LAPORAN TUGAS AKHIR - TL184834

# REVIEW PENGARUH REDUKTOR DALAM REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT

ERICK NICOLAS SEBAYANG
NRP. 02511640000142

Dosen Pembimbing
Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., 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

**LAPORAN TUGAS AKHIR – TL184834**

# REVIEW PENGARUH REDUKTOR DALAM REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT

ERICK NICOLAS SEBAYANG
NRP. 02511640000142

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

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL & METALURGI
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

**FINAL PROJECT REPORT – TL184384**

# THE EFFECT OF REDUCTANTS IN THE SELECTIVE REDUCTION OF NICKEL LATERITE ORE: A REVIEW

ERICK NICOLAS SEBAYANG
NRP. 02511640000142

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

MATERIALS & METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty Of Industrial Technology And System Engineering
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2020

(*This page is intentionally left blank*)

**REVIEW PENGARUH REDUKTOR DALAM REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material & Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
**ERICK NICOLAS SEBAYANG**
NRP 02511640000142

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

**SURABAYA**
**Agustus 2020**

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

# REVIEW PENGARUH REDUKTOR DALAM REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT

**Nama** : **Erick Nicolas Sebayang**
**NRP** : **02511640000142**
**Departemen** : **Teknik Material & Metalurgi**
**Pembimbing I** : **Sungging Pintowantoro, S.T.,M.T, Ph.D**
**Pembimbing II** : **Fakhreza Abdul, S.T., M.T**

**Abstrak**

*Seiring dengan menipisnya cadangan bijih sulfida, pengolahan bijih laterit kian digencarkan demi kebutuhan nikel tetap dapat dipenuhi. Metode reduksi selektif menjadi salah satu pilihan yang patut dipertimbangkan untuk mengolah laterit karena dinilai ramah lingkungan serta konsumsi energi yang lebih rendah. Selama ini pengembangan metode reduksi selektif terkonsentrasi pada agen selektivitas yang digunakan. Kondisi ini perlu diperluas agar efisiensi dan efektivitas proses reduksi selektif dalam mengolah laterit semakin optimal. Salah satu topik yang butuh diteliti lebih dalam adalah reduktor setelah penggunaannya menunjukkan indikasi dapat mengoptimalkan proses reduksi selektif laterit. Demi mengetahui lebih dalam bagaimana dampak penggunaan reduktor terhadap proses ini, review paper ini pun dilakukan dengan tujuan untuk mempelajari pengaruh reduktor terhadap kadar serta recovery nikel dan besi dalam produk hasil reduksi selektif bijih nikel laterit. Metode review paper yang dilakukan berbasis pada hasil karakterisasi produk yaitu komposisi kimianya, terutama kadar nikel dan besi. Hasil review paper menunjukkan bahwa penambahan reduktor berlebih menekan kadar nikel tetapi meningkatkan recovery nikel, besi dan kadar besi. Diperoleh jumlah penambahan reduktor yang direkomendasikan untuk limonit sebesar 5wt% dan saprolit*

*sebesar 15wt% tetapi hasil yang optimal didapatkan melalui kalkulasi potensial reduksi.*

**Kata Kunci:** ***laterit, reduktor, kadar nikel, recovery nikel***

# THE EFFECT OF REDUCTANTS IN THE SELECTIVE REDUCTION OF NICKEL LATERITE ORE: A REVIEW

**Name** : **Erick Nicolas Sebayang**
**NRP** : **02511640000142**
**Departement** : **Material & Metallurgical Engineering**
**Supervisor** : **Sungging Pintowantoro, S.T.,M.T, Ph.D**
**Co-Supervisor** : **Fakhreza Abdul, S.T., M.T**

**Abstract**

*Along with the depletion of sulfide ore reserves, producing nickel from laterite type ore are become popular recently. The selective reduction method is one of the options that need to be considered because this process is claimed to be environmentally friendly and have low energy consumption. Reductant is one of the factors that effecting the efficiency of this process. To find out how was the effect of using reductant in this process, this paper review was aimed of to find the effect of reductant towards the grade and recovery of nickel and iron. The method of this paper review is based on the results of product characterization, namely its chemical composition, especially nickel and iron content. So far, the development of selective reduction method are concentrated on the used selectivity agent. This condition needs to be expanded to provide more efficient and effective selective reduction process for processing laterite ore. One of the topics that need to be deeply studied is the effect of reductant after showing an indication of optimalization of the laterite selective reduction process. Result of this paper review show that the excess addition of reducing agent will surpress the nickel content in the product. In the other hand, it will improve the recovery of nickel, iron and also the grade of iron in product. The recommended amount of reductants addition for limonite is 5wt% and saprolite is 15wt% but the optimal results are obtained through the calculation of the reduction potential.*

**Keywords:** ***laterite, reductant, nickel grade, nickel recovery***

(*This page is intentionally left blank*)

# KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat yang telah di berikan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir berjudul “Review Pengaruh Reduktor Dalam Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit” sebagai salah satu persyaratan studi. Atas keberhasilan menyelesaikan penulisan Laporan Tugas Akhir ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan kebaikkan-Nya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua, kedua adik serta nenek penulis yang selalu mendukung dan senantiasa mendoakan penulis.
3. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si, M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Material & Metalurgi ITS.
4. Bapak Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen Pembimbing dan Ketua Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material ITS yang telah banyak memberikan arahan dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Bapak Fakhreza Abdul, S.T. M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah senantiasa membimbing serta memberikan ilmu dan masukan selama pengerjaan Tugas Akhir.

Besar harapan penulis bahwa Laporan Tugas Akhir yang telah disusun ini dapat memberikan manfaat bagi banyak orang. Terlepas dari pada itu, penulis pun menyadari bahwa di dalamnya masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka untuk menerima segala kritik maupun saran yang membangun.

Surabaya, 13 April 2020
Penulis

Erick Nicolas Sebayang
02511640000142

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

# DAFTAR ISI

**HALAMAN JUDUL.....v**
**LEMBAR PENGESAHAN..... vii**
**ABSTRAK..... ix**
**ABSTRACT ..... xi**
**KATA PENGANTAR ..... xiii**
**DAFTAR ISI .....xv**
**DAFTAR GAMBAR ..... xvii**
**DAFTAR TABEL..... xix**
**BAB I PENDAHULUAN .....1**
1.1 Latar Belakang.....1
1.2 Rumusan Masalah.....2
1.3 Batasan Masalah .....2
1.4 Tujuan Penelitian .....3
1.5 Manfaat Penelitian .....3
**BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....5**
2.1 Nikel dan Proses Ekstraksinya.....5
2.2 Bijih Nikel Laterit Dan Proses Pengolahannya .....6
2.3 Reduksi Langsung .....7
2.4 Reaktor *Bed* Reduksi Langsung.....9
2.5 Reduktor Dalam Proses Reduksi Langsung.....10
2.6 Termodinamika Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit.....11
2.7 Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit Dan Penelitiannya Terdahulu .....15
**BAB III METODE PENELITIAN .....25**
3.1 Diagram Alir Penelitian.....25
3.2 Alat & Bahan .....26
3.2.1 Alat **.....26**
3.2.2 Bahan **.....30**
3.3 Langkah Kerja .....32
3.4 Teknik Pengumpulan Variabel & Analisis .....33
**BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....37**
4.1 Analisis Data.....37

4.2 Pembahasan..... 50
**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... 61**
5.1 Kesimpulan ..... 61
5.2 Saran ..... 61
**DAFTAR PUSTAKA ..... xv**
**LAMPIRAN**
**UCAPAN TERIMA KASIH**
**BIODATA PENULIS**

# DAFTAR GAMBAR

**Gambar 2.1** Diagram Ellingham .....12
**Gambar 2.2** Diagram Stabilitas Fe-Ni-O .....16
**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian .....25
**Gambar 3.2** *Muffle Furnace*.....26
**Gambar 3.3** Jaw Crusher (a) Ball Mill (b) .....27
**Gambar 3.4** *Sieving Machine* .....27
**Gambar 3.5** *Crucible*.....28
**Gambar 3.6** EDX.....28
**Gambar 3.7** *Atomic Absroption Spectrometry* .....29
**Gambar 3.8** *Magnetic Separator*.....30
**Gambar 3.9** Bijih Nikel Laterit Saprolitik (a) Limonitik (b) .....30
**Gambar 3.10** Aditif Serbuk *Hematite* (a) $CaSO_4$ (b) $Na_2SO_4$ (c) CaCl (d) .....31
**Gambar 3.11** Batu Bara .....31
**Gambar 3.12** Dolomit .....32
**Gambar 4.1** Hasil Penelitian Zhu *et al.* (2012) .....39
**Gambar 4.2** Hasil Penelitian Nurjaman *et al.* (2018).....41
**Gambar 4.3** Tren *Recovery* Produk Penelitian Mayangsari *t al.* (2018).....44
**Gambar 4.4** Tren Kadar Produk Penelitian Mayangsari *et al.* (2018).....44
**Gambar 4.5** Tren Kadar Produk Penelitian Abdul *et al.* (2020) .....47
**Gambar 4.6** Tren *Recovery* Produk Penelitian Abdul *et al.* (2020) .....47
**Gambar 4.7** Tren Penambahan Reduktor Dalam Penelitian Xiao *et al.* (2020) Sebelum *Scale Up Test* .....50

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

# DAFTAR TABEL

**Tabel 2.1** Mekanisme Reduksi Selektif Laterit Dengan Aditif Natrium Sulfat .....18
**Tabel 2.2** Penelitian Terdahulu .....21
**Tabel 3.1** *Paper* Yang Di *Review*.....34
**Tabel 4.1** Komposisi Kimia Bijih Dalam Penelitian Zhu *et al*. (2012) .....37
**Tabel 4.2** Komposisi Kimia Reduktor Yang Digunakan Dalam Penelitian Zhu *et al*. (2012) .....38
**Tabel 4.3** Hasil EDX Produk Akhir Penelitian Zhu *et al*. (2012) Pada Penambahan 5% Reduktor.....39
**Tabel 4.4** Komposisi Kimia Bijih Nikel Dalam Penelitian Nurjaman *et al*. (2018) .....40
**Tabel 4.5** Komposisi Kimia Reduktor Dalam Penelitian Nurjaman *et al*. (2018) .....40
**Tabel 4.6** Hasil EDX Produk Penelitian Nurjaman *et al*. (2018) Dengan Penambahan 5% Reduktor .....41
**Tabel 4.7** Komposisi Kimia Bijih Nikel Limonit Hasil Analisis Dengan AAS Pada Penelitian Mayangsari *et al*. (2018) .....42
**Tabel 4.8** Hasil AAS Produk Hasil Penelitian Mayangsari *et al*. (2018) .....43
**Tabel 4.9** Komposisi Kimia Bijih Nikel Laterit Dalam Penelitian Abdul *et al*. (2020) .....45
**Tabel 4.10** Komposisi Kimia Reduktor Dalam Penelitian Abdul *et al*. (2020) .....45
**Tabel 4.11** Komposisi Kimia Dolomit Dalam Penelitian Abdul *et al*. (2020) .....45
**Tabel 4.12** Jumlah Batu Bara Dan Dolomit Dalam Penelitian Abdul *et al*. (2020) .....46
**Tabel 4.13** Hasil EDX Produk Hasil Penelitian Abdul *et al*. (2020).....47
**Tabel 4.14** Komposisi Kimia Bijih Nikel Dalam Penelitian Xiao *et al*. (2020) .....48

**Tabel 4.15** Komposisi Kimia Konsentrat Hematite Dalam Penelitian Xiao *et al*. (2020) ..... 48
**Tabel 4.16** Hasil EDX Produk Hasil Penelitian Xiao *et al*. (2020) Dengan Penambahan 15% Reduktor ..... 49
**Tabel 4.17** Faktor Selektivitas Paper Yang Diteliti ..... 51
**Tabel 4.18** Perbandingan Peningkatan Kadar Besi Dan Nikel ..... 54
**Tabel 4.19** Komposisi Kimia Bijih Nikel Dalam Penelitian Dong *et al*. (2017)..... 57
**Tabel 4.20** Hasil Penelitian Dong *et al*. (2017) ..... 57
**Tabel 4.21** Hasil *Repeated Scale Up Test* Penelitian Xiao *et al*. (2020) ..... 58

# BAB I
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Nikel merupakan unsur ke-24 yang paling umum ditemukan dalam lapisan kerak bumi yang secara alami terbentuk dalam wujud sulfida dan laterit (oksida) (Morcali, *et al*., 2017). Sebagai logam, nikel memiliki karakteristik unggul seperti kekuatan yang baik, stabilitas pada temperatur tinggi, ketahanan korosi yang baik, ulet serta konduktor listrik dan panas yang baik sehingga banyak diminati industri (Supriyatna, *et al*., 2019). Memiliki sifat-sifat unggul tersebut, industri menggunakan nikel untuk memproduksi jenis material baru, transformasi kimia, baja tahan karat dan baterai. Sebanyak 65% konsumsi nikel dunia saat ini, diperkirakan menjadi bahan baku untuk memproduksi baja tahan karat (Zhu, *et al*., 2018).

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, nikel terbentuk dalam wujud sulfida dan laterit secara alamiah, di mana 70% cadangan bijih nikel dunia berwujud laterit tetapi hanya 40% produksi nikel berasal dari bijih ini. Kondisi ini menyebabkan penipisan cadangan bijih sulfida sehingga untuk memenuhi permintaan nikel, pengolahan bijih laterit pun sedang mengalami tren yang meningkat (Pintowantoro & Abdul, 2019). Tidak mudah untuk mengolah bijih laterit karena kandungan padatan mineral silikat dan besi oksidanya yang menyebabkan sulit mendapatkan nikel secara langsung dengan metode benefisiasi fisik maupun di olah dengan melakukan *leaching* menggunakan asam. Pirometalurgi menjadi metode paling umum digunakan untuk mengolah bijih ini (Liu, *et al*., 2020). Setelah sebelumnya di olah dengan proses *smelting*, kini pengolahan laterit banyak menggunakan metode reduksi langsung yang membutuhkan energi lebih rendah dan lebih ramah lingkungan untuk mengolah laterit. Metode ini terbukti mampu menghasilkan recovery dan kadar yang tinggi dengan biaya yang lebih rendah (Pintowantoro & Abdul,

2019). Emisi $CO_2$ yang dihasilkan pun 40%-60% lebih rendah dibanding *smelting* pada umumnya (Béchara, *et al*., 2018).

Peningkatan efisiensi mengolah nikel dari bijih laterit dengan metode reduksi langsung terus digencarkan. Hal ini ditunjukkan dengan tingginya tren riset seputar metode reduksi langsung. Saat ini, riset dengan topik penambahan agen selektivitas sedang menjadi salah satu yang paling di minati. Penambahan agen selektivitas ini bertujuan untuk meletekkan konsentrasi reduksi hanya pada nikel oksida menjadi nikel. Proses reduksi langsung dengan kondisi ini biasa disebut juga reduksi selektif. Penelitian Jiang (2013) tentang pengaruh zat aditif menjadi salah satunya. Dalam penelitiannya digunakan agen selektivitas yaitu $Na_2SO_4$, $Na_2S$ dan campuran $Na_2O$ dan sulfur dengan variasi konsentrasi 0%-10%. Hasil penelitian ini menunjukkan hasil optimal pada aditif $Na_2SO_4$ dengan konsentrasi 10%. Disisi lain, penelitian Nurjaman *et al.* (2018) menunjukkan bahwa reduktor pun dapat meningkatkan efisiensi reduksi selektif laterit.

Melihat kondisi telah maraknya penelitian mengenai agen selektivitas dan disisi lain reduktor yang nyatanya berpengaruh dalam reduksi selektif laterit, maka *paper review* ini akan mengulas lebih dalam terhadap pengaruh reduktor dalam proses reduksi selektif laterit dengan harapan dapat memberikan gambaran potensi penelitian lanjutan untuk proses reduksi selektif laterit yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh reduktor terhadap kadar nikel dan besi dalam produk hasil reduksi selektif bijih nikel laterit?
2. Bagaimana pengaruh reduktor terhadap *recovery* nikel dan besi dalam produk hasil reduksi selektif bijih nikel laterit?

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini, yaitu:

1. Tipe reduktor yang diteliti dibatasi reduktor tipe padat.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Menganalisis pengaruh reduktor terhadap kadar nikel dan besi dalam produk hasil reduksi selektif bijih nikel laterit.
2. Menganalisis pengaruh reduktor terhadap *recovery* nikel dan besi dalam produk hasil reduksi selektif bijih nikel laterit.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi empiris mengenai parameter seleksi reduktor untuk meningkatkan selektivitas reduksi terhadap nikel dalam proses reduksi langsung bijih nikel laterit sehingga diperoleh parameter proses yang optimal dan ramah lingkungan.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Nikel dan Proses Ekstraksinya

Nikel (nomor atom 28; nomor massa 58,69) merupakan logam yang diklasifikasikan dalam golongan transisi VIIIB serta memiliki kekuatan, keuletan, ketahanan korosi yang baik serta temperatur leleh yang tinggi (Abdul, *et al*., 2020). Logam ini banyak dimanfaatkan dalam industri untuk memproduksi jenis material baru, transformasi kimia, baja tahan karat dan baterai. Industri baja tahan karat masih menjadi produk yang paling banyak memanfaatkan nikel hingga saat ini, di mana jumlahnya mencapai 65% total produksi nikel dunia (Zhu, *et al*., 2018). Menurut Young (2019), tingginya angka permintaan nikel untuk memproduksi baja tahan karat akan menurun setidaknya pada tahun 2030. Alasan dibalik penurunan ini adalah kian gencarnya pemanfaatan nikel sebagai bahan baku katoda baterai kendaraan berbasis listrik. Variasi baterai untuk kendaraan berbasis listrik memang banyak memanfaatkan nikel sebagai bahan baku katodanya, seperti baterai jenis katoda *nickel manganese cobalt* (NMC) dan *nickel cobalt alumunium* (NCA) (Miao, *et al*., 2019).

Secara alamiah, nikel terbentuk dalam wujud bijih sulfida dan laterit (oksida) (Morcali, et al., 2017). Bijih sulfida terletak pada permukaan yang dalam sehingga membutuhkan sumber daya yang cukup mumpuni untuk mendapatkannya. Contoh bijih nikel sulfida yaitu *pentlandite* ($[Fe,Ni]_9S_8$), *pyrrhotite* ($Fe_7S_8$), *chalcopyrite* ($CuFeS_2$). Disisi lain, laterit letaknya dekat dengan permukaan yang terbentuk sebagai dampak dari pelapukan batuan ultramafik berkandungan tinggi akan besi dan magnesium sehingga lebih mudah untuk mendapatkannya. (Khoo, *et al*., 2016). Contoh bijih laterit yaitu limonit dan saprolit (Rodrigues, *et al*., 2017).

Metode pengolahan bijih nikel telah lama dikembangkan. Dalam pengembangannya, efisiensi faktor ekonomi dan lingkungan selalu menjadi poin terpenting. Secara umum, proses

pengolahan bijih nikel dibagi menjadi dua yang telah lazim di komersialisasikan yaitu, pirometalurgi dan hidrometalurgi.

Pengolahan nikel secara pirometalurgi biasa dilakukan dengan teknologi dan proses seperti *Rotary Kiln-Eletric Furnace* (RKEF), *Sintering-Blast Furnace* dan reduksi langsung-pemisahan magnetik. Disisi lain, hidrometalurgi yang biasa diaplikasikan yaitu *leaching* kimia, flotasi. Proses gabungan antara pirometalurgi dan hidrometalurgi pun sering digunakan. Teknik ini biasa disebut juga sebagai proses Caron. Namun dari metode-metode tersebut, pirometalurgi menjadi yang paling umum digunakan karena lebih ekonomis, sesuai untuk banyak bijih, proses yang terstruktur dan polusinya mampu untuk di kontrol (Tian, *et al*., 2020).

## 2.2 Bijih Nikel Laterit Dan Proses Pengolahannya

Laterit memiliki kandungan nikel yang berkisar antara 0,4wt%-4 wt% yang dipengaruhi oleh kondisi mineralogi dari bijih. Biasanya, kandungan nikel dalam laterit tergabung dengan *goethite*, *hematite*, *ferrihydrite* dan *serpentine* (Al-Khirbash, 2020). Hanya 40% produksi nikel dunia berasal dari bijih ini, terlepas dari cadangannya yang mencapai 70% cadangan nikel dunia. Penyebabnya adalah pengolahan nikel dari bijih ini membutuhkan proses yang kompleks dan cenderung sulit karena kandungan nikelnya yang terdistribusi merata dalam kisi molecular partikel yang terkandung di dalamnya (Abdul, *et al*., 2018). Indonesia sendiri diprediksi memiliki cadangan laterit sebanyak 1,8 juta ton dengan kadar nikel rata-rata sebesar 1,45% (Febriana, *et al*., 2020).

Berdasarkan lapisannya, Laterit diklasifikasikan menjadi beberapa jenis seperti limonit dan saprolit (Al-Khirbash, 2015). Limonit terletak pada lapisan yang lebih tinggi dibandingkan dengan saprolit. Mineral utama dari limonit merupakan *goethite* (FeO•OH), di mana lapisan ini mengandung konsentrasi nikel dalam rentang 0,5wt%-1,7wt%, 40wt%-60wt% besi, >20% silika dan >10% magnesia. Kandungan nikel dari limonit tersubstitusi dalam mineral *goethite* (Elliot, *et al*., 2016). Disisi lain, saprolit

memiliki kandungan yang lebih kaya nikel dibanding limonit. Konsentrasi nikel dalam saprolit berkisar dalam rentang 2wt%-5wt% serta <40% besi dan magnesia yang cukup berlebih. Nikel dalam saprolit tersubstitusi ke dalam magnesium dan membentuk mineral *garnierite* ($(Mg,Fe,Ni)_3Si_2O_5(OH)_4$) (Pickles & Anthony, 2018).

Pengolahan laterit dapat dilakukan secara pirometalurgi dan hidrometalurgi tetapi efektifitas dari prosesnya dipengaruhi oleh karakteristik mineral dan komposisi kimia dari bijih yang diolah (Sufriadin, et al., 2011). Secara pirometalurgi, teknologi yang telah digunakan industry untuk mengolah laterit selama ini yaitu *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF), *Blast Furnace* dan Reduksi Langsung. Namun pengolahan laterit secara pirometalurgi hanya menguntungkan bila memproses bijih yang memiliki kadar nikel > 1,8wt% karena menimbang kebutuhan energinya yang besar (Setiawan, 2016). Oleh karena itu, mengolah laterit dengan pirometalurgi lebih cocok untuk saprolit. Hidrometalurgi sendiri cenderung lebih digemari untuk mengolah limonit. Penyebabnya adalah metode memiliki selektivitas yang lebih tinggi karena dapat memisahkan nikel yang terdistribusi pada mineral-mineral penyusun limonit (Li, *et al*., 2018). Metode hidrometalurgi yang dapat digunakan yaitu *Reducing Roasting-Amoniac Leaching*, *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) dan *Heap Leaching* (Wang, et al., 2017).

## 2.3 Reduksi Langsung

Reaksi redoks ialah reaksi yang melibatkan reaksi reduksi yaitu penurunan bilangan oksidasi dan reaksi oksidasi yaitu penambahan bilangan oksidasi. Reaksi ini ditunjukkan dalam persamaan kimia sehingga harus disetarakan dengan mekanisme sebagai berikut (Sukmanawati, 2009),

1. Menentukan unsur-unsur yang mengalami perubahan bilangan oksidasi.
2. Memberi koefisien yang sesuai pada unsur-unsur yang mengalami perubahan bilangan oksidasi.

3. Menentukan jumlah penambahan bilangan oksidasi untuk reaksi oksidasi dan penurunan bilangan oksidasi untuk reaksi reduksi. Kalikan jumlah unsur yang terlibat dengan muatannya.
4. Menyetarakan perubahan bilangan oksidasi dengan memberi koefisien yang sesuai.
5. Setarakan muatan dengan menambahkan $H^+$ (dalam suasana asam) dan $OH^-$ (dalam suasana basa).
6. Setarakan jumlah atom H dengan menambahkan $H_2O$.

Reduksi dalam proses reduksi langsung dapat pula dipahami sebagai proses penghilangan kandungan oksigen dan pengotor dalam bijih (Kusnadi & Cahyono, 2018). Reduksi langsung merupakan proses penghilangan oksigen dari suatu bijih oksida dengan kondisi dibawah temperatur leleh sehingga reaksinya berlangsung dalam fasa padat (Dutta & Sah, 2016).

Pengembangan reduksi langsung berawal dari teknologi yang digunakan untuk mengolah besi. Pada awalnya pengolahan besi menggunakan temperatur yang tinggi untuk melelehkan bijih sehingga dapat dipisahkan antara logam berharga dengan pengotornya dalam fasa cair. Namun proses ini menyebabkan tingginya kadar karbon dalam besi karena penggunaan batu bara sehingga penggunaannya menjadi terbatas. Riset terhadap peningkatan kadar besi dalam produk pun terus dilakukan hingga munculnya teknologi *blast furnace*. Namun *blast furnace* tidak cocok untuk penggunaan dengan skala kecil karena membutuhkan *capital cost* yang tinggi untuk membuatnya. Selain itu, kokas yang digunakan juga berdampak negatif terhadap lingkungan (Battle, 2016). Selanjutnya, proses Elkem pun berkembang. Proses ini menggunakan *Rotary Kiln* dan *Electric Furnace* untuk mereduksi dan melelehkan bijih. Proses ini pun sudah cocok untuk mengolah laterit untuk menghasilkan feronikel. Namun proses Elkem membutuhkan konsumsi energi listrik yang terlalu tinggi. Terdapat pula cara lain dalam memproduksi besi selain menggunakan *blast furnace* dan proses Elkem yaitu proses Krupp-Renn. Proses ini mampu menghasilkan besi spons tanpa pemanasan yang

sepenuhnya melelehkan bijih. Proses ini memiliki modal awal yang lebih rendah dengan produk yang memiliki lebih sedikit pengotor serta tanpa menggunakan kokas (Tsuji, 2012). Perusahaan asal Jepan bernama Nippon Yakin kemudian memodifikasi proses Krupp-Renn agar relevan untuk mengolah laterit sehingga dapat memproduksi nikel dengan prinsip reduksi langsung. Proses ini kemudian diberi nama Nippon Yakin Oheyama yang telah menjadi salah satu metode dalam mengolah nikel secara komersial menggunakan prinsip reduksi langsung (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Proses reduksi langsung Nippon Yakin Oheyama dimulai dengan menghancurkan dan menghaluskan bahan-bahan yang digunakan hingga menjadi serbuk. Bahan yang dimaksud yaitu laterit, batu bara dan fluks. Bahan-bahan kemudian dicampurkan untuk membuat briket yang kemudian dipanaskan dan direduksi di dalam *rotary kiln*. Sumber panas dari *kiln* berasal dari serbuk batu bara dan hembusan udara. Produk kemudian didinginkan dengan media air lalu dihancurkan dan dipisahkan antara logam berharga dan pengotornya secara grafitasi dan magnetik (Rao, *et al*., 2013). Konsep inilah yang banyak diaplikasikan untuk mengolah laterit dengan prinsip reduksi langsung saat ini dan terus dimodifikasi untuk meningkatkan efisiensi prosesnya.

## 2.4 Reaktor *Bed* Reduksi Langsung

Reaksi dalam reduksi langsung terjadi karena adanya reaktor dalam prosesnya. Reaktor *bed* dalam proses reduksi langsung sendiri dibedakan menjadi dua jenis yaitu, *Fixed Bed Reactor* dan *Fluidized Bed Reactor*.

*Fixed Bed Reactor* biasanya diaplikasikan untuk purifikasi gas, pertukaran ion dan proses desulfurisasi ZnO (Li, 2017). Reaktor *bed* ini memiliki desain yang sederhana dan menggunakan katalisis dalam bentuk padat untuk *bed* nya. Namun proses ini memiliki kekurangan dalam aspek konduktivitas termalnya yang rendah.

Pemilihan *Fluidized Bed Reactor* menjadi solusi dari kekurangan *fixed bed reactor*. Jenis reaktor *bed* ini memiliki perpindahan massa dan panas yang lebih baik dalam mencampur katalis dengan fluida dan menciptakan permukaan area reaksi yang lebih luas. *Fluidized Bed Reactor* tidak membutuhkan penambahan *feed* selama proses berlangsung sehingga proses dapat berlangsung kontinu. Dalam skala industri, reaktor *bed* ini diklaim memiliki biaya operasi yang rendah serta efisiensi proses yang baik (Hafeez, *et al*., 2019).

Menimbang kelebihannya, jenis *Fluidized Bed Reactor* banyak digunakan dalam proses reduksi langsung dengan reaktor *bed* prosesnya berupa reduktor padat atau gas.

## 2.5 Reduktor Dalam Proses Reduksi Langsung

Elemen pereduksi yang digunakan untuk melaksanakan prosesnya disebut juga sebagai reduktor. Proses reduksi langsung memiliki dua tipe reduktor yang digunakan, yaitu tipe padat dan gas. Berdasarkan aplikasinya di industri, tipe gas penggunaannya mencapai 82,4%.

Reduktor tipe padat menggunakan bahan yang mengandung karbon sebagai reduktornya. Proses reduksinya berlangsung dengan mencampur bijih dan reduktor di dalam reaktor. Reaksi yang berlangsung menciptakan produk gas karbon monoksida (CO) yang mereduksi oksida bijih nikel dan menghasilkan logam padat. Contoh reduktor padat yang paling banyak digunakan adalah batu bara. Keuntungan menggunakan reduktor tipe padat adalah tidak membutuhkan batu bara kokas serta memungkinkan di gunakan dalam skala kecil tetapi memiliki konsumsi energi yang lebih tinggi.

Reduktor tipe gas mereduksi oksigen dalam bijih dengan menggunakan reduktor berupa gas seperti $H_2$, CO atau gabungan keduanya. Proses ini membutuhkan gas alam dengan jumlah yang cukup untuk memproduksi gas pereduksi tersebut. Reaksinya reduksinya berlangsung pada temperatur hingga 1000$^o$C dan tekanan hingga 5 bar.

Penggunaan reduktor tipe gas yang jauh lebih tinggi dibandingkan tipe padat bukan tanpa alasan. Reduktor tipe ini dinilai jauh lebih baik dibanding tipe padat karena,

1. Investasi awal lebih rendah, pembuatan *plant* dengan reduktor berbasis gas dinilai memiliki investasi awal 1,8 hingga 2 kali lebih rendah dibanding padat dengan kapasitas yang sama.
2. Produktifitas lebih tinggi, reduktor berbasis gas dapat 10 kali lebih produktif dibandingkan jenis reduktor padat.
3. Kualitas produk lebih baik, produk dengan reduktor tipe gas memiliki kadar karbon lebih rendah dan metalisasinya lebih baik.
4. Efisiensi energi
5. Ketersediaan *plant*, proses *plant* dengan reduktor gas alam dinilai lebih jarang mengalami masalah sehingga dapat terus berlangsung tanpa banyak kebutuhan *maintenance*.
6. Polusi, reduktor tipe gas menggunakan gas alam yang bersih sehingga menghasilkan polusi yang lebih minim dibandingkan dengan batu bara.

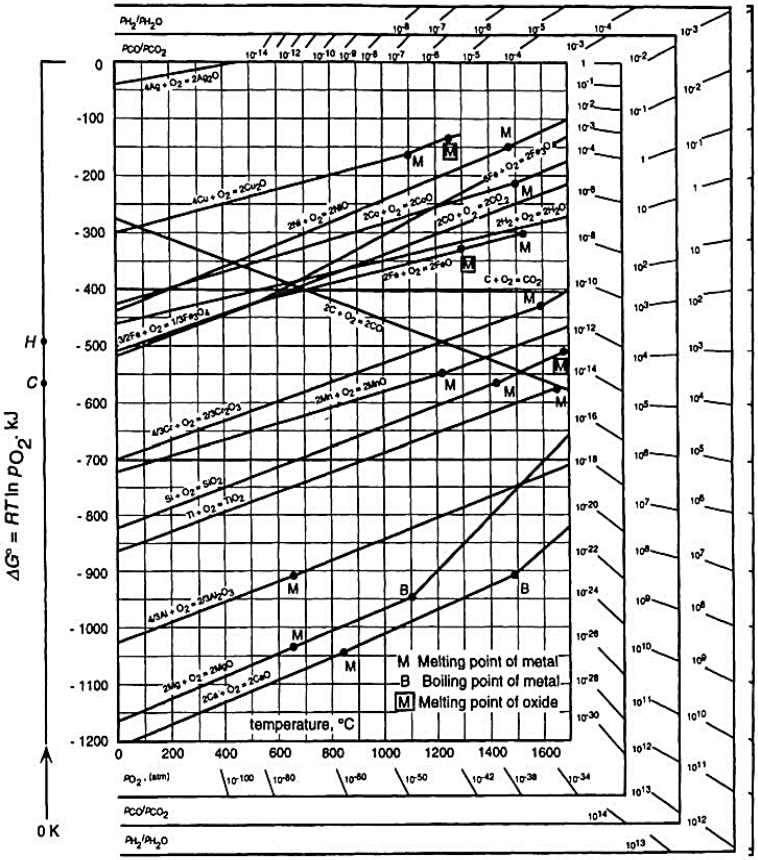
Namun di samping segala kelebihannya, penggunaan reduktor gas alam membutuhkan lokasi yang memiliki kandungan gas alam yang melimpah untuk dapat mengoperasikan *plant* nya sehingga tidak dapat di operasikan di sembarang tempat dan untuk skala yang kecil (Dutta & Chokshi, 2020).

## 2.6 Termodinamika Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit

Proses reduksi langsung bijih laterit tidak terlepas dari fenomena termodinamika. Secara umum, fenomena reduksi dari oksida dalam bijih nikel laterit dapat kita analisis berdasarkan diagram Ellingham (Gambar 2.1). Diagram ini menunjukkan hubungan antara energi bebas Gibbs dan perubahan temperatur terhadap formasi senyawa dari suatu oksida. Oleh karena entalpi dan entropi nilainya konstan terhadap perubahan temperatur ketika tidak terjadi perubahan fasa, hubungan antara energi bebas Gibbs dan temperatur dapat digambarkan dengan sebuah garis. *Slope* dari

hubungan tersebut merupakan nilai entropi dan garis potong pada sumbu y merupakan nilai entalpinya. Posisi garis dari diagram Ellingham menunjukkan kemampuan oksida untuk stabil dalam tingkatan temperatur tertentu. Semakin tinggi posisi garis maka oksidanya menjadi kurang stabil sehingga mudah untuk direduksi (Stratton, 2013).

Senyawa laterit yang memiliki formasi yang kompleks mengakibatkan dibutuhkan perlakuan khusus sebelum proses




**Gambar 2.1** Diagram Ellingham (Stratton, 2013)

reduksi laterit dapat dilangsungkan. Proses ini adalah dehidroksilasi, sebuah proses untuk memecah gugus hidroksil dari laterit sehingga menghasilkan senyawa spinel yang mengandung nikel oksida dalam bentuk larutan padat (Subagja, *et al*., 2016). Proses dehidroksilasi untuk limonit dan saprolit memiliki perlakuan yang berbeda karena formasi senyawa keduanya yang tak sama. Untuk bijih limonit, proses dehidroksilasi mulai terjadi pada temperatur ±300ºC (Elliot, *et al*., 2016). Prosesnya terus berlangsung hingga temperatur ±700ºC. Dehidroksilasi limonit diketahui cukup kompleks prosesnya, di mana terjadi beberapa perubahan fasa dari mineral *goethite* hingga menjadi akhirnya menjadi *hematite*. Transformasinya dimulai dari *goethite* (α-FeOOH) menjadi *protohematite* ($Fe_{5/3}(OH)O_2$) lalu *hydrohematite* ($Fe_{11/6}(OH)_{1/2}O_{5/2}$) dan transformasinya berakhir setelah menjadi *hematite* (α-$Fe_2O_3$). Air yang mengontaminasi limonit diklasifikasikan menjadi air bebas, air kristalin dan gugus hidroksil. Proses penghilangnya dari bijih berbeda untuk setiap temperatur. Air bebas dihilangkan ketika pemanasan berada pada temperatur 25-140ºC. Air kristalin hilang pada temperatur pemanasan 200-480ºC. Gugus hidroksil akan hilang ketika pemanasan mencapai temperatur 500-800ºC. Disisi lain, dehidroksilasi pada saprolit terjadi dalam 2 tahapan. Mineral *goethite*, *serpentine* dan *quartz* yang terkandung dalam saprolit akan sepenuhnya menjadi *serpentine* ketika dilakukan pemanasan pada temperatur 400ºC. *Serpentine* yang terbentuk akan terdehidroksilasi pada temperatur diatas 650ºC dan proses dehidroksilasi akan kembali terjadi dan selesai pada temperatur 750ºC (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Setelah gugus hidroksil telah terlepas dari bijih, proses reduksi laterit pun dapat dilangsungkan. Terdapat beberapa reduktor yang dapat digunakan, seperti karbon, hydrogen dan metana. Untuk jenis limonit, reaksi reduksi yang terjadi ketika digunakan reduktor karbon yaitu:

$$NiFe_2O_4 + CO \leftrightarrow Ni + Fe_2O_3 + CO_2 \qquad (2.1)$$

Persamaan 2.1 menunjukkan nikel ferit dengan formasi spinel yang direduksi oleh karbon monoksida. Agen pereduksi karbon monoksida pada reaksi tersebut berasal dari reaksi antara karbon dan karbon dioksida sesuai dengan reaksi Boudouard (Persamaan 2.2).

$$C_{(s)} + CO_{2(g)} \leftrightarrow 2CO_{(g)} \quad (2.2)$$

Karbon dioksida dalam Persamaan 2.2, salah satunya dihasilkan melalui proses dekomposisi fluks. Proses ini berlangsung pada temperatur 700-800$^{o}$C dengan reaksi ditunjukkan pada Persamaan 2.3 (Dutta & Chokshi, 2020).

$$CaCO_{3(s)} \leftrightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)} \quad (2.3)$$

*Hematite* hasil reduksi tersebut kemudian kembali direduksi, di mana reaksinya yaitu:

$$3Fe_2O_3 + CO \leftrightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2 \quad (2.4)$$
$$Fe_3O_4 + CO \leftrightarrow 3FeO + CO_2 \quad (2.5)$$
$$FeO + CO \leftrightarrow Fe + CO_2 \quad (2.6)$$

*Hematite* pada mulanya akan direduksi menjadi *magnetite* (Persamaan 2.4) sebelum menjadi *wustite* (Persamaan 2.5) yang kemudian direduksi menjadi logam besi (Persamaan 2.6) (Pickles & Elliot, 2015).

Berbeda dengan limonit, *serpentine* dalam bijih saprolit pasca dehidroksilasi akan membentuk formasi senyawa *olivine* dan *pyroxene* (Bunjaku, *et al*., 2013). Kedua senyawa ini mengandung nikel yang dapat direduksi oleh agen pereduksi. Reaksi reduksinya dengan agen pereduksi karbon yaitu:

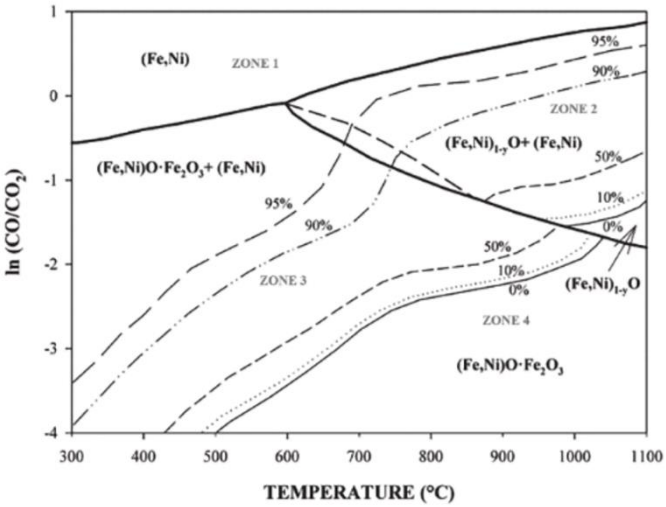
$$(Ni,Mg)2SiO_2 + 2CO \leftrightarrow 2Ni + 2SiO_2 + Mg_2SiO_4 + 2CO_2 \quad (2.7)$$
$$(Ni,Mg)2SiO_3 + CO \leftrightarrow Ni + SiO_2 + MgSiO_3 + CO_2 \quad (2.8)$$

Proses reduksi *olivine* (Persamaan 2.7) dan *pyroxene* (Persamaan 2.8) menghasilkan sedikit silika pada produk sisanya (Elliot, et al., 2016).

## 2.7 Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit Dan Penelitiannya Terdahulu

Keberadaan nikel dalam laterit yang strukturnya kompleks serta kadar yang rendah menyebabkan proses reduksi langsung secara umum tidak akan menghasilkan nikel dengan optimal. Dibutuhkan modifikasi dalam proses reduksi langsung laterit agar diperoleh nikel dengan *recovery* dan kadar yang tinggi. Penambahan aditif diketahui dapat meningkatkan kandungan nikel dalam produk. Proses reduksi langsung dengan penambahan aditif ini disebut juga sebagai reduksi selektif (Nurjaman, *et al*., 2018).

Prinsip reduksi selektif dalam meningkatkan kandungan nikel dalam produk adalah dengan menghambat reduksi besi oksida (*wustite*) menjadi logam besi sehingga proses reduksi terkonsentrasi pada nikel oksida menjadi logam nikel. Dari banyak penelitian dan pemodelan yang telah dilaksanakan, ada 3 aspek termodinamika yang berpengaruh dalam proses reduksi selektif yaitu potensial reduksi, temperatur reduksi dan transformasi fasa atau senyawa. Semakin tinggi potensial dan temperatur reduksi menyebabkan meningkatnya *recovery* Ni serta menurunnya kadar nikel dalam produk, di mana keduanya menentukan pula fasa atau senyawa yang terbentuk dalam produk. Gambar 2.2 menunjukkan hubungan antara potensial reduksi dan temperatur reduksi dapat mengakibatkan transformasi fasa yang menentukan produk akhir dari proses reduksi limonit dengan menggunakan reduktor karbon monoksida. Terdapat 4 zona dalam diagram tersebut yang masing-masing menunjukkan kondisi produk akhir. Zona 2 menjadi kondisi yang paling tepat untuk menjadi target proses reduksi selektif. Hal ini disebabkan karena pada zona ini dihasilkan produk dengan kadar nikel yang cukup serta *recovery* nikel yang tinggi. Dibandingkan dengan zona lain, proses reduksi selektif terhadap




**Gambar 2.2** Diagram Stabilitas Fe-Ni-O (Pintowantoro & Abdul, 2019)

nikel pada zona ini dapat menjadi yang paling efisien bila temperatur reduksi ditingkatkan sehingga reaksi dapat berlangsung lebih cepat (Pintowantoro & Abdul, 2019). Reduktor menjadi salah satu bahan yang penting dalam proses ini, di mana reduktor berperan sebagai penyumbang karbon dalam reaksi. Karbon dari reduktor menjadi unsur yang mereduksi karbon dioksida hasil dekomposisi fluks (Persamaan 2.9) yang kemudian menghasilkan agen pereduksi karbon monoksida sesuai reaksi Boudouard (Persamaan 2.10) sehingga dapat diperoleh potensial reduksi proses berdasarkan rasio jumlah karbon monoksida dan karbon dioksida yang berlangsung dalam proses.

$$CaCO_{3(s)} \leftrightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)} \quad (2.9)$$

$$C_{(s)} + CO_{2(g)} \leftrightarrow 2CO_{(g)} \quad (2.10)$$

Aditif yang digunakan untuk melangsungkan proses reduksi selektif menjadi salah satu topik riset yang sedang naik daun saat

ini. Jiang *et al*. (2013) melakukan riset tentang penambahan aditif $Na_2S$, $Na_2SO_4$ serta campuran sulfur dan $Na_2O$ terhadap proses reduksi bijih laterit. Hasil riset ini menunjukkan bahwa $Na_2SO_4$ menjadi aditif yang menghasilkan kadar nikel dalam produk tertinggi (10,86%) serta mampu menghambat reduksi besi oksida terbaik (24,62%) ketika dilakukan penambahan 10% aditif. Mayangsari & Prasetyo (2016) juga melakukan penelitian tentang penambahan aditif $CaSO_4$ terhadap proses reduksi limonit. Penelitian ini menjelaskan bahwa $CaSO_4$ juga dapat digunakan sebagai aditif untuk meningkatkan kadar nikel dan menekan tingkat reduksi besi, di mana peningkatan kadar nikel nya mencapai 2,44% ketika dilakukan penambahan 20% $CaSO_4$. Dong *et al*. (2017) pernah pula meneliti pengaruh aditif dalam reduksi selektif laterit. Dalam penelitiannya digunakan bijih laterit yang kaya magnesium. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan 12wt% $CaCl_2.2H_2O$ juga mampu meningkatkan kadar dan *recovery* nikel dari laterit. Reaksi dari penggunaan aditif ini ditunjukkan berikut ini,

$$CaCl_2 \cdot 2H_2O \leftrightarrow CaCl_2 + 2H_2O \quad (2.11)$$

$$CaCl_2 + SiO_2 + H_2O \leftrightarrow CaSiO_3 + 2HCl \quad (2.12)$$

$$NiO + 2HCl \leftrightarrow NiCl_2 + H_2O \quad (2.13)$$

$$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 \quad (2.14)$$

$$NiCl_2 + H_2 \leftrightarrow Ni + 2HCl \quad (2.15)$$

$$NiCl_2 + C + H_2O \leftrightarrow CO + Ni + 2HCl \quad (2.16)$$

$$Fe_2O_3 + 6HCl \leftrightarrow FeCl_2 + FeCl_3 + 3H_2O + 0{,}5Cl_2 \quad (2.17)$$

$$FeCl_2 + FeCl_3 + 2H_2O + 2C \leftrightarrow 2Fe + 4HCl + 2CO + 0{,}5Cl_2 \quad (2.18)$$

Persamaan 2.11 menunjukkan reaksi dekomposisi dari kalsium klorida yang kemudian bereaksi dengan silikon dioksida yang berasal dari kandungan bijih serta kadar air dari hasil dekomposisi pada Persamaan 2.11 yang menghasilkan *wollastonit* dalam wujud solid dan gas asam klorida (Persamaan 2.12). Gas asam klorida kemudian menciptakan proses kloridasi pada oksida nikel dan besi. Hasil klodirasi nikel yang berupa nikel klorida

(Persamaan 2.13) kemudian direduksi oleh gas hidrogen menjadi logam nikel (Persamaan 2.15). Gas hidrogen yang berfungsi sebagai agen pereduksi berasal dari reduksi air oleh karbon dari reduktor (Persamaan 2.14). Selain itu, terdapat pula nikel yang tereduksi secara langsung oleh karbon dari reduktor (Persamaan 2.16) (Pintowantoro & Abdul, 2019). Persamaan 2.17 menunjukkan proses kloridasi yang menghasilkan $FeCl_2$ dan $FeCl_3$ dalam wujud gas yang kemudian direduksi menjadi logam besi oleh karbon seperti pada Persamaan 2.18 (Bhattacharya, 2016). Namun bila reduksi oleh karbon tidak segera berlangsung, maka oksida logam yang terkloridasi tersebut dapat terevaporasi pada temperatur yang tinggi (Dong, *et al*., 2017). Aditif bertipe sulfat terbukti menjadi yang paling baik untuk melangsungkan reduksi selektif laterit yang memiliki kandungan magnesium yang rendah. Hal ini dibuktikan oleh penelitian Shofi *et al*. (2019) yang membandingkan hasil penggunaan aditif $Na_2SO_4$, NaCl dan $Na_2CO_3$. Hasilnya penambahan 10% $Na_2SO_4$ menghasilkan kadar nikel sebesar 4,6wt% dan *recovery* sebanyak 73,2% yang nilainya lebih tinggi dibandingkan hasil penambahan NaCl dan $Na_2CO_3$ dengan jumlah serupa. Mekanisme reduksi selektif laterit dengan penambahan aditif sulfat ditunjukkan pada Tabel 2.1 (Subagja, *et al*., 2016) (Wang, *et al*., 2017) (Lv, *et al*., 2018) (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Ada dua parameter yang digunakan untuk membandingkan kualitas setiap parameter proses reduksi selektif yaitu faktor efisiensi pemisahan (*separation efficiency*) dan faktor selektivitas.

**Tabel 2.1** Mekanisme Reduksi Selektif Laterit Dengan Aditif Natrium Sulfat

| Temperatur | Reaksi | Keterangan |
|---|---|---|
| $\geq$ 700ºC | $CaCO_{3(s)} \leftrightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$ | Dekomposisi Fluks |
| $\geq$ 700ºC | $C_{(s)} + CO_{2(g)} \leftrightarrow 2CO_{(g)}$ | Reaksi Bouduard |

| | | |
|---|---|---|
| ≥ 437°C | $NiO_{(s)} + CO_{(s)} \leftrightarrow Ni_{(s)} + CO_{2(g)}$ | Reaksi reduksi nikel oksida menjadi logam nikel |
| ≥ 25°C | $3Fe_2O_{3(s)} + CO_{(s)} \leftrightarrow 2Fe_3O_{4(s)} + CO_{2(g)}$ | Reaksi reduksi hematite menjadi magnetite |
| ≥ 556°C | $Fe_3O_{4(s)} + CO_{(s)} \leftrightarrow 3FeO_{(s)} + CO_{2(g)}$ | Reaksi reduksi magnetite menjadi wustite |
| ≤ 556°C | $FeO_{(s)} + CO_{(s)} \leftrightarrow Fe_{(s)} + CO_{2(g)}$ | Reaksi reduksi wustite menjadi logam besi. Reaksi ini dihambat dengan penambahan aditif. |
| ≥ 850 °C | $Na_2SO_{4(s)} + 4CO_{(g)} \leftrightarrow Na_2S_{(s)} + 4CO_{2(g)}$ | Reaksi dekomposisi Natrium Sulfat |
| ≥ 850 °C | $Na_2SO_{4(s)} + 3CO_{(g)} \leftrightarrow Na_2O_{(s)} + S_{(g)} + 3CO_{2(g)}$ | Reaksi dekomposisi Natrium Sulfat |
| ≥ 900°C | $Na_2O_{(s)} + 2Fe_2SiO_{4(s)} \leftrightarrow 4FeO_{(s)} + Na_2Si_2O_{5(s)}$ | Reaksi natrium oksida hasil dekomposisi natrium sulfat dengan fayalite |
| ≥ 900°C | $Fe_{(s)} + S_{(g)} \leftrightarrow FeS_{(s)}$ | Reaksi sulfur dengan logam besi membentuk troilite yang bersifat non magnetik sehingga besi terpisah sebagai pengotor |
| ≥ 900°C | $Na_2S_{(s)} + FeO_{(s)} + 2SiO_{2(s)} \leftrightarrow FeS_{(s)} + Na_2Si_2O_{5(s)}$ | Reaksi natrium sulfida dengan wustite dan silika oksida yang menghasilkan troilite yang bersifat non |

| | | |
|---|---|---|
| | | magnetik sehingga menghambat reduksi besi oksida menjadi logam besi |

Faktor efisiensi pemisahan menggambarkan nilai efisiensi proses yang berlangsung, hal ini dapat menjadi opsi pertimbangan dalam memilih sebuah proses meninjau dari sudut pandang ekonominya. Faktor selektivitas memberikan gambaran tentang kualitas proses dalam melakukan reduksi selektif terhadap nikel. Faktor efisiensi proses dapat dihitung dengan Persamaan 2.19 berikut ini:

$$\textit{Separation Efficiency} = \frac{100R_{Ni}m(Y_{Ni}-X_{Ni})}{(m-X_{Ni})X_{Ni}} \qquad (2.19)$$

di mana, $R_{Ni}$ merupakan *recovery* nikel, *m* adalah persentase nikel dalam logam berharga (diasumsikan dalam bentuk NiO sehingga, *m* nilainya 78,58%), $Y_{Ni}$ adalah kadar nikel dalam produk dan $X_{Ni}$ adalah kadar nikel dalam laterit. Untuk faktor selektivitas dapat dihitungnya nilainya dengan Persamaan 2.20 berikut ini:

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{X_{Fe}Y_{Ni}}{X_{Ni}Y_{Fe}} \qquad (2.20)$$

di mana, *X* adalah kadar dalam bijih dan *Y* adalah kadar dalam produk (Pintowantoro & Abdul, 2019). *Recovery* sendiri merupakan jumlah logam berharga yang diperoleh dari bijih. Nilai ini menunjukkan kualitas dari proses yang berlangsung. Nilainya dapat diperoleh berdasarkan Persamaan 2.21.

$$\textit{Recovery}\ (a) = \frac{\text{Massa Produk x Kadar } (a) \text{ Produk}}{\text{Massa Bijih x Kadar } (a) \text{ Bijih}} \text{x}100\% \qquad (2.21)$$

*a* merupakan unsur yang ingin diketahui *recovery* nya (Mayangsari & Prasetyo, 2016).

Tabel 2.2 menunjukkan penelitian terdahulu dari reduksi selektif bijih nikel laterit.

**Tabel 2.2** Penelitian Terdahulu

| Peneliti | Jenis Laterit | Reduktor | Aditif | FS | SE |
|---|---|---|---|---|---|
| (Elliot, *et al.*, 2016) | Limonit | Karbon 7,07wt% | - | - | 77,33% |
| (Lu, *et al.*, 2017) | Limonit | 8wt% Batu Bara | 20wt% $Na_2SO_4$ | 6,01 | 69,93% |
| (Cao, *et al.*, 2016) | Limonit | Antrasit dengan rasio C/O = 1,2 | CaF dan $Ca(OH)_2$ | 0,94 | 53,76% |
| (Rao, *et al.*, 2013) | Limonit | Antrasit dengan rasio C/O = 0,6 | CaF | 1,19 | 52,09% |
| (Elliott, *et al.*, 2015) | Limonit | 6wt% Bituminus | 4wt% Sulfur | 1,69 | 45,03 |
| (Abdul, *et al.*, 2018) | Limonit | Batu Bara | Dolomit | 3,07 | 51,73 |
| (Abdul, *et al.*, 2018) | Limonit | Batu Bara | Dolomit | 6,09 | 51,37 |
| (Lv, *et al.*, 2018) | Saprolit | Batu Bara dengan rasio C/O =0,8 | 8wt% $Na_2SO_4$ | 1,16 | 41,26 |

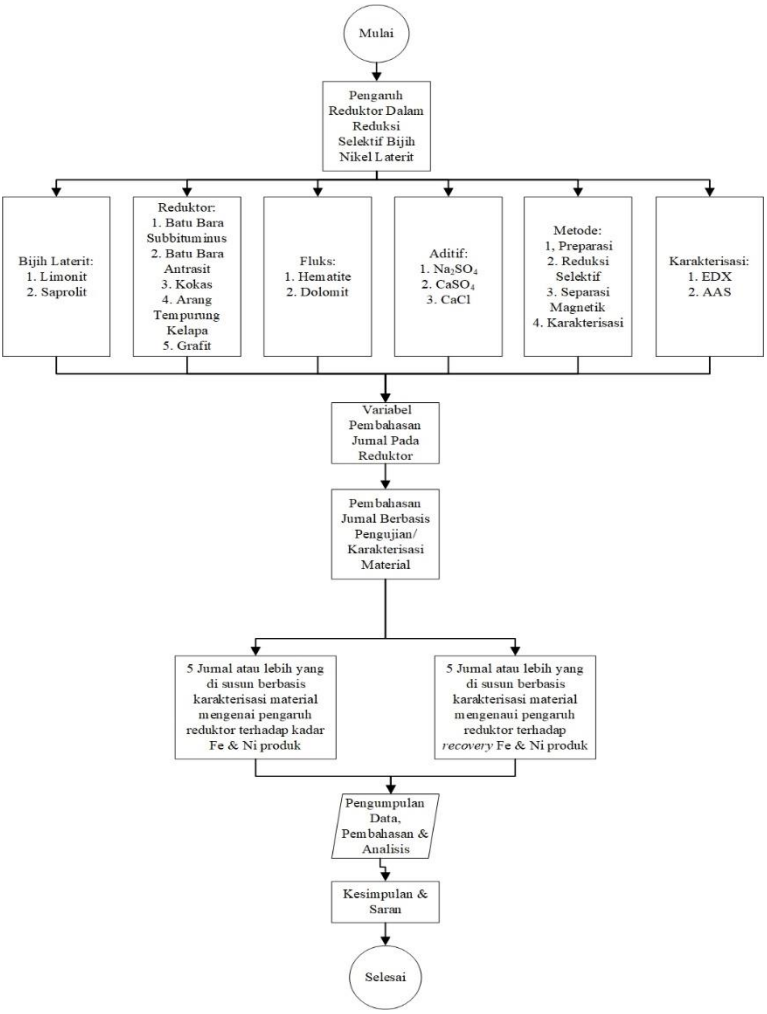
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| (Zhu, *et al.*, 2013) | Saprolit | Batu Bara dengan rasio batu bara/bijih = 2,7 | $CaO/SiO_2$ = 0,2 dan 14wt% komposit | 0,94 | 70,36 |
| (Zheng, *et al.*, 2014) | Saprolit | Batu Bara dengan rasio batu bara/pellet = 1 | - | 3,4 | 65,51 |
| (Jiang, *et al.*, 2013) | Saprolit | Batu Bara dengan FC = 30,65% dan VM = 46,36% | 10wt% $Na_2SO_4$ | 21,8 | 52,27 |
| (Liu, *et al.*, 2014) | Saprolit | Batu Bara dengan FC = 71,41% dan VM = 11,02% | CaO | 1,36 | 47,31 |
| (Li, *et al.*, 2012) | Saprolit | Lignit | 20wt% $Na_2SO_4$ | 1,38 | 35,37 |
| (Wang, *et al.*, 2018) | Saprolit | Serbuk Kokas | 75wt% $SiO_2$ | 0,97 | 35,31 |
| (Zhu, *et al.*, 2012) | Limonit + Saprolit | 5wt% Grafit | 6wt% $CaSO_4$ | 2,65 | 65,72 |
| (Elliot, *et al.*, 2016) | Limonit + Saprolit | 2,76wt% Karbon | - | - | 56,35 |

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, nilai *separation efficiency* terbaik dari pengolahan bijih limonit diperoleh pada penelitian Elliot *et al*. (2016) yang nilainya mencapai 77,33% tetapi tidak ditemukan data yang menunjukkan faktor selektivitasnya. Penelitian Abdul *et al*. (2017) menghasilkan faktor selektivitas tertinggi untuk pengolahan limonit yang mencapai 6,09 dengan *separation efficiency* sebesar 51,37%. Untuk saprolit, penelitian Zhu *et al*. (2013) memiliki nilai *separation efficiency* yang paling tinggi yaitu 70,36% dengan faktor selektivitas 0,94. Disisi lain, penelitian Jiang *et al*. (2013) menunjukkan faktor selektivitas yang paling tinggi yaitu 21,8 dengan *separation efficiency* sebesar 52,27%.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

# BAB III
# METODE PENELITIAN

## 3.1 Diagram Alir Penelitian




**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

## 3.2 Alat & Bahan

### 3.2.1 Alat

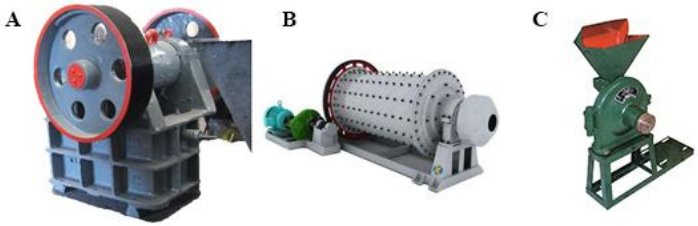
Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini secara umum, yaitu:

#### 3.2.1.1 *Muffle Furnace*

**Gambar 3.2** *Muffle Furnace*

*Muffle furnace* (Gambar 3.2) merupakan alat yang digunakan sebagai reaktor untuk melangsungkan proses reduksi. Muffle furnace mampu menyeragamkan temperatur serta memastikan ruang pembakaran tetap terisolasi selama proses pembakaran berlansung. Kodisi dibutuhkan agar tidak terdapat kontaminan dari luar (Abadi, 2018).

### 3.2.1.2 *Ore Crusher & Milling*




**Gambar 3.3** Jaw Crusher (a) Ball Mill (b)

*Crusher* merupakan alat yang digunakan untuk memperhalus ukuran bahan. Prinsipnya adalah dengan memberikan beban tekan kepada bahan menggunakan bagian kaku atau beban kejut dengan permukaan yang memiliki gerakan terbatas (Haldar, 2018). *Crusher* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *jaw crusher* (Gambar 3.3a). Hasil crushing *crushing* kemudian diperhalus kembali dengan proses *milling*. Prinsip dari proses ini adalah penggunaan beban kejut dan proses abrasi terhadap bijih. Hasil akhir dari proses ini adalah bijih dalam bentuk serbuk . Alat *milling* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *ball mill* (Gambar 3.3b) dan *disk mill* (Gambar 3.3c).

### 3.2.1.3 *Sieving Machine*

**Gambar 3.4** *Sieving Machine*

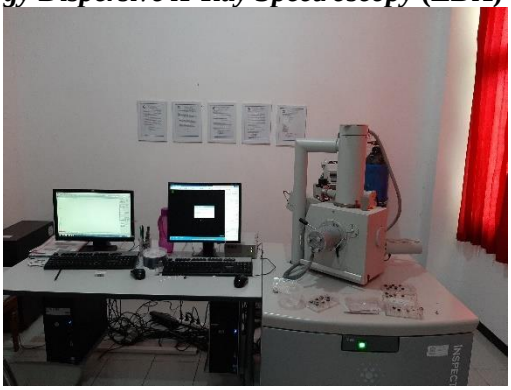
*Sieving machine* (Gambar 3.4) merupakan alat yang berfungsi untuk menyeragamkan ukuran partikel bahan setelah proses komunisi.

### 3.2.1.4 *Crucible*

**Gambar 3.5** *Crucible*

*Crucible* (Gambar 3.5) menjadi wadah bagi campuran bahan hasil aglomerasi. Salah satu *crucible* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berbahan dasar grafit.

### 3.2.1.5 *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX)



**Gambar 3.6** EDX

*Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan alat karakterisasi yang memiliki perbesaran gambar yang teliti meskipun dalam warna abu-abu. Alat karakterisasi ini dapat digunakan diberbagai disiplin ilmu karena efektif dalam menganalisis bahan organik maupun non organik dalam skala nano hingga mikro (Mohammed & Abdullah, 2019). SEM banyak dipadukan dengan detektor EDX (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*), untuk dapat secara efisien melakukan analisis terhadap komposisi kimia pada sampel dan menghasilkan informasi berbentuk data kualitatif dan kuantitatif (Gniadek & Dąbrowska, 2019).

Ilustrasi EDX yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.6.

### 3.2.1.6 *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS)

**Gambar 3.7** *Atomic Absroption Spectrometry*

*Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) merupakan sebuah metode karakterisasi material yang digunakan untuk mengetahui komposisi kimia yang ada di dalam sebuah material secara kuantitatif. Prinsip kerja alat ini adalah dengan mengukur seberapa banyak radiasi yang diserap oleh setiap unsur kimia pada sampel (García & Báez , 2012).

Ilustrasi alat AAS yang digunakan dalam penelitian ini, ditunjukkan pada Gambar 3.7.

### 3.2.1.7 Magnetik Separator

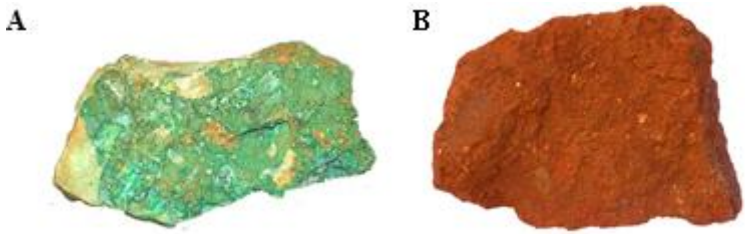
**Gambar 3.8** *Magnetic Separator*

*Magnetik separator* digunakan untuk memisakan logam dalam produk dengan pengotor. Ilustrasi *magnetik separator* yang digunakan dalam penelitian ini seperti pada Gambar 3.8.

### 3.2.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini secara umum, yaitu:

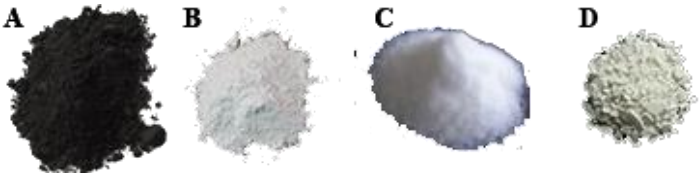
#### 3.2.2.1 Bijih Nikel Laterit




**Gambar 3.9** Bijih Nikel Laterit Saprolitik (a) Limonitik (b)

Bijih nikel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu laterit jenis saprolit (Gambar 3.9a) dan limonit (Gambar 3.9b).

### 3.2.2.2 Aditif




**Gambar 3.10** Aditif Serbuk *Hematite* (a) $CaSO_4$ (b) $Na_2SO_4$ (c) CaCl (d)

Aditif yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Serbuk *hematite* (Gambar 3.10a), $CaSO_4$ (Gambar 3.10b), $Na_2SO_4$ (Gambar 3.10c) dan CaCl (Gambar 3.10d).

### 3.2.2.3 Reduktor

**Gambar 3.11** Batu Bara

Reduktor yang digunakan dalam penelitian ini yaitu batu bara (Gambar 3.11a) jenis sub bituminous dan antrasit, arang tempurung kelapa (Gambar 3.11b) serta grafit (Gambar 3.11c).

#### 3.2.2.4 Fluks

**Gambar 3.12** Dolomit

Fluks berfungsi sebagai penyumbang $CO_2$ untuk menciptakan reaksi yang menghasilkan agen pereduksi. Fluks yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dolomit (Gambar 3.12).

## 3.3 Langkah Kerja

Setiap *paper* yang di *review* memiliki tahapan eksperimen yang secara umum sama. Adapun tahapan yang dilakukan, yaitu:

1. Preparasi Bahan

   Preparasi bahan merupakan tahapan yang dilakukan dengan tujuan mempersiapkan bahan sebelum memasuki proses reduksi dengan tujuan proses reduksi dapat berlangsung secara optimal.

   Pada tahapan ini, laterit yang telah dikarakterisasi akan diaglomerasikan sesuai dengan kebutuhan. Aglomerasi sendiri merupakan proses homogenisasi ukuran bijih agar sesuai dengan kebutuhan proses selanjutnya (Fernández-González, *et al*., 2018). Dalam tahap ini, laterit akan dihancurkan dengan *crusher* dan diseragamkan ukuran partikelnya menggunakan *sieving machine* kemudian dibentuk sesuai kebutuhan. Proses aglomerasi bijih ini juga diikuti dengan penambahan reduktor dan aditif yang juga telah dihaluskan ukurannya.

2. Reduksi Langsung

Dalam proses ini bijih dimasukkan ke dalam *crucible* lalu dipanaskan hingga dibawah temperatur lelehnya selama beberapa saat dan didinginkan. Proses ini berlangsung di dalam *muffle furnace*.

3. Separasi Magnetik

Produk hasil reduksi kemudian dipisahkan pengotor dan logamnya. Memanfaat sifat logam yang magnetik maka digunakan alat pemisah magnetik seperti *Davis Magnetic Tube*.

4. Karakterisasi

Produk yang telah dipisahkan kemudian dikarakterisasi untuk mengetahui komposisi kimianya. Proses ini menggunakan EDX atau AAS. Hasil ini juga digunakan untuk mengetahui *recovery* produk yang didapatkan.

## 3.4 Teknik Pengumpulan Variabel & Analisis

Teknik Pengumpulan Variabel yang dilakukan berbasis pada hasil karakterisasi pada produk hasil reduksi langsung. Adapun variabelnya yaitu pengaruh reduktor terhadap kadar dan *recovery* besi dan nikel. Hal ini dilatarbelakangi karena data-data berupa kadar dan *recovery* tersebut selalu menjadi parameter pembanding antara satu proses dan lainnya terutama untuk mendapatkan nilai faktor selektivitas dan *separation effiency*. Kedua hal ini menjadi dua metode pembanding paling banyak digunakan oleh para peneliti untuk membandingkan hasil penelitiannya dengan penelitian lain.

Untuk teknis analisis terhadap hasil analisis data akan dilakukan dengan membandingkan data hasil *review paper* dengan teori yang ada dan memberikan analisis kritis terhadap perbandingan data dan teori tersebut. Paper yang menjadi bahan *review* ditunjukkan dalam Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** *Paper* Yang Di *Review*

| Tahun | Nama Jurnal | Judul | Penulis |
|---|---|---|---|
| 2012 | International Journal of Mineral Processing | *Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed By Magnetic Separation* | (Zhu, *et al*., 2012) |
| 2018 | Jurnal Sains Materi Indonesia | *The Effect Of Additives And Reductors In Selective Reduction Process Of Laterite Nickel Ore* | (Nurjaman, *et al*., 2018) |
| 2018 | AIP Conference Proceedings | *Upgrading Nickel Content Of Limonite Nickel Ore Through Pelletization, Selective Reduction And Magnetic Separation* | (Mayangsari, *et al*., 2018) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 2020 | Journal of Chemical Technology and Metallurgy | *Direct Reduction Of Nickel Laterite Limonitic Ore Using A Coal-Dolomite Mixture Bed And $Na_2SO_4$ As A Selective Agent* | (Abdul, *et al*., 2020) |
| 2020 | Minerals | *Extraction of Nickel from Garnierite Laterite Ore Using Roasting and Magnetic Separation with Calcium Chloride and Iron Concentrate* | (Xiao, *et al*., 2020) |

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB IV
# HASIL DAN PEMBAHASAN

## 4.1 Analisis Data

Zhu *et al.* (2012) melakukan penelitian mengenai peningkatan kadar nikel dari bijih nikel kadar rendah dengan reduksi selektif yang disertai pemisahan berbasis magnet. Terdapat dua bijih yang digunakan dalam penelitian ini yaitu limonit dan saprolit dari Indonesia dengan komposisi kimia seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.1. Batu bara dan grafit digunakan sebagai reduktor serta serbuk kalsium sulfat ($CaSO_4$) digunakan sebagai sumber sulfur.

**Tabel 4.1** Komposisi Kimia Bijih Dalam Penelitian Zhu *et al*. (2012)

| Unsur Kimia | Kadar Bijih Limonit (wt%) | Kandungan Bijih Saprolit (wt%) |
|---|---|---|
| Ni | 0,97 | 1,42 |
| $Fe_{total}$ | 40,9 | 23,16 |
| FeO | 1,14 | 0,19 |
| Co | 0,09 | 0,08 |
| $Cr_2O_3$ | 2,86 | 1,68 |
| MnO | 0,82 | 0,57 |
| SiO2 | 12,55 | 27,74 |
| $Al_2O_3$ | 6,52 | 4,05 |
| CaO | 0,3 | 0,5 |
| MgO | 4,65 | 17,65 |
| S | 0,035 | 0,096 |
| P | 0,0063 | 0,0079 |
| LOI* | 13,23 | 12,80 |

Komposisi kimia reduktor ditunjukkan dalam Tabel 4.2. Mekanisme eksperimen penelitian ini dibagi menjadi 3 tahap yaitu preparasi sampel, proses reduksi dan pemisahan produk berbasis magnet. Persiapan sampel bertujuan untuk membuat briket untuk umpan pada proses reduksi. Tahap ini dimulai dengan

mengeringkan bijih selama 10 jam dengan temperatur 90ºC sebelum dihancurkan dengan *roll crusher* hingga berukuran 1 mm.

**Tabel 4.2** Komposisi Kimia Reduktor Yang Digunakan Dalam Penelitian Zhu *et al*. (2012)

| **Jenis Reduktor** | ***Fixed Carbon* (wt%)** | ***Moisture* (wt%)** | ***Ash* (wt%)** | ***Volatile Matter* (wt%)** |
|---|---|---|---|---|
| Batu Bara | 53,80 | 16,60 | 5,44 | 32,21 |
| Grafit | 98,70 | 0,60 | 0,20 | 0,50 |

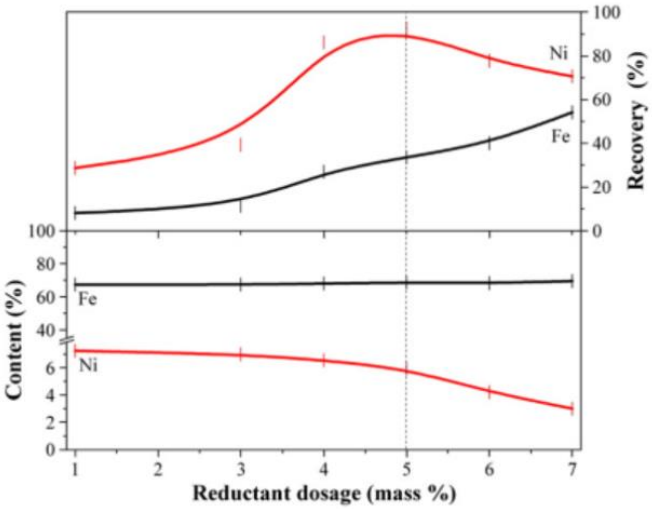
Reduktor dalam penelitian ini dibagi menjadi dua yaitu reduktor internal dan eksternal. Penggunaan internal yang dimaksud adalah reduktor dicampur dengan bijih dan aditif menjadi briket, di mana campuran batu bara dan grafit dipilih untuk hal ini dan dihancurkan dengan *jaw crusher* hingga berukuran 74 µm. Disisi lain, reduktor eksternal adalah reduktor yang berfungsi sebagai *bed* dalam reaktor. Hanya grafit yang digunakan sebagai reduktor eksternal dan dihancurkan hingga berukuran 1 mm. Briket dibentuk dengan mencampurkan bijih limonit, bijih saprolit, reduktor internal dan aditif dengan proporsi yang mengacu pada massa bijih saprolit yang digunakan. Massa setiap briket yang dibentuk yaitu sebesar 2,5 gram dengan bentuk silinder berdiameter 11 mm dan ditekan dengan alat penekan *hydraulic* menggunakan tekanan sebesar 570 N untuk setiap briketnya. Selanjutnya briket direduksi dengan rentang temperatur 900ºC dan 1250ºC selama 30 hingga 90 menit dengan *muffle furnace* lalu didinginkan dengan aliran nitrogen. Produk kemudian di hancurkan dengan *ball mill* hingga mencapai ukuran 74 µm dan di pisahkan secara magnetik dengan alat *XCGS-73 Davies Magnetic Tube*. Produk kemudian di uji komposisi kimianya dengan alat karakterisasi XRF. Pengaruh temperatur reduksi dan waktu tahan, pengaruh penambahan limonit dan kalsium sulfat dan pengaruh dosis reduktor internal selanjutnya di analisis berdasarkan hasil karakterisasi terhadap produk. Berdasarkan data yang diperoleh, kadar nikel dan *recovery* terbaik diperoleh pada kondisi reduksi dengan temperatur 1100ºC dan

waktu tahan selama 60 menit serta penambahan 40% limonit, 5% batu bara dan 6% kalsium sulfat. Parameter proses ini menghasilkan nikel dengan kadar 6,01% dan *recovery* nikel sebesar 92,3% (Tabel 4.3) . Analisis pengaruh dosis reduktor dalam

**Tabel 4.3** Hasil EDX Produk Akhir Penelitian Zhu *et al.* (2012) Pada Penambahan 5% Reduktor

| Unsur | Kadar (%) |
|---|---|
| Ni | 6,01 |
| Fe | 69,69 |

penelitian ini memvariasikan jumlah penambahan reduktor internal berupa batubara-grafit sebanyak 1-7 wt%. Data hasil eksperimen (Gambar 4.1) menunjukkan bahwa reduksi selektif nikel laterit cukup sensitif terhadap jumlah penambahan reduktor. Kadar nikel produk terus menurun seiring dengan jumlah penambahan reduktor internal tetapi *recovery* terus meningkat hingga mencapai nilai tertinggi pada penambahan 5wt% reduktor internal sebelum nilainya mencapai titik jenuh dan menurun. Penambahan reduktor




**Gambar 4.1** Hasil Penelitian Zhu *et al.* (2012)

internal ini di nilai cukup efektif karena mampu mengatasi inti briket yang tidak bereaksi serta area permukaan yang habis tereduksi. Hal ini menunjukkan proses reduksi semakin optimal karena penggunaan reduktor internal.

Nurjaman *et al.* (2018) meneliti pengaruh aditif dan reduktor dalam reduksi selektif nikel laterit. Dalam penelitiannya, peneliti dan tim menggunakan nikel laterit kadar rendah (Tabel 4.4), batu bara dan arang tempurung kelapa sebagai reduktor (Tabel 4.5) serta sodium sulfat sebagai aditif. Eksperimen dalam penelitian ini dimulai dengan menghaluskan ukuran laterit dan reduktor hingga kurang dari 149 µm (~100 mesh). Bahan yang telah halus tersebut di bentuk menjadi pelet dengan ukuran diameter sebesar 10-15 mm. di mana komposisinya yaitu 100 gram laterit, 5%-15% reduktor dan 10% sodium sulfat. Pelet kemudian di keringkan dalam oven selama 4 jam dengan temperatur 120$^{o}$C dan kemudian diletakkan dalam *crucible* untuk melangsungkan proses reduksi. Temperatur reduksi dibuat 3 variasi yaitu 950$^{o}$C, 1050$^{o}$C dan 1150$^{o}$C dengan waktu tahan selama 1 jam. Selepas proses reduksi selesai, pelet didinginkan dengan air. Produk kemudian di hancurkan hingga mencapai ukuran 74 µm dan di pisahkan dengan pengotor menggunakan metode separasi magnetik. Produk magnetik kemudian dikarakterisasi dengan XRF untuk mengetahui kandungan nikel dan besinya serta SEM-EDS untuk melihat morfologinya.

**Tabel 4.4** Komposisi Kimia Bijih Nikel Dalam Penelitian Nurjaman *et al*. (2018)

| **Unsur** | **Ni** | **Fe** | **Si** | **Mg** | **Al** | **Ca** | **Cr** | **Mn** | **Co** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| %weight | 1,4 | 50,5 | 16,5 | 1,81 | 4,86 | 0,177 | 2,68 | 0,847 | 0,0662 |

**Tabel 4.5** Komposisi Kimia Reduktor Dalam Penelitian Nurjaman *et al*. (2018)

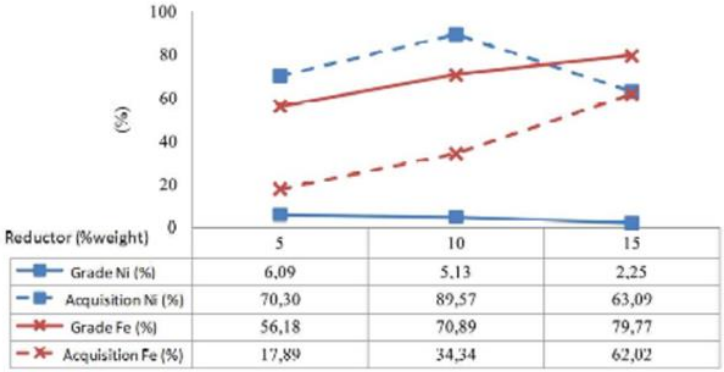
| **Reduktor** | ***Moisture*** | ***Volatile Content*** | ***Ash Content*** | ***Fixed Carbon*** |
|---|---|---|---|---|
| Batu Bara Antrasit | 3,14 | 18,25 | 18,25 | 60,35 |
| Arang Tempurung Kelapa | 0,43 | 22,57 | 21 | 77 |

Efek penambahan aditif serta tipe dan dosis reduktor di analisis. Berdasarkan hasil eksperimen, kadar dan *recovery* nikel terbaik diperoleh pada kondisi penambahan 5% reduktor dan 10% sodium sulfat dengan temperatur reduksi 1150°C selama 1 jam (Tabel 4.6).

**Tabel 4.6** Hasil EDX Produk Penelitian Nurjaman *et al*. (2018) Dengan Penambahan 5% Reduktor

| Unsur | Kadar (%) |
|---|---|
| Ni | 6,09 |
| Fe | 56,18 |

Variasi reduktor yang digunakan yaitu batubara antrasit dan arang tempurung kelapa dengan dosis 5wt%,10wt% dan 15wt%. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan jumlah reduktor




**Gambar 4.2** Hasil Penelitian Nurjaman *et al.* (2018)

menghasilkan peningkatan kadar besi dalam produk dari 56,18% yang terus meningkat hingga mencapai 79,77% (Gambar 4.2). Penambahan reduktor menyebabkan gas CO terus mengalami peningkatan sehingga mempermudah terjadinya reduksi dari *wustite* menjadi logam besi. Hal ini menyebabkan kadar nikel produk terus menurun seiring penambahan reduktor. Awalnya,

penambahan 5wt% reduktor menghasilkan 6,1% nikel tetapi terus menurun hingga pada penambahan 15wt% reduktor yang hanya menghasilkan 2,25% nikel. Penelitian ini juga mengungkap bahwa penambahan reduktor mempengaruhi ukuran butir logam yang terbentuk dalam produk. Seiring dengan penambahan reduktor, butiran yang terbentuk akan semakin besar karena semakin banyak logam oksida yang tereduksi menjadi padatan logam. Kontribusi logam tertinggi tentu saja oleh besi sehingga ketika dihasilkannya produk dengan ukuran butir yang besar, penyebabnya adalah reduksi *wustite* menjadi logam besi. Batu bara antrasit juga didapatkan lebih baik dibandingkan arang tempurung kelapa. Kadar sulfur dalam batu bara antrasit yang lebih tinggi diketahui sebagai penyebabnya. Kandungan sulfur ini meningkatkan laju kinetika reaksi reduksi dan menyebabkan pembentukan FeS yang menghambat proses reduksi *wustite* menjadi logam besi.

Mayangsari *et al.* (2018) melakukan penelitian dengan topik peningkatan kadar nikel dari bijih nikel limonit melalui proses peletisasi, reduksi selektif dan pemisahan berbasis magnet. Bijih nikel yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Halmahera, Maluku Utara, Indonesia (Tabel 4.7). Eksperimen dimulai dengan mengeringkan limonit dengan oven pada temperatur 110$^{o}$C selama 12 jam.

**Tabel 4.7** Komposisi Kimia Bijih Nikel Limonit Hasil Analisis Dengan AAS Pada Penelitian Mayangsari *et al*. (2018)

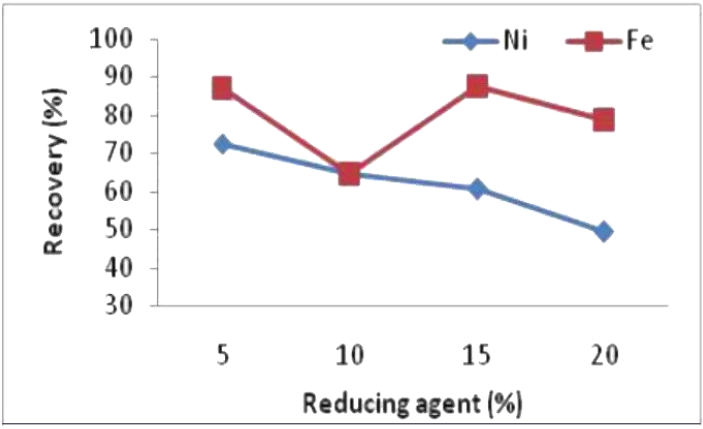
| Komposisi Kimia | Massa (wt%) |
|---|---|
| Fe | 27,02 |
| Ni | 1,29 |

Bijih kemudian dihaluskan menggunakan *crusher* dan *disk mill* lalu diayak dengan ukuran 100 *mesh*. Prosesnya dilanjutkan dengan membuat pelet dengan mencampurkan limonit, batu bara sebagai reduktor dan $CaSO_4$ sebagai aditif dengan komposisi yang telah ditentukan. Jumlah penambahan batu bara dan $CaSO_4$ divariasikan antara 5-10% dari total massa limonit yang digunakan.

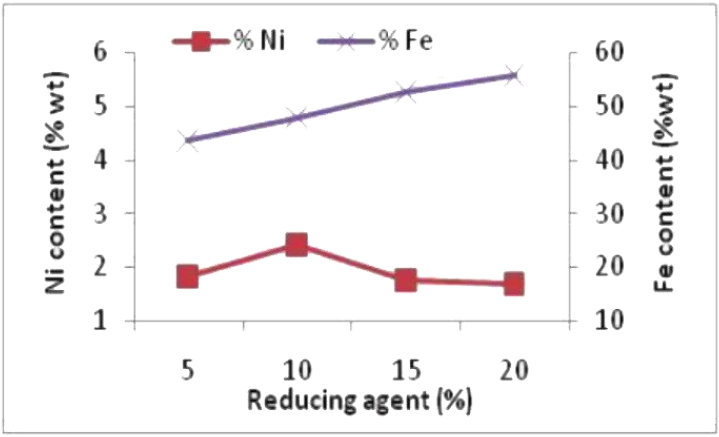
Pelet lalu dimasukkan ke dalam *crucible* grafit dan di letakkan di dalam reaktor *muffle furnace* karbolit. Proses reduksi kemudian dimulai dengan beberapa variasi temperatur dan waktu reduksi. Setelah proses reduksi selesai, produk didinginkan di dalam *furnace* hingga mencapai temperatur kamar dan di pisahkan secara magnetik dengan pengotornya. Proses pemisahannya dilakukan secara basah. Pengaruh temperatur reduksi, waktu reduksi, dosis reduktor dan aditif, fasa serta transformasi morfologinya dianalisis. Kadar nikel dan besi dalam produk dianalisis dengan menggunakan alat *Atomic Absorption Spectrophotometer Shimizu* XRD juga digunakan untuk menganalisis fasa yang terbentuk pasca proses reduksi serta SEM-EDS digunakan untuk menganalisis struktur mikro dari produk dan pengotor. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, reduksi limonit pada temperatur 1100$^{o}$C selama 60 menit dengan penambahan 10% batu bara dan 10% $CaSO_4$ menghasilkan kadar dan recovery nikel yang paling optimal. Kadar nikelnya mencapai 4,34% dengan *recovery* 50,38% (Tabel 4.8). Disisi lain, pada kondisi ini kadar besinya mencapai 57,48% dengan *recovery* 37,58%. Eksperimen ini menunjukkan bahwa penambahan reduktor menyebabkan peningkatan metalisasi dan kadar besi serta menekan nilai *recovery* dan kadar nikel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Peningkatan dosis reduktor dari 5wt% menjadi 10wt% semula berhasil meningkatkan kadar nikel dari 1,81% menjadi 2,42% tetapi angka tersebut terus menurun setelahnya hingga pada penambahan 20wt% reduktor. Disisi lain, *recovery* nikel menunjukkan tren yang terus menurun seiring dengan penambahan jumlah reduktor yang dilakukan.

**Tabel 4.8** Hasil AAS Produk Hasil Penelitian Mayangsari *et al*. (2018)

| Komposisi Kimia | Massa (wt%) |
|---|---|
| Fe | 47,93 |
| Ni | 2,42 |




**Gambar 4.4** Tren *Recovery* Produk Penelitian Mayangsari *et al*. (2018)




**Gambar 4.3** Tren Kadar Produk Penelitian Mayangsari *et al*. (2018)

Abdul *et al.* (2020) meneliti reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik menggunakan reaktor *bed* campuran dolomit dan batu

bara serta penambahan agen pereduksi berupa $Na_2SO_4$. Penelitian ini menggunakan limonit yang berasal dari Sulawesi Tenggara, Indonesia dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 4.9.

**Tabel 4.9** Komposisi Kimia Bijih Nikel Laterit Dalam Penelitian Abdul *et al*. (2020)

| Unsur | Ni | Fe | Si | Mg | Ca | Al | Cr | Mn | Co |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| wt% | 1,25 | 55,37 | 1,94 | 0,42 | 0,46 | 5,04 | 1,54 | 0,88 | 1,62 |

Eksperimen dimulai dengan menghaluskan ukuran limonit, dolomit dan batu bara hingga mencapai ukuran 50 *mesh*. Batu bara yang digunakan berasal dari Kalimantan Selatan, Indonesia sedangkan dolomit berasal dari Gresik, Jawa Timur, Indonesia. Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 menjelaskan hasil analisis proksimat batu bara dan komposisi kimia dolomit.

**Tabel 4.10** Komposisi Kimia Reduktor Dalam Penelitian Abdul *et al*. (2020)

| Parameter | Hasil | Satuan | Standar Pengujian |
|---|---|---|---|
| *Total Moisture* | 1,8 | %, ar | ASTM D3302-02 |
| *Ash Content* | 4,75 | %, ar | ASTM D3174-02 |
| *Fixed Carbon* | 42,35 | %, adb | ASTM D3175-02 |
| *Volatile Matter* | 53,86 | %, adb | ASTM D3172-02 |

**Tabel 4.11** Komposisi Kimia Dolomit Dalam Penelitian Abdul et al. (2020)

| Unsur | Ca | Mg | C | O |
|---|---|---|---|---|
| wt% | 18,01 | 14,30 | 12,62 | 55,07 |

Limonit dan batu bara kemudian dicampurkan dan dicetak menjadi briket. Pembuatan briket dilakukan dengan menggunakan agen perekat berupa tapioka yang dicampurkan dengan air. Selain limonit, batu bara dan dolomit, sebanyak 14,42 gram $Na_2SO_4$ juga ditambahkan ke dalam campuran briket tersebut sebagai agen selektivitas. Campuran bahan tersebut kemudian di tekan dengan tekanan 30 kgf/cm$^2$ dengan bentuk *pillow*. Briket kemudian dikeringkan dalam oven selama 3 jam dengan temperatur 110$^o$C agar kadar airnya hilang. Jumlah batu bara dan dolomit dalam penelitian ini divariasikan seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.12.

**Tabel 4.12** Jumlah Batu Bara Dan Dolomit Dalam Penelitian Abdul *et al*. (2020)

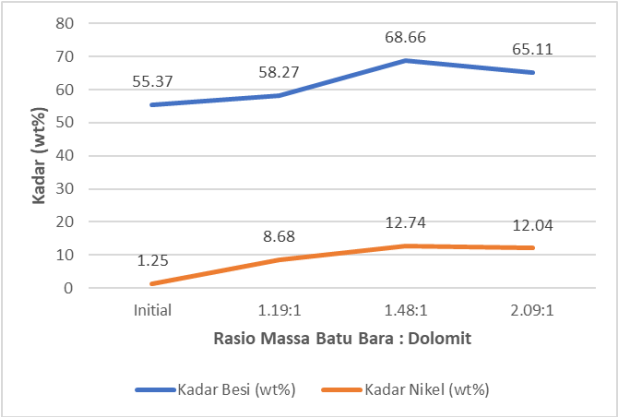
| Sampel | Batu Bara: Dolomit | Rasio $CO/CO_2$ | Massa Batu Bara (gram) | Massa Dolomit (gram) | Total Massa Briket |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 1,19:1 | 0,88 | 27,07 | 22,84 | 168,57 |
| B | 1,48:1 | 2,23 | 68,36 | 46,20 | 233,22 |
| C | 2,09:1 | 1,56 | 47,71 | 22,84 | 189,21 |

Briket kemudian dimasukkan ke dalam *crucible* dan ditimbun dengan *bed* berupa campuran batu bara dan dolomit di dalam reaktor *muffle furnace*. Proses reduksi kemudian dilangsungkan dengan temperatur reduksi 1400$^o$C selama 6 jam. Produk hasil reduksi kemudian dihancurkan dan dipisahkan secara magnetik. Produk logam kemudian dikarakterisasi dengan EDX dan XRD untuk mengetahui komposisi kimia dan senyawa yang terbentuk. Efek rasio massa batu bara dan dolomit dianalisis pengaruhnya terhadap kadar dan *recovery* nikel dan besi produk. Berdasarkan data yang didapatkan dari eksperimen ini (Gambar 4.5 dan Gambar 4.6), rasio batu bara:dolomit terbaik yaitu 2,09:1. Nilai ini lebih besar dari hasil kalkulasi (1,19:1) dan menghasilkan faktor selektivitas sebesar 8,191. Kadar nikel yang diperoleh yaitu

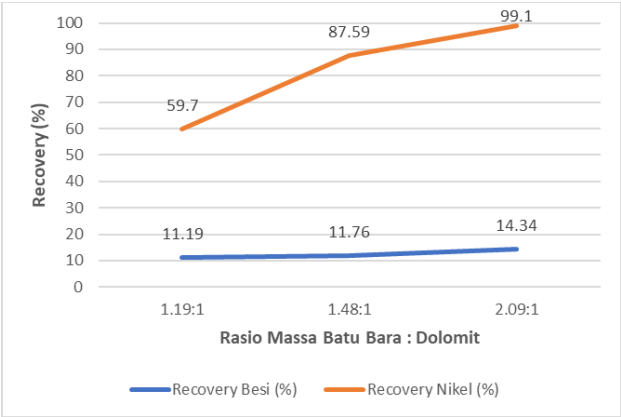
12,04wt% dan *recovery* 99,1% (Tabel 4.13). Disisi lain, kadar besi yang diperoleh yaitu 65,11wt% dengan *recovery* nya 14,34%.

**Tabel 4.13** Hasil EDX Produk Hasil Penelitian Abdul *et al*. (2020)

| Unsur | Ni | Fe | Si | Mg | Ca | Al | Cr | S | Na |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| wt% | 12,04 | 65,11 | 3,87 | 0,8 | 1,21 | 1,34 | 2,37 | 12,48 | 0,79 |




**Gambar 4.6** Tren Kadar Produk Penelitian Abdul *et al*. (2020)




**Gambar 4.5** Tren *Recovery* Produk Penelitian Abdul *et al*. (2020)

Penambahan rasio menunjukkan tren *recovery* yang terus meningkat. Disisi lain, kadar nikel juga memiliki tren yang terus meningkat sebelum mengalami penurunan pada rasio 2,09:1 meskipun tidak signifikan.

Xiao *et al.* (2020) melaksanakan penelitian bertopik pengolahan nikel laterit jenis garnierit dengan mekanisme reduksi pembakaran dan pemisahan secara magnetik. Bijih garnierit yang digunakan berasal dari Mojiang, China dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 4.14.

**Tabel 4.14** Komposisi Kimia Bijih Nikel Dalam Penelitian Xiao *et al*. (2020)

| Ni | Fe | Co | MgO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,72 | 8,65 | 0,029 | 29,66 | 37,86 | 10,05 | 5,22 |

Bijih didapatkan dalam wujud serbuk berukuran 10 mm. Namun proses ini mengharuskan ukuran bahan yang sehalus mungkin sehingga bijih garnierit diperhalus kembali hingga ukuran 0,1 mm menggunakan *crusher*. Konsentrat *hematite* digunakan sebagai aditif dalam penelitian ini dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 4.15. Reduktor yang digunakan berupa kokas yang ukurannya divariasikan 2,5 mm, 2 mm, 1,5 mm, 1 mm, dan >0,5 mm serta CaCl digunakan sebagai pereaksi. Eksperimen dimulai dengan mencampurkan garnierit, CaCl, konsentrat *hematite* dan kokas dan diletakkan ke dalam *muffle furnace*.

**Tabel 4.15** Komposisi Kimia Konsentrat Hematite Dalam Penelitian Xiao *et al*. (2020)

| Fe | P | S | MgO | SiO2 | Al2O3 | CaO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 61,22 | 0,09 | 0,032 | 4,11 | 9,22 | 7,12 | 6,78 |

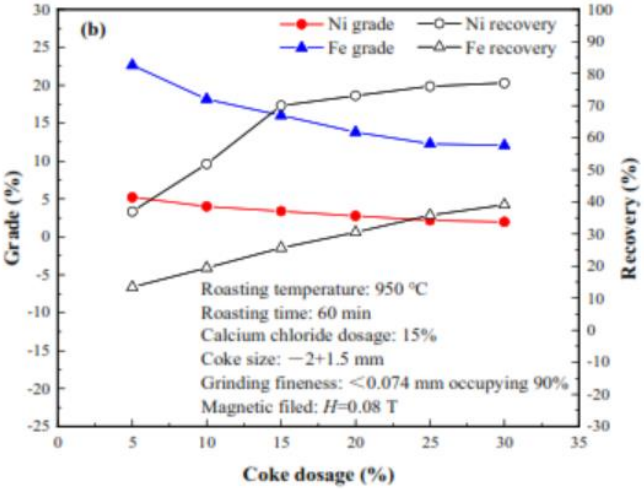
Campuran ini kemudian direduksi dengan temperatur 950ºC hingga 1200ºC dalam kondisi atmosfir reduksi yang lemah. CaCl dalam eksperimen ini berfungsi untuk membentuk logam klorida

yang mudah menguap. Produk reduksi kemudian di hancurkan dengan *conical ball mill* dan dipisahkan secara magnetik dengan alat *Davis Magnetic Tube*. Logam yang didapatkan kemudian dikarakterisasi untuk mengetahui komposisi kimianya dan menghitung *recovery* produk yang didapatkan. Pengaruh dosis penambahan CaCl dan kokas, temperatur pembakaran, lama pembakaran, ukuran kokas, dosis konsentrat *hematite*, pemisahan magnetik serta transformasi fasa nikel dan besi di analisis. Pengujian berulang terhadap metode pun dilakukan dengan *scale up test*. Eksperimen ini menunjukkan hasil paling optimal pada kondisi pembakaran pada temperatur 1100$^{o}$C selama 90 menit dengan 15% CaCl, 30% konsentrat *hematite*, 15% kokas dengan ukuran partikel 0,5 mm. Pemisahan magnetik produk dilakukan dengan tingkat kehalusan 90% produk yang mencapai <45 µm dan intensitas medan gaya magnet 0,10 T. Hasilnya diperoleh kadar nikel sebanyak 16,16% dan *recovery* 90,33%. Disisi lain, diperoleh Fe sebanyak 73,67% dengan *recovery* 10,96% (Tabel 4.16).

**Tabel 4.16** Hasil EDX Produk Hasil Penelitian Xiao *et al*. (2020) Dengan Penambahan 15% Reduktor

| Unsur | Kadar (%) |
|---|---|
| Ni | 16,16 |
| Fe | 73,67 |

Penambahan reduktor dalam penelitian ini mengakibatkan kadar nikel dalam produk mengalami penurunan tetapi *recovery* nya memiliki tren untuk terus naik seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.7. Ukuran reduktor juga diteliti dalam eksperimen yang menunjukkan bahwa ukuran partikel reduktor juga mampu meningkatkan kadar dan *recovery* nikel. Memperhalus ukuran partikel diketahui mampu meningkatkan kadar dan *recovery* nikel hingga ukurannya mecapai -1+0,5 mm sebelum sedikit nilainya sedikit menurun ketika ukuran partikel kurang dari 0,5 mm.




**Gambar 4.7** Tren Penambahan Reduktor Dalam Penelitian Xiao *et al.* (2020) Sebelum *Scale Up Test*

## 4.2 Pembahasan

Faktor selektivitas dari setiap paper penelitian ini ditunjukkan dalam Tabel 4.17, di mana data yang diambil merupakan hasil paling optimal dari setiap *paper*. Parameter yang mempengaruhi nilai faktor selektivitas ini yaitu kadar unsur dalam bijih dan produk. Oleh karena terdapat perbedaan proses dan bahan dari setiap *paper*, menyebabkan terjadinya perbedaan kadar unsur yang diperoleh sehingga faktor selektivitas juga menunjukkan nilai yang berbeda. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Pintowantoro & Abdul (2019), diketahui bahwa semakin banyak penambahan reduktor akan menyebabkan terjadinya peningkatan *recovery* nikel dan besi serta kadar besi tetapi akan menekan kadar nikel dalam produk. Alasan menurunnya kadar nikel dijelaskan dalam penelitian Forster *et al.* (2015), di mana semakin banyak

**Tabel 4.17** Faktor Selektivitas Paper Yang Diteliti

| Peneliti | Jenis Laterit | Reduktor | Aditif | Kadar Bijih (%) | | Kadar Produk (%) | | FS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Ni | Fe | Ni | Fe | |
| (Zhu, *et al.*, 2012) | Limonit | 5% Batu Bara - Grafit | $CaSO_4$ | 0,97 | 40,9 | 6,01 | 69,69 | 3,64 |
| (Nurjaman, *et al.*, 2018) | Limonit | 5% Batu Bara Antrasit | $Na_2SO_4$ | 1,40 | 50,5 | 6,09 | 56,18 | 3,91 |
| (Mayangsari, *et al.*, 2018) | Limonit | 10% Batu Bara | $CaSO_4$ | 1,29 | 27,02 | 2,42 | 47,93 | 1,06 |
| (Abdul, *et al.*, 2020) | Limonit | 2,09:1 Batu Bara:Dolomit | $Na_2SO_4$ | 1,25 | 55,37 | 12,04 | 66,11 | 8,19 |
| (Xiao, *et al.*, 2020) | Saprolit | 15% Batu Bara Kokas | CaCl & Hematite | 0,72 | 8,65 | 3,68 | 16,22 | 2,73 |

penambahan reduktor akan meningkatkan reduksi besi oksida (FeO) menjadi logam besi sehingga menekan kadar nikel dalam produk. Penelitian Lu *et al.* (2013)) serta Pickles & Anthony (2018) mengungkap bahwa tren yang sama juga terjadi pada reduktor tipe gas, di mana dalam kedua penelitian tersebut digunakan reduktor berupa hidrogen dan metana. Penambahan reduktor berlebih diketahui juga menyebabkan sulitnya pengintian produk logam karena keberadaan reduktor yang tidak bereaksi (Zulhan & Gibranata, 2017). Kandungan karbon pada reduktor yang tidak bereaksi akan membentuk residu berukuran besar serta kondisi fisik bijih yang akan lebih mudah terurai akan menghambat pergerakan partikel logam untuk melangsungkan pengintian selama proses reduksi berlangsung (Febriana, *et al.*, 2020).

Berdasarkan analisis data terhadap kadar nikel dan besi dalam produk dari setiap *paper* yang dibahas, ditemukan kondisi

bahwa dosis atau jumlah penambahan reduktor mempengaruhi kadar produk hasil reduksi selektif bijih nikel laterit. Penelitian Zhu *et al.* (2013), Nurjaman *et al.* (2018) dan Xiao *et al.* (2020) menunjukkan kadar nikel dengan tren yang terus menurun ketika penambahan reduktor dilakukan. Ketiga penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan teori dalam penelitian Pintowantoro & Abdul (2020). Penelitian Mayangsari *et al*. (2018) sempat mengalami tren kadar nikel yang meningkat ketika penambahan 5wt% reduktor ke 10wt%. Namun penurunan kembali terjadi setelah penambahan sebanyak 15wt% reduktor dilakukan. Hal ini menunjukkan bahwa batas penambahan reduktor berada pada 10wt% karena penambahan diatas batas tersebut menyebabkan atmosfir yang terlalu reduktif sehingga reduksi besi oksida menjadi besi menjadi lebih optimal. Hal ini dapat dilihat dari kadar besi dalam produk dari penelitian ini yang terus menunjukkan tren meningkat. Disisi lain, penelitian Abdul *et al.* (2020) menunjukkan hasil yang berbeda dengan teori. Hasil eksperimennya menunjukkan tren kadar nikel yang mengalami peningkatan ketika penambahan dosis reduktor dilakukan. Perbedaan pada penelitian ini disebabkan karena terdapat penggunaan fluks dalam eksperimennya yang berupa dolomit. Selain berfungsi untuk mengikat pengotor, dolomit juga menjadi penyedia $CO_2$ untuk bereaksi dengan karbon dari batu bara agar menghasilkan gas pereduksi karbon monoksida. Rasio batu bara dan dolomit yang digunakan telah dikalkulasi sebelumnya untuk mendapatkan potensial reduksi yang tepat. Berdasarkan potensial reduksi dan temperatur reduksinya, variasi eksperimen ini berada pada zona 2 pada diagram stabilitas Fe-Ni-O yang merupakan zona paling tepat untuk melaksanakan reduksi selektif, di mana didapatkan angka potensial reduksi untuk variasi A,B dan C yaitu -0,12, 0,8 dan 0,44. Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar nikel tetap dapat terjadi meskipun dilakukan penambahan dosis reduktor dengan syarat potensial reduksi dan temperatur reduksinya harus cocok untuk melangsungkan reduksi selektif. Keselarasan dengan teori juga ditemukan dalam tren kadar besi pada penelitian Zhu *et al.* (2012), Nurjaman *et al.* (2018),

Mayangsari *et al.* (2018) dan Abdul *et al.* (2020), di mana trennya terus mengalami peningkatan seiring dengan penambahan reduktor. Hanya penelitian Xiao *et al.* (2020) yang menunjukkan hasil berbeda. Dalam penelitian ini, tren penurunan lah yang terjadi. Kondisi ini dapat terjadi karena penggunaan aditif kalsium klorida yang menyebabkan terjadinya proses kloridasi pada unsur-unsur yang terkandung dalam bijih. Untuk besi, proses kloridasi akan menghasilkan $FeCl_2$ dan $FeCl_3$ dalam wujud gas yang kemudian direduksi menjadi logam besi oleh karbon (Bhattacharya, 2016). Namun apabila reaksi reduksi ini tidak segera terjadi, maka terdapat kemungkinan oksida logam yang terkloridasi tersebut untuk mengalami evaporasi pada temperatur tinggi (Dong, *et al*., 2017). Kondisi ini dapat menjadi salah satu penyebab mengapa kadar besi dalam produk terus mengalami penurunan, terutama $FeCl_3$ yang akan menguap pada temperatur 320$^{o}$C (Namboothiri & Mallick, 2017). Selain itu, penambahan reduktor juga menyebabkan semakin banyaknya karbon monoksida dan gas asam klorida dalam reaksi. Kondisi ini dapat mengakibatkan terjadi pula reduksi terhadap unsur lain seperti magnesium, potasium, alumunium dan sodium yang juga terkloridasi. Reduksi terhadap unsur-unsur lain ini dapat menekan kadar besi yang kandungannya tidaklah dominan dalam bijih. Peningkatan kadar besi pada produk hasil reduksi selektif bijih nikel laterit sangat dihindari. Alasannya karena hal ini akan menekan kadar nikel dalam produk. Kandungan nikel dalam laterit sendiri hanya berkisar dalam rentang 0,4-2wt%, di sisi lain kandungan besinya dapat mencapai 60wt% (Al-Khirbash, 2020). Tujuan utama dilaksanakannya reduksi selektif ini sendiri adalah untuk mempromosikan reduksi terhadap nikel sehingga diperoleh produk dengan kadar dan *recovery* nikel yang tinggi. Untuk mendapatkannya, dibutuhkan penghambatan terhadap reduksi oksida lainnya termasuk besi dengan beberapa upaya seperti menambahkan aditif ke dalam proses dan membatasi jumlah penambahan reduktor. Berdasarkan analisis data yang dilakukan, peningkatan kadar besi dalam produk yang dihasilkan tidak setara ketika dibandingkan dengan peningkatan kadar nikel dalam produk

bila ditinjau berdasarkan selisih kadar dari produk pada paratemer optimal dan kadar pada bijih. Perbandingannya ditunjukkan pada Tabel 4.18.

**Tabel 4.18** Perbandingan Peningkatan Kadar Besi Dan Nikel

| **Peneliti** | **Peningkatan Kadar Nikel (wt%)** | **Peningkatan Kadar Besi (wt%)** |
|---|---|---|
| Zhu *et al.* (2012) | 5,04 | 28,79 |
| Nurjaman *et al.* (2018) | 4,69 | 5,68 |
| Mayangsari *et al.* (2018) | 1,13 | 20,91 |
| Abdul *et al.* (2020) | 10,79 | 9,74 |
| Xiao *et al.* (2020) | 2,96 | 7,57 |

Hanya pada penelitian Abdul *et al.* (2020) diperoleh peningkatan kadar nikel yang lebih tinggi dibandingkan kadar besi serta menjadi peningkatan kadar nikel yang paling tinggi yaitu sebesar 10,79wt% dan peningkatan kadar besinya sebesar 10wt%. Pada penelitian lainnya, jumlah peningkatan kadar besi lebih dominan, terutama pada penelitian Mayangsari *et al.* (2018). Hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan kadar besi sebesar 21wt% sedangkan peningkatan kadar nikel hanya sebesar 1,13wt%. Namun, peningkatan kadar besi tertinggi terjadi pada penelitian Zhu *et al.* (2012) yaitu sebesar 29wt%.

Analisis terhadap data *recovery* nikel dan besi dalam produk dari setiap *paper* yang dibahas, juga menunjukkan bahwa reduktor berpengaruh dalam reduksi selektif nikel laterit. *Recovery* nikel dari bijih laterit jenis limonit dan saprolit menunjukkan tren yang berbeda. Penelitian terhadap limonit menunjukkan tren *recovery* nikel yang tidak konsisten, di mana trennya menurun ketika penambahan dosis reduktor mencapai 10wt% tetapi pada penelitian saprolit menunjukkan bahwa *recovery* nikel terus meningkat seiring dengan penambahan reduktor hingga mencapai 30wt%.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, secara teoritis *recovery* nikel seharusnya terus meningkat seiring dilakukannya penambahan reduktor, di mana hal ini tidak terjadi pada bijih jenis limonit. Namun, penelitian Wang *et al.* (2017) menjelaskan bahwa tren yang menurun karena penambahan reduktor pada limonit mungkin saja terjadi. Dalam penelitiannya, rasio C/O divariasikan. C dalam hal ini merupakan nilai *fixed carbon* dari reduktor yang berupa batu bara dan O merupakan total oksigen milik besi dan nikel dalam bijih. Hasilnya menunjukkan bahwa jumlah reduktor yang terlalu banyak dapat menyebabkan agregasi dan pertumbuhan partikel feronikel yang buruk, di mana nikel tidak dapat berpisah dari besi sehingga *recovery* nikel mengalami penurunan. Disisi lain, nilai *recovery* besi dari setiap *paper* yang dibahas cukup konsisten untuk mengalami peningkatan seiring dengan penambahan reduktor yang dilakukan, di mana hal ini selaras dengan teori. Hanya pada penelitian Mayangsari *et al*. (2018), *recovery* besi menunjukkan penurunan ketika dilakukan penambahan dosis reduktor menjadi 10wt%. Namun hal tersebut tidak berlangsung konsisten karena setelah penambahan 15wt% dilakukan, *recovery* besi kembali mengalami peningkatan. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan 10wt% mempromosikan reduksi selektif terbaik dalam penelitian ini. Dalam penelitian ini, digunakan aditif $CaSO_4$. Penambahan aditif ini, diketahui mampu menciptakan ikatan sulfur dengan besi yang membentuk FeS dan terpisah sebagai pengotor setelah proses separasi magnetik dilakukan. Namun penambahan reduktor diatas 10wt% kembali menciptakan tren peningkatan *recovery* besi. Penambahan diatas angka tersebut menunjukkan terciptanya atmosfir reduksi yang terlalu reduktif sehingga terlepas dari penambahan aditif, reduksi *wustite* menjadi logam besi tetap optimal. Meskipun mampu menekan *recovery* besi, penambahan 10wt% reduktor dalam penelitian ini nyatanya tidak mampu menekan kadar besi. Kadar besi produk hasil penelitian ini, tetap mengalami tren yang meningkat seiring penambahan reduktor. Hal ini menunjukkan indikasi bahwa pada penambahan 10wt% reduktor, proses reduksi berhasil menghambat konversi besi oksida menjadi logam besi.

Namun fenomena tersebut tidak didukung dengan proses reduksi yang lebih optimal terhadap nikel melainkan mereduksi senyawa oksida lain dalam bijih. Penelitian Abdul *et al.* (2020) yang mengacu pada nilai potensial reduksi juga menunjukkan keselarasan dengan teori, di mana *recovery* nikel dan besi nya sama-sama meningkat seiring peningkatan potensial reduksi (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Oleh karena itu, penambahan reduktor membutuhkan pembatasan agar reduksi selektif nikel laterit dapat berlangsung optimal. Perbandingan faktor selektivitas menunjukkan bahwa penelitian Abdul *et al.* (2020) memiliki nilai tertinggi. Dalam penelitian ini, digunakan kalkulasi potensial reduksi yang sesuai dengan zona reduksi selektif yang tepat. Metode ini terbukti mampu menghasilkan kadar serta *recovery* nikel paling optimal dibandingkan penelitian dari *paper* lain yang dibahas sehingga penggunaannya lebih disarankan untuk diaplikasikan kedepannya bila dibandingkan dengan penambahan reduktor berdasarkan massa total bahan. Kelemahan dari penambahan reduktor berdasarkan massa total bahan adalah sulitnya mengetahui batasan yang tepat akan kebutuhan proses reduksi, di mana ketika penambahannya melebihi batasan ini dapat menyebabkan proses reduksi berlangsung kurang optimal seperti yang ditemukan dalam bagian pembahasan sebelumnya. Terlepas daripada itu, metode penambahan reduktor berdasarkan massa total bahan menunjukkan hasil paling optimal ketika jumlahnya tidak lebih dari 5wt% untuk limonit dan 15wt% untuk saprolit.

Penambahan 5wt% untuk limonit disarankan berdasarkan hasil analisis data dalam penelitian ini. Dari tiga penelitian terhadap limonit yang menggunakan parameter massa total bahan dalam menentukan jumlah penambahan reduktor, dua penelitian yang menghasilkan faktor selektivitas tertinggi melakukan penambahan sebanyak 5wt% reduktor dalam prosesnya. Penambahan reduktor dibawah 5wt% menghasilkan *recovery* nikel yang cukup rendah sedangkan ketika penambahan reduktor lebih dari 5wt% dapat menyebabkan atmosfir yang terlalu reduktif. Kondisi ini berdampak pada semakin rendahnya perolehan kadar

nikel, meskipun meningkatkan *recovery* nya. Namun meninjau tren kadar nikel yang masih meningkat hingga penambahan 10wt% dalam penelitian Mayangsari *et al.* (2018), maka terdapat potensi pengembangan penelitian selanjutnya pada rentang penambahan 5-10wt% reduktor. Disisi lain, Penambahan 15wt% untuk jenis saprolit disarankan berdasarkan pada penelitian Xiao *et al.* (2020). Saran ini diperkuat dengan hasil perbandingan dengan penelitian Dong *et al.* (2017). Pada penelitiannya, Dong *et al.* juga menggunakan bijih saprolit dengan kadar magnesium yang tinggi (Tabel 4.19) serta memvariasikan penambahan reduktor sebanyak 6-14wt%.

**Tabel 4.19** Komposisi Kimia Bijih Nikel Dalam Penelitian Dong *et al*. (2017)

| **Unsur** | **$Fe_{total}$** | **Ni** | **Co** | **MgO** | **$SiO_2$** | **$Al_2O_3$** | **CaO** | **S** | **Mn** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | 9,67 | 0,82 | 0,033 | 31,49 | 37,37 | 1,89 | 0,033 | 0,01 | 0,083 |

Hasil penelitian paling optimal diperoleh pada penambahan 8wt% dengan hasil seperti ditunjukkan pada Tabel 4.20. Meskipun faktor selektivitasnya lebih rendah, namun penelitian ini memiliki *recovery* nikel yang jauh lebih tinggi dengan perbedaan sebesar 27,37%.

**Tabel 4.20** Hasil Penelitian Dong *et al*. (2017)

| **Recovery (%)** | | **Kadar Produk Hasil Reduksi (%)** | | **Faktor Selektivitas** |
|---|---|---|---|---|
| **Ni** | **Fe** | **Ni** | **Fe** | |
| 97,38 | 47,31 | 11,83 | 67,78 | 2,06 |

Penyebab utama munculnya perbedaan tersebut adalah karena temperatur reduksi dari masing-masing penelitian. Penelitian Dong et al. menggunakan temperatur reduksi sebesar 1150$^{o}$C, di mana dalam penelitiannya pula dijelaskan bahwa

temperatur reduksi yang rendah dapat berdampak pada terhambatnya hidrolisis CaCl menjadi HCl sehingga menyebabkan keterbatasan kuantitas agen pereduksi yang dapat mereduksi logam klorida menjadi logam. Disisi lain, penelitian Xiao *et al.* hanya menggunakan temperatur reduksi sebesar 950$^{o}$C. Angka ini tergolong cukup rendah untuk melangsungkan proses reduksi selektif yang idealnya berlangsung rentang temperatur reduksi 1100$^{-}$1450$^{o}$C, di mana titik optimalnya berada pada 1200$^{o}$C (Pintowantoro & Abdul, 2019). Dalam penelitian yang sama, Xiao *et al*. melakukan eksperimen dengan hasil terbaik dari setiap variabel yang ditelitinya dan melakukan pengujian berulang terhadap hasilnya. Pada eksperimen kali ini, digunakan temperatur reduksi sebesar 1100$^{o}$C selama 90 menit dengan penambahan 15wt% CaCl, 30wt% konsentrat *hematite*, 15wt% kokas berukuran -1 + 0,5 mm serta proses separasi magnetik dengan 90% ukuran partikel produk sebesar <45 µm pada intensitas medan magnet sebesar 0,10 T. Hasil rata-rata yang diperoleh dari 6 kali pengujian berulang ditampilkan pada Tabel 4.21. Melihat potensi hasil yang lebih baik ketika penambahan 15wt% reduktor disertai pula dengan optimalisasi parameter proses lainnya, menjadi alasan jumlah ini disarankan untuk mereduksi saprolit.

**Tabel 4.21** Hasil *Repeated Scale Up Test* Penelitian *Xiao et al.* (2020)

| **Recovery (%)** | | **Kadar Produl Hasil Reduksi (%)** | | **Faktor Selektivitas** |
|---|---|---|---|---|
| **Ni** | **Fe** | **Ni** | **Fe** | |
| 90,33 | 10,96 | 16,16 | 73,67 | 2,64 |

Analisis data yang dilakukan juga menunjukkan fakta lain bahwa komposisi reduktor juga mempengaruhi reduksi selektif laterit. Sulfur yang terkandung dalam reduktor diketahui dapat menekan nilai *recovery* dan kadar besi serta meningkatkan kadar nikel dalam produk. Sulfur dapat bereaksi dengan *wustite* (FeO) dan membentuk FeS yang merupakan senyawa non magnetik yang

akan terpisah sebagai pengotor (Abdul, *et al*., 2018). Reaksi ini menyebabkan reduksi FeO menjadi logam besi berkurang sehingga kadar serta *recovery* besi mengalami penurunan karena FeS akan membentuk lapisan di depan *wustite* sehingga mempersulit reduktor untuk mereduksi FeO (Liu, *et al*., 2015). Kondisi ini membantu menghasilkan kadar nikel yang tinggi dalam produk karena reduksinya dapat berlangsung tanpa adanya hambatan. Namun belum diketahui seberapa signifikan pengaruh kadar sulfur dalam reduktor terhadap reduksi selektif nikel sehingga masih butuh untuk diteliti lebih lanjut. Penambahan sulfur dari aditif dan ditambah dengan sulfur dari reduktor bisa saja menyebabkan tingkat sulfur berlebih dalam proses reduksi. Penelitian Jiang *et al.* (2013) menunjukkan bahwa tingkat sulfur berlebih dalam reaksi dapat menyebabkan penurunan *recovery* nikel. Disisi lain, ukuran partikel reduktor juga ditemukan berpengaruh terhadap kadar dan *recovery* nikel. Dalam penelitian Xiao *et al*. (2020), reduktor berupa kokas berhasil meningkatkan kadar nikel ketika ukurannya berada pada rentang 0,5 – 1 mm. Peningkatan kadar nikel yang dihasilkan mampu mencapai 3,53wt% disertai *recovery* sebesar 82,03%. Disisi lain, kadar besi yang diperoleh juga mengalami peningkatan sebesar 8,37wt%. Namun penelitian sejenis masih sangat minim ditemukan sehingga masih kurang pembanding terhadap hasil yang didapatkan. Selain itu, dalam penelitian ini hanya digunakan bijih saprolit dengan reduktor berupa kokas sehingga masih dibutuhkan pula penelitian lebih lanjut pada bijih limonit serta reduktor jenis lain.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB V
# KESIMPULAN DAN SARAN

## 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan reduktor menekan kadar nikel dalam produk serta mempromosikan kadar besi. Jumlah penambahan reduktor optimal didapatkan sebesar 5wt% untuk limonit dan 15wt% untuk saprolit. Namun hasil terbaik dapat diperoleh dari kalkulasi potensial reduksi.
2. Penambahan reduktor menyebabkan *recovery* nikel dan besi semakin bertambah. Namun khusus untuk limonit, tren peningkatan terbatas hanya hingga 10wt%. Jumlah penambahan reduktor optimal didapatkan sebesar 5wt% untuk limonit dan 15wt% untuk saprolit. Namun hasil terbaik dapat diperoleh dari kalkulasi potensial reduksi.

## 5.2 Saran

Saran untuk penelitian kedepan agar diperoleh hasil reduksi selektif bijih laterit yang lebih baik, yaitu:

1. Menentukan jumlah penambahan reduktor berdasarkan kalkulasi potensial reduksi.
2. Melakukan penelitian lebih lanjut terhadap pengaruh penambahan reduktor dalam rentang 5-10wt%.
3. Melakukan penelitian lebih lanjut terhadap pengaruh kandungan sulfur dari reduktor dalam reduksi selektif nikel laterit.
4. Melakukan penelitian lebih lanjut terhadap pengaruh ukuran partikel reduktor dalam reduksi selektif nikel laterit.
5. Melakukan penelitian lebih lanjut terhadap jenis-jenis reduktor organik.

6. Melakukan penelitian lebih lanjut terhadap pengaruh penggunaan reduktor internal.
7. Melakukan penelitian lebih lanjut terhadap pengaruh penambahan saprolit dalam reduksi limonit dan sebaliknya.

# DAFTAR PUSTAKA


Abadi, F. R., 2018. "Design Of A Simple Muffle Furnace For Temperature Optimization In Ash Content Analysis". **Jurnal Fisika dan Aplikasinya**, 10(2), pp. 30-39.

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 Laterit Limonitic Nickel Ore by Coal-bed Method". **AIP Coneference Proceeding**, p. 020034.

Abdul, F., Pintowantoro, S. & Purnamasari, A., 2020. "Direct Reduction Of Nickel Laterite Limonitic Ore Using A Coal-Dolomite Mixture Bed And $Na_2SO_4$ AS A Selective Agent". **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, pp. 103-110.

Abdul, F., Pintowantoro, S. & Yuwandono, R. B., 2018. "Analysis of Holding Time Variations to Ni and Fe Content and Morphology in Nickel Laterite Limonitic Reduction Process by Using Coal-Dolomite Bed". **AIP Conference Proceedings**, pp. 1-9.

Al-Khirbash, S., 2015. "Genesis and Mineralogical Classification of Ni-Laterites Oman Mountains". **Ore Geology Reviews**, pp. 199-212.

Al-Khirbash, S., 2020. "Mineralogical Characterization of Low-grade Nickel Laterites from the North Oman Mountains: Using Mineral Liberation Analyses -Scanning Electron Microscopy-based Automated Quantitative Mineralogy". **Ore Geology Reviews**, pp. 1-68.

Battle, T. P., 2016. **Sustainability In Ironmaking:The Rise Of Direct Reduction**. Dalam: P. J. Mackey, E. J. Grimsey, R. T. Jones & G. A. Brooks, penyunt. **Celebrating the Megascale**. Switzerland: Springer, pp. 277-288.

Béchara, R., Hamadeh, H., Mirgaux, O. & Patisson, F., 2018. "Optimization of the Iron Ore Direct Reduction Process

through Multiscale Process Modeling". **Materials**, Volume 11, p. 1094.

Bhattacharya, M., 2016. "Reaction Mechanism and Thermodynamics of Segregation Roasting of Iron Oxide". **International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, 1(5), pp. 64-69.

Bunjaku, A., Kekkonen, M., Pekkarinen , S. & Taskinen, P., 2013. "Effect Of Sulphur Addition On Roasting Reduction Of Saprolitic Nickel Ores In $CO/CO_2$ Gas Mixture". **Minerals Processing And Extractive Metallurgy**, Volume 122, pp. 15-24.

Cao, C., Xue, Z. & Duan, H., 2016. "Making Ferronickel from Laterite Nickel Ore by Coal-Based Self-Reduction and High Temperature Melting Process". **International Journal of Nonferrous Metallurgy**, 5(2), pp. 9-15.

Dong, J. et al., 2017. "Influence of Calcium Chloride Addition on Coal-Based Reduction Roasting of Low-Nickel Garnierite Ore". **Materials Transactions**, 58(8), pp. 1161-1168.

Dutta, S. K. & Chokshi, Y. B., 2020. **Basic Concepts of Iron and Steelmaking**. Singapore: Springer.

Dutta, S. K. & Sah, R., 2016. **Direct Reduced Iron: Production**. Dalam: T. a. F. Group, penyunt. **Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys**. New York: CRC Press, pp. 1082-1108.

Elliot, R., Pickles, C. A. & Forster, J., 2016. "Thermodynamics of the Reduction Roasting of Nickeliferous Laterite Ores". **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, pp. 320-346.

Elliott, R., Rodrigues, F., Pickles, C. A. & Peacey, J., 2015. "A Two-Stage Thermal Upgrading Process For Nickeliferous Limonitic Laterite Ores". **The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science**, 54(4), pp. 395-405.

Febriana, E. et al., 2020. "Effect of Sulfur Addition to Nickel Recovery of Laterite Ore". **Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi**, 23(1), pp. 14-20.

Fernández-González, D., Piñuela-Noval, J. & Verdeja, L. F., 2018. **Iron Ore Agglomeration Technologies**. Dalam: **Iron Ore Agglomeration Technologies Provisional**. Rijeka: InTech, pp. 61-80.

Forster, J., Pickles, C. A. & Elliot, R., 2015. "Microwave Carbothermic Reduction Roasting Of A Low Grade Nickeliferous Silicate Laterite Ore". **Minerals Engineering**, pp. 1-10.

García, R. & Báez , A. P., 2012. **Atomic Absorption Spectroscopy**. Rijeka: InTech.

Gniadek, M. & Dąbrowska, A., 2019. "The Marine Nano- and Microplastics Characterisation by SEM-EDX: The Potential of The Method in Comparison With Various Physical and Chemical Approaches". **Marine Pollution Bulletin**, pp. 210-216.

Hafeez, S., Pallari, E., Manos, G. & Constantinou, A., 2019. **Plastic To Energy**. 1st penyunt. Kuwait: Elsevier.

Haldar, S. K., 2018. **Mineral Exploration**. 2nd penyunt. Amsterdam: Elsevier.

Jiang, M. et al., 2013. "Mechanism Sodium Sulfate in Promoting Selective Reduction of Nickel Laterite Ore During Reduction Roasting Process". **International Journal of Mineral Processing**, pp. 32-38.

Khoo, J. Z. et al., 2016. "A Life Cycle Assesment Of A New Laterite Processing Technology". **Journal of Cleaner Production**, pp. 1-16.

Kusnadi, F. A. & Cahyono, R. B., 2018. "Reduction Of Indonesia Iron Ore Using Biomass Palm Kernel Shell Charcoal: Effect Of Residence Time". **AIP Conference Proceedings 1977**, p. 020035.

Li, G. et al., 2012. "Beneficiation Of Nickeliferous Laterite By Reduction Roasting In The Presence Of Sodium Sulfate". **Minerals Engineering**, Volume 32, pp. 19-26.

Li, G. et al., 2018. "Selective Leaching Of Nickel And Cobalt From Limonitic Laterite Using Phosphoric Acid: An Alternative

For Value-Added Processing Of Laterite". **Journal Of Cleaner Production**, Volume 189, pp. 620-626.

Li, S., 2017. **Fluid-Solid Noncatalytic Reaction Kinetics And Reactors**. 1st penyunt. Cambridge: Elsevier.

Liu, M. et al., 2014. "Novel Process of Ferronickel Nugget Production from Nickel Laterite by Semi-molten State Reduction". **ISIJ International**, 54(8), pp. 1749-1754.

Liu, Y., Lv, X., You, Z. & Lv, X., 2020. "Kinetics Study on Non-isothermal Carbothermic Reduction of Nickel Laterite Ore in Presence of $Na_2SO_4$". **Powder Technology**, Volume 362, pp. 486-492.

Liu, Z.-g., Sun, T.-c., Wang, X.-p. & Gao, E.-x., 2015. "Generation Process Of Fes And Its Inhibition Mechanism On Iron Mineral Reduction In Selective Direct Reduction Of Laterite Nickel Ore". **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, pp. 901-907.

Lu, C. et al., 2017. "Selective Reduction and Enrichment of Nickel and Iron in Limonitic Laterite Ore with the Addition of Sodium Sulfate". **Chinese Journal Of Process Engineering**, 17(6), pp. 1195-1202.

Lu, J. et al., 2013. "The Effect Of Sodium Sulphate On The Hydrogen Reduction Process Of Nickel Laterite Ore". **Minerals Engineering**, Volume 49, pp. 154-164.

Lv, X. et al., 2018. "Effect of Sodium Sulfate on Preparation of Ferronickel from Nickel Laterite by Carbothermal Reduction". **ISIJ International**, 58(5), pp. 799-807.

Mayangsari, W. & Prasetyo, A. B., 2016. "Proses Reduksi Selektif Bijih Nikel Limonit Menggunakan Zat Aditif $CaSO_4$". **Metalurgi**, pp. 1-17.

Mayangsari, W., Prasetyo, A. B. & Prasetiyo, P., 2018. "Upgrading Nickel Content of Limonite Nickel Ore through Pelletization, Selective Reduction and Magnetic Separation". **AIP Conference Proceedings**, Volume 1945, p. 020021.

Miao, Y., Hynan, P., Jouanne, A. v. & Yokochi, a. A., 2019. "Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements". **energies**, Volume 12, pp. 1-20.

Mohammed, A. & Abdullah, A., 2019. **Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review**. Băile Govora, HERVEX.

Morcali, M. H., Khajavi, L. T. & Dreisinger, D. B., 2017. "Extraction Of Nickel And Cobalt From Nickeliferous Limonitic Laterite Ore Using Borax Containing Slags". **International Journal of Mineral Processing**, pp. 1-21.

Namboothiri, S. & Mallick, S., 2017. **Bauxite Processing via Chloride Route to Produce Chloride Products and Subsequent Electrolysis of Alumunium Chloride to Produce Alumunium Metal**. Dalam: A. P. Ratvik, penyunt. **Light Metals 2017**. Cham: Springer, pp. 641-648.

Nurjaman, F. et al., 2018. "The Effect Of Additives And Reductors In Seletive Reduction Process Of Laterite Nickel Ore". **Jurnal Sains Materi Indonesia**, 20(1), pp. 8-14.

Pickles, C. A. & Elliot, R., 2015. "Thermodynamic Analysis Of Selective Reduction Of Nickeliferous Limonitic Laterite Ore Bby Carbon Monoxide". **Minerals Processing And Extractive Metallurgy**, Volume 124, pp. 208-216.

Pickles, C. & Anthony, W., 2018. "Thermodynamic Modelling Of The Reduction Of A Saprolitic Laterite Ore By Methane". **Minerals Engineering**, pp. 47-59.

Pintowantoro, S. & Abdul, F., 2019. "Selective Reduction of Laterite Nickel Ore". **Materials Transactions**, pp. 2245-2254.

Rao, M. et al., 2013. "Carbothermic Reduction of Nickeliferous Laterite Ores for Nickel Pig Iron Production in China: A Review". **JOM**, Volume 65, p. 1573–1583.

Rodrigues, F. et al., 2017. "Factors Affecting the Upgrading of a Nickliferous Limonitic Laterite Ore by Reduction Roasting, Thermal Growth and Magnetic Separation". **Minerals**, pp. 1-21.

Setiawan, I., 2016. "Pengolahan Nikel Laterit Secara Pirometalurgi: Kini Dan Penelitian Kedepan". **Jurnal UMJ**, p. 1.

Shofi, A., Rahmahwati, A., Nurjaman, F. & Suharno, B., 2019. "Effect Of Reduction Temperature And Sodium-Based Additives On Nickel Upgrading Process Of Laterites Ores". **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Volume 541, p. 012002.

Stratton, P., 2013. "Ellingham diagrams – their use and misuse". **International Heat Treatment and Surface Engineering**, pp. 70-73.

Subagja, R., Prasetyo, A. B. & Sari, W. M., 2016. "Peningkatan Kadar Nikel Dalam Laterit Jenis Limonit Dengan Cara Peletasi, Pemanggangan Reduksi Dan Pemisahan Magnet Campuran Bijih, Batu Bara, Dan $Na_2SO_4$". **Metalurgi**, pp. 103-115.

Sufriadin, et al., 2011. "Study On Mineralogy And Chemistry Of The Saprolitic Nickel Ores From Soroako, Sulawesi, Indonesia: Implication For The Lateritic Ore Processing". **Journal Of South East Asian Applied Geology**, Volume 3, pp. 23-33.

Sukmanawati, W., 2009. **Kimia 3**. 3rd penyunt. Jakarta: Pusat Perbukuan Departemen Pendidikan Nasional.

Supriyatna, Y. I., Sihotang, I. H. & Sudibyo, 2019. "Preliminary Study of Smelting of Indonesian Nickel Laterite Ore Using An Electric Arc Furnace". **Materials Today**, pp. 127-131.

Tian, H. et al., 2020. "Improved Beneficiation Of Nickel And Iron From A Low-grade Saprolite Laterite By Addition Of Limonitic Laterite Ore And $CaCO_3$". **Journal Of Materials Research And Technology**, pp. 1-12.

Tsuji, H., 2012. "Influence of Non-stoichiometric Serpentine in Saprolite Ni-ore on a Softening Behavior of Raw Materials in a Rotary Kiln for Production of Ferro-nickel Alloy". **ISIJ International**, 52(3), p. 333–341.

Wang, L.-w.et al., 2018. "Preparation Of Ferronickel From Nickel Laterite Via Coal-Based Reduction Followed By Magnetic Separation". **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, Volume 25, p. 744–751.

Wang, Z. et al., 2017. "Preparing Ferro-Nickel Alloy from Low-Grade Laterite Nickel Ore Based on Metallized Reduction–Magnetic Separation". **Metals**, Volume 7, p. 313.

Xiao, J. et al., 2020. "Extraction of Nickel from Garnierite Laterite Ore Using Roasting and Magnetic Separation with Calcium Chloride and Iron Concentrate". **Minerals**, pp. 1-13.

Young, L. E., 2019. **Nickel and The Battery Revolution**, Singapore: DBS Group Research.

Zheng, G.-l.et al., 2014. "Pilot Scale Test Of Producing Nickel Concentrate From Low-Grade Saprolitic Laterite By Direct Reduction-Magnetic Separation". **Journal of Central South University**, Volume 21, p. 1771–1777.

Zhu, D. et al., 2018. "Utilization Of Limonitic Nickel Laterite To Produce Ferronickel Concentrate By The Selective Reduction-Magnetic Separation Process". **Advanced Powder Technology**, pp. 1-11.

Zhu, D. Q. et al., 2012. "Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed By Magnetic Separation". **International Journal of Mineral Processing**, p. 107.

Zhu, D. et al., 2013. "Study Of Producing Nickel Concentrate From Low-Grade Laterite Ore". **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 44(1), pp. 1-7.

Zulhan, Z. & Gibranata, I., 2017. "Direct Reduction of Low Grade Nickel Laterite Ore to Produce Ferronickel Using Isothermal – Temperature Gradient". **AIP Conference Proceedings**, Volume 1805, p. 040003.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# LAMPIRAN

## A. Paper Zhu et al. (2012)

International Journal of Mineral Processing 106–109 (2012) 1–7

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

International Journal of Mineral Processing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijminpro

# Upgrading low nickel content laterite ores using selective reduction followed by magnetic separation

D.Q. Zhu [a], Y. Cui [a,*], K. Vining [b], S. Hapugoda [b], J. Douglas [b], J. Pan [a], G.L. Zheng [a]

[a] School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China
[b] CSIRO Process Science and Engineering, PO Box 883, Kenmore, QLD 4069, Australia

ARTICLE INFO

*Article history:*
Received 12 September 2011
Received in revised form 23 January 2012
Accepted 28 January 2012
Available online 4 February 2012

*Keywords:*
Low nickel content laterite ore
Selective reduction
Sulfur containing additive
High nickel concentrate

ABSTRACT

The processing of nickel laterite ore to produce ferronickel is energy intensive, especially when low nickel content ores are processed. The selective reduction–beneficiation of laterite ore to produce high nickel content nickeliferous concentrate and abandon gangue minerals before smelting potentially offers an effective pre-treatment to this process. In this work, the authors conducted selective reduction of nickel laterite ores at 1100 °C for 60 min with addition of 6% calcium sulfate and 5% reductant coal. The reduced ore was then wet magnetic separated. The experiments show that high nickel content nickeliferous concentrate containing 6.0% Ni with nickel recovery of 92.1% could be produced with over 75% of the reduced ore, containing low nickel concentration, rejected. The tests indicated that the selectivity of reduction depends mainly on reduction atmosphere and silica level. According to the microscopic study, nickel oxide had been reduced and nickel was mainly enriched into a γ Fe–Ni phase. The presence of sulfur significantly promoted γ Fe–Ni particle growth, from 5.8 μm to 16.1 μm, and improved the Ni enrichment in metallic phases.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

Nickel is a commercially important metal and used mainly in the production of stainless steel and alloys (approximately 81%) (Mudd, 2010). The rapid rise in stainless steel demand has led to a dramatic increase in the production of nickel metal in recent years (Moskalyk and Alfantazi, 2002), with an increasing rate of some 4.7% per year (Norgate and Jahanshahi, 2011). Traditionally, about 60% of the nickel product is produced from sulfide ores (Norgate and Jahanshahi, 2011; Kim et al., 2010; Norgate and Jahanshahi, 2010). However, miners of nickel sulfide ores are now confronted with increasing challenges due to much deeper drilling requirements, higher production costs and depleting reserves. Moreover, only 30% of the land nickel reserves now exist as sulfide ores with the balance comprised of nickel laterite ores (Agatzini-Leonardou et al., 2009, Mudd, 2009). Thus, nickel laterite ore processing has attracted much greater attention in recent years (Pickles, 2004; McDonald and Whittington, 2008).

Ferronickel processing of laterite ore is energy intensive, especially when low nickel content laterite ores are processed. As a result, laterite ore or pre-reduced ore is generally directly smelted to produce a small amount of ferronickel product and a large amount of slag. Moreover, the areas where large deposits of laterite ores are located do not have access to readily available sources of cheap electricity. Moreover, unlike the sulfide ores, nickel is finely disseminated in laterite ore and cannot be upgraded by fine grinding or other methods of physical beneficiation (Norgate and Jahanshahi, 2011). Hence, most pyrometallurgical processes can only process laterite ore with nickel content over 1.5%. Since the average nickel contents of reported laterite mines worldwide is about 1.45%, this means over 50% of the known laterite ores cannot be processed using conventional pyrometallurgical processes (Mudd, 2010). Since traditional beneficiation processes are impractical, it would seem attractive to introduce a pre-treatment process to reduce the nickel oxide in the laterite ore to metallic nickel, whilst controlling the iron oxide reduction and then separate the valuable product from the large quantities of iron-bearing gangue using magnetic separation. Success would, however, be conditional on the reduction occurring under such conditions that the growth of the metallic nickel particles proceeds to a stage at which the particle size is sufficient for effective magnetic separation to be applied (Alexander and Bell, 1970; Harris et al., 2010; Li et al., 2010). This is possible from a thermodynamics perspective, but in practice, however, the process is problematic. Firstly, sensitive control of the $CO/CO_2$ ratio is difficult to achieve. Secondly, there is a dilemma when applying the reduction temperature, lower temperatures (around 600 °C) are beneficial for selective reduction of NiO over FeO in the presence of CO (Purwanto et al., 2001), however, the metallic particles cannot grow large enough for subsequent magnetic separation at these temperatures, higher reduction temperature would indeed promote the growth of larger metallic particles, but

* Corresponding author.
*E-mail address:* cuiyucsu@163.com (Y. Cui).

0301-7516/$ – see front matter © 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.minpro.2012.01.003

# B. Paper Nurjaman et al. (2018)

*Jurnal Sains Materi Indonesia Vol. 20, No. 1, Oktober 2018, hal. 8-14*

Jusami
Homepage: http://jusami.batan.go.id

Jurnal Sains Materi Indonesia

Akreditasi Nomor: 21/E/KPT/2018
Tanggal 9 Juli 2018
ISSN 1411-1098
E-ISSN 2614-087X

## THE EFFECT OF ADDITIVES AND REDUCTORS IN SELECTIVE REDUCTION PROCESS OF LATERITE NICKEL ORE

**F. Nurjaman[1], A. Sa'adah[2], A. Shofi[1], W. Apriyana[3] and B. Suharno[2]**
[1] *Research Unit for Mineral Technology - LIPI*
*Jl. Ir. Sutami, Km 15 Tanjung Bintang, Serdang, Lampung 35361*
[2] *Departement of Metallurgical and Materials Engineering, University of Indonesia*
*Kampus Baru UI, Depok 16424*
[3] *Research Unit for Natural Technology - LIPI*
*Daerah Istimewa Yogyakarta 55861*
*E-mail: fajar.nurjaman@lipi.go.id*

*Received: 11 August 2018* *Revised: 28 August 2018* *Accepted: 28 September 2018*

## ABSTRACT

**THE EFFECT OF ADDITIVES AND REDUCTORS IN SELECTIVE REDUCTION PROCESS OF LATERITE NICKEL ORE.** Selective reduction of laterite nickel ore followed by magnetic separation was carried out to produce ferronickel products. The effect of adding additives and reductor types in the selective reduction process was studied in this study. Reductors used were anthracite coal and palm shell charcoal with variations of 5 to 15% by weight, while the additive used was sodium sulfate ($Na_2SO_4$). The reduction process was carried out at temperatures of 950 ºC, 1050 ºC and 1150 ºC for 60 minutes. The addition of 10% sodium sulfate additives by weight in the reduction process of laterite nickel ore produced higher concentrations of nickel as 6.09%, compared to no additives, i.e. 2.45%. The addition of reductors in the selective reduction process of laterite nickel ore shows that the higher the amount of reductors causes a decrease in the concentrate level of nickel. Furhtermore, the type of reductors used shows that the concentrate from the reduction result using anthracite coal reductor produces higher level of nickel and lower level of iron compared to the use of palm shell charcoal reductor.

***Keywords***: Laterite nickel ore, Selective reduction, Ferronickel, Sodium sulfate, Anthracite coal, Palm shell charcoal

## ABSTRAK

**PENGARUH ADITIF DAN REDUKTOR PADA PROSES REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT.** Reduksi selektif bijih nikel laterit diikuti dengan pemisahan magnetik dilakukan untuk menghasilkan produk ferronikel. Pengaruh penambahan aditif dan jenis reduktor dalam proses reduksi selektif telah dipelajari dalam penelitian ini. Reduktor yang digunakan, yaitu batubara antrasit dan arang cangkang sawit dengan variasi 5 hingga 15% berat, sedangkan aditif yang digunakan adalah sodium sulfat ($Na_2SO_4$). Proses reduksi dilakukan pada temperatur 950 ºC, 1050 ºC dan 1150 ºC selama 60 menit. Penambahan aditif sodium sulfat sebanyak 10% berat dalam proses reduksi bijih nikel laterit menghasilkan kadar nikel dalam konsentrat yang lebih tinggi yaitu 6,09%, jika dibandingkan tanpa aditif, yaitu 2,45%. Pada penambahan reduktor dalam proses reduksi selektif bijih nikel laterit, menunjukkan bahwa semakin tinggi jumlah reduktor menyebabkan penurunan kadar nikel dalam konsentrat. Disamping itu dari jenis reduktor yang digunakan menunjukkan bahwa konsentrat hasil reduksi menggunakan reduktor batubara antrasit menghasilkan kadar nikel yang lebih tinggi dan besi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan penggunaan reduktor arang cangkang sawit.

***Kata kunci:*** Bijih nikel laterit, Reduksi selektif, Ferronikel, Sodium sulfat, Batubara antrasit, Arang cangkang sawit

# C. Paper Mayangsari et al. (2018)

## Upgrading Nickel Content of Limonite Nickel Ore through Pelletization, Selective Reduction and Magnetic Separation

W Mayangsari[1,a)], A B Prasetyo[b)] and Puguh Prasetiyo[c)]

[1]*Research Center for Metallurgy and Material, Indonesian Institute of Sciences, PUSPIPTEK Area builing 470 South Tangerang, Banten, Indonesia*

Email: a) wahy035@lipi.go.id
b) agus080@lipi.go.id
c) pprasetiyo2002@yahoo.com

**Abstract**. Limonite nickel ore has potency to utilize as raw material for ferronickel or nickel matte, since it has low grade nickel content, thus process development is needed to find the acceptable process for upgrading nickel. The aim of this research is to determine upgrading of Ni content as result of selective reduction of limonite nickel pellet continued by magnetic separation as effect of temperature and time reduction as well as coal and $CaSO_4$ addition. There are four steps to perform this research, such as preparation including characterization of raw ore and pelletization, selective reduction, magnetic separation and characterization of products by using AAS, XRD and SEM. Based on the result study, pellet form can upgrade 77.78% higher than powder form. Upgrading of Ni and Fe content was up to 3fold and 1.5fold respectively from raw ore used when reduced at 1100ºC for 60 minutes with composition of coal and $CaSO_4$, both 10%. The excess of $CaSO_4$ addition caused fayalite formation. Moreover, $S_2$ from $CaSO_4$ also support to reach low melting point and enlardge particle size of metal formed.

**Keyword**: limonite, nickel ore, pelletization, reduction, magnetic separation.

### INTRODUCTION

Laterite nickel ore, a low grade nickel type, is divided into saprolite and limonite [1] [2]. Saprolite contains 1.5% – 3% nickel while limonite contains 0.5% – 1.7% nickel [3]. Saprolite has silica while limonite has iron as major component. Saprolite is used to produce ferronickel or nickel matte by pyrometallurgical method [4], but it is not applied to limonite which has low Ni content since that method effectively used to nickel ore with nickel content more than 1.5% [5]. However, limonite nickel ore has potency to use as raw material for ferronickel or nickel matte, since it has low grade nickel content, it needed to develop acceptable process to upgrade nickel content.

The number of investigations were carried out. Calcination of laterite nickel ore from Indonesia at 500ºC for 1 hour followed by magnetic separation was carried out by Kim, et.al. and resulted upgrading Ni content from 1.5% to 2.9% with recovery 48%[6]. Li, et al reduced saprolitic nickel ore with CaO addition and determined that CaO addition affected phase transformation and melting point of lateritic nickel, beside it also developed sintering integration [7]. Selective sulphidation was carried out by Harris, et all to the limonite nickel ore from ivory coast. It determined that grade and sulphidation degree were affected by temperature and sulfur addition which both of them exhibited highest when temperature more than 550ºC [8]. Zhu, et al [5] used laterite nickel ore (a mixture of

*Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology (ICOMMET 2017)*
AIP Conf. Proc. 1945, 020021-1 020021-6; https://doi.org/10.1063/1.5030243
Published by AIP Publishing. 978-0-7354-1640-6/$30.00

# D. Paper Abdul et al. (2020)

*Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 55, 1, 2020, 103-110*

## DIRECT REDUCTION OF NICKEL LATERITE LIMONITIC ORE USING A COAL-DOLOMITE MIXTURE BED AND $Na_2SO_4$ AS A SELECTIVE AGENT

Fakhreza Abdul, Sungging Pintowantoro, Anisya Purnamasari

*Department of Materials Engineering, Faculty of Industrial Technology,*
*Institut Teknologi Sepuluh Nopember*
*Arief Rahman Hakim Street 60177, Surabaya, Indonesia*
*E-mail: fakhrezaabdul@gmail.com*

*Received 28 May 2018*
*Accepted 31 October 2019*

**ABSTRACT**

*Nickel finds a wide industrial application. It is obtained through extraction from nickel-containing ores. The metal extraction using a lateritic nickel ore becomes an important alternative because of nickel sulphide ore reserves decrease. This study aims to determine the coal to dolomite mass ratio that can produce ferronickel products of high nickel recovery, content, and selectivity. The extraction process studied refers to a direct reduction using a coal/ dolomite bed and $Na_2SO_4$ as a selective agent. It takes place in a SiC crucible within 6 h at a temperature of 1300°C. The best coal to dolomite mass ratio refers to 1:2.09. It provides the highest Ni content of 12.04 %, the highest selectivity factor of 8.191 and nickel recovery of 99.1 %.*

*Keywords: lateritic nickel ore, coal-dolomite bed, direct reduction, selectivity factor.*

### INTRODUCTION

Nickel is an important alloying metal with a wide range of applications in the industry [1]. The nickel alloys have high strength and tenacity. They are characterized by high corrosion thermal resistance. The nickel laterite type ore presents about 70 % of the nickel reserve. However, only 40 % of it is processed for further application [2]. This is due to the difficulty of nickel laterite ore processing when compared to that containing nickel sulphide. It is attributed to metallic nickel uniform distribution which in turn excludes the possibility of applying flotation and gravity separation [3].

Limonitic and saprolitic types of the nickel laterite ore are present. The first one is a low nickel grade of Ni content ranging from 1.1 wt. % to 1.8 wt. % [4]. It can be processed following a hydrometallurgy route such as that of high-pressure acid leaching (HPAL) [5 - 7]. Several hydrometallurgy processes have been applied aiming limonitic nickel ore extraction but the productivity level achieved is low, while the operational costs are too high [6 - 9]. However, the nickel recovery is about 80 % and which is why the process is not economically viable [7].

Hence, many researchers have examined new methods for treating laterite nickel ore including a pyro process at a lower operating temperature, i.e. a direct reduction [10-14]. But the latter product has a low content of Ni because of the high Fe presence in the ore. Furthermore, the bond between oxygen and iron is only slightly stronger than that between oxygen and nickel, which means that FeO is reduced almost as readily as NiO [15]. So, the challenges are how to reduce selectively the Ni content of the nickel limonite ore leaving the ferrous oxide unchanged. Until now, many researchers have used several Ni selective reduction procedures. Some of them have applied $Na_2SO_4$ as an additive [16, 17]. The investigation reported is focused on using a bed of a mixture of coal and dolomite and $Na_2SO_4$ as a selective agent varying the coal to dolomite mass ratio because of its effect on CO to $CO_2$ mole ratios obtained in the course of the coal and the dolomite heating.

# E. Paper Xiao et al. (2020)

minerals

MDPI

Article

## Extraction of Nickel from Garnierite Laterite Ore Using Roasting and Magnetic Separation with Calcium Chloride and Iron Concentrate

**Junhui Xiao [1,2,3,*], Wei Ding [1,3], Yang Peng [1,3], Tao Chen [1,3], Kai Zou [1,3] and Zhen Wang [1,3]**

1 Sichuan Engineering Lab of Non-Metallic Mineral Powder Modification and High-Value Utilization, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; dingwei@mails.swust.edu.cn (W.D.); pengyang@mails.swust.edu.cn (Y.P.); chentao@mails.swust.edu.cn (T.C.); zoukaiswust@163.com (K.Z.); wangzhen@swust.edu.cn (Z.W.)

2 Key Laboratory of Sichuan Province for Comprehensive Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Panzhihua University, Panzhihua 61700, China

3 Key Laboratory of Ministry of Education for Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

* Correspondence: xiaojunhui33@163.com; Tel.: +86-139-9019-0544

Received: 20 March 2020; Accepted: 14 April 2020; Published: 15 April 2020

check for updates

**Abstract:** In this study, segregation roasting and magnetic separation are used to extract nickel from a garnierite laterite ore. The garnierite laterite ore containing 0.72% Ni, 0.029% Co, 8.65% Fe, 29.66% MgO, and 37.86% $SiO_2$ was collected in the Mojiang area of China. Garnierite was the Ni-bearing mineral; the other main minerals were potash feldspar, forsterite, tremolite, halloysite, quartz, and kaolinite in the garnierite laterite ore. The iron phase transformations show that nickel is transformed from $(Ni,Mg)O{\cdot}SiO_2{\cdot}nH_2O$ to a new nickel mineral phase dominated by [Ni]Fe solid solution; and iron changed from $Fe_2O_3$ and FeOOH to a new iron mineral phase dominated by metal Fe and $Fe_3O_4$ after segregation roasting. Ferronickel concentrate with Ni of 16.16%, Fe of 73.67%, and nickel recovery of 90.33% was obtained under the comprehensive conditions used: A roasting temperature of 1100 °C, a roasting time of 90 min, a calcium chloride dosage of 15%, an iron concentrate dosage of 30%, a coke dosage of 15%, a coke size of −1 + 0.5 mm, a magnetic separation grinding fineness of <45 μm occupying 90%, and a magnetic separation magnetic field intensity of $H = 0.10$ T. The main minerals in ferronickel concentrate are Fe, [Ni]Fe, $Fe_3O_4$, and a small amount of gangue minerals, such as $CaO{\cdot}SiO_2$ and $CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$.

**Keywords:** nickel; garnierite laterite ore; segregation roasting; magnetic separation

### 1. Introduction

Nickel, as a national strategic reserve metal, is not only a threat to the sustainable development of the national economy but also a potential major threat to the national defense. As an important metal, nickel is widely used in stainless steel and new material industries. According to marketing observations, 66.2% of the total metal nickel is consumed by the stainless-steel industry. Rapid expansion of these industries, especially stainless-steel manufacture, has dramatically increased the demand for nickel in recent years. Of all the land nickel reserves, 30% exist as sulfide ores, with the balance comprised of oxide ores [1]. Because of the low grade of nickel ore mined from mines, most of the nickel concentrate can be obtained after the beneficiation process before smelting. Nickel ores are usually divided into three types: Nickel sulfide, nickel oxide, and nickel arsenide. Nickel arsenide contains minerals, such as red nickel NiAs, arsenic $NiAs_2$, and nickel arsenide NiAsS. Only a small amount of these minerals are produced in Morocco, North Africa, and nickel extraction from nickel

## F. Perhitungan Faktor Selektivitas

**Penelitian Zhu *et al.* (2012)**

$$\text{Selectivity Factor} = \frac{X_{Fe} Y_{Ni}}{X_{Ni} Y_{Fe}}$$

$$\text{Selectivity Factor} = \frac{40{,}9\% \text{ x } 6{,}01\%}{0{,}97\% \text{ x } 69{,}69\%}$$

$$\text{Selectivity Factor} = 3{,}64$$

**Penelitian Nurjaman *et al.* (2018)**

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{X_{Fe} Y_{Ni}}{X_{Ni} Y_{Fe}}$$

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{50{,}5\% \text{ x } 6{,}09\%}{1{,}4\% \text{ x } 56{,}18\%}$$

$$\text{Faktor Selektivitas} = 3{,}91$$

**Penelitian Mayangsari *et al.* (2018)**

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{X_{Fe} Y_{Ni}}{X_{Ni} Y_{Fe}}$$

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{27{,}02\% \text{ x } 2{,}42\%}{1{,}29\% \text{ x } 47{,}93\%}$$

$$\text{Faktor Selektivitas} = 1{,}06$$

**Penelitian Abdul *et al.* (2020)**

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{X_{Fe} Y_{Ni}}{X_{Ni} Y_{Fe}}$$

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{55{,}37\% \text{ x } 12{,}74\%}{1{,}25\% \text{ x } 68{,}66\%}$$

$$\text{Faktor Selektivitas} = 8{,}19$$

**Penelitian Xiao *et al.* (2020)**

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{X_{Fe} Y_{Ni}}{X_{Ni} Y_{Fe}}$$

$$\text{Faktor Selektivitas} = \frac{8{,}65\% \text{ x } 3{,}68\%}{0{,}72\% \text{ x } 16{,}22\%}$$

$$\text{Faktor Selektivitas} = 2{,}73$$

## G. Perhitungan Peningkatan Kadar Nikel

**Penelitian Zhu et al. (2012)**
Peningkatan Kadar Ni = Kadar Ni Produk – Kadar Ni Bijih
Peningkatan Kadar Ni = 6,01% - 0,97%
Peningkatan Kadar Ni = 5,04%

**Penelitian Nurjaman et al. (2018)**
Peningkatan Kadar Ni = Kadar Ni Produk – Kadar Ni Bijih
Peningkatan Kadar Ni = 6,09% - 1,4%
Peningkatan Kadar Ni = 4,69%

**Penelitian Mayangsari et al. (2018)**
Peningkatan Kadar Ni = Kadar Ni Produk – Kadar Ni Bijih
Peningkatan Kadar Ni = 2,42% - 1,49%
Peningkatan Kadar Ni = 1,13%

**Penelitian Abdul et al. (2020)**
Peningkatan Kadar Ni = Kadar Ni Produk – Kadar Ni Bijih
Peningkatan Kadar Ni = 12,04% - 1,25%
Peningkatan Kadar Ni = 10,79%

**Penelitian Xiao et al. (2020)**
Peningkatan Kadar Ni = Kadar Ni Produk – Kadar Ni Bijih
Peningkatan Kadar Ni = 3,68% - 0,72%
Peningkatan Kadar Ni = 2,73%

## H. Perhitungan Peningkatan Kadar Besi

**Penelitian Zhu et al. (2012)**
Peningkatan Kadar Fe = Kadar Fe Produk – Kadar Fe Bijih
Peningkatan Kadar Fe = 69,69% - 40,90%
Peningkatan Kadar Fe = 28,79%

**Penelitian Nurjaman et al. (2018)**
Peningkatan Kadar Ni = Kadar Fe Produk – Kadar Fe Bijih
Peningkatan Kadar Ni = 56,18% - 50,50%
Peningkatan Kadar Ni = 5,68%

**Penelitian Mayangsari et al. (2018)**
Peningkatan Kadar Fe = Kadar Fe Produk – Kadar Fe Bijih
Peningkatan Kadar Fe = 47,93% - 27,02%
Peningkatan Kadar Fe = 20,91%

**Penelitian Abdul et al. (2020)**
Peningkatan Kadar Fe = Kadar Fe Produk – Kadar Fe Bijih
Peningkatan Kadar Fe = 68,66% - 55,37%
Peningkatan Kadar Fe = 9,74%

**Penelitian Xiao et al. (2020)**
Peningkatan Kadar Fe = Kadar Fe Produk – Kadar Fe Bijih
Peningkatan Kadar Fe = 16,22% - 8,65%
Peningkatan Kadar Fe = 7,57%

# UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih tak lupa penulis ucapkan kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi selama proses penyelesaian tugas akhir dengan judul “Review Pengaruh Reduktor Dalam Proses Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit” ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Seluruh anggota ‘asli’ Laboratorium Teknik Pengolahan Mineral & Material, Mas Berryl, Afni, Aim, Amri, Fadel, Falferde, Fira, Henokh, Iqbal, Kepinbob, Najib, Nanta, Naufal, Radite, Rizki, Satrio, Tetty dan Vito serta anggota ‘pendatang’, Arif, Nanda dan Bayu atas segala promo, nobar dan pertandingan FIFA selama proses pengerjaan tugas akhir.
2. Setiap anggota MT18 dan Teknik Material & Metalurgi ITS 2016 yang telah luar biasa dalam menemani penulis mengarungi ‘*roller coaster*’ perkuliahan.
3. PKKTM, khususnya angkatan 2016, Aim, Ciping, Daniel, Edwin, Feliks, Gary, Henokh, Kristin, Marcel, Putra, Ria, Samuel, Tadeus, Tetty, dan Yos yang telah banyak membantu penulis sejak proses adaptasi hingga pada titik akhir masa perkuliahan.
4. Sahabat Kontrakan Mbambet, Anyun, Arfan, Arif, Cici, Daniel, Edwin, Fadhel, Handis, Henokh, Iqbal, Mirfa, Nabil, Putra, Rafli, Rizki, Satrio, Wardhana dan Om Yoga atas tempat yang nyaman untuk ‘melarikan diri’ dari ingar bingar rutinitas jagat perkuliahan.
5. Rekan-rekan pengurus HMMT dalam rentang 2017-2019, terkhusus untuk setiap individu yang tergabung dalam PSDM HMMT 17/18 dan BPHPI HMMT 18/19 atas pengalaman dan kesempatan belajar yang telah diberikan serta tak lupa kepada seluruh anggota tim MFC atas kesempatan untuk menyalurkan hobi dan melepas penat perkuliahan.

Besar harapan penulis bahwa laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat. Namun penulis menyadari bila di dalamnya pula masih terdapat banyak kekurangan yang mohon dapat dimaafkan.

Bekasi, 12 Juli 2020
Penulis

Erick Nicolas Sebayang
02511640000142

# BIODATA PENULIS

Erick Nicolas Sebayang lahir di Bekasi, 13 Mei 1998. Penulis menempuh Pendidikan formal di SDK Pa Van Der Steur Bekasi, kemudian melanjutkan ke jenjang menengah di SMP Santo Markus 2 Jakarta, serta jenjang atas di SMA Pangudi Luhur 2 Bekasi. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikannya di Pendidikan Informatika dan Komputer Terapan Institut Teknologi Sepuluh Nopember hingga lulus pada tahun 2016. Pada tahun yang sama, penulis kemudian melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di Departemen Teknik Material & Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama menempuh pendidikan sarjana, penulis aktif di berbagai kegiatan kemahasiswaan seperti menjadi Staff Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HMMT FTIRS-ITS (2017-2018), Staff *Head Resource Development* ITS Material Advantage Chapter (2017-2018), Bendahara Umum HMMT FTIRS-ITS (2018-2019), dan Koordinator *Grader* Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral & Material (2019-2020). Penulis juga aktif mengikuti pelatihan seperti Pelatihan Karya Tulis Ilmiah Tingkat Dasar, *Basic Entepreneurship School* HMMT, *Training For Matrice Trainer* HMMT dan Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Pra Tingkat Dasar hingga Menengah. Penulis juga tercatat sebagai juara cabang olahraga futsal tingkat nasional pada Kompetisi Olahraga Teknik Metalurgi dan Material se-Indonesia 2018 serta melangsungkan kerja praktik industri sebagai *Non Destructive Technician* di PT. GMF AeroAsia Tbk pada Januari-Februari 2019. Pada kesempatan kerja praktik tersebut, penulis menyelesaikan sebuah laporan kerja berjudul "*Fasteners Area At Left Window Frames Junction On Fuselage Skin Between* STR 18 *and* STR 22 Airbus A330-300 *Inspection*

*Using High Frequency Eddy Current Non Destructive Method*". Ketertarikan dalam industri pengolahan logam mendorong penulis untuk terlibat dalam riset serta mengambil topik tugas akhir dibidang tersebut. Penulis tercatat pernah melaksanakan riset dengan topik "Analisis Pengaruh Bentuk Briket Terhadap Kadar Serta *Recovery* Ni Dan Fe Dalam Proses Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit Limonitik Menggunakan Reaktor Bed Batu Bara-Batu Kapur" serta tugas akhir berjudul "*Review* Pengaruh Reduktor Dalam Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit". Penulis dapat dihubungi melalui alamat email nicolas.erick9@gmail.com.