10^{-3}T^2 \Big|_{1183}^{1673} + 6,74T + 0,8 \times \\
 &10^{-3}T^2 \Big|_{1673}^{1812} + 9,77T + 0,2 \times 10^{-3}T^2 \Big|_{1812}^{1823} + 380 = \\
 &= 6085,35 + 1669,5 + 4227,4456 + 1324,39 + 115,467 = \\
 &13422,15 \text{ cal/mol} = 56158,28 \text{ J/mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{p_{\text{O}_2}} &= \int_{298}^{1823} 7,16 + 11 \times 10^{-3}T - 0,4 \times 10^5 T^{-2} dt = \\
 &= 7,16T + 0,5 \times 10^{-3}T^2 + 0,4 \times 10^5 T^{-1} \Big|_{298}^{1823} \\
 &= 12423,97 \text{ cal/mol} = 51881,89 \text{ J/mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta H_{\text{FeO}} &= \Delta H_{298\text{FeO}} + C_{p_{\text{FeO}}} - (C_{p_{\text{Fe}}} + 1/2 C_{p_{\text{O}_2}}) = -272043 + \\
 &130280,74 - (56158,2864 + 0,5 \times 51981) \\
 &= -64457,28 \text{ J/mol}
 \end{aligned}$$

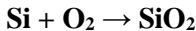


$$\Delta H_{298} = -296810 \text{ J/mol}$$

$$\begin{aligned}
 C_{p_{\text{SO}_2}} &= \int_{298}^{1823} 11,04 + 1,88 \times 10^{-3}T - 1,84 \times 10^5 T^{-2} dt = \\
 &= 11,04T + 0,94 \times 10^{-3}T^2 + 1,84 \times 10^5 T^{-1} \Big|_{298}^{1823} = \\
 &= 19359,93636 \text{ cal/mol} = 80583,57 \text{ J/mol}
 \end{aligned}$$

$$C_{p_{\text{O}_2}} = \int_{298}^{1823} 7,16 + 11 \times 10^{-3}T - 0,4 \times 10^5 T^{-2} dt =$$

$$\begin{aligned}
 &= 7,16T + 0,5 \times 10^{-3}T^2 + 0,4 \times 10^5T^{-1} \Big|_{298}^{1823} = \\
 &= 12423,97 \text{ cal/mol} = 51881,89 \text{ J/mol} \\
 C_{ps} &= \int_{298}^{368,6} 3,58 + 6,24 \times 10^{-3}T dt + \int_{368,6}^{392} 6,2 dt + \\
 &\int_{392}^{1823} 8,73 dt + 28475 = \\
 &= 3,58T + 3,12 \times 10^{-3}T^2 \Big|_{298}^{368,6} + 6,2T \Big|_{368,6}^{392} + 8,73T \Big|_{392}^{1823} + \\
 &28475 = \\
 &= 56305,34 \text{ J/mol} \\
 \Delta H_{SO_2} &= -296810 + 80583,57 - (56305,34 + 51981,89) = - \\
 &324513,458 \text{ J/mol}
 \end{aligned}$$



$\Delta H_{SiO_2 298} = -100416 \text{ J/mol}$

$$\begin{aligned}
 C_{pSiO_2} &= \int_{298}^{1823} 13,38 + 3,68 \times 10^{-3}T - 3,45 \times 10^5T^{-2} dt = \\
 &= 13,38T + 1,84 \times 10^{-3}T^2 + 3,45 \times 10^5T^{-1} \Big|_{298}^{1823} = \\
 &= 25387,55 \text{ cal/mol} = 64381 \text{ J/mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{pO_2} &= \int_{298}^{1823} 7,16 + 11 \times 10^{-3}T - 0,4 \times 10^5T^{-2} dt = \\
 &= 7,16T + 0,5 \times 10^{-3}T^2 + 0,4 \times 10^5T^{-1} \Big|_{298}^{1823} = \\
 &= 12423,97 \text{ cal/mol} = 51881,89 \text{ J/mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{pSi} &= \int_{298}^{1685} 5,7 + 0,7 \times 10^{-3}T - 1,04 \times 10^5T^{-2} dt + \\
 &\int_{1685}^{1823} 6,1 dt = \\
 &= 5,7T + 0,35 \times 10^{-3}T^2 + 1,04 \times 10^5T^{-1} \Big|_{298}^{1685} + \\
 &6,1T \Big|_{1685}^{1823} = \\
 &= 8581 + 841,8 + 12100 + 21522,8 \text{ cal/mol} = 90051,39 \text{ J/mol}
 \end{aligned}$$

$$\Delta H_{SiO_2} = -100416 + 64381,5092 - (51981,89 + 90051,395) = -178067,7 \text{ J/mol}$$



$\Delta P_{2O_5 298} = -1470060 \text{ J/mol}$

$$C_{pP_2O_5} = \int_{298}^{1823} 36,8 dt =$$

$$= 36,8 \left|_{298}^{1823} = 133800,136 \text{ J/mol}$$

$$\begin{aligned} C_{pP} &= \int_{298}^{1823} 4,74 + 3,9 \times 10^{-3} T dt = \\ &= 4,74T + 3,9 \times 10^{-3} T \left|_{298}^{1823} = 13535,8 \text{ cal/mol} = \right. \\ &56633,78 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{pO_2} &= \int_{298}^{1823} 7,16 + 11 \times 10^{-3} T - 0,4 \times 10^5 T^{-2} dt = \\ &= 7,16T + 0,5 \times 10^{-3} T^2 + 0,4 \times 10^5 T^{-1} \left|_{298}^{1823} = \right. \\ &12423,97 \text{ cal/mol} = 51881,89 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{P_{2O_5}} &= -1470000 + 133800,136 - (2 \times 56633,78 + 2,5 \times 51981,89) \\ &= 1579422,149 \text{ J/mol} \end{aligned}$$



$$\Delta H_{\text{CoO}_{298}} = -237940 \text{ J/mol}$$

$$\begin{aligned} C_{p\text{CoO}} &= \int_{298}^{1823} 11,54 + 2,04 \times 10^{-3} T + 0,4 \times 10^5 T^{-2} dt = \\ &= 11,54T + 1,02 \times 10^{-3} T^2 - 0,4 \times 10^5 T^{-1} \left|_{298}^{1823} = \right. \\ &21010 \text{ cal/mol} = 87947,68 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{pO_2} &= \int_{298}^{1823} 7,16 + 11 \times 10^{-3} T - 0,4 \times 10^5 T^{-2} dt = \\ &= 7,16T + 0,5 \times 10^{-3} T^2 + 0,4 \times 10^5 T^{-1} \left|_{298}^{1823} = \right. \\ &12423,97 \text{ cal/mol} = 51881,89 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{p\text{Co}} &= \int_{298}^{700} 4,74 + 4 \times 10^{-3} T dt + \int_{700}^{1393} 2,16 + 7,02 \times \\ &10^{-3} T dt + \int_{1393}^{1768} 17,49 - 4,92 \times 10^{-3} T dt + \int_{1768}^{1823} 9 dt + \\ &4000 + 105 = \\ &= 4205 + 2707,872 + 6065,79 + 3642,7275 + 495 = 17116,3895 \\ &\text{cal/mol} \\ &= 71614,97 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{CoO}} &= -237940 + 87947,68 - (71614,97 + 0,5 \times 51981,89) = \\ &= -247598,235 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{total}} &= \Delta H_{\text{FeO}} = -249902,43 \text{ J/mol} \times 0,25793 \text{ mol} = -64457,33 \text{ J} \\ \Delta H_{\text{SO}_2} &= -324513,458 \text{ J/mol} \times 0,018 \text{ mol} = -5841,24 \text{ J} \\ \Delta H_{\text{SiO}_2} &= -178067,7 \text{ J/mol} \times 0,0094 = -1673,83 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\Delta H_{P_{2O_5}} = -1579422,149 \text{ J/mol} \times 9,68 \times 10^{-3} = -1528,8 \text{ J}$$

$$\Delta H_{C_{6O}} = -247598,235 \text{ J/mol} \times 0,003 = -742,794 \text{ J}$$

$$\Delta H \text{ Total} = -74986,788 \text{ J} = 0,75 \text{ MJ/ sampel} = 30 \text{ MJ}$$

C. Perhitungan Kebutuhan bahan bakar LPG

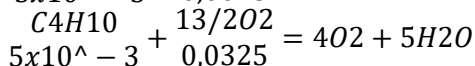
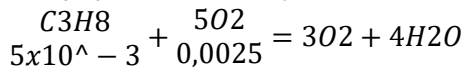
Diketahui densitas energi LPG 24,4 MJ/liter (Pertamina,2012)

$$\frac{30 \text{ MJ}}{24,4 \text{ MJ/l}} = 1,22 \text{ l LPG}$$

$$PV = nRT$$

$$1,22 = 0,08206 \times 1823 \times n ; n=0,01$$

LPG berisi 50% C_3H_8 dan 50% C_4H_{10}



$n = 5 \times 10^{-3}$ untuk Propana dan Butana

$n = 0,0025$ Oksigen Propana dan $n = 0,0325$ Oksigen Butana

$$V_{O_2 \text{ Propana}} = 0,0325 \times 0,08206 \times 1823 = 4,86 \text{ liter}$$

$$V_{O_2 \text{ Butana}} = 0,0025 \times 0,08206 \times 1823 = 0,37 \text{ liter}$$

Total Volume Pembakaran = 5,26 Liter Oksigen

D. Perhitungan Kebutuhan Oksigen

Kebutuhan Oksigen total:

Voksigen total adalah = 5,26liter + O_2 Oksidasi = 962,26 liter

E. Perhitungan Kebutuhan Laju Alir Oksigen

Perhitungan laju alor oksigen:

$$V = \frac{nRT}{P} = 0,16 \times 0,08206 \times 1823 = 24 \text{ l/sampel}$$

Dengan waktu adalah 10 menit, maka 2,4 liter/menit

F. Perhitungan Kecepatan Aliran LPG

$$V_{LPG} = 1,22 \text{ liter LPG}$$

$$V_{LPG} = 0,031 \text{ liter/sampel}$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{\text{sampel}} &= 0,031 \text{ liter dalam waktu 10 menit} \\ &= 31 \text{ cm}^3 / 10 \text{ menit} = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{detik} \end{aligned}$$

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{0,05 \text{ cm}^3 / \text{detik}}{3,14 \times 0,05 \times 0,05 \text{ cm}^2} = 0,636 \text{ m/s}$$

G. Perhitungan Yield Fire Refining

Perhitungan *Yield* berdasarkan hasil eksperimen *Fire Refining Crude Feronikel* didapat data sebagai berikut:

Laju Alir Oksigen (liter/min)	Kadar (wt %)	Ni Massa awal w_0 (gr)	Massa Akhir W_t (gr)
1,5	24,92	21,43	20,5
2	32,09	19,87	16,28
2,5	38,53	23,1	14,88
3	38,95	20,39	7,27
3,5	71,14	20,18	2,3

Dengan menggunakan persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$\text{Yield} = \frac{\text{Massa hasil fire refining} \times \% \text{Ni dalam Feronikel}}{\% \text{Ni dalam Crude Feronikel} \times \text{Massa sampel}} \times 100\%$$

1. Laju alir oksigen 1,5 Liter/min

$$\text{Yield} = \frac{20,5 \times 24,92\%}{21,43 \times 26,95\%} \times 100\% = 88,45 \%$$

2. Laju alir oksigen 2 Liter/min

$$\text{Yield} = \frac{16,28 \times 32,26\%}{21,87 \times 26,95\%} \times 100\% = 89,1\%$$

3. Laju alir oksigen 2,5 liter/min

$$\text{Yield} = \frac{14,88 \times 30,53\%}{23,1 \times 26,95\%} \times 100\% = 72,97 \%$$

4. Laju alir oksigen 3 liter/min

$$\text{Yield} = \frac{7,27 \times 35,97\%}{20,39 \times 26,95\%} \times 100\% = 57,58 \%$$

5. Laju alir oksigen 3,5 liter/min

$$\text{Yield} = \frac{6,3 \times 36,3\%}{20,18 \times 26,95\%} \times 100\% = 42,05 \%$$

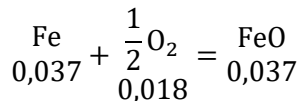
H. Perhitungan solubility Oksigen dalam Besi

Perhitungan berdasarkan persamaan 4.12 yaitu:

Fe Crude feronikel adalah $67,88\% \times 21,32 \text{ gr} = 14,47 \text{ gr}$

Fe Fire Refining adalah $58,7\% \times 21,32 \text{ gr} = 12,36$

FeO hasil Fire Refining adalah 2,11 gr



FeO adalah 2,71 gr

Solubilitas

$$\frac{56}{72} \times 2,71 = 2,103 \text{ gr Fe}$$

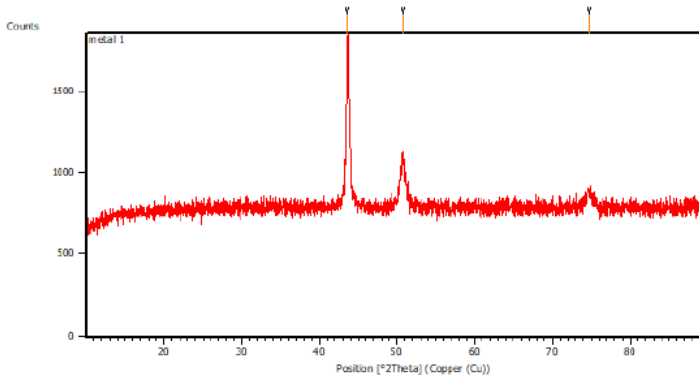
$$\frac{16}{72} \times 2,71 = 0,602 \text{ gr O}$$

$$\text{O \% wt} = \frac{0,602}{0,602 + 2,103}$$

$$\text{O \% wt} = 22\%$$

G. Hasil Pengujian XRD

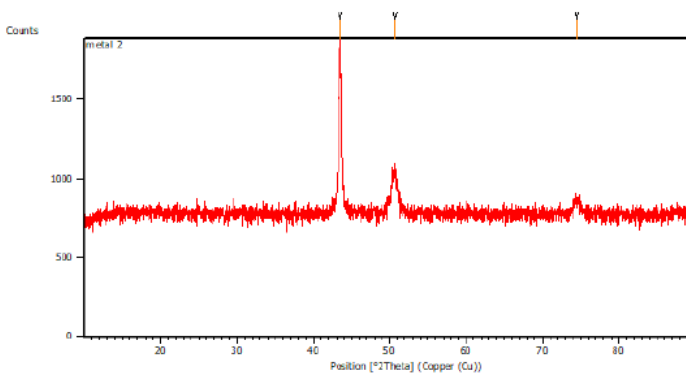
Hasil Pengujian XRD Metal 1 (7,5 kg *Limestone*)



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.5636	1025.18	0.0836	2.07759	100.00
50.8760	303.34	0.2007	1.79482	29.59
74.7138	100.37	0.5353	1.27054	9.79

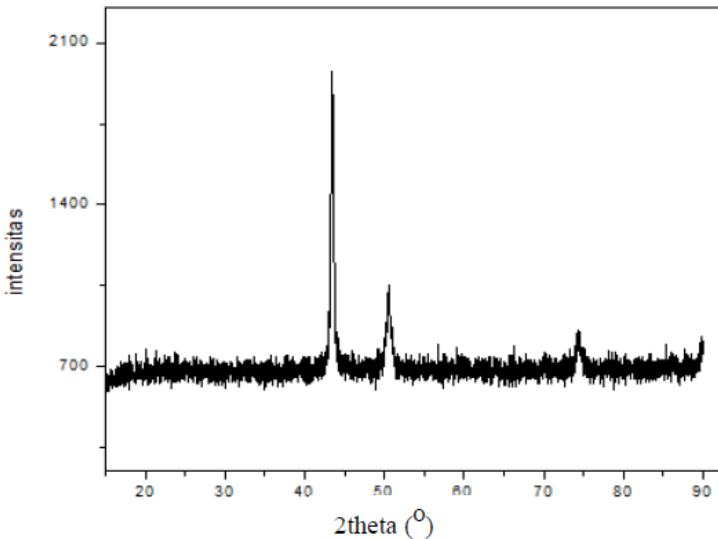
Hasil Pengujian XRD Metal 2 (8,5 kg *Limestone*)



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.4970	1098.40	0.0836	2.08062	100.00
50.7122	259.12	0.6022	1.80023	23.59
74.5541	77.91	0.6691	1.27287	7.09

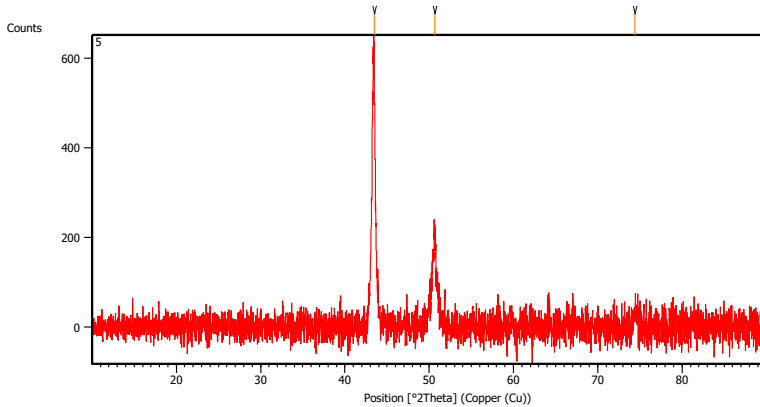
Hasil Pengujian XRD Metal 3 (9,5 kg Limestone)



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.4970	1098.40	0.0836	2.08062	100.00
50.7122	259.12	0.6022	1.80023	23.59
74.5541	77.91	0.6691	1.27287	7.09

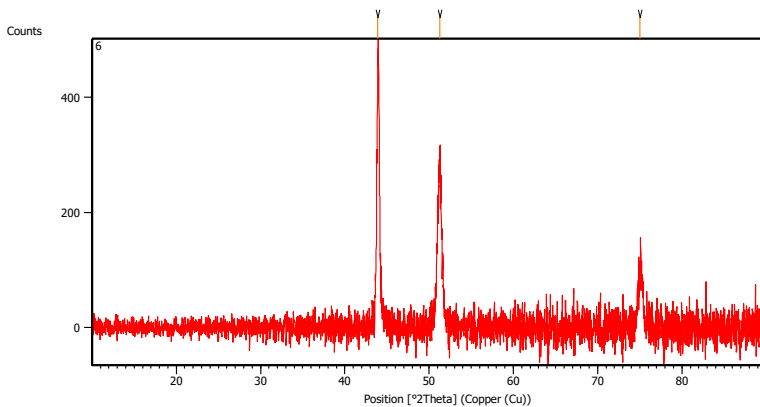
Hasil Pengujian XRD Feronikel Laju Alir 1,5 L/min



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	Left	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.4669	619.51	0.1004		2.08199	100.00
50.6670	202.02	0.4015		1.80173	32.61
74.4180	81.38	0.5353		1.27486	13.14

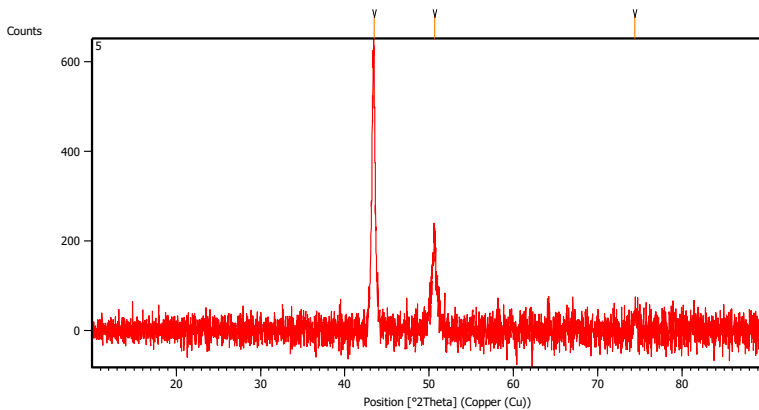
Hasil Pengujian XRD Feronikel Laju Alir 2 L/min



Peak List

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
43.9280	481.22	0.1171	2.06119	100.00
51.2708	303.65	0.2676	1.78193	63.10
75.0448	111.54	0.3346	1.26576	23.18

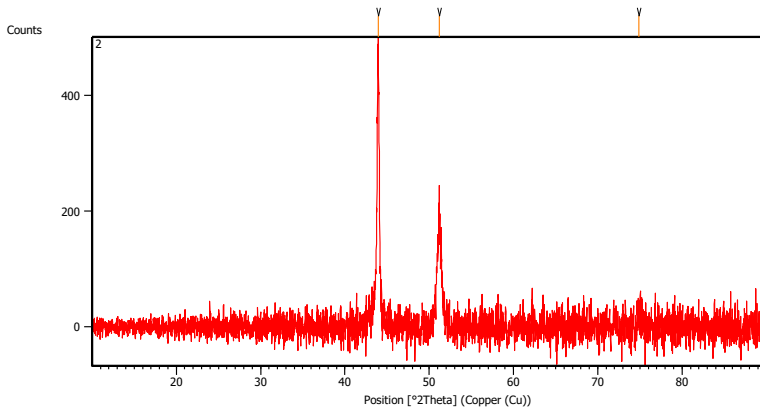
Hasil Pengujian XRD Feronikel Laju Alir 2,5 L/min



Peak List:

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
43.4669	619.51	0.1004	2.08199	100.00
50.6670	202.02	0.4015	1.80173	32.61
74.4180	81.38	0.5353	1.27486	13.14

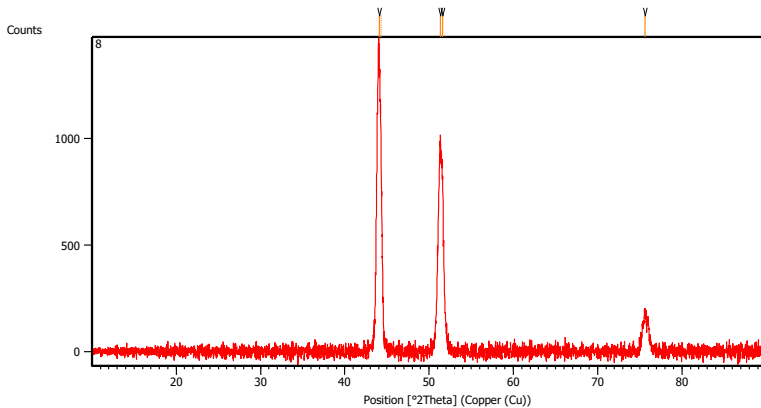
Hasil Pengujian XRD Feronikel Laju Alir 3 L/min



Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.9380	491.60	0.2342	2.06075	100.00
51.2239	196.23	0.4015	1.78345	39.92
74.9030	51.91	0.5353	1.26780	10.56

Hasil Pengujian XRD Feronikel Laju Alir 3,5 L/min



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.0792	1444.53	0.2040	2.05278	100.00
44.2731	1062.60	0.1632	2.04931	73.56
51.3226	976.50	0.3264	1.77878	67.60
51.6033	813.13	0.2448	1.76976	56.29
75.6207	172.52	0.4896	1.25650	11.94

H. Hasil Pengujian EDX

Hasil Pengujian EDX Crude Feronikel

Hasil Pengujian EDX Metal 1 (*Limestone 7,5 kg*)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>SiK</i>	00.99	01.97
<i>SK</i>	00.87	01.50
<i>FeK</i>	70.47	70.28
<i>CoK</i>	01.26	01.19
<i>NiK</i>	26.41	25.05

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>SiK</i>	01.26	02.50
<i>SK</i>	00.28	00.49
<i>FeK</i>	70.99	70.92
<i>CoK</i>	01.05	01.00
<i>NiK</i>	26.42	25.10

Hasil Pengujian EDX Metal 2 (*Limestone 8,5 kg*)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>SiK</i>	02.12	04.07
<i>PK</i>	00.49	00.86
<i>SK</i>	02.76	04.65
<i>FeK</i>	71.07	68.74
<i>NiK</i>	23.56	21.68

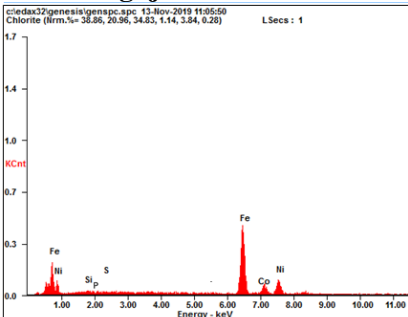
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>SiK</i>	01.76	03.45
<i>PK</i>	00.36	00.64
<i>SK</i>	01.15	01.97
<i>FeK</i>	72.53	71.31
<i>NiK</i>	24.20	22.63

Hasil Pengujian EDX Metal 3 (Limestone 9,5 kg)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>SiK</i>	00.52	00.98
<i>P K</i>	00.27	00.46
<i>S K</i>	07.76	12.87
<i>FeK</i>	61.36	58.43
<i>CoK</i>	01.33	01.20
<i>NiK</i>	28.77	26.06

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>SiK</i>	01.03	01.97
<i>P K</i>	00.50	00.87
<i>S K</i>	05.39	09.04
<i>FeK</i>	61.03	58.77
<i>CoK</i>	01.54	01.41
<i>NiK</i>	30.51	27.94

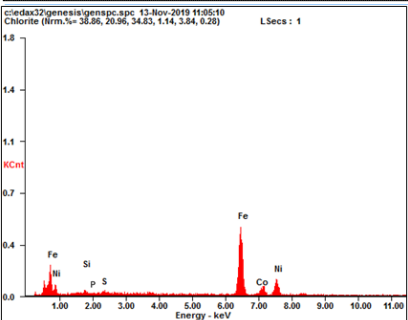
Hasil Pengujian EDX Crude Feronikel laju alir 1,5 liter/min



KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	01.24	02.45
S K	00.49	00.85
P K	00.41	00.45
FeK	70.97	70.75
CoK	01.76	01.66
NiK	25.08	23.78

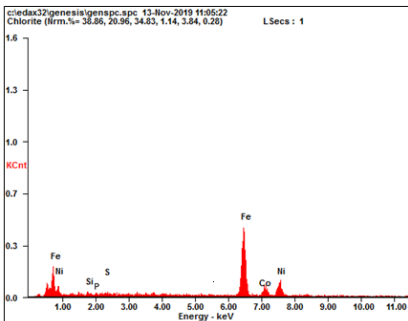
EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT



KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	01.50	02.96
S K	01.02	01.76
P K	00.32	00.39
FeK	70.64	69.97
CoK	01.87	01.75
NiK	24.61	23.19

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT

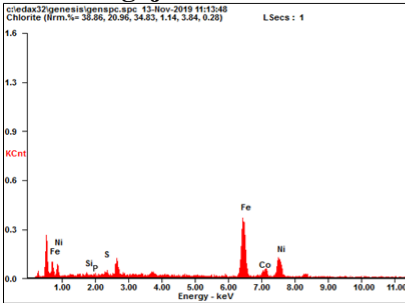


KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	01.28	02.53
S K	00.73	01.26
P K	00.56	00.62
FeK	70.37	70.00
CoK	02.10	01.98
NiK	24.92	23.59

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT

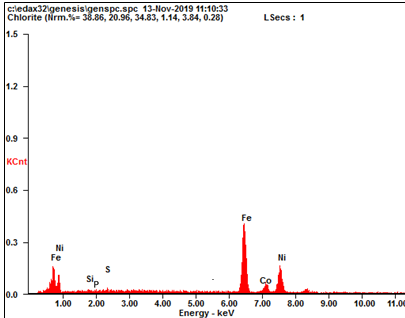
Hasil Pengujian EDX Crude Feronikel laju alir 2 liter/min



KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	01.00	01.97
S K	01.66	02.87
P K	00.16	00.17
FeK	62.68	62.39
CoK	02.59	02.44
NiK	31.91	30.12

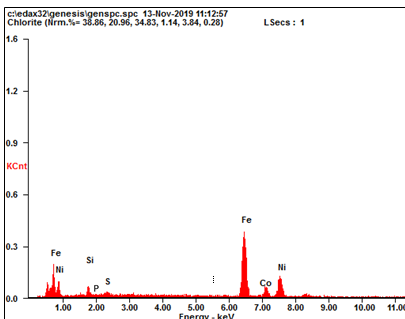
EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE - DEFAULT



KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	00.81	01.62
S K	00.63	01.11
P K	00.19	00.23
FeK	62	62.10
CoK	01.59	01.51
NiK	34.78	33.18

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE - DEFAULT

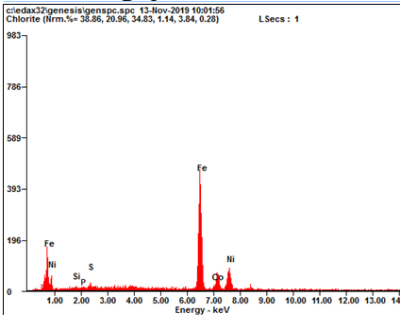


KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	03.42	06.64
S K	00.85	01.45
P K	00.34	00.38
FeK	63.89	62.80
CoK	01.41	01.31
NiK	30.09	27.79

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE - DEFAULT

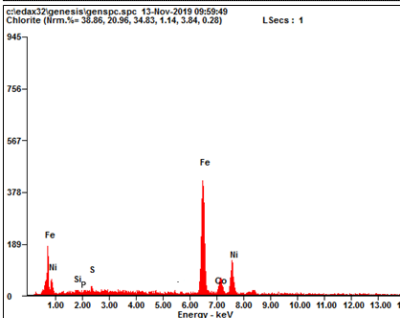
Hasil Pengujian EDX Crude Feronikel laju alir 2,5 liter/min



KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:33.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	00.59	01.17
S K	00.80	01.40
P K	00.12	00.16
FeK	71.90	71.95
CoK	01.30	01.24
NiK	24.85	23.65

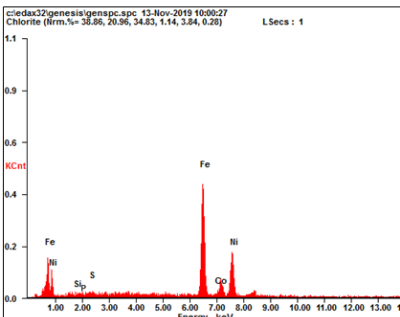
EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT



KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:33.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	01.01	02.01
S K	01.19	02.07
P K	00.13	00.15
FeK	67.17	66.88
CoK	01.44	01.36
NiK	28.87	27.34

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT

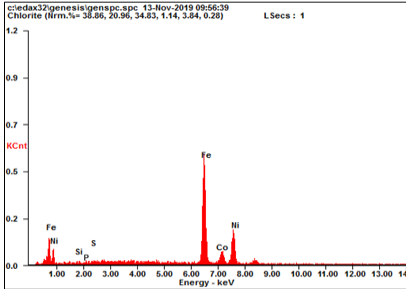


KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:33.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	00.39	00.78
S K	00.57	01.00
P K	00.17	00.20
FeK	59.44	60.09
CoK	00.75	00.71
NiK	38.53	37.05

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT

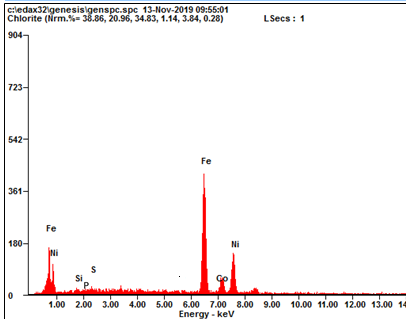
Hasil Pengujian EDX Crude Feronikel laju alir 3 liter/min



KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	00.34	00.69
SK	00.26	00.46
PK	00.12	00.15
FeK	62.16	63.94
CoK	01.39	01.33
NIK	34.61	33.33

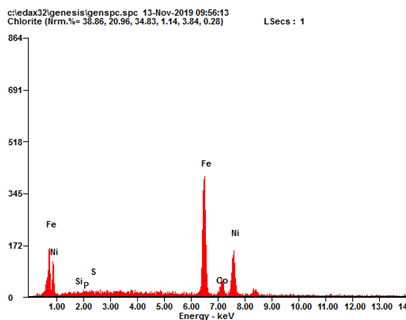
EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT



KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	00.54	01.08
SK	00.34	00.60
PK	00.27	00.30
FeK	61.80	63.40
CoK	01.52	01.46
NIK	34.36	33.00

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT

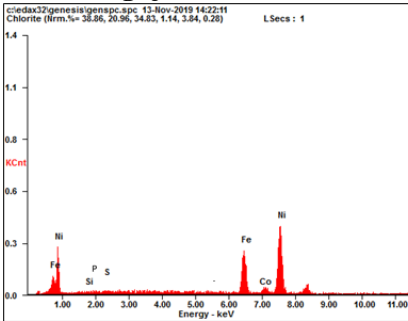


KV:20.00 TILT: 0.00 TAKE-OFF:35.00 AMPT:12.8 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLO X RESOLUTION :128.59

Element	Wt %	At %
SiK	00.35	00.71
SK	00.48	00.84
PK	00.15	00.19
FeK	57.97	59.72
CoK	01.26	01.21
NIK	38.95	37.52

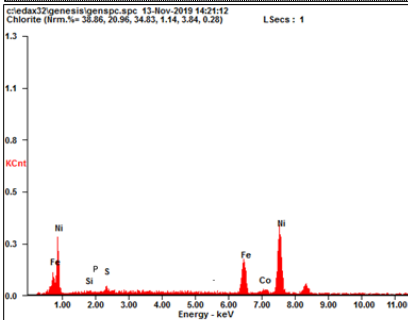
EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT

Hasil Pengujian EDX Crude Feronikel laju alir 3,5 liter/min



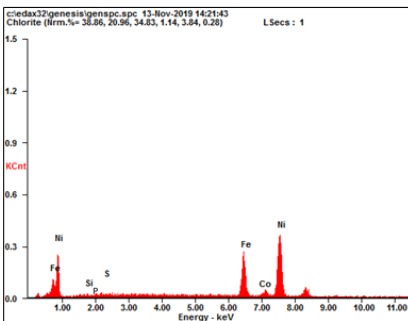
Element	Wt %	At %
SiK	00.21	00.43
SK	00.32	00.58
PK	00.39	00.43
FeK	26.09	26.92
CoK	01.60	01.57
NiK	71.39	70.07

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT



Element	Wt %	At %
SiK	00.26	00.52
SK	01.13	02.01
PK	00.37	00.41
FeK	21.86	22.44
CoK	01.79	01.74
NiK	74.60	72.87

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT



Element	Wt %	At %
SiK	00.45	00.92
SK	00.09	00.15
PK	00.44	00.49
FeK	26.42	27.23
CoK	01.46	01.43
NiK	71.14	69.77

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS_SEC
TABLE : DEFAULT

Dokumentasi





UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih tak lupa penulis sampaikan kepada pihak – pihak yang telah membantu penciptaan Tugas Akhir “Studi Pengaruh Variasi Laju Alir Oksigen Terhadap Kadar Ni, Fe, Dan Senyawa Produk Hasil Proses *Fire Refining Crude Feronikel Mini Blast Furnace* (MBF)” ini:

1. Para Anggota Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material Mas Ber, Nokh, Fira, Tetty, Nanta, Najib, Naim, Iqbal, Omsat, Sumantri, Ticil, Erik, Naupalpir, Nopal, Amri, Nanda, Arif yang selalu menemani disetiap pengerjaan Tugas Akhir ini, mulai dari persiapan, proses, pembuatan sampel, pengujian analisis dll. Tugas Akhir ini tak akan sukses tanpa kalian
2. Para sahabat MRC (Material Research Club) Zizi 35 Juta, Boba, Ust Ghodz, dan Fakh - Fakh yang selalu menjadi tempat inspirasi dan bantuan.
3. MT 18 angkatan yang selalu menjadi support dan tempat kembali
4. Mas dan Mbak MT15, MT16, MT 17 yang membimbing penulis selama menjalani perkuliahan
5. Adik-adik MT 19 dan MT20 yang selalu mendorong menjadi teladan yang baik

Penulis menyadari terdapat pihak-pihak yang belum dapat dituliskan dalam halaman ucapan terimakasih ini dan memohon maaf yang sebesar-besarnya untuk hal itu. Semoga kebaikan yang telah kalian berikan dibalaskan berlipat – lipat dengan keberkahan dari Tuhan YME

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Bukittinggi 11 Oktober 1998, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 02 Percontohan Bukittinggi. Kemudian dilanjutkan ke jenjang pertama di SMPN 01 Bukittinggi. Selanjutnya penulis menempuh pendidikan jenjang atas di SMAN 1 Bukittinggi. Lalu, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi

FTI-ITS. Selama menempuh aktivitas perkuliahan, penulis tercatat aktif dalam keorganisasian baik di tingkat himpunan dan institut. Penulis tercatat sebagai Staff BEM FTI ITS Departemen Kewirausahaan. Penulis juga mengemban amanah sebagai *President* INDOCOR SC-ITS 18/19. Penulis juga tercatat sebagai pemandu kewirausahaan ITS LKMW dan banyak sebagai pembicara kewirausahaan di ITS. Penulis juga aktif dalam mengikuti dan memenangkan lomba karya tulis baik di tingkat nasional dan Internasional, salah satunya pernah menjadi mahasiswa undangan dan pembicara dalam *Paper Competition* di Korea Maritime and Ocean University, Korea Selatan. Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT Dirgantara Indonesia pada bulan Januari-Februari 2018 dan memiliki topik dengan judul "*Influence of aging in 2014 aluminum in airbus A320 airplane component components in PT Dirgantara Indonesia*". Selain itu penulis merupakan *Co-Founder* dari MRC (Material Research Club) di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Tugas akhir yang diambil penulis yaitu dalam bidang metalurgi ekstraksi dengan judul "Studi Pengaruh Variasi Laju Alir Oksigen Terhadap Kadar Ni, Fe, Dan Senyawa Produk Hasil Proses *Fire Refining Crude Feronikel Mini Blast Furnace (MBF)*". Penulis dapat dihubungi melalui email kevinoktaviandra@gmail.com