



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR –TL184834**

**REVIEW PENGARUH ZAT ADITIF SEBAGAI AGEN  
SELEKTIVITAS DALAM PROSES REDUKSI SELEKTIF NIKEL**

**MAHANAIM NICOLAS SAMUEL  
NRP. 0251164000063**

**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**





**TUGAS AKHIR–TL 184834**

**REVIEW PENGARUH ZAT ADITIF SEBAGAI AGEN  
SELEKTIVITAS DALAM PROSES REDUKSI SELEKTIF  
NIKEL**

MAHANAIM NICOLAS SAMUEL  
NRP. 02511640000063

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

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT–TL 184834**

**REVIEW OF ADDITIVES INFLUENCE AS SELECTIVE AGENTS IN NICKEL SELECTIVE REDUCTION PROCESS**

MAHANAIM NICOLAS SAMUEL  
NRP. 02511640000063

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

MATERIAL AND 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 ZAT ADITIF SEBAGAI AGEN  
SELEKTIVITAS DALAM PROSES REDUKSI SELEKTIF  
NIKEL**

**TUGAS AKHIR**

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

Oleh:

**MAHANAIM NICOLAS SAMUEL**  
NRP 02511640000063

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)



**SURABAYA**  
**Agustus 2020**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# REVIEW PENGARUH ZAT ADITIF SEBAGAI AGEN SELEKTIVITAS DALAM PROSES REDUKSI SELEKTIF NIKEL

**Nama** : Mahanaim Nicolas Samuel  
**NRP** : 0251164000063  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi  
**Dosen Pembimbing I** : Sungging Pintowantoro, S.T., M.T, Ph.D  
**Dosen Pembimbing II** : Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

## Abstrak

*Nikel diperoleh dengan cara mengekstrak bijihnya yaitu bijih sulfida dan bijih laterit. Dengan semakin berkurangnya cadangan bijih sulfida di bumi maka pengolahan nikel pun beralih ke pengolahan bijih laterit. Pengolahan bijih laterit yang ekonomis pada saat ini ialah dengan menggunakan metode reduksi selektif. Perolehan nikel melalui proses reduksi selektif tidak lepas dari campur tangan zat aditif. Review penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh dari variasi zat aditif terhadap kadar dan recovery pada produk hasil reduksi selektif serta faktor selektivitas nikel. Secara umum metode proses reduksi selektif ialah dengan metode reduksi langsung yang dilanjutkan dengan pemisahan magnetik. Pengujian kemudian dilakukan pada produk hasil reduksi untuk mengetahui kadar nikel yang diperoleh, morfologi serta fasa yang terbentuk pada produk. Setelah dilakukan pengolahan data maka diperoleh hasil yaitu zat aditif sodium sulfat menghasilkan peningkatan kadar nikel tertinggi dan zat aditif sodium klorida menghasilkan nilai recovery nikel tertinggi. Hasil perhitungan faktor selektivitas nikel tertinggi dihasilkan oleh zat aditif sodium sulfat.*

**Kata Kunci:** *Reduksi Selektif; Nikel Laterit; Aditif; Kalsium Sulfat; Natrium Klorida; Natrium Sulfat.*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# REVIEW OF ADDITIVES INFLUENCE AS SELECTIVE AGENTS IN NICKEL SELECTIVE REDUCTION PROCESS

**Student Name** : Mahanaim Nicolas Samuel  
**NRP** : 0251164000063  
**Department** : Material dan Metallurgical Engineering  
**Supervisor I** : Sungging Pintowantoro, S.T., M.T, Ph.D  
**Supervisor II** : Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

## Abstract

*Nickel is obtained by extracting its ore, namely sulfide ore and laterite ore. With the reduction in sulfide ore reserves on earth, nickel processing has shifted to laterite ore processing. The economical processing of laterite ore at this time is obtained by using selective reduction method. Acquisition of nickel through a selective reduction process is inseparable from the influence of additives. This research aims to determine the effect of additive variations on grade and recovery of selective reduction products and nickel selectivity factors. In general, the method of the selective reduction process is the direct reduction method followed by magnetic separation. Tests are then carried out on the reduced product to determine the grade of nickel obtained, morphology and phases formed on the product. After processing the data, the results obtained are sodium sulfate additives produce the highest increase in nickel content and sodium chloride additives produce the highest nickel recovery value. The results of the calculation of the highest nickel selectivity factor were obtained by the sodium sulfate additive.*

**Keywords:** *Selective Reduction; Nickel Laterite; Additives; Calcium Sulfate; Sodium Chloride; Sodium Sulfate.*

*(This page is intentionally left blank)*

## **KATA PENGANTAR**

Puji dan syukur penulis ucapkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa berkat rahmat dan karunia-Nya penelitian Tugas Akhir dapat terlaksanakan dengan baik dan dapat selesai tepat pada waktunya. Tujuan dari penyusunan Laporan Tugas Akhir adalah untuk memenuhi salah satu syarat akademis yang wajib dipenuhi dalam kuliah program studi Departemen Teknik Material FTI-ITS, Surabaya.

Terselesaikannya Laporan Tugas Akhir tidak luput dari bantuan, motivasi serta partisipasi dari semua pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat-Nya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua yang selalu mendukung dan senantiasa mendoakan penulis.
3. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si, M.Si, Ph. D. selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.
4. Bapak Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.

Penulis menyadari penyusunan laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat berguna bagi penulis dan semua pihak yang terkait.

Bogor, 9 Agustus 2020  
Penulis

Mahanaim Nicolas Samuel

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Nikel dan Bijih Nikel.....	5
2.2 Bijih Nikel Laterit dan Proses Ekstraksinya.....	8
2.3 Reduksi Selektif Bijih Nikel.....	10
2.4 Zat Aditif Sebagai Agen Selektivitas.....	13
2.5 Kadar, Recovery & Faktor Selektivitas Nikel.....	16
2.6 Penelitian Sebelumnya.....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Diagram Alir.....	23
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.3 Pengujian dan Karakterisasi.....	25
3.4 Metode Percobaan.....	26
3.5 Metode Pembahasan.....	27
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Hasil.....	33
4.1.1 Hasil Percobaan Aditif $\text{CaSO}_4$ .....	33
4.1.2 Hasil Percobaan Aditif $\text{NaCl}$ .....	35
4.1.3 Hasil Percobaan Aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	36
4.2 Pembahasan.....	38

4.2.1	Pengaruh Zat Aditif Terhadap Kadar Pada Produk Reduksi .....	38
4.2.2	Pengaruh Zat Aditif Terhadap Recovery Pada Produk Reduksi.....	55
4.2.3	Pengaruh Zat Aditif Terhadap Faktor Selektivitas Nikel .....	68
4.3	Kritisasi Jurnal .....	70
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
5.1	Kesimpulan .....	73
5.2	Saran .....	73
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>75</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>81</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>		<b>89</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>		<b>91</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Ekstraksi nikel dan ferro-nikel dari bijih laterit dan bijih sulfida.....	7
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian review jurnal.....	23
<b>Gambar 4.1</b>	Pengaruh variasi massa zat aditif $\text{CaSO}_4$ dalam penelitian Zhu, dkk. ....	40
<b>Gambar 4.2</b>	Pengaruh variasi massa zat aditif $\text{CaSO}_4$ terhadap kadar produk reduksi dalam penelitian Mayangsari, dkk.....	40
<b>Gambar 4.3</b>	Hasil SEM pada produk dalam penelitian Zhu, dkk., 2012, 1 dan 3 merupakan Fe-Ni dan 2 adalah FeS.....	42
<b>Gambar 4.4</b>	Hasil SEM pada produk dan <i>tailing</i> dalam penelitian Mayangsari, dkk., 2018, 1 adalah fayalit dan 2 adalah Fe-Ni, gambar kiri adalah konsentrat dan gambar kanan adalah <i>tailing</i> .....	42
<b>Gambar 4.5</b>	Pengaruh variasi massa zat aditif NaCl dalam penelitian Qu, dkk. ....	44
<b>Gambar 4.6</b>	Hasil XRD pada produk dalam penelitian Zhou, dkk., 2016, (a) hasil produk dengan menggunakan zat aditif NaCl dan (b) hasil produk tanpa menggunakan zat aditif NaCl .....	45
<b>Gambar 4.7</b>	Hasil XRD pada produk dalam penelitian Qu, dkk., 2019 .....	46
<b>Gambar 4.8</b>	Hasil XRD pada <i>tailing</i> dalam penelitian Qu, dkk., 2019 .....	47
<b>Gambar 4.9</b>	Hasil SEM pada produk dalam penelitian Qu, dkk., 2019 tanpa menggunakan zat aditif NaCl.....	48
<b>Gambar 4.10</b>	Hasil SEM pada produk dalam penelitian Qu, dkk., 2019 dengan menggunakan zat aditif NaCl.....	49

<b>Gambar 4.11</b>	Pengaruh variasi massa zat aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$ terhadap kadar produk reduksi dalam penelitian Jiang, dkk. ....	51
<b>Gambar 4.12</b>	Hasil XRD pada produk dalam penelitian Jiang, dkk., 2013, a merupakan hasil tanpa zat aditif, f merupakan hasil dengan zat aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , M merupakan <i>forsterite</i> ( $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ), F merupakan <i>kamacite</i> ( $[\text{Fe,Ni}]$ ), G merupakan <i>taenite</i> ( $[\text{Fe,Ni}]$ ), H merupakan <i>wustite</i> ( $\text{FeO}$ ), Q merupakan <i>troilite</i> ( $\text{FeS}$ ), K merupakan <i>nepheline</i> ( $\text{Na}_3\text{MgAl}(\text{SiO}_4)_2$ ), hasil b hingga hasil e tidak dibahas dalam review ini .....	52
<b>Gambar 4.13</b>	Hasil XRD pada produk dalam penelitian Widyartha, dkk., 2020, hasil terbaik dalam penelitian ini yang digunakan untuk review paper ini adalah hasil limestone.....	53
<b>Gambar 4.14</b>	Pengaruh variasi massa zat aditif $\text{CaSO}_4$ terhadap <i>recovery</i> produk reduksi dalam penelitian Mayangsari, dkk.....	56
<b>Gambar 4.15</b>	Hasil XRD pada produk dalam penelitian Zhu, dkk., 2012.....	57
<b>Gambar 4.16</b>	Hasil XRD pada produk dalam penelitian Mayangsari, dkk., 2018 .....	58
<b>Gambar 4.17</b>	Hasil SEM-EDX pada produk dalam penelitian Zhou, dkk., 2016 .....	61
<b>Gambar 4.18</b>	Pengaruh variasi massa zat aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$ terhadap <i>recovery</i> besi pada produk reduksi dalam penelitian Jiang, dkk. ....	63
<b>Gambar 4.19</b>	Pengaruh variasi massa zat aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$ terhadap <i>recovery</i> nikel pada produk reduksi dalam penelitian Jiang, dkk. ....	63
<b>Gambar 4.20</b>	Hasil SEM pada produk dalam penelitian Jiang, dkk., 2013, dengan tidak menggunakan zat aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , a' merupakan gambar	

	perbesaran dari a, M merupakan <i>forsterite</i> ((Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ), F merupakan <i>kamacite</i> ([Fe,Ni]), P merupakan <i>spinel</i> (MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) .....	64
<b>Gambar 4.21</b>	Hasil SEM pada produk dalam penelitian Jiang, dkk., 2013, dengan menggunakan zat aditif Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , f <sup>o</sup> merupakan gambar perbesaran dari f, M merupakan <i>forsterite</i> ((Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ), F merupakan <i>kamacite</i> ([Fe,Ni]), G merupakan <i>taenite</i> ([Fe,Ni]), H merupakan <i>wustite</i> (FeO), Q merupakan <i>troilite</i> (FeS), K merupakan <i>nepheline</i> (Na <sub>3</sub> MgAl(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ), P merupakan <i>spinel</i> (MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ).....	65
<b>Gambar 4.22</b>	Hasil SEM pada produk dalam penelitian Widyartha, dkk., 2020 .....	67

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b>	Daftar jurnal yang direview .....	29
<b>Tabel 4.1</b>	Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Zhu, dkk., 2012.....	33
<b>Tabel 4.2</b>	Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Mayangsari, dkk., 2018 .....	34
<b>Tabel 4.3</b>	Data hasil percobaan zat aditif $\text{CaSO}_4$ .....	34
<b>Tabel 4.4</b>	Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Zhou, dkk., 2016.....	35
<b>Tabel 4.5</b>	Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Qu, dkk., 2019 .....	35
<b>Tabel 4.6</b>	Data hasil percobaan zat aditif $\text{NaCl}$ .....	36
<b>Tabel 4.7</b>	Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Jiang, dkk., 2013.....	37
<b>Tabel 4.8</b>	Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Widyartha, dkk., 2020 .....	37
<b>Tabel 4.9</b>	Data hasil percobaan zat aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	38

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Secara historis pengembangan dan kemajuan manusia sangat berkaitan dengan kemampuan produksi dan manipulasi bahan atau material untuk memenuhi kebutuhan manusia. Mulanya manusia hanya memiliki akses terhadap material secara terbatas yang terjadi secara alami seperti batu, kayu, tanah liat, kulit, dan sebagainya. Seiring dengan berjalannya waktu dan berkembangnya teknologi, manusia mulai menemukan teknik dan cara untuk menghasilkan material yang memiliki sifat jauh lebih unggul daripada material alami. Pada titik ini pemanfaatan material sepenuhnya merupakan proses seleksi dari material yang ada dan paling cocok untuk aplikasi tertentu berdasarkan karakteristiknya. Sehingga puluhan ribu material berbeda telah berevolusi untuk memenuhi kebutuhan manusia serta menunjang kemajuan teknologi (Callister & Rethwisch, 2014).

Perkembangan riset dan teknologi yang signifikan tentunya dibarengi dengan ketersediaan bahan-bahan material penunjang yang memadai. Salah satu contoh dari material aplikatif dalam berbagai bidang adalah nikel. Nikel memiliki berbagai kegunaan seperti bahan baja tahan karat, bahan baja paduan, *electroplating*, industri otomotif dan industri baterai. Salah satu industri yang berbahan dasar nikel adalah industri baterai. Dalam beberapa tahun terakhir industri baterai mengalami peningkatan yang pesat hal ini dapat disebabkan oleh riset dan permintaan terhadap mobil listrik yang meningkat. Salah satu jenis baterai dengan *Coulombic Efficiency* (CE) tertinggi dari jenis baterai lainnya adalah baterai *Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide* (NMC). Baterai NMC yang berbahan dasar nikel adalah baterai yang paling baik hampir dari setiap aspek suatu baterai yaitu *cost*, *life span*, *performance*, *safety*, *specific power*, dan *specific energy* sehingga permintaan terhadap baterai NMC pun meningkat (Yu, dkk., 2019).

Dengan tingginya tingkat permintaan terhadap baterai NMC maka permintaan terhadap nikel juga meningkat. Untuk memenuhi permintaan tersebut diperlukan juga tingkat produksi nikel yang tinggi. Sebagian besar produksi nikel diperoleh dari bijih nikel sulfida yang ketersediaannya di alam hanya sekitar 30%. Dan 70% dari cadangan nikel di alam terdapat dalam bentuk nikel laterit namun produksi nikel dari sumber ini hanya mencapai 40% dari total produksi nikel dunia (Norgate & Jahanshahi, 2011). Hal ini akhirnya memantik para peneliti untuk menemukan metode pengolahan bijih laterit yang lebih efisien.

Pengolahan bijih nikel laterit terdiri dari 2 metode yaitu dengan metode pirometalurgi dan hidrometalurgi. Dalam proses pirometalurgi umumnya menggunakan bijih nikel laterit saprolit dan untuk proses hidrometalurgi cenderung menggunakan bijih nikel laterit limonit. Namun dalam beberapa dekade terakhir peneliti mulai menggunakan bijih nikel laterit limonit untuk diproses secara pirometalurgi yaitu proses reduksi langsung yang jauh lebih cepat dan lebih ekonomis ketimbang proses hidrometalurgi (Mudd, 2010). Dalam usaha untuk meningkatkan kadar dan *recovery* dari nikel menggunakan proses reduksi selektif maka ditambahkan suatu agen selektifitas yaitu zat aditif yang diharapkan mampu meningkatkan kadar dan *recovery* dari nikel, sehingga dapat meningkat faktor selektivitas proses.

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan di atas maka diadakan penelitian bersifat review jurnal tentang pengaruh beberapa jenis aditif terhadap kadar, *recovery* dan faktor selektivitas dari proses pengolahan bijih nikel laterit dengan harapan dari penelitian ini dapat diperoleh informasi terkait pengaruh masing-masing aditif serta dapat diperoleh parameter proses yang optimal.

---

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dari penelitian bersifat review jurnal ini, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi jenis aditif terhadap kadar nikel pada produk reduksi?
2. Bagaimana pengaruh variasi jenis aditif terhadap *recovery* nikel pada produk reduksi?
3. Bagaimana pengaruh variasi jenis aditif terhadap faktor selektivitas nikel dalam proses reduksi?

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian bersifat review jurnal ini, yaitu:

1. Data yang digunakan bersumber dari jurnal adalah data penelitian dengan kondisi yang paling optimal.
2. Data yang digunakan bersumber dari jurnal adalah data penelitian yang berkaitan dengan penggunaan zat aditif.
3. Zat aditif yang dibahas dalam review ini adalah jenis zat aditif senyawa sulfat dan zat aditif senyawa klorida.
4. Variabel kontrol dalam masing-masing jurnal yang direview tidak dibahas.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang bersifat review jurnal ini, yaitu:

1. Menganalisis pengaruh variasi jenis aditif terhadap kadar nikel pada produk reduksi.
2. Menganalisis pengaruh variasi jenis aditif terhadap *recovery* nikel pada produk reduksi.
3. Menganalisis pengaruh variasi jenis aditif terhadap faktor selektivitas nikel dalam proses reduksi.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian bersifat review jurnal ini diharapkan dapat memberikan rangkuman informasi mengenai pengaruh beberapa

---

---

jenis aditif terhadap kadar dan *recovery* dari produk nikel serta faktor selektivitas nikel dalam proses reduksi berdasarkan hasil penelitian terdahulu dan dengan data yang ada digunakan untuk menentukan parameter proses yang optimal.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Nikel dan Bijih Nikel**

Nikel adalah logam transisi yang memiliki simbol Ni dan memiliki nomor atom 28 di dalam tabel periodik. Semenjak ditemukan oleh Axel Fredrick Cronstedts, seorang ahli kimia dan pertambangan dari Swedia pada tahun 1751, nikel telah menjadi unsur logam yang sangat diperlukan oleh karena sifatnya yang serbaguna.

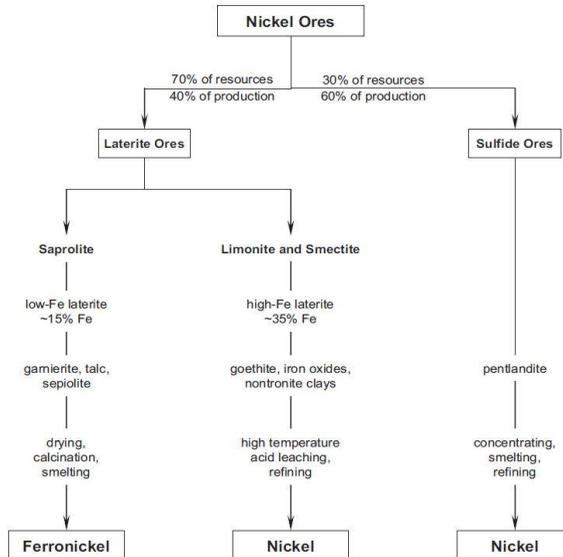
Hampir 65% dari konsumsi nikel dunia digunakan untuk pembuatan *stainless steel* dan 12% untuk manufaktur *superalloys* dan *nonferrous alloys* yang digunakan karena ketahanan korosinya (Kim, dkk., 2010). Nikel juga digunakan oleh industri-industri besar yang bergerak dibidang kimia, perminyakan, energi dan proses. Sisa dari konsumsi nikel dunia adalah untuk kebutuhan konsumen, bangunan dan konstruksi, dunia otomotif dan elektronik (Moskalyk & Alfantazi, 2002). Dengan karakteristik dari unsur nikel yang sangat serbaguna maka nikel memiliki banyak pengaplikasian seperti yang telah disebutkan di atas diantaranya dalam pembuatan *stainless steel*, *electroplating*, katalis, industri petrokimia (Chen, dkk., 2015), dan yang terbaru dalam pemanfaatan nikel adalah sebagai bahan dari baterai untuk *electric vehicle* yaitu baterai *Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide* atau disingkat baterai NMC (Yu, dkk., 2019).

Nikel umumnya hadir dalam dalam dua jenis bijih utama yaitu bijih nikel laterit dan bijih nikel sulfida (Rizov, 2012). Bijih nikel sulfida terbentuk dari hasil aktivitas vulkanik ataupun proses hidrotermal dan biasanya termasuk tembaga (Cu) dan/atau kobalt (Co), dan seringkali disertai logam mulia seperti emas (Au) dan platina (Pt), paladium (Pd) dan rodium (Rh) (kelompok logam platina). Sedangkan bijih nikel laterit terbentuk di dekat permukaan bumi setelah pelapukan ekstensif dari batuan ultramafik (Li, dkk., 2016). Bijih nikel laterit terbentuk secara melimpah di daerah beriklim tropis di sekitar garis khatulistiwa, di daerah gersang

Australia Barat, dan di daerah lembab Eropa Timur (Samouhos, dkk., 2012). Pelapukan mengarah pada jenis bijih yang berbeda-beda seperti limonit, *nontronite*, *saprolit/garnierite/serpentin* dengan jumlah kadar magnesium, besi, dan silika yang berbeda disertai jenis bijih logam zona transisi (Yildirim, dkk., 2013). Terdapat lebih dari 60 jenis mineral yang mengandung nikel namun yang memiliki value untuk industri hanya beberapa saja seperti laterit dengan rumus kimia  $(\text{Fe,Ni})\text{O}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$ , *genthite* dengan rumus kimia  $(\text{Ni,Mg})_4\cdot 3\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , *garnierite* dengan rumus kimia  $\text{H}_2(\text{Ni,Mg})\text{SiO}_4\cdot x\text{H}_2\text{O}$ , *pentlandite* dengan rumus kimia  $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ , *pyrrhotite* dengan rumus kimia  $(\text{Ni,Fe})_7\text{S}_8$ , *millerite* dengan rumus kimia  $\text{NiS}$ , *violarite* dengan rumus kimia  $(\text{Fe,Ni})_2\text{S}_4$ , *polydymite* dengan rumus kimia  $3\text{NiS}\cdot\text{FeS}_2$ , dan *hengleinite* dengan rumus kimia  $(\text{Ni,Co})_3\text{S}_4$  (Xiao, dkk., 2020).

Secara historis hampir sebagian besar proses produksi nikel menggunakan bijih nikel sulfida. Sementara kurang lebih 70% dari cadangan nikel diseluruh dunia terdapat dalam bijih nikel laterit sedangkan total produksi nikel menggunakan bijih nikel laterit hanya mencapai sekitar 40% dari produksi nikel dunia. Faktor utama dari lebih sedikitnya jumlah produksi nikel dunia dari bijih laterit adalah proses ekstraksi nikel dari bijih laterit memerlukan *treatment* yang lebih menyeluruh dan kompleks dibandingkan dengan proses ekstraksi nikel dari bijih sulfida (Quast, dkk., 2017). Sehingga dengan lebih kompleksnya proses ekstraksi nikel dari bijih laterit maka diperlukan biaya yang jauh lebih besar dan menjadikan proses ekstraksi nikel dari bijih laterit kurang ekonomis (Norgate & Jahanshahi, 2011).

Dalam kurun beberapa tahun terakhir tengah berlangsung *trend* peningkatan fokus terhadap pemanfaatan bijih nikel laterit dengan kadar rendah sebagai sumber bijih nikel utama. Hal ini dipengaruhi oleh kebutuhan terhadap baja *stainless steel* serta segala peralatan yang memanfaatkan nikel yang meningkat sehingga permintaan terhadap nikel pun meningkat padahal cadangan dari bijih nikel sulfida dan cadangan bijih nikel laterit kadar tinggi sudah semakin menipis (Zhai, dkk., 2010).



**Gambar 2.1** Ekstraksi nikel dan ferro-nikel dari bijih laterit dan bijih sulfida

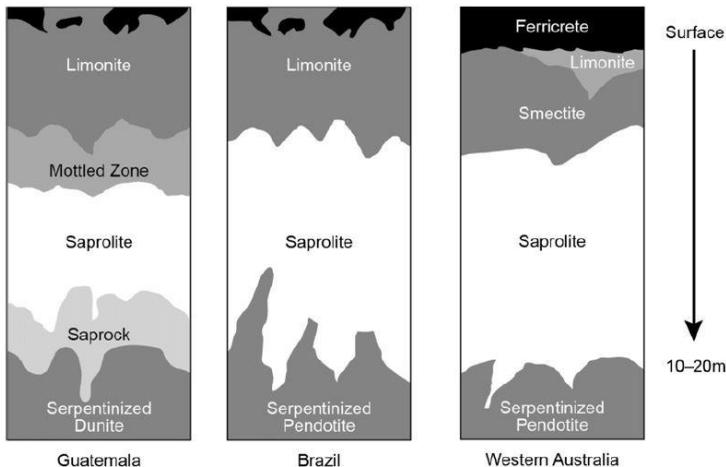
Proses ekstraksi bagi masing-masing bijih nikel laterit dan bijih sulfida dapat dilihat pada Gambar 2.1. Proses ekstraksi dari bijih nikel sulfida berasal dari mineral *pentlandite*,  $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$  (Crundwell, dkk., 2011). Secara umum produksi nikel dari bijih nikel sulfida melibatkan *open cut* atau *underground mining* diikuti dengan proses konsentrasi secara *flotation* kemudian konsentrat dileburkan untuk menghasilkan Nikel *matte* setelah itu di-*refining* untuk mendapatkan logam murni (Mudd, 2010).

Disisi lain proses ekstraksi dari bijih nikel laterit jauh lebih kompleks ketimbang proses ekstraksi bijih nikel sulfida dikarenakan bijih laterit lebih susah untuk ditingkatkan kadarnya (Yang, dkk., 2013). Bijih nikel laterit jauh lebih kompleks dari bijih nikel sulfida. Tambang laterit sebagian besar merupakan *open cut* dan luas karena sifat dari bijih laterit dapat ditemukan di kedalaman dangkal dan pada umumnya hanya dapat diterapkan proses

benefisiari secara dasar sebelum di proses. Kandungan air yang tinggi dalam bijih laterit juga perlu dihilangkan melalui pengeringan atau kalsinasi (Mudd, 2010).

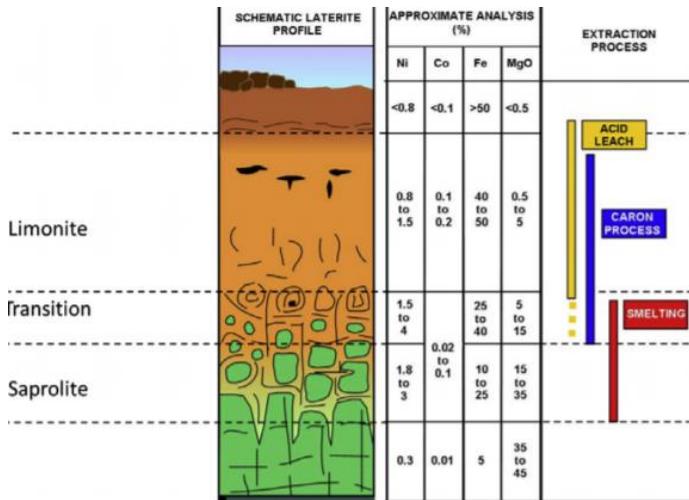
## 2.2 Bijih Nikel Laterit dan Proses Ekstraksinya

Bijih laterit banyak ditemukan di daerah tropis dan ditambang untuk diambil nikel dan kobalt di negara-negara seperti Indonesia, Filipina, dan Kuba. Bijih laterit yang ditambang untuk diambil nikel dan kobalt ketika bijih tersebut memiliki konsentrasi melebihi sekitar 1,3% Ni dan 0,1% Co. Laterit merupakan hasil pelapukan selama jutaan tahun sehingga tercipta beberapa lapisan laterit, dan terdapat 3 lapisan yang mengandung nikel yaitu lapisan limonit yang terbentuk di dekat permukaan, lapisan *smectite* yang juga terbentuk di dekat permukaan dan yang terakhir adalah lapisan saprolit terbentuk di bawah lapisan laterit dan *smectite*. Lapisan-lapisan ini ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Crundwell, dkk., 2011).



**Gambar 2.2** Profil persebaran bijih nikel laterit pada beberapa tempat di dunia

Bijih laterit dapat dibagi menjadi tiga lapisan utama yaitu limonit, transisi, dan saprolit. Limonit dan transisi diekstraksi secara hidrometalurgi. Sebagian besar limonit di alam memiliki senyawa dominan  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  yang bersifat amorf, aphanitik, dan sebagai oksida besi dan hidroksida amorf terutama dengan goetit, sehingga kadar besi di dalam bijih nikel laterit limonit menjadi sangat tinggi (Jiangan, dkk., 2014). Deposit bijih nikel saprolite terbesar terletak di New Caledonia, Indonesia dan Filipina (Tsuji & Tachino, 2012). Saprolit diekstraksi secara pirometalurgi karena memiliki kadar besi yang rendah (Amilton, dkk., 2018). Terdapat empat jenis proses utama yang berbeda yaitu secara pirometalurgi, hidrometalurgi, kombinasi hidro-pirometalurgi dan yang terakhir ialah teknologi terbaru. Proses yang umum secara pirometalurgi dan hidrometalurgi dari pengolahan bijih laterit berupa proses *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF), proses *Caron Ammonia Leach, acid leaching* (AL) dan *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) (Zheng, dkk., 2014). Secara umum masing-masing jenis bijih nikel laterit cocok untuk proses tertentu seperti limonit untuk HPAL, dan saprolit untuk RKEF seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Oxley & Barcza, 2013).



**Gambar 2.3** Profil bijih nikel laterit dan proses ekstraksinya

Proses ekstraksi dengan menggunakan proses kombinasi hidro-pirometalurgi utamanya melakukan proses *reduction roasting* dilanjut dengan separasi menggunakan magnet ataupun secara flotasi. Karena begitu tingginya tingkat konsumsi energi pada proses pengolahan bijih nikel laterit menggunakan proses RKEF (Li, dkk., 2015) serta banyaknya keterbatasan dalam melakukan proses hidrometalurgi (Pickles, dkk., 2014). Hal tersebut antara lain *recovery* nikel yang rendah dalam proses Caron, konsumsi asam yang tinggi serta kandungan besi yang tinggi dalam *leaching*, kemudian kebutuhan suhu serta tekanan yang tinggi dalam HPAL menjadikan rute *reduction roasting-magnetic separation* dianggap sebagai metode yang paling ramah lingkungan dan ekonomis untuk pengolahan bijih laterit sekarang ini (Dong, dkk., 2018).

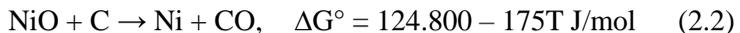
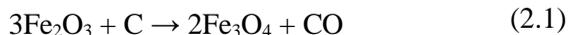
### 2.3 Reduksi Selektif Bijih Nikel

Proses reduksi langsung merupakan suatu pengembangan dari metode *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF) dimana tahapan-tahapan dari proses RKEF menggunakan energi dengan

jumlah yang sangat besar. Proses reduksi langsung menggunakan bantuan zat aditif diikuti dengan proses pemisahan secara magnetik dipandang mampu mengurangi penggunaan energi yang sangat tinggi (Li, dkk., 2012).

Reduksi selektif nikel bertujuan untuk mereduksi oksida nikel menjadi logam nikel dan mempertahankan oksida besi untuk tidak tereduksi atau untuk meminimalkan jumlah dari reduksi oksida besi menjadi logam besi (Liu, dkk., 2015). Dengan proses reduksi selektif ini, diharapkan produk reduksi akan memiliki kadar nikel yang tinggi dan kadar besi sedang (Pintowantoro & Abdul, 2019). Dari beberapa penelitian dan pemodelan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa aspek termodinamika yang penting dan memengaruhi reduksi selektif. Beberapa aspek tersebut adalah besar potensial reduksi (rasio  $\text{CO}/\text{CO}_2$ ), temperatur dari proses reduksi (Febriana, dkk., 2018), dan transformasi fase/senyawa ketika reduksi berlangsung (Elliot, dkk., 2016).

Dalam proses reduksi langsung nikel laterit, reaksi dari fasa solid diawali dengan interaksi karbon dan bijih laterit yang membentuk reduktor karbonmonoksida (CO), seperti yang disajikan dalam Persamaan 2.1-2.2.



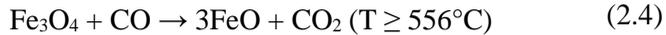
Reaksi kemudian berlanjut akibat terbentuknya gas intermediet sebagai produk dari reaksi reduksi dan reaksi *Boudouard*. Reaksi *Boudouard* adalah reaksi dari *feed* carbon dengan karbondioksida membentuk karbonmonoksida dimana sumber dari karbon dioksida ialah berasal dari dekomposisi fluks yang digunakan umumnya fluks dengan senyawa karbonat. Reaksi reduksi laterit terbagi menjadi tiga tahap yaitu reduksi besi oksida, reduksi nikel oksida dan gasifikasi karbon (Zevgolis, dkk., 2009).

Mekanisme reduksi komponen oksida besi dibagi menjadi 3 tahap seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.3-2.5, yaitu:

Tahap I: Reduksi *hematite* menjadi *magnetite*



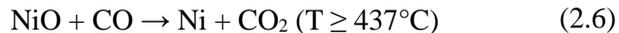
Tahap II : Reduksi *magnetite* menjadi *wustite*



Tahap III : Reduksi *wustite* menjadi logam besi



Reduksi nikel yang terjadi dalam satu tahap reaksi seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.6, yaitu:



Gasifikasi karbon terjadi melalui reaksi *Boudouard* seperti yang ditunjukkan Persamaan 2.7. (Cao, dkk., 2016), yaitu:



Sejalan dengan pembentukan gas karbonmonoksida diawal proses kontak, zat-zat *volatile* terbentuk dari pemanasan batu bara yang mengandung rantai panjang hidrokarbon. Pada temperatur di atas  $700^\circ\text{C}$  hidrokarbon akan mulai terpecah menjadi hidrogen dan karbon. Produk reaksi berupa karbonmonoksida, hidrogen dan karbon dapat berperan sebagai reduktor dalam reduksi bijih laterit. Dalam reduksi selektif nikel, sejauh mungkin reaksi reduksi dari besi oksida harus dicegah sehingga reaksi reduksi besi oksida hanya terjadi hingga Persamaan (2.4) sehingga masih banyak oksida besi yang belum membentuk logam besi. Keberadaan senyawa besi non-oksida akan membuat reduksi besi menjadi logam akan terhambat. Dengan kata lain, dalam proses reduksi selektif bijih nikel laterit, besi adalah sejenis lawan reduksi selektif dari nikel. Untuk mendapatkan produk paduan FeNi dengan kadar

nikel yang lebih tinggi, maka proses reduksi besi oksida menjadi besi logam harus dihambat (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Proses reduksi langsung yang terdiri dari proses *reduction* *roasting* dan dilanjutkan pemisahan secara magnetik mulai banyak divariasikan dengan reduktor yang berbeda seperti karbon, hidrogen, karbon monoksida, dan bahkan campuran gas. Proses *reduction roasting* dapat meningkatkan nilai *recovery* dari nikel (Yang, dkk., 2016). Akan tetapi kandungan nikel dalam konsentrat yang diperoleh lebih rendah dari 4% sehingga untuk meningkatkan kadar nikel maka ditambahkan zat aditif seperti beberapa senyawa klorida dan beberapa senyawa sulfat untuk menjadi agen selektivitas yang akan meningkatkan perolehan nikel (Dong, dkk., 2017).

## 2.4 Zat Aditif Sebagai Agen Selektivitas

Penambahan aditif dalam proses reduksi langsung adalah untuk meningkatkan reduksi selektif nikel. Zat aditif diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu aditif dalam bentuk *sulfocompound* ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{CaSO}_4$ ) serta aditif dalam bentuk senyawa klor ( $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ , dan  $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (Pintowantoro & Abdul, 2019).

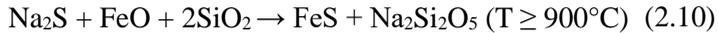
Aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  berperan sebagai aditif dengan membentuk dekomposisi berupa  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{S}$  pada temperature 850-900°C (Xueming, dkk., 2018).  $\text{Na}_2\text{O}$  akan meningkatkan *recovery* nikel dengan cara bereaksi dengan  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  (besi silikat) membentuk senyawa dengan temperatur lebur yang rendah sehingga meningkatkan laju agregasi dari partikel metal. Adapun persamaan reaksinya ditunjukkan pada Persamaan 2.8.



$\text{S}$  hasil dari dekomposisi  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  akan meningkatkan kadar nikel dengan mengikat  $\text{Fe}$  dan membentuk senyawa *troilite* seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.9.



$\text{Na}_2\text{S}$  akan mengurangi *recovery* dari besi dengan cara berikatan dengan  $\text{FeO}$  seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.10.



Senyawa  $\text{FeS}$  tidak dapat ditarik oleh magnet ketika proses *magnetic separation* sehingga akan meningkatkan kadar nikel (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Tidak jauh beda dengan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , aditif  $\text{CaSO}_4$  yang juga masih termasuk kedalam aditif *sulfocompounds* dimana  $\text{CaSO}_4$  akan terdekomposisi dan menghasilkan  $\text{S}_2$ ,  $\text{O}_2$  dan  $\text{CaO}$  (Zhu, dkk., 2012).  $\text{CaO}$  kemudian akan berikatan dengan  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{FeO}$  untuk membentuk senyawa *kirschsteinite* ( $\text{CaFeSiO}_4$ ) seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.11. Pembentukan *kirschsteinite* akan mempercepat pembentukan fayalite ( $\text{FeSiO}_3$ ) sehingga menurunkan *recovery* dari besi (Zhu, dkk., 2012).



Selain  $\text{CaO}$ ,  $\text{S}_2$  hasil dekomposisi  $\text{CaSO}_4$  juga akan mengikat  $\text{Fe}$  dan membentuk senyawa dengan temperatur leleh rendah yang akan meningkatkan ukuran partikel dari metal  $\text{Fe-Ni}$ . Reaksi  $\text{S}_2$  dengan  $\text{Fe}$  ditunjukkan dalam Persamaan 2.12.



Dengan terbentuknya FeS yang tidak dapat ditarik magnet ketika dipisahkan secara magnetik maka akan meningkatkan kadar nikel (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Aditif NaCl yang merupakan salah satu aditif dalam bentuk senyawa klor akan bereaksi membentuk agen klorinasi bagi Ni dan Fe dalam bijih laterit. Proses dimulai ketika NaCl bereaksi dengan uap air dan pengotor dalam bijih berupa SiO<sub>2</sub> dan akan menghasilkan asam klorida seperti yang akan ditunjukkan pada Persamaan 2.13.



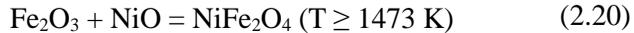
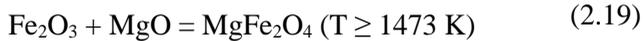
Kemudian asam klorida akan mengklorinasi oksida nikel dan oksida besi membentuk senyawa FeCl<sub>2</sub> dan NiCl<sub>2</sub> seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.14-2.15.



FeCl<sub>2</sub> dan NiCl<sub>2</sub> akan bereaksi dengan uap air dan kemudian akan bereaksi dengan C (*water gas reaction*) membentuk Fe dan Ni seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.16-2.17.



Selain itu oksida-oksida lain yang berada di dalam ore akan bereaksi sesuai dengan Persamaan 2.18-2.21.



Sehingga di akhir proses akan tersisa senyawa senyawa berupa  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Pintowantoro & Abdul, 2019).

## 2.5 Kadar, Recovery & Faktor Selektivitas Nikel

Tujuan dari berbagai macam pengolahan mineral terlepas dari metode yang digunakan ialah untuk memisahkan mineral yang berharga yang ada pada konsentrat dengan mineral yang tidak berharga atau gangue pada *tailing*. Terdapat dua jenis pengukuran dari proses pemisahan yang paling umum digunakan dalam proses pengolahan mineral, hal tersebut adalah kadar/grade dan pemulihan/*recovery* (Wills & Finch, 2016).

Kadar ataupun *assay* adalah persentase yang mengacu terhadap jumlah ataupun kandungan dalam suatu komoditas. Dalam pengolahan bijih logam, kadar menunjukkan kandungan persentase logam yang ada meskipun untuk beberapa jenis bijih dengan kandungan yang sangat rendah seperti emas maka kandungan logamnya dinyatakan dalam *part per million* atau ppm. Beberapa logam dijual dalam bentuk oksidanya sehingga yang dimaksud kadar disini adalah kandungan dari oksida tersebut (Wills & Finch, 2016).

Pengertian *recovery* dalam hal pengolahan bijih logam menunjukkan persentase dari total logam yang terkandung dalam bijih yang berhasil diperoleh ke dalam konsentrat. Sebagai contoh, nilai *recovery* sebesar 90% menyatakan bahwa terdapat 90% dari

logam dalam bijih yang berhasil diperoleh kembali ke dalam konsentrat serta sisanya 10% akan terbuang ke dalam *tailing*. *Recovery* dilambangkan dengan symbol  $R$  dengan persamaan seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.22.

$$R = \frac{C c}{F f} \quad (2.22)$$

Dengan  $C$  merupakan berat dari konsentrat,  $F$  merupakan berat dari feed/umpan,  $c$  merupakan kadar dari metal di dalam konsentrat, dan  $f$  adalah kadar dari metal di dalam feed/umpan (Wills & Finch, 2016).

Kadar dan *recovery* adalah ukuran paling umum dari efisiensi metalurgi untuk mengevaluasi operasi yang diberikan sehingga perlu untuk diketahui nilai dari keduanya. Sebagai contoh, sangat mungkin untuk memperoleh kadar konsentrat yang sangat tinggi hanya dengan mengambil beberapa gumpalan galena murni dari bijih timah, tetapi nilai *recovery* akan sangat rendah. Di sisi lain, sangat mungkin juga diperoleh *recovery* 99% dari logam, tetapi hal ini juga menempatkan 60% gangue mineral dalam konsentrat. Tentu saja dimungkinkan untuk memperoleh *recovery* 100% dengan tidak meningkatkan kadar bijih sama sekali. Nilai kadar dan *recovery* umumnya berbanding terbalik hal ini karena *recovery* meningkat, maka kadar akan menurun dan sebaliknya. Jika suatu upaya dilakukan untuk mencapai kadar yang tinggi, hasil *tailing* akan lebih banyak dan *recovery*nya menjadi rendah. Jika ditujukan untuk *recovery* logam yang tinggi, akan ada lebih banyak gangue dalam konsentrat sehingga kadar logam akan menurun. (Wills & Finch, 2016).

Selain kadar dan *recovery*, untuk membandingkan hasil dari pengolahan bijih logam khususnya bijih nikel maka digunakan faktor selektivitas untuk membandingkan hasil dari masing-masing proses dengan kondisi bijih dengan kadar nikel dan kadar besi yang berbeda-beda. Adapun cara menghitung faktor selektivitas nikel ditunjukkan melalui Persamaan 2.23.

$$\text{Faktor Selektivitas Nikel} = \frac{X_{Ni} \cdot Y_{Fe}}{X_{Fe} \cdot Y_{Ni}} \quad (2.23)$$

Dimana  $X_{Ni}$  adalah kadar nikel dalam produk reduksi,  $X_{Fe}$  adalah kadar besi dalam produk reduksi,  $Y_{Ni}$  adalah kadar nikel dalam bijih laterit, dan  $Y_{Fe}$  adalah kadar besi dalam bijih laterit (Elliot, dkk., 2015). Faktor selektivitas mampu mengukur tingkatan terjadinya reduksi selektif nikel sehingga mampu dijadikan pembanding dari masing-masing proses yang mengolah bijih nikel dengan perbedaan kandungan kadar nikel dan besi dalam bijih yang digunakan. Semakin tinggi faktor selektivitas maka semakin baik proses reduksi selektif nikel (Pintowantoro & Abdul, 2019).

## 2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian dan riset yang berkaitan dengan proses pengolahan bijih nikel laterit menggunakan metode reduksi langsung telah menjadi populer dalam kurun waktu satu hingga dua dekade terakhir. Berbagai macam riset telah dilakukan dengan berbagai macam variasi yang ada. Khususnya riset dan penelitian tentang pengaruh zat aditif dalam proses reduksi langsung yang terus menerus dilakukan dengan tujuan untuk menemukan parameter proses yang ideal dari proses ekstraksi bijih nikel menggunakan zat aditif. Di bawah ini merupakan beberapa rangkuman dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang membahas proses reduksi selektif dengan menggunakan zat aditif.

Pada tahun 2012, Li, dkk., melakukan penelitian reduksi langsung nikel laterit dengan menggunakan agen selektifitas  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Pellet yang mengandung bijih nikel laterit dan zat aditif dipanaskan dalam furnace bersamaan dengan *lignite* sebagai reduktor dengan temperatur reduksi sebesar  $1050^\circ\text{C}$  -  $1100^\circ\text{C}$ . Hasil dari penelitian ini adalah jumlah *recovery* nikel sebesar 83,01% dan *recovery* besi sebesar 56,36%. Hal menarik yang ditemukan Li adalah reaksi reduksi pembentukan logam besi tidak

---

dihambat oleh pembentukan fayalit namun proses selektivitas nikel di dapat dengan pembentukan FeS yang menekan proses metalisasi besi sehingga meningkatkan pembentukan nikel

Mayangsari & Prasetyo pada tahun 2016 melakukan penelitian proses reduksi selektif bijih nikel laterit menggunakan zat aditif  $\text{CaSO}_4$ . Proses reduksi dilakukan dalam rentang temperatur  $800^\circ\text{C}$  hingga  $1100^\circ\text{C}$  dengan waktu reduksi 1 sampai 4 jam serta penambahan reduktor dan aditif yang bervariasi dari 5% hingga 20%. Proses reduksi dilakukan di dalam *muffle furnace carbolite*. Hasil reduksi kemudian dipisahkan secara magnetik dan diuji AAS untuk mengetahui kadar Ni dalam konsentrat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu reduksi, peningkatan kadar Ni dan metalisasi logam Ni semakin tinggi, dengan terbentuknya logam Ni yang terpisah dari logam Fe. Hal yang sama juga terjadi jika waktu reduksi semakin lama. Namun, semakin banyak penambahan reduktor pada campuran reduksi, peningkatan kadar Ni semakin kecil. Penambahan  $\text{CaSO}_4$  dapat meningkatkan kadar nikel namun belum memberikan kecenderungan hasil yang baik. Peningkatan kadar Ni tertinggi yang didapatkan adalah 2,44%.

Pada tahun 2017, Dong, dkk., melakukan penelitian terhadap proses reduksi langsung dengan menggunakan zat aditif  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Bijih nikel yang digunakan yaitu bijih nikel laterite kadar rendah yang dikeringkan kemudian dihancurkan hingga berukuran dibawah 0,25 mm kemudian dicampurkan dengan zat aditif  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  secara bervariasi dan ditambahkan reduktor yaitu anthracite. Pencampuran dilakukan menggunakan *laboratory mixing drum* kemudian campuran bijih dimasukkan kedalam *corundum crucible* dan dipanaskan di dalam *tube furnace* kemudian hasil dari proses pemanasan akan di separasi menggunakan magnetic separator untuk mendapatkan konsentrat feronikel. Diperoleh hasil dari penelitian Dong, dkk., yaitu kadar nikel terbaik yang diperoleh adalah sebesar 11,83% dan nilai *recovery* tertinggi sebesar 97,83%. Kehadiran  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sangat berpengaruh dalam *recovery* nikel, hal ini disebabkan

---

bertambahnya jumlah  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  akan menghasilkan HCl yang lebih banyak sehingga jumlah NiO yang terkloridasi akan semakin banyak dan akhirnya meningkatkan kadar dari nikel.

Ditahun berikutnya yaitu 2018, Abdul, dkk., melakukan penelitian reduksi selektif nikel menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Bijih nikel yang digunakan adalah bijih nikel laterit limonit yang kemudian dihancurkan dan dicampur dengan reduktor gas CO yang diperoleh dari reaksi *Boudouard* dengan dolomite sebagai sumber gas  $\text{CO}_2$ . Dan terakhir dicampurkan zat aditif dan campuran kemudian dibentuk menjadi briket bantal. Briket bantal lalu dimasukkan kedalam *crucible*. Proses reduksi berlangsung di dalam *muffle furnace*. Hasil dari reduksi kemudian dilakukan separasi menggunakan magnet. Diperoleh hasil penelitian berupa kadar nikel tertinggi yang diperoleh sebesar 5,84% dan *recovery* nikel tertinggi sebesar 88,51%.

Pada penelitiannya yang kedua di tahun 2018, Abdul, dkk., meneliti variasi dari temperatur reduksi dari proses reduksi selektif. Campuran dari bijih nikel laterit, batu bara dan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dibentuk menjadi briket dan dimasukkan ke dalam *crucible* dengan *bed* batu bara dan direduksi di dalam *muffle furnace* selama 6 jam dengan variasi temperatur  $1200^\circ\text{C}$ ,  $1300^\circ\text{C}$ , dan  $1400^\circ\text{C}$ . Hasil reduksi menunjukkan bahwa peningkatan kadar serta *recovery* nikel terbaik diperoleh pada proses reduksi variasi temperatur  $1400^\circ\text{C}$  dengan peningkatan kadar sebesar 3,44% dan *recovery* sebesar 86,75%.

Masih pada tahun 2018, Arsyanjani melakukan penelitian reduksi selektif bijih nikel laterit dengan memvariasikan 3 jenis aditif yaitu  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dan  $\text{CaSO}_4$  untuk mengetahui pengaruh masing-masing aditif terhadap kadar unsur dan nilai *recovery* nikel dan besi dalam proses reduksi selektif. Briket yang terdiri dari campuran ore, batu bara, zat aditif sebanyak 10%, serta kanji yang dimasukkan ke dalam *crucible bed* yang terdiri dari campuran batu bara dan dolomit kemudian direduksi hingga temperatur  $1400^\circ\text{C}$ . Dari hasil reduksi didapatkan peningkatan kadar nikel tertinggi pada aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  peningkatan sebesar 4,5%,

---

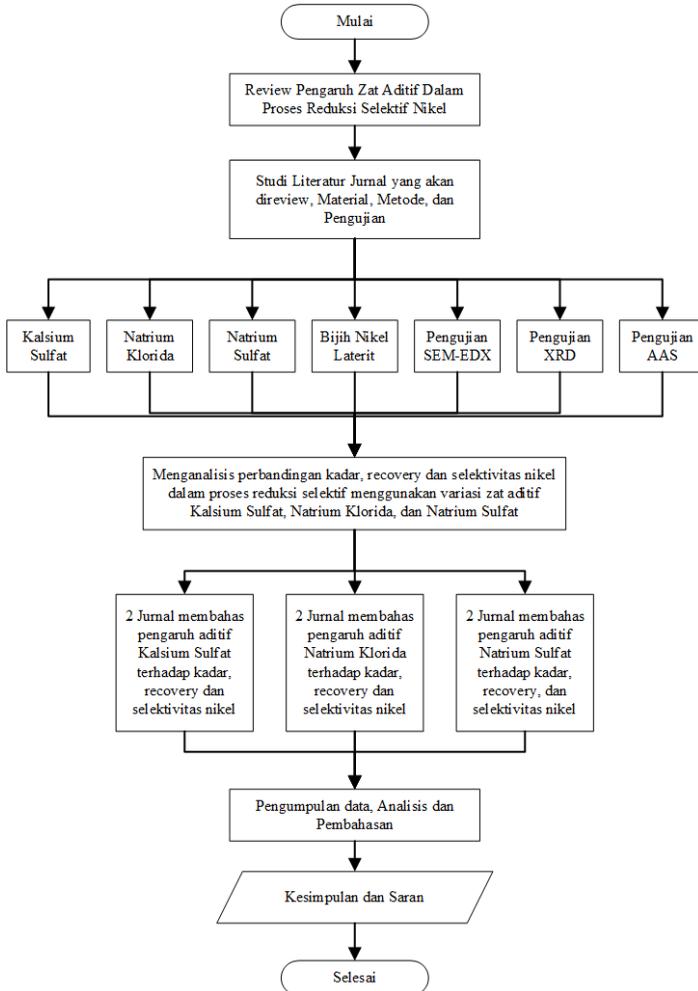
serta *recovery* nikel tertinggi didapatkan aditif  $\text{CaSO}_4$  sebesar 97,93%. Sedangkan penurunan kadar besi tertinggi didapat pada aditif  $\text{CaSO}_4$  sebesar 39,13% dan nilai *recovery* besi tertinggi didapatkan pada aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebesar 18,96%.

Pada tahun 2020, dalam penelitian yang dilakukan oleh Widyartha, tentang proses reduksi selektif menggunakan aditif  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . Bijih yang digunakan adalah bijih nikel laterit limonit yang dihancurkan dan diayak hingga berukuran 50 mesh kemudian dicampurkan dengan aditif  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  dengan jumlah bervariasi dan dibentuk briket bantal yang kemudian briket diletakkan didalam crucible dan direduksi menggunakan muffle furnace dengan reduktor batubara. Hasil reduksi kemudian diseparasi dengan menggunakan magnet. Diperoleh hasil penelitian berupa peningkatan kadar nikel terbaik sebesar 14,31% dan nilai *recovery* nikel terbaik sebesar 93,22%.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB III METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1 Diagram Alir



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian review jurnal

---

### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan dalam penelitian ini disesuaikan berdasarkan dengan alat dan bahan yang digunakan serta dicantumkan di dalam jurnal yang direview. Alat yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. *Crusher*  
*Crusher* digunakan untuk menghancurkan bijih nikel yang akan digunakan dalam proses reduksi.
2. *Sieve*  
*Sieve* dengan ukuran mesh yang bervariasi antara 50 dan 100 mesh digunakan untuk mengayak bijih nikel yang sudah dihancurkan dengan *crusher*.
3. Pembentuk Pellet/Briket  
Alat ini digunakan untuk membentuk campuran dari bijih nikel, reduktor, dan zat aditif menjadi berbentuk pellet/briket.
4. *Crucible*  
*Crucible* digunakan sebagai tempat pellet/briket yang akan direduksi diletakkan.
5. *Furnace*  
*Furnace* adalah tungku perapian tempat *crucible* diletakkan dan tempat proses reduksi berlangsung, dalam masing masing penelitian menggunakan beberap tipe *furnace* seperti *muffle furnace* dan *tube sintering furnace*.
6. *Magnetic Separator*  
*Magnetic separator* adalah alat yang digunakan untuk memisahkan konsentrat hasil reduksi dengan *tailing* dengan memanfaatkan sifat magnetik.

Kemudian bahan yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Bijih Nikel Laterit  
Bijih nikel laterit yang digunakan dalam jurnal yang review merupakan bijih nikel laterit limonit dan juga bijih nikel laterit saprolit.

2. Reduktor  
Reduktor yang digunakan dalam masing-masing jurnal yang direview beragam, contohnya *coal*, *anthracite*, *sub bituminous coal* dan *bituminous coal*.
3. Fluks  
Dalam beberapa penelitian yang dilakukan digunakan fluks dengan senyawa karbonat seperti *quicklime*, *dolomite* dan *limestone*.
4. Zat Aditif  
Zat aditif yang digunakan dalam beberapa penelitian adalah zat aditif seperti kalsium sulfat, natrium klorida dan natrium sulfat.

### 3.3 Pengujian dan Karakterisasi

Adapun pengujian dan karakterisasi dalam penelitian ini disesuaikan berdasarkan dengan pengujian dan karakterisasi yang digunakan serta dicantumkan di dalam jurnal-jurnal yang akan direview. Pengujian dan karakterisasi yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pengujian AAS  
Pengujian AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*) dilakukan untuk mengetahui kadar nikel dan besi dalam bijih nikel yang akan digunakan untuk percobaan serta untuk mengetahui kadar nikel dan besi dalam produk hasil reduksi. Pengujian AAS ini dilakukan dalam penelitian Mayangsari, dkk., 2018.
2. Pengujian XRF  
Pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia penyusun dari bijih nikel laterit dan konsentrat serta *tailing* yang dihasilkan setelah dilakukan proses pemisahan secara magnetik. Pengujian XRF ini dilakukan dalam penelitian Zhu, dkk., 2012, dan dalam penelitian Jiang, dkk., 2013.

3. Pengujian EDX  
Pengujian EDX (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) dilakukan untuk mengetahui kadar dari unsur-unsur penyusun dari bijih nikel laterit dan konsentrat serta *tailing* yang dihasilkan setelah dilakukan proses pemisahan secara magnetik. Pengujian EDX ini dilakukan dalam penelitian Zhou, dkk., 2016, dalam penelitian Qu, dkk., 2019, dan dalam penelitian Widyartha, dkk., 2020.
4. Pengujian SEM  
Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari hasil percobaan reduksi selektif serta morfologinya. Pengujian SEM ini dilakukan oleh semua jurnal penelitian yang direview.
5. Pengujian XRD  
Pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) dilakukan untuk mengetahui dan mengidentifikasi fasa apa saja yang ada di dalam bijih nikel laterit. Pengujian XRD juga dilakukan pada konsentrat dan *tailing* hasil pemisahan secara magnetik untuk mengetahui fasa apa saja yang terbentuk setelah dilakukan proses reduksi. Pengujian ini XRD ini dilakukan oleh semua jurnal penelitian yang direview.

### 3.4 Metode Percobaan

Adapun metode percobaan dalam penelitian ini disesuaikan berdasarkan dengan metode percobaan yang dilakukan dalam penelitian reduksi selektif adalah sebagai berikut.

1. Preparasi  
Preparasi dilakukan untuk menyiapkan bijih nikel yang telah dilakukan pengujian karakterisasi awal sebelum direduksi. Preparasi diawali dengan menghancurkan bijih nikel menggunakan *crusher* dan diayak menggunakan *sieve*. Kemudian bijih dicampur dengan reduktor dan zat aditif dengan komposisi tertentu dan dibentuk menjadi pellet/briket.

2. Proses Reduksi

Proses reduksi dilakukan terhadap bijih yang sudah dipreparasi. Pellet/briket dimasukkan ke dalam *crucible* dan diletakkan di dalam *furnace* dan direduksi dengan menggunakan temperature tertentu. Setelah proses reduksi selesai dilakukan kemudian *furnace* dimatikan dan sample kemudian dibiarkan mendingin di dalam *furnace* hingga mencapai temperature kamar. Kemudian sample akan diseparasi secara magnetik untuk memisahkan konsentrat dan *tailing*.

3. Pengujian dan Karakterisasi

Konsentrat dan *tailing* kemudian akan di uji untuk mendapatkan data-data hasil penelitian yang akan digunakan untuk membahas pengaruh zat aditif yang telah ditentukan terhadap proses reduksi selektif nikel.

### 3.5 Metode Pembahasan

Penelitian yang dilakukan kali ini adalah penelitian berbasis review jurnal sehingga data-data yang dihasilkan dan akan dianalisis berasal dari data-data penelitian terdahulu yang relevan dengan topik dan variabel penelitian yang dilakukan. Adapun topik dari penelitian ini adalah tentang agen selektivitas nikel dalam proses reduksi selektif nikel yang lebih dikerucutkan lagi membahas tentang zat aditif sebagai agen selektivitas nikel beserta pengaruh yang diberikan oleh beberapa variasi aditif terhadap parameter-parameter dari proses reduksi selektif nikel. Adapun parameter-parameter tersebut meliputi kadar dan *recovery* nikel pada produk reduksi, serta nilai faktor selektivitas nikel.

Secara historis, pengolahan nikel dari bijih laterit dengan mineralogi yang rumit dan kompleks mengakibatkan metode pemisahan fisik tidak dapat dilakukan dan harus dilakukan secara metalurgi. Terdapat 4 kategori pengolahan nikel yaitu pyrometalurgi, hidrometalurgi, kombinasi hidro-pyrometalurgi, serta teknologi terbaru.

Sesuai dengan tinjauan pustaka yang ada, hingga saat ini pengolahan nikel yang paling ekonomis serta ramah lingkungan ialah berasal dari kategori teknologi terbaru dimana salah satunya adalah reduksi selektif nikel. Proses yang terbagi dalam 2 tahapan ini yaitu tahapan *reduction roasting* dimana bijih nikel direduksi dengan cara dipanaskan hingga temperatur tertentu. Kemudian masuk ke tahapan berikutnya yaitu *magnetic separation* dimana hasil reduksi akan diseparasi secara magnetik untuk memperoleh konsentrat dengan kadar nikel yang tinggi (Dong, dkk., 2018).

Dalam pengembangannya, metode reduksi selektif mulai menggunakan zat-zat tambahan guna meningkatkan mutu proses dari reduksi selektif. Zat tambahan tersebut salah satunya ialah zat aditif. Zat aditif yang umumnya digunakan adalah zat aditif berbasis senyawa sulfat dan senyawa klorida.

Untuk mengetahui pengaruh dari jenis-jenis aditif yang ada maka penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi zat aditif terhadap performa proses reduksi selektif. Adapun variasi dari zat aditif yang digunakan dalam penelitian ini adalah zat aditif  $\text{CaSO}_4$ , zat aditif  $\text{NaCl}$ , dan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Dan data-data penelitian dari masing-masing zat aditif yang telah disebutkan diperoleh dari jurnal penelitian terdahulu seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Daftar jurnal yang direview

Zat Aditif Yang Digunakan	Tahun Publikasi	Nama Jurnal	Judul Paper	Penulis
	2012	International Journal of Mineral Processing	Upgrading low nickel content laterite ores using selective reduction followed by magnetic separation	D.Q. <b>Zhu</b> , Y. Cui, K. Vining, S. Hapugoda, J. Douglas, J. Pan, G.L. Zheng
CaSO <sub>4</sub>	2018	Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology (ICOMMET 2017)	Upgrading Nickel Content of Limonite Nickel Ore through Pelletization, Selective Reduction and Magnetic Separation	W. <b>Mayangsari</b> , A.B. Prasetyo, Puguh Prasetyo
NaCl	2016	Scientific Reports	Mechanism of sodium chloride in promoting reduction of high magnesium low-nickel oxide ore	S. <b>Zhou</b> , Y. Wei, H. Wang, B. Ma, C. Wang
	2019	Metals	Production of	G. <b>Qu</b> , S. Zhou, H.

			Ferronickel Concentrate from Low-Grade Nickel Laterite Ore by Non-Melting Reduction Magnetic Separation Process	Wang, B. Li, Y. Wei
	2013	International Journal of Mineral Processing	Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process	M. Jiang, T. Sun, Z. Liu, J. Kou, N. Liu, S. Zhang
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2020	Materialwiss. Werkstofftech	Effective beneficiation of low content nickel ferrous laterite using fluxing agent through Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> selective reduction	B. Widyartha, Y. Setiyorini, F. Abdul, T.J. Subakti, S. Pintowantoro

---

Pembahasan dari masing-masing jurnal akan dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian yang paling baik dari masing-masing jurnal kemudian dibahas masing-masing parameter prosesnya. Parameter yang digunakan untuk membandingkan masing-masing proses reduksi selektif dengan masing-masing aditif adalah kadar dan *recovery* nikel dalam produk, serta faktor selektivitas nikel dalam proses reduksi selektif.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil

Berikut ini adalah lampiran hasil dari percobaan reduksi selektif nikel dengan menggunakan varisasi zat aditif yaitu zat aditif  $\text{CaSO}_4$ , zat aditif  $\text{NaCl}$  dan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  berdasarkan data yang dikumpulkan dari jurnal-jurnal penelitian sebelumnya.

#### 4.1.1 Hasil Percobaan Aditif $\text{CaSO}_4$

Berikut ini adalah data hasil dari percobaan reduksi selektif nikel menggunakan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  yang diperoleh dari jurnal penelitian Zhu, dkk., pada tahun 2012 dan dari jurnal penelitian Mayangsari, dkk., pada tahun 2018.

#### A. Karakterisasi

Berikut ini merupakan data-data hasil karakterisasi dari penelitian dengan menggunakan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  yang diperoleh dari laporan penelitian yang dilakukan oleh Zhu, dkk., pada 2012 dan oleh Mayangsari, dkk., pada 2018.

**Tabel 4.1** Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Zhu, dkk., 2012

	Ni	Fe <sub>total</sub>	FeO	Co	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
LN	0,97	40,90	1,14	0,09	2,86	0,82
SN	1,42	23,16	0,19	0,08	1,68	0,57

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S	P
LN	12,55	6,52	0,30	4,65	0,035	0,063
SN	27,74	4,05	0,50	17,65	0,096	0,0079

\* LN = limonitic laterite

\*\* SN = saprolitic laterite

**Tabel 4.2** Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Mayangsari, dkk., 2018

Komponen	% (massa)
Fe	27,02
Ni	1,29

### B. Kadar dan Recovery

Data kadar dan *recovery* hasil percobaan dari proses reduksi selektif menggunakan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  disajikan dalam Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Data hasil percobaan zat aditif  $\text{CaSO}_4$

Peneliti	Kadar Awal (%)		Hasil Reduksi Selektif (%)			
	Ni	Fe	Kadar Ni	Kadar Fe	<i>Recovery</i> Ni	<i>Recovery</i> Fe
Zhu, dkk., 2012	1,15	33,8	5,94	66,69	92,3	33,9
Mayangsari, dkk., 2018	1,29	27,02	2,42	47,93	66,73	62,01
RATA-RATA			4,18	57,31	79,515	47,955

### C. Faktor Selektivitas

Faktor selektivitas nikel dengan menggunakan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dihitung dengan menggunakan data yang ada di dalam Tabel 4.3 dengan menggunakan Persamaan 2.23. Setelah dilakukan perhitungan maka diperoleh nilai faktor selektivitas nikel dalam penelitian Zhu, dkk., adalah sebesar 2,617 dan nilai faktor selektivitas nikel dalam penelitian Mayangsari, dkk., adalah sebesar 1,057. Sehingga nilai faktor selektivitas nikel rata-rata zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dengan merata-ratakan nilai faktor selektivitas dari

penelitian Zhu, dkk., dan penelitian Mayangsari, dkk., adalah sebesar 1,837.

#### 4.1.2 Hasil Percobaan Aditif NaCl

Berikut ini adalah data hasil dari percobaan reduksi selektif nikel menggunakan zat aditif NaCl yang diperoleh dari jurnal penelitian Zhou, dkk., pada tahun 2016 dan dari jurnal penelitian Qu, dkk., pada tahun 2019.

##### A. Karakterisasi

Berikut ini merupakan data-data hasil karakterisasi dari penelitian dengan menggunakan zat aditif NaCl yang diperoleh dari laporan penelitian yang dilakukan oleh Zhou, dkk., pada 2016 dan oleh Qu, dkk., pada 2019.

**Tabel 4.4** Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Zhou, dkk., 2016

	Fe <sub>total</sub>	Ni	Co	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	S	Mn
wt. %	9,67	0,82	0,033	31,49	37,37	1,89	0,033	0,01	0,083

**Tabel 4.5** Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Qu, dkk., 2019

	Fe <sub>total</sub>	Ni	Co	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
wt. %	35,79	1,13	0,097	3,65	10,38	10,31

## B. Kadar dan Recovery

Data kadar dan *recovery* hasil percobaan dari proses reduksi selektif menggunakan zat aditif NaCl disajikan dalam Tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Data hasil percobaan zat aditif NaCl

Peneliti	Kadar Awal (%)		Hasil Reduksi Selektif (%)			
	Ni	Fe	Kadar Ni	Kadar Fe	<i>Recovery</i> Ni	<i>Recovery</i> Fe
Zhou, dkk., 2016	0,82	9,67	7,09	67,9	98,31	72,08
Qu, dkk., 2019	1,13	35,79	8,15	64,28	97,76	25,71
RATA-RATA			7,62	66,09	98,035	48,895

## C. Faktor Selektivitas

Faktor selektivitas nikel dengan menggunakan zat aditif NaCl dihitung dengan menggunakan data yang ada di dalam Tabel 4.6 dengan menggunakan Persamaan 2.23. Setelah dilakukan perhitungan maka diperoleh nilai faktor selektivitas nikel dalam penelitian Zhou, dkk., adalah sebesar 1,231 dan nilai faktor selektivitas nikel dalam penelitian Qu, dkk., adalah sebesar 4,015. Sehingga nilai faktor selektivitas nikel rata-rata zat aditif NaCl dengan merata-ratakan nilai faktor selektivitas dari penelitian Zhou, dkk., dan penelitian Qu, dkk., adalah sebesar 2,623.

### 4.1.3 Hasil Percobaan Aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Berikut ini adalah data hasil dari percobaan reduksi selektif nikel menggunakan zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yang diperoleh dari jurnal penelitian Jiang, dkk., pada tahun 2013 dan dari jurnal penelitian Widyarta, dkk., pada tahun 2020.

### A. Karakterisasi

Berikut ini merupakan data-data hasil karakterisasi dari penelitian dengan menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang diperoleh dari laporan penelitian yang dilakukan oleh Jiang, dkk., pada 2013 dan oleh Widyartha, dkk., pada 2020.

**Tabel 4.7** Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Jiang, dkk., 2013

	$\text{Fe}_{\text{total}}$	Ni	MgO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	MnO
wt.%	34,69	1,49	12,28	20,05	3,03	2,27	1,34

	$\text{CO}_2\text{O}_3$	$\text{RuO}_2$	CaO	ZnO	$\text{TiO}_2$	$\text{V}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$
wt.%	0,28	0,2	0,15	0,05	0,05	0,03	0,37

**Tabel 4.8** Analisis kimia bijih laterit dalam penelitian Widyartha, dkk., 2020

	Ni	Fe	O	Mg	Al	Si
wt.%	1,25	55,37	31,49	0,42	5,04	1,94

	P	S	Ca	Cr	Co
wt.%	0,2	0,67	0,46	1,54	1,62

## B. Kadar dan Recovery

Data kadar dan *recovery* hasil percobaan dari proses reduksi selektif menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  disajikan dalam Tabel 4.9.

**Tabel 4.9** Data hasil percobaan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Peneliti	Kadar Awal (%)		Hasil Reduksi Selektif (%)			
	Ni	Fe	Kadar Ni	Kadar Fe	Recovery Ni	Recovery Fe
Jiang, dkk., 2013	1,49	34,69	10,86	11,6	88,56	24,62
Widyartha, dkk., 2020	1,25	55,37	21,93	49,88	68,17	9,11
RATA-RATA			16,395	30,74	78,365	33,73

## C. Faktor Selektivitas

Faktor selektivitas nikel dengan menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dihitung dengan menggunakan data yang ada di dalam Tabel 4.9 dengan menggunakan Persamaan 2.23. Setelah dilakukan perhitungan maka diperoleh nilai faktor selektivitas nikel dalam penelitian Jiang, dkk., adalah sebesar 21,796 dan nilai faktor selektivitas nikel dalam penelitian Widyartha, dkk., adalah sebesar 20,363. Sehingga nilai faktor selektivitas nikel rata-rata zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dengan merata-ratakan nilai faktor selektivitas dari penelitian Jiang, dkk., dan penelitian Widyartha, dkk., adalah sebesar 21,0795.

## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Pengaruh Zat Aditif Terhadap Kadar Pada Produk Reduksi

Untuk mempermudah pembahasan terkait pengaruh zat aditif dengan variasi  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ , dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  terhadap kadar

---

nikel pada produk reduksi maka pembahasan akan dilakukan satu per satu berdasarkan masing-masing aditif.

#### **A. Pengaruh Zat Aditif $\text{CaSO}_4$**

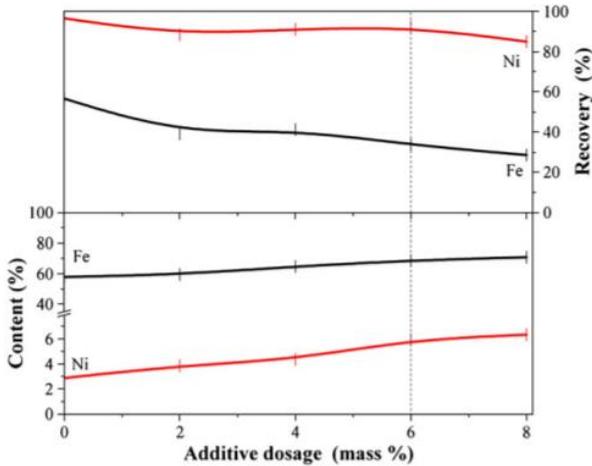
Berdasarkan data-data hasil penelitian yang ditunjukkan dalam Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 diketahui bahwa kadar dari nikel di dalam bijih laterit dalam penelitian Zhu, dkk., dan penelitian Mayangsari, dkk., secara berturut-turut adalah sebesar 1,15% dan 1,29% serta diketahui kadar dari besi di dalam bijih laterit yang digunakan dalam penelitian Zhu, dkk., dan penelitian Mayangsari, dkk., secara berurutan sebesar 33,8% dan 27,02%. Dari data-data tersebut maka bijih nikel laterit yang digunakan dapat diklasifikasikan sebagai bijih nikel laterit limonit.

Setelah melalui proses reduksi selektif dengan menggunakan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  diperoleh hasil produk reduksi dengan kadar nikel dalam penelitian Zhu, dkk., dan penelitian Mayangsari, dkk., secara berturut-turut sebesar 5,94% dan 2,42%. Kadar besi dari produk reduksi dalam penelitian Zhu, dkk., dan penelitian Mayangsari, dkk., adalah sebesar 66,69% dan 47,93%.

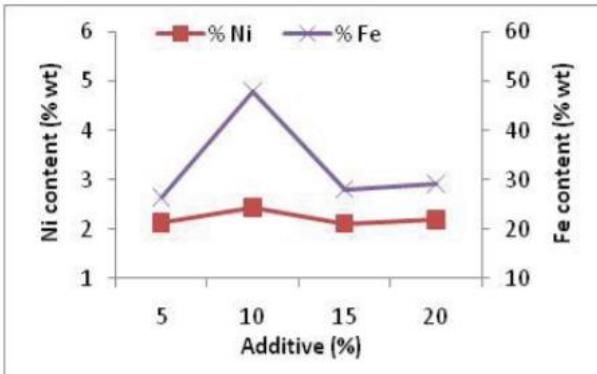
Berdasarkan data-data yang telah disebutkan diatas dapat diamati bahwa penggunaan zat aditif dapat meningkatkan kadar dari nikel dan kadar dari besi secara bersamaan. Sebagai pembanding adanya pengaruh dari penambahan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  terhadap produk hasil reduksi selektif nikel maka diperlukan data pembanding proses reduksi selektif nikel tanpa menggunakan zat aditif. Pada penelitian Zhu, dkk., dilakukan percobaan dengan tidak melibatkan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dan diperoleh peningkatan kadar nikel hanya sebesar 1,72% yaitu dari kadar nikel di dalam bijih laterit sebelum direduksi sebesar 1,15% menjadi 2,87% setelah proses reduksi. Sedangkan dengan kehadiran  $\text{CaSO}_4$  dalam proses reduksi selektif nikel diperoleh pertambahan kadar nikel sebesar 4,79%, meningkat hampir mencapai tiga kali lipat hasil reduksi tanpa zat aditif. Untuk mempertegas adanya pengaruh dari zat aditif  $\text{CaSO}_4$  Zhu, dkk., dan juga Mayangsari, dkk., dalam penelitiannya juga melakukan percobaan yang memvariasikan

---

persentase massa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  yang digunakan. Data hasil percobaan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



**Gambar 4.1** Pengaruh variasi massa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dalam penelitian Zhu, dkk.

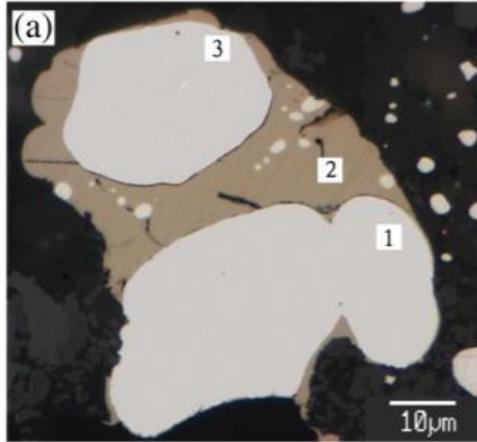


**Gambar 4.2** Pengaruh variasi massa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  terhadap kadar produk reduksi dalam penelitian Mayangsari, dkk.

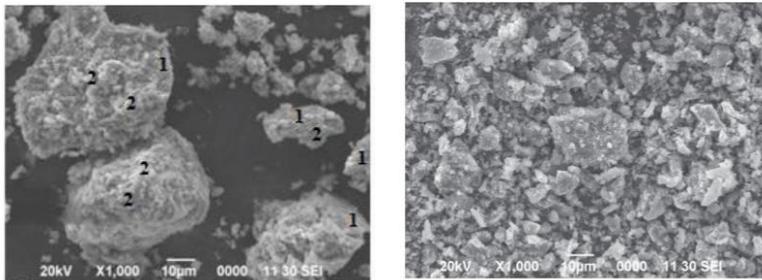
Dari Gambar 4.1 dapat kita cermati bahwa dengan penambahan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dengan persentase massa aditif  $\text{CaSO}_4$  sebanyak 0% hingga 8 % dapat menghasilkan suatu trend peningkatan dari kadar nikel dan besi dalam produk reduksi. Sedangkan dalam Gambar 4.2 dapat kita lihat bahwa trend peningkatan kadar nikel dan besi dalam produk reduksi hanya terjadi dalam rentang persentase massa aditif 5% hingga 10%.

Peningkatan kadar dari nikel dan besi dalam proses reduksi selektif dengan melibatkan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  menurut teori didasarkan pada kemampuan dari  $\text{CaSO}_4$  untuk terdekomposisi menjadi  $\text{CaO}$ ,  $\text{S}_2$ , dan  $\text{O}_2$  pada kondisi atmosfer reduksi (Pintowantoro & Abdul, 2019). Hasil dari dekomposisi ini yang akan menjadi pelopor terjadinya proses reduksi selektif nikel. Sesuai dengan teori dimana  $\text{S}_2$  yang terbentuk dari hasil dekomposisi  $\text{CaSO}_4$  akan mengikat besi dan membentuk senyawa *troilite* ( $\text{FeS}$ ) seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.12, dimana *troilite* adalah senyawa logam non-magnet sehingga ketika diseparasi secara magnetik, *troilite* akan terbuang ke *tailing* dan mengakibatkan meningkatnya kadar nikel. Hal ini juga dapat dibuktikan melalui hasil penelitian Mayangsari, dkk., melalui Gambar 4.2 dimana pada penambahan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  diatas 10% akan menyebabkan penurunan kadar dari besi yang diakibatkan begitu banyaknya jumlah  $\text{S}_2$  yang terbentuk sehingga menurunkan kadar Fe. Selain itu,  $\text{S}_2$  hasil dekomposisi dari  $\text{CaSO}_4$  diperkirakan mampu berikatan dengan senyawa silikat yang ada di dalam bijih nikel laterit. Dengan bereaksi nya  $\text{S}_2$  dengan senyawa silikat yang membentuk senyawa baru dengan titik leleh rendah akan meningkatkan ukuran partikel logam (Rodrigues, dkk., 2017). Berikatannya  $\text{S}_2$  membentuk senyawa  $\text{FeS}$  seperti pada Gambar 4.3 berhasil meningkatkan ukuran partikel dari Fe-Ni. Meningkatnya ukuran partikel logam dalam produk mampu meningkat kadar nikel dalam konsentrat (Zhu, dkk., 2012) hal ini dikarenakan dalam proses pemisahan secara magnetik, ukuran partikel yang terlalu kecil akan sangat mudah terbuang ke *tailing*, hal ini dibuktikan pada Gambar 4.4 dimana terdapat perbedaan yang sangat

signifikan antara ukuran partikel dari konsentrat dan ukuran partikel dari *tailing*.



**Gambar 4.3** Hasil SEM pada produk dalam penelitian Zhu, dkk., 2012, 1 dan 3 merupakan Fe-Ni dan 2 adalah FeS



**Gambar 4.4** Hasil SEM pada produk dan *tailing* dalam penelitian Mayangsari, dkk., 2018, 1 adalah fayalit dan 2 adalah Fe-Ni, gambar kiri adalah konsentrat dan gambar kanan adalah *tailing*

---

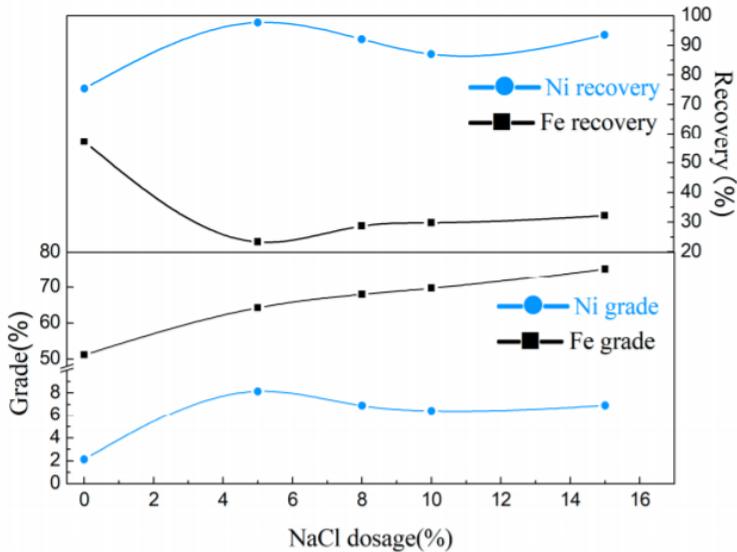
---

## **B. Pengaruh Zat Aditif NaCl**

Berdasarkan data-data hasil penelitian yang ditunjukkan dalam Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 diketahui bahwa kadar dari nikel di dalam bijih laterit dalam penelitian Zhou, dkk., dan penelitian Qu, dkk., secara berturut-turut adalah sebesar 0,82% dan 1,13% serta diketahui kadar dari besi di dalam bijih laterit yang digunakan dalam penelitian Zhou, dkk., dan penelitian Qu, dkk., secara berurutan sebesar 9,67% dan 35,79%.

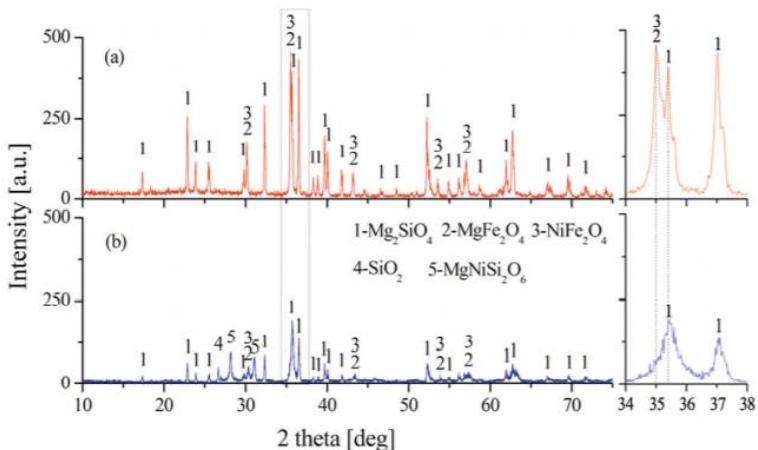
Setelah melalui proses reduksi selektif dengan menggunakan zat aditif NaCl diperoleh hasil produk reduksi dengan kadar nikel dalam penelitian Zhou, dkk., dan penelitian Qu, dkk., secara berturut-turut sebesar 7,09% dan 8,15%. Kadar besi dari produk reduksi dalam penelitian Zhou, dkk., dan penelitian Qu, dkk., adalah sebesar 67,9% dan 64,28%.

Berdasarkan data-data yang telah disebutkan diatas dapat diamati bahwa penggunaan zat aditif dapat meningkatkan kadar dari nikel dan kadar dari besi secara bersamaan. Sebagai pembanding adanya pengaruh dari penambahan zat aditif NaCl terhadap produk hasil reduksi selektif nikel maka diperlukan data pembanding proses reduksi selektif nikel tanpa menggunakan zat aditif. Pada penelitian Qu, dkk., dilakukan percobaan dengan tidak melibatkan zat aditif NaCl dan diperoleh peningkatan kadar nikel hanya sebesar 1% yaitu dari kadar nikel di dalam bijih laterit sebelum direduksi sebesar 1,13% menjadi 2,13% setelah proses reduksi. Sedangkan dengan penambahan zat aditif NaCl dalam proses reduksi selektif nikel diperoleh pertambahan kadar nikel sebesar 7,02%. Untuk semakin memperjelas pengaruh penambahan aditif NaCl dalam proses reduksi selektif maka Qu, dkk., melakukan serangkaian percobaan dengan menggunakan variasi massa NaCl yang ditambahkan. Adapun data hasil dari variasi penambahan massa NaCl disajikan dalam Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Pengaruh variasi massa zat aditif NaCl dalam penelitian Qu, dkk.

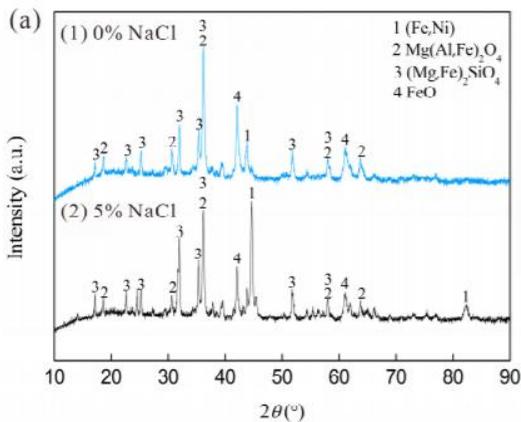
Dari Gambar 4.5 dapat dicermati bahwa pengaruh penambahan zat aditif NaCl menunjukkan hasil yaitu peningkatan kadar besi seiring dengan penambahan persentase massa aditif NaCl. Kadar nikel akan semakin meningkat dengan penambahan zat aditif NaCl dalam rentang persentase massa aditif NaCl sebanyak 0% hingga 5% dan di atas 5% kadar nikel akan menurun sedikit hingga rentang 10% dan di atas 10% penambahan zat aditif NaCl sudah tidak mempengaruhi kadar nikel yang dihasilkan.



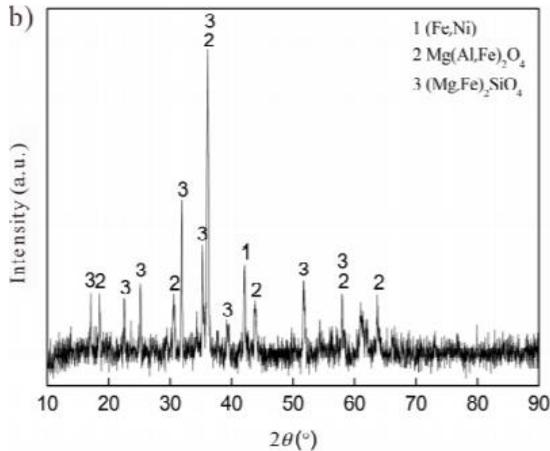
**Gambar 4.6** Hasil XRD pada produk dalam penelitian Zhou, dkk., 2016, (a) hasil produk dengan menggunakan zat aditif NaCl dan (b) hasil produk tanpa menggunakan zat aditif NaCl

Secara teori tentang mekanisme zat aditif NaCl untuk meningkatkan kadar dari nikel dalam produk reduksi adalah dengan membentuk agen klorinasi dengan menggunakan *moisture content* yang ada di dalam bijih untuk menghasilkan asam klorida yang berfungsi sebagai agen klorinasi sesuai dengan Persamaan 2.13. Semakin banyak jumlah zat aditif NaCl yang ditambahkan maka agen klorinasi yang dihasilkan akan semakin banyak sehingga dapat meningkatkan jumlah pembentukan NiCl<sub>2</sub> dan FeCl<sub>2</sub> seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.14-2.15. NiCl<sub>2</sub> dan FeCl<sub>2</sub> kemudian sesuai teori akan bereaksi secara water gas reaction dengan karbon yang berasal dari reduktor dan *moisture content* yang nantinya akan menghasilkan logam nikel dan besi sesuai dengan Persamaan 2.16-2.17. Berdasarkan Gambar 4.6 dapat diamati bahwa dengan penambahan zat aditif NaCl mampu memisahkan Ni dari rantai MgNiSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> yang sukar untuk tereduksi dan Ni yang terlepas kemudian berikatan dengan oksida besi membentuk trevorite (NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) yang lebih mudah tereduksi

sehingga meningkatkan kadar dari nikel. Pada Gambar 4.6 juga dapat dicermati bahwa terjadinya peningkatan dari *forsterite* dan *spinel* yang merupakan senyawa yang mengikat besi sehingga dengan bertambahnya jumlah *forsterite* dan *spinel* yang terbentuk maka kadar nikel dalam produk setelah dipisahkan secara magnet akan meningkat. Hal ini didukung dengan hasil dari Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 dimana pada Gambar 4.7 terjadi peningkatan dari Fe-Ni pada produk yang menggunakan zat aditif NaCl dibanding produk tanpa menggunakan zat aditif NaCl dan pada Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa mayoritas senyawa penyusun dari *tailing* adalah *forsterite* dan *spinel*. Gambar 4.7 juga menunjukkan terjadinya penurunan dari *wustite* sehingga zat aditif NaCl berhasil menekan proses reduksi oksida besi menuju logam besi yang mana akan meningkatkan kadar dari nikel.



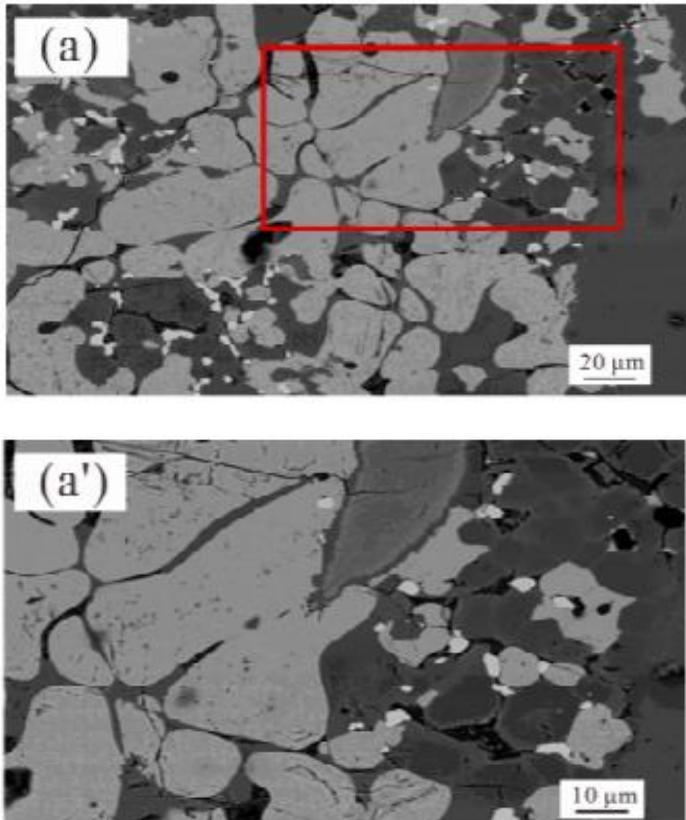
**Gambar 4.7** Hasil XRD pada produk dalam penelitian Qu, dkk., 2019



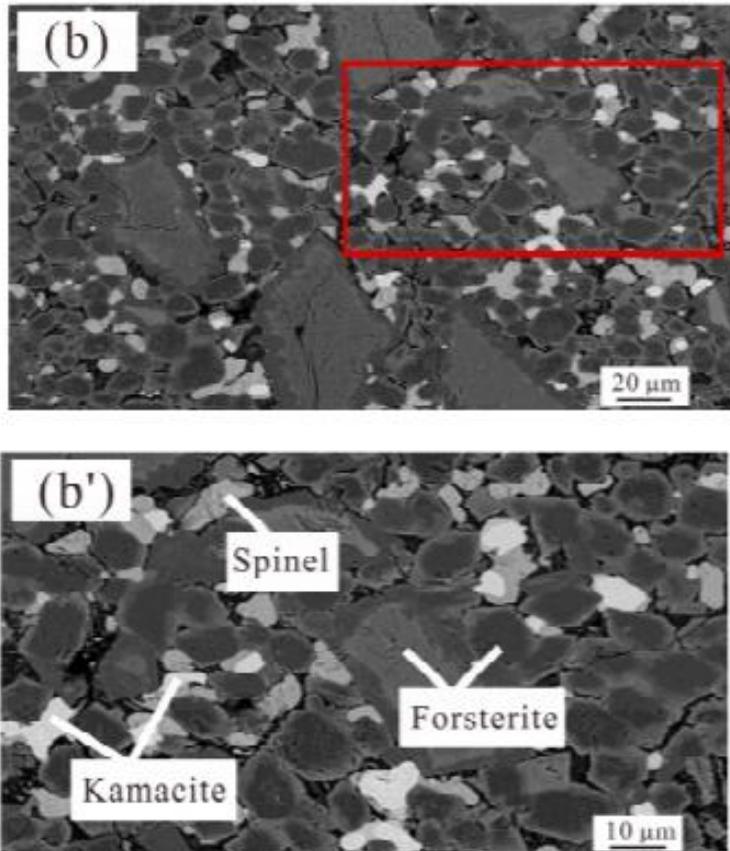
**Gambar 4.8** Hasil XRD pada *tailing* dalam penelitian Qu, dkk., 2019

Peningkatan kadar nikel yang optimal adalah pada penggunaan zat aditif NaCl dalam penelitian Qu, dkk., adalah sebanyak 5% dan diatas 5% kadar nikel yang diperoleh sudah tidak menunjukkan peningkatan lagi, hal ini diperkirakan karena jumlah *moisture content* yang tersedia sudah tidak mencukupi kebutuhan dari salah satu reaksi yang ada seperti ditunjukkan dalam Persamaan 2.14-2.17. Selain itu, faktor lain yang perlu dipertimbangkan adalah pembentukan dari senyawa Na<sub>2</sub>O·SiO<sub>2</sub>. Senyawa dengan temperatur leleh yang rendah hasil dari reaksi yang ditunjukkan pada Persamaan 2.13 tersebut akan mempercepat laju agregasi partikel nikel dan besi sehingga akan meningkatkan pertumbuhan partikel nikel dan pada akhirnya meningkatkan kadar nikel pada konsentrat. Pertumbuhan ukuran partikel dari Fe-Ni yang dipengaruhi oleh penambahan zat aditif NaCl dibuktikan melalui uji SEM dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 dimana pada Gambar 4.9 yang merupakan produk tanpa penggunaan zat aditif menghasilkan Fe-Ni namun dalam jumlah dan ukuran partikel yang sangat kecil sedangkan

pada Gambar 4.10 yang merupakan produk dengan zat aditif NaCl terlihat banyaknya partikel Fe-Ni yang terbentuk serta dengan ukuran yang jauh lebih besar. Ukuran partikel yang terlalu kecil akan mengakibatkan partikel Fe-Ni mudah terbuang ke *tailing* sehingga menurunkan kadar dari nikel dalam konsentrat.



**Gambar 4.9** Hasil SEM pada produk dalam penelitian Qu, dkk., 2019 tanpa menggunakan zat aditif NaCl



**Gambar 4.10** Hasil SEM pada produk dalam penelitian Qu, dkk., 2019 dengan menggunakan zat aditif NaCl

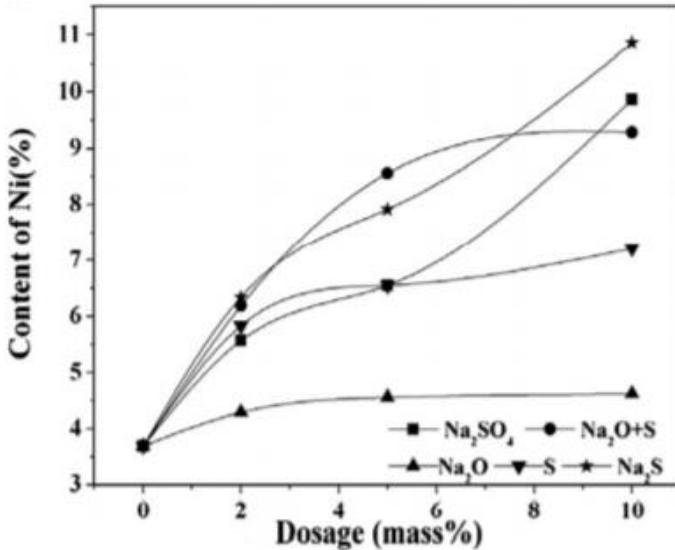
### C. Pengaruh Zat Aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Berdasarkan data-data hasil penelitian yang ditunjukkan dalam Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 diketahui bahwa kadar dari nikel di dalam bijih laterit dalam penelitian Jiang, dkk., dan penelitian Widyartha, dkk., secara berturut-turut adalah sebesar 1,49% dan 1,25% serta diketahui kadar dari besi di dalam bijih laterit yang

digunakan dalam penelitian Jiang, dkk., dan penelitian Widyartha, dkk., secara berurutan sebesar 34,69% dan 55,37%.

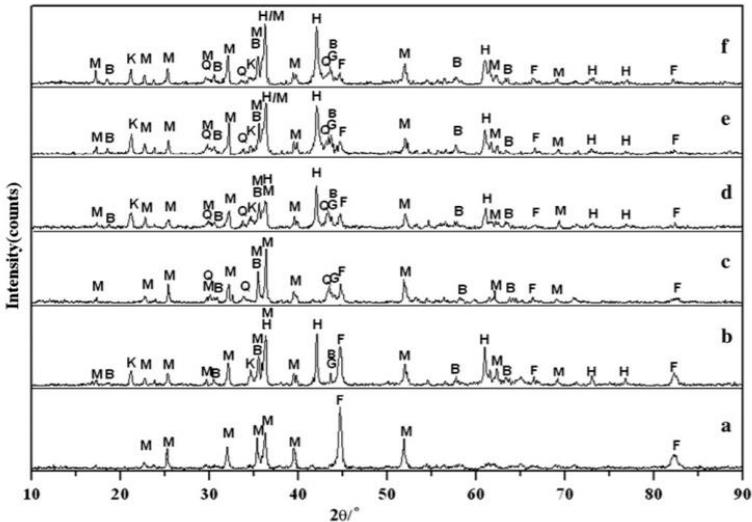
Setelah melalui proses reduksi selektif dengan menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  diperoleh hasil produk reduksi dengan kadar nikel dalam penelitian Jiang, dkk., dan penelitian Widyartha, dkk., secara berturut-turut sebesar 10,86% dan 21,93%. Kadar besi dari produk reduksi dalam penelitian Jiang, dkk., dan penelitian Widyartha, dkk., adalah sebesar 11,6% dan 49,88%.

Berdasarkan data-data yang telah disebutkan diatas dapat diamati bahwa penggunaan zat aditif dapat meningkatkan kadar dari nikel dan kadar dari besi secara bersamaan. Sebagai pembanding adanya pengaruh dari penambahan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  terhadap produk hasil reduksi selektif nikel maka diperlukan data pembanding proses reduksi selektif nikel tanpa menggunakan zat aditif. Pada penelitian Jiang, dkk., dilakukan percobaan dengan tidak melibatkan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan diperoleh peningkatan kadar nikel hanya sebesar 2,2% yaitu dari kadar nikel di dalam bijih laterit sebelum direduksi sebesar 1,49% menjadi 3,69% setelah proses reduksi. Sedangkan dengan penambahan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dalam proses reduksi selektif diperoleh pertambahan kadar nikel sebesar 9,37%, meningkat hampir mencapai lima kali lipat hasil reduksi tanpa zat aditif. Untuk semakin menunjukkan adanya pengaruh dari penambahan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , maka Jiang, dkk., dalam penelitiannya juga melakukan percobaan yang memvariasikan persentase massa zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang digunakan. Data hasil percobaan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 4.11.

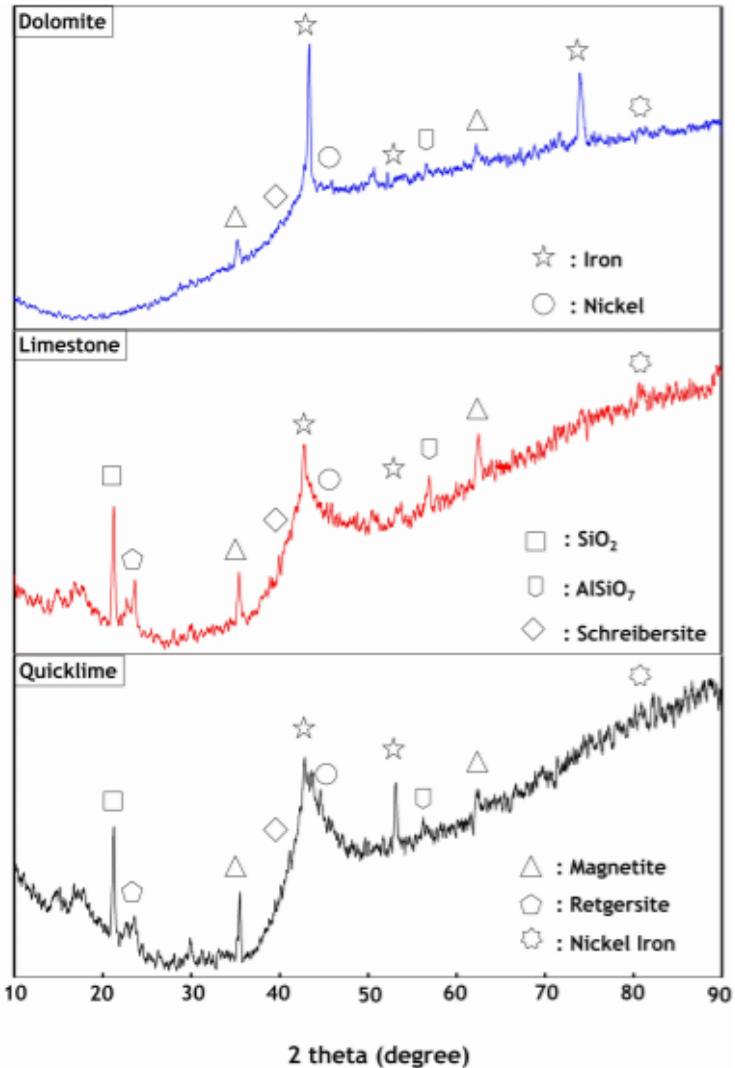


**Gambar 4.11** Pengaruh variasi massa zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> terhadap kadar produk reduksi dalam penelitian Jiang, dkk.

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.11, terdapat peningkatan kadar nikel yang signifikan seiring dengan penambahan zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dalam rentang massa zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sebanyak 0% hingga 10% dengan peningkatan kadar nikel tertinggi diperoleh pada penambahan zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sebanyak 10%.



**Gambar 4.12** Hasil XRD pada produk dalam penelitian Jiang, dkk., 2013, a merupakan hasil tanpa zat aditif, f merupakan hasil dengan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , M merupakan *forsterite* ( $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$ ), F merupakan *kamacite* ( $[\text{Fe},\text{Ni}]$ ), G merupakan *taenite* ( $[\text{Fe},\text{Ni}]$ ), H merupakan *wustite* ( $\text{FeO}$ ), Q merupakan *troilite* ( $\text{FeS}$ ), K merupakan *nepheline* ( $\text{Na}_3\text{MgAl}(\text{SiO}_4)_2$ ), hasil b hingga e tidak dibahas dalam review ini



**Gambar 4.13** Hasil XRD pada produk dalam penelitian Widyarta, dkk., 2020, hasil terbaik dalam penelitian ini yang digunakan untuk review paper ini adalah hasil limestone

Berdasarkan data-data diatas dapat dicermati bahwa peningkatan kadar nikel sangat dipengaruhi oleh mekanisme selektivitas dari zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Berdasarkan teori-teori yang ada, mekanisme selektivitas dari  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sangat berkaitan erat dengan proses dekomposisi zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang berlangsung pada temperatur dibawah temperatur reduksi sehingga  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dapat terurai terlebih dahulu dan menjadi agen selektivitas untuk proses reduksi nikel. Adapun hasil dekomposisi dari zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  adalah  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$ , dan S. Hampir sama dengan mekanisme selektivitas yang dilakukan oleh zat aditif  $\text{CaSO}_4$ , S hasil dari dekomposisi  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  akan berikatan dengan besi yang ada didalam bijih nikel laterit membentuk senyawa *troilite* ( $\text{FeS}$ ) seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.8. Pembentukan senyawa *troilite* dengan sifat non-magnetik mengakibatkan kadar nikel akan meningkat dalam konsentrat setelah dilakukan proses *magnetic separation*. Serupa dengan S,  $\text{Na}_2\text{S}$  hasil dekomposisi dari  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  juga memiliki kecenderungan untuk berikatan dengan besi silikat yang ada di dalam bijih nikel laterit sehingga akan terbentuk senyawa *troilite* ( $\text{FeS}$ ) dan juga senyawa natrium silikat dengan titik leleh rendah (Jiang, dkk., 2013). Senyawa dengan titik leleh rendah dalam proses reduksi akan meningkatkan ukuran partikel nikel dan meningkatkan kadar nikel dalam konsentrat (Zhu, dkk., 2012). Pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 dapat kita lihat bahwa masih terdapat fasa *wustite* serta *magnetite* menandakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  berhasil menekan transformasi oksida besi menjadi logam besi sehingga meningkatkan kadar dari nikel dalam konsentrat.

Dengan lebih banyaknya mekanisme dari selektivitas nikel yang mampu dilakukan oleh zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  menjadikan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  mampu menghasilkan peningkatan kadar yang jauh lebih baik ketimbang zat aditif  $\text{NaCl}$  dan zat aditif  $\text{CaSO}_4$ . Teori ini dibuktikan dari hasil penelitian yang telah dirangkum dalam Tabel 4.3, Tabel 4.6 dan Tabel 4.9 dimana zat aditif  $\text{CaSO}_4$  hanya mampu meningkatkan kadar nikel sebesar 4,79% dan 1,13% dalam penelitian yang dilakukan oleh Zhu, dkk., pada tahun 2012 dan

Mayangsari, dkk., pada tahun 2018. Zat aditif NaCl hanya mampu meningkatkan kadar nikel sebesar 6,27% dan 7,02% dalam penelitian yang dilakukan oleh Zhou, dkk., pada tahun 2016 dan Qu, dkk., pada tahun 2019. Dan penggunaan zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> menghasilkan peningkatan kadar nikel sebesar 9,37% dan 20,68%. Sehingga peningkatan kadar nikel dalam produk reduksi dengan menggunakan variasi aditif terbaik adalah dengan menggunakan zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> disusul oleh NaCl dan CaSO<sub>4</sub>.

#### **4.2.2 Pengaruh Zat Aditif Terhadap Recovery Pada Produk Reduksi**

Untuk mempermudah pembahasan terkait pengaruh zat aditif dengan variasi CaSO<sub>4</sub>, NaCl, dan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> terhadap *recovery* nikel pada produk reduksi maka pembahasan akan dilakukan satu per satu berdasarkan masing-masing aditif.

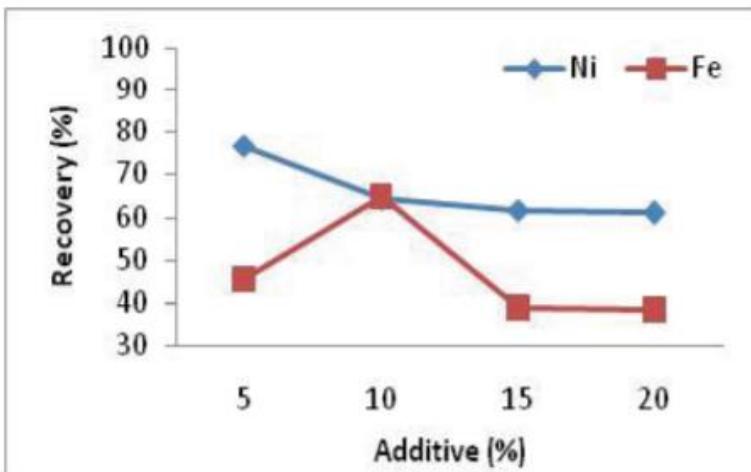
##### **A. Pengaruh Zat Aditif CaSO<sub>4</sub>**

Setelah melalui proses reduksi selektif dengan menggunakan zat aditif CaSO<sub>4</sub> diperoleh hasil produk reduksi seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.3. Hasil produk reduksi mendapatkan nilai *recovery* nikel dalam penelitian Zhu, dkk., dan penelitian Mayangsari, dkk., secara berturut-turut sebesar 92,3% dan 66,73%. Nilai *recovery* besi dari produk reduksi dalam penelitian Zhu, dkk., dan penelitian Mayangsari, dkk., adalah sebesar 33,9% dan 62,01%.

Untuk mengetahui pengaruh dari zat aditif CaSO<sub>4</sub> terhadap nilai *recovery* nikel dalam produk hasil reduksi maka diperlukan data pembanding sebagai acuan untuk membandingkan hasil dari penelitian menggunakan zat aditif CaSO<sub>4</sub> dengan yang tidak menggunakan zat aditif CaSO<sub>4</sub>. Pada penelitian Zhu, dkk., dilakukan percobaan dengan tidak melibatkan zat aditif CaSO<sub>4</sub> dan diperoleh nilai *recovery* nikel sebesar 95% dan nilai *recovery* besi sebesar 57%. Dari data yang telah disebutkan dapat diamati bahwa terjadi penurunan nilai *recovery* dari nikel dalam produk reduksi yang tidak signifikan dan terjadi penurunan nilai *recovery* dari besi

dalam produk reduksi yang sangat signifikan seiring dengan penambahan persentase massa  $\text{CaSO}_4$ .

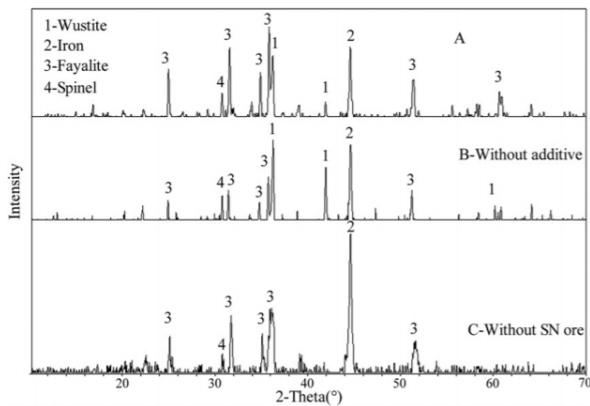
Untuk memperdalam tinjauan dari pengaruh zat aditif  $\text{CaSO}_4$  terhadap nilai *recovery* dari nikel dan besi dalam produk reduksi maka Zhu, dkk., dan Mayangsari, dkk., melakukan penelitian dengan memvariasikan jumlah persentase massa aditif  $\text{CaSO}_4$  yang digunakan. Data hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.14.



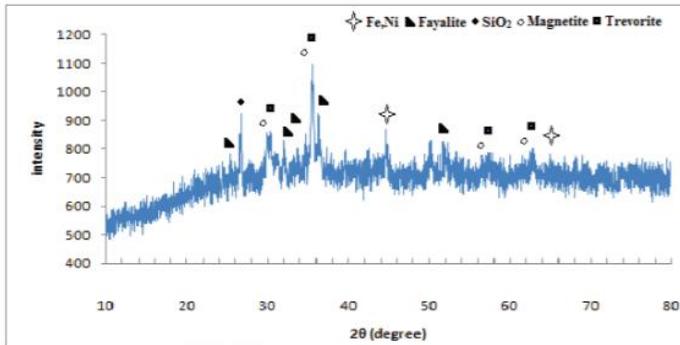
**Gambar 4.14** Pengaruh variasi massa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  terhadap *recovery* produk reduksi dalam penelitian Mayangsari, dkk.

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa penambahan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dalam proses reduksi selektif nikel akan menurunkan nilai *recovery* dari nikel dan besi. Semakin banyak massa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  yang ditambahkan maka nilai *recovery* untuk nikel akan semakin menurun namun tidak signifikan. Sedangkan untuk nilai *recovery* dari besi akan mengalami penurunan yang signifikan seiring dengan penambahan zat aditif  $\text{CaSO}_4$ . Pada Gambar 4.14 dapat diamati bahwa penambahan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  akan menurunkan nilai *recovery* nikel seiring dengan penambahan

massa aditif  $\text{CaSO}_4$  secara signifikan pada rentang massa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  sebanyak 5% hingga 10% dan diatas 10% penurunan *recovery* nikel yang terjadi tidak terlalu signifikan dan hampir linear mendatar. Pada kondisi yang sama, nilai *recovery* dari besi mengalami peningkatan seiring dengan penambahan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dalam rentang massa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  sebanyak 5% hingga 10% dan diatas 10% nilai *recovery* dari besi akan menurun secara signifikan.



**Gambar 4.15** Hasil XRD pada produk dalam penelitian Zhu, dkk., 2012



**Gambar 4.16** Hasil XRD pada produk dalam penelitian Mayangsari, dkk., 2018

Mengacu pada teori yang berkaitan dengan hasil dekomposisi  $\text{CaSO}_4$  berupa  $\text{CaO}$ ,  $\text{S}_2$ , dan  $\text{O}_2$  (Zhu, dkk., 2012).  $\text{CaO}$  akan bereaksi dengan besi dan silikat yang ada di dalam bijih nikel laterit dan membentuk senyawa kirscheteinite ( $\text{CaFeSiO}_4$ ) seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.11. Kirscheteinite kemudian akan mempercepat pembentukan senyawa fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ). Dari Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 ditemukan adanya fasa fayalite dalam produk serta terjadi peningkatan dari jumlah fayalite dalam hasil uji XRD pada Gambar 4.15 hal ini membuktikan bahwa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  mampu mendorong pembentukan fayalite. Pembentukan fayalite dapat menekan transformasi oksida besi menjadi logam besi, hal ini sejalan dengan Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 dimana terjadinya pengurangan intensitas dari besi dan *wustite* pada Gambar 4.15 dan terbentuknya fasa *magnetite* pada Gambar 4.16 yang menandakan transformasi *magnetite* menjadi *wustite* terhambat. Penghambatan transformasi oksida besi menjadi logam besi menyebabkan nilai *recovery* dari besi akan semakin menurun sejalan dengan peningkatan persentase massa zat aditif  $\text{CaSO}_4$  (Mayangsari, dkk., 2018). Sehingga teori ini dapat menjelaskan hubungan yang terjadi antara menurunnya nilai *recovery* dari besi yang diakibatkan oleh penambahan zat aditif  $\text{CaSO}_4$ . Selain itu S hasil dekomposisi  $\text{CaSO}_4$  yang berkaitan

dengan Fe akan membentuk FeS yang akan menekan metalisasi besi sehingga menurunkan nilai *recovery* dari besi (Febriana, dkk., 2020). Penurunan nilai *recovery* dari nikel dapat terjadi karena kadar nikel pada produk reduksi meningkat namun pada proses pemisahan magnetik yang menghasilkan konsentrat dan *tailing*, massa konsentrat yang diperoleh hampir sama dengan massa *tailing* sehingga meskipun terjadi peningkatan kadar Ni pada konsentrat, *recovery* yang diperoleh akan menurun (Mayangsari & Prasetyo, 2016).

### **B. Pengaruh Zat Aditif NaCl**

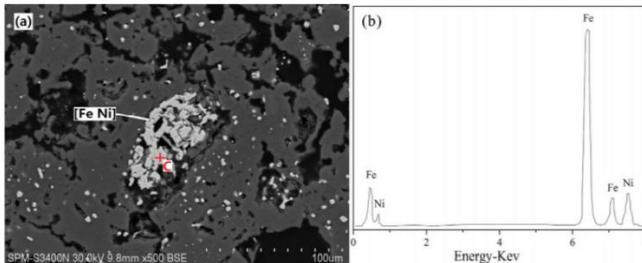
Setelah melalui proses reduksi selektif dengan menggunakan zat aditif NaCl diperoleh hasil produk reduksi seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.6. Hasil produk reduksi mendapatkan nilai *recovery* nikel dalam penelitian Zhou, dkk., dan penelitian Qu, dkk., secara berturut-turut sebesar 98,31% dan 97,76%. Nilai *recovery* besi dari produk reduksi dalam penelitian Zhou, dkk., dan penelitian Qu, dkk., adalah sebesar 72,08% dan 25,71%.

Untuk mengetahui pengaruh dari zat aditif NaCl terhadap nilai *recovery* nikel dalam produk hasil reduksi maka diperlukan data pembanding sebagai acuan untuk membandingkan hasil dari penelitian menggunakan zat aditif NaCl dengan yang tidak menggunakan zat aditif NaCl. Pada penelitian Qu, dkk., dilakukan percobaan dengan tidak melibatkan zat aditif NaCl dan diperoleh nilai *recovery* nikel sebesar 75,40% dan nilai *recovery* besi sebesar 57,13%. Dari data yang telah disebutkan dapat diamati bahwa terjadi peningkatan nilai *recovery* dari nikel dalam produk reduksi secara signifikan yaitu sebesar 22,36 % dan terjadi penurunan nilai *recovery* dari besi dalam produk reduksi yang signifikan yaitu sebesar 31,42%. Pengaruh NaCl dalam meningkatkan *recovery* dari nikel dan menurunkan *recovery* dari besi semakin dipertegas oleh Qu, dkk., dengan melakukan percobaan yang memvariasikan persentase massa zat aditif NaCl yang digunakan. Data percobaan tersebut dapat dilihat seperti pada Gambar 4.5.

Berdasarkan Gambar 4.5, peningkatan persentase massa aditif NaCl yang digunakan akan meningkatkan nilai *recovery* dari nikel hingga penambahan massa aditif NaCl sebanyak 5% dimana penambahan 5% massa aditif NaCl menghasilkan nilai *recovery* yang tertinggi. Penambahan massa aditif NaCl diatas 5% akan menurunkan nilai *recovery* nikel namun tidak signifikan. Berdasarkan pertimbangan tersebut maka penambahan aditif NaCl sebanyak 5% dinilai sebagai penambahan zat aditif NaCl yang paling optimum (Qu, dkk., 2019). Di sisi lain, penambahan massa aditif NaCl akan mengakibatkan terjadinya penurunan nilai *recovery* besi dengan penurunan *recovery* paling besar terjadi pada penambahan massa aditif NaCl sebanyak 5% dan penambahan massa aditif NaCl diatas 5% tidak akan terlalu banyak memberi perubahan pada nilai *recovery* dari besi. Dengan mempertimbangkan perolehan nilai *recovery* dari nikel yang tinggi sesuai dengan tujuan dari percobaan yang dilakukan Qu, dkk., maka penambahan zat aditif NaCl sebanyak 5% adalah massa aditif NaCl yang paling optimal.

Berdasarkan teori tentang mekanisme dari zat aditif NaCl dalam mempromosikan perolehan nikel adalah dengan membentuk agen klorinasi. Secara pyro-hidrolisis NaCl dengan bantuan dari SiO<sub>2</sub> yang ada dalam bijih nikel laterit dan dengan kehadiran *moisture content* akan menghasilkan agen klorinasi HCl. Dimana kehadiran HCl akan mengikat atau mengklorinasi besi dan nikel yang ada didalam bijih. Hal ini menyebabkan besi dan nikel akan terpisah dari zat pengotor yang ada di dalam bijih nikel laterit yang umumnya berupa oksida dan silikat sehingga nilai *recovery* nikel akan meningkat. Selain itu NaCl akan mendorong pembentukan *trevorite*, *spinel* dan *forsterite* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.10. Pembentukan *forsterite* akan melepaskan nikel sehingga perolehan nikel akan meningkat. Bersamaan dengan itu, pertumbuhan partikel dari nikel akan meningkat sehingga nilai *recovery* nikel dari konsentrat akan semakin meningkat (Qu, dkk., 2019). Hal ini dipengaruhi oleh pembentukan *forsterite* dan *spinel* yang merupakan bahan

penyusun *tailing* serta mampu mengikat unsur besi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dan dengan terbentuknya Fe-Ni yang murni seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17 akan mengakibatkan meningkatnya nilai *recovery* nikel yang sangat signifikan.



**Gambar 4.17** Hasil SEM-EDX pada produk dalam penelitian Zhou, dkk., 2016

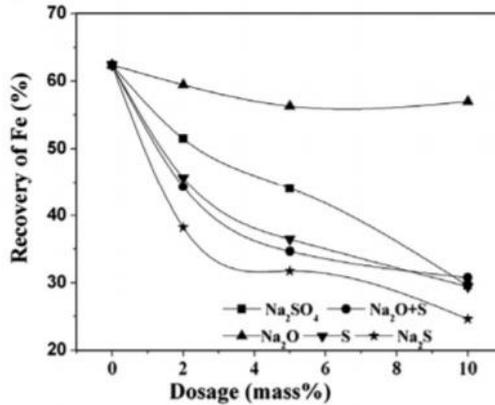
### C. Pengaruh Zat Aditif $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Setelah melalui proses reduksi selektif dengan menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  diperoleh hasil produk reduksi seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.9. Hasil produk reduksi mendapatkan nilai *recovery* nikel dalam penelitian Jiang, dkk., dan penelitian Widyartha, dkk., secara berturut-turut sebesar 88,56% dan 68,17%. Nilai *recovery* besi dari produk reduksi dalam penelitian Jiang, dkk., dan penelitian Widyartha, dkk., adalah sebesar 24,62% dan 9,11%.

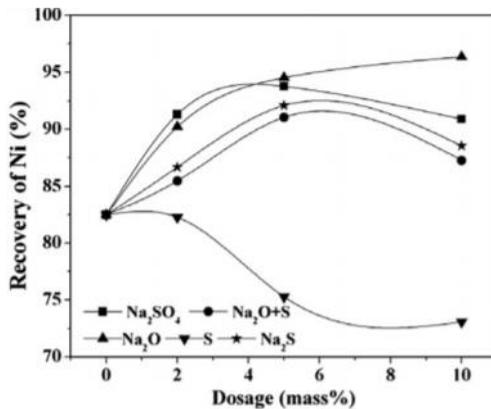
Untuk mengetahui pengaruh dari zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  terhadap nilai *recovery* nikel dalam produk hasil reduksi maka diperlukan data pembandingan sebagai acuan untuk membandingkan hasil dari penelitian menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dengan yang tidak menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Pada penelitian Jiang, dkk., dilakukan percobaan dengan tidak melibatkan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan diperoleh nilai *recovery* nikel sebesar 84,04%. Dari data yang telah disebutkan dapat diamati bahwa terjadi peningkatan nilai *recovery* dari nikel dalam produk reduksi setelah ditambahkan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang tidak terlalu signifikan hanya sebesar 4,52%.

Dikarenakan penambahan nilai *recovery* yang tidak terlalu signifikan menjadikan pengaruh dari zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tidak dirasakan pengaruhnya sehingga untuk memastikan adanya pengaruh dari persentase penambahan massa aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  terhadap nilai *recovery* maka diperlukan data tambahan berupa data nilai *recovery* dari proses reduksi menggunakan variasi persentase massa zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang ditambahkan. Pada penelitian Jiang, dkk., dilakukan percobaan dengan tidak melibatkan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan diperoleh nilai *recovery* nikel sebesar 82,5% dan nilai *recovery* besi sebesar 62,5%. Dari data yang telah disebutkan dapat diamati bahwa terjadi peningkatan nilai *recovery* dari nikel dalam produk reduksi yang tidak signifikan dan terjadi penurunan nilai *recovery* dari besi dalam produk reduksi seiring dengan penambahan persentase massa  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Untuk semakin membuktikan adanya pengaruh dari zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  terhadap nilai *recovery* dari nikel dan besi dalam produk reduksi maka Jiang, dkk., melakukan percobaan dengan memvariasikan jumlah persentase massa aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang digunakan. Data hasil percobaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19.



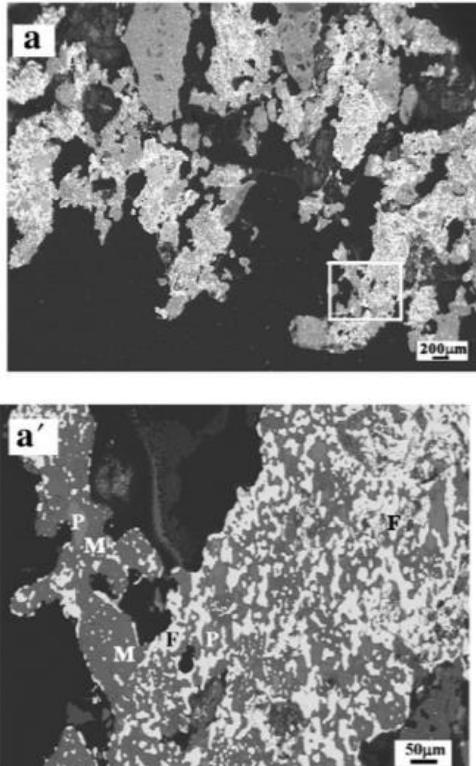
**Gambar 4.18** Pengaruh variasi massa zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  terhadap *recovery* besi pada produk reduksi dalam penelitian Jiang, dkk.



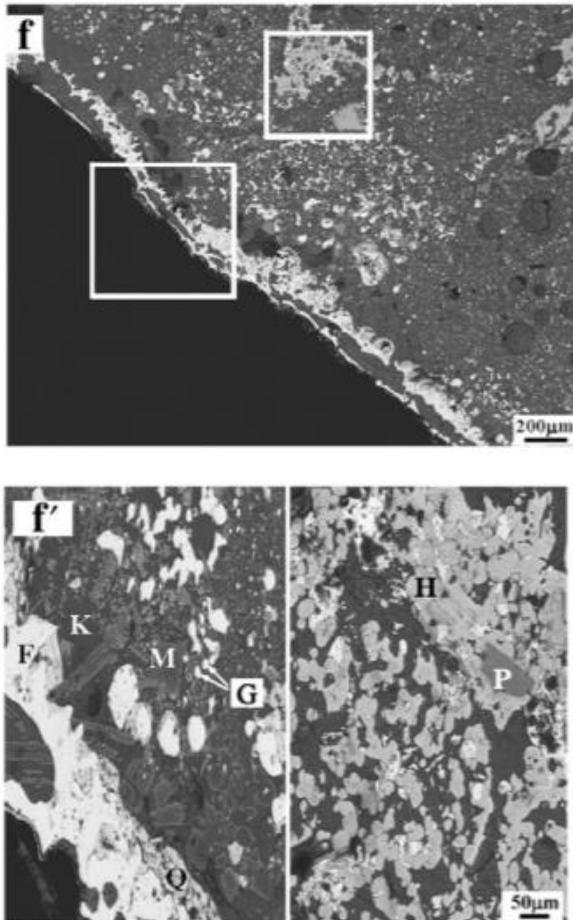
**Gambar 4.19** Pengaruh variasi massa zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  terhadap *recovery* nikel pada produk reduksi dalam penelitian Jiang, dkk.

Dari Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa nilai *recovery* dari Fe akan menurun secara signifikan seiring dengan penambahan dari massa zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hingga penambahan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

sebanyak 10%. Dan dari Gambar 4.19 dapat dicermati bahwa variasi penambahan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  akan menunjukkan trend menanjak pada rentang persentase massa aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebesar 0% hingga 5% dan di atas 5% zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  maka nilai *recovery* dari nikel menunjukkan trend menurun secara progresif.



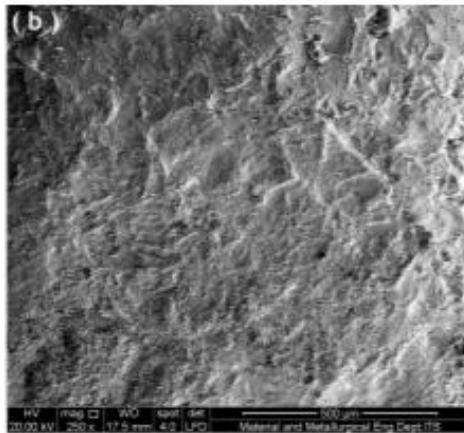
**Gambar 4.20** Hasil SEM pada produk dalam penelitian Jiang, dkk., 2013, dengan tidak menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , a' merupakan gambar perbesaran dari a, M merupakan *forsterite* ( $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$ ), F merupakan *kamacite* ( $[\text{Fe},\text{Ni}]$ ), P merupakan *spinel* ( $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ )



**Gambar 4.21** Hasil SEM pada produk dalam penelitian Jiang, dkk., 2013, dengan menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , f' merupakan gambar perbesaran dari f, M merupakan *forsterite* ( $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ), F merupakan *kamacite* ( $[\text{Fe,Ni}]$ ), G merupakan *taenite* ( $[\text{Fe,Ni}]$ ), H merupakan *wustite* ( $\text{FeO}$ ), Q merupakan *troilite* ( $\text{FeS}$ ), K merupakan nepheline ( $\text{Na}_3\text{MgAl}(\text{SiO}_4)_2$ ), P merupakan *spinel* ( $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ )

Secara teori dimana  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang juga merupakan zat aditif *sulfocompound* memiliki mekanisme yang kurang lebih sama dengan zat aditif  $\text{CaSO}_4$ . Hasil dekomposisi dari  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  berupa S akan berikatan dengan besi yang ada di dalam bijih nikel laterit membentuk senyawa *troilite* ( $\text{FeS}$ ).  $\text{Na}_2\text{S}$  yang juga merupakan hasil dekomposisi  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  akan berikatan dengan silikat yang ada di dalam bijih nikel laterit dan menghasilkan senyawa *troilite* dan natrium silikat. Dengan terbentuknya banyak *troilite* maka akan menekan metalisasi besi sehingga nilai *recovery* dari produk besi akan menurun (Li, dkk., 2012). Selain itu pembentukan *troilite* yang merupakan senyawa non-magnetik akan semakin menurunkan nilai *recovery* dari besi karena *troilite* akan terpisah ke dalam *tailing* ketika dilakukan proses separasi menggunakan magnet. Di sisi lain, pembentukan natrium silikat dari hasil reaksi  $\text{Na}_2\text{S}$  ditambah dengan hasil reaksi antara  $\text{Na}_2\text{O}$  dengan senyawa silikat yang ada di dalam bijih laterit akan menghasilkan banyak senyawa silikat yang mampu mengikat besi ataupun nikel. Senyawa silikat dengan temperatur leleh yang rendah akan menurunkan atmosfer reduksi, secara termodinamika pada atmosfer reduksi yang rendah nikel akan lebih mudah tereduksi jika dibandingkan dengan besi sehingga besi tidak tereduksi dan akan terikat dengan senyawa silikat sedangkan nikel akan tereduksi (Jiang, dkk., 2013). Dalam Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 kita dapat membandingkan hasil dengan menggunakan zat aditif dan yang tidak menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dimana pada Gambar 4.20 mayoritas dari fasa merupakan *forsterite* dan *spinel* serta *kamacite* dengan ukuran partikel yang sangat kecil dan tersebar, hasil ini sangat jauh berbeda dari hasil yang menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dimana pada Gambar 4.21 ditunjukkan bahwa penggunaan zat aditif akan memberikan ukuran partikel *kamacite* yang jauh lebih besar, selain itu terdapat fasa seperti *nepheline*, *wustite* dan *troilite* yang menandakan transformasi oksida besi menjadi logam besi terhalang serta terbuangnya zat-zat yang tidak diinginkan kedalam *tailing* ketika proses separasi secara magnetik dilakukan sehingga hal ini akan meningkatkan nilai *recovery* dari nikel dan

menurunkan nilai *recovery* besi. Selain itu pada penelitian Widyartha, dkk., seperti yang ditunjukkan Gambar 4.22 juga ditemukan penggunaan limestone dapat memberikan proses aglomerasi yang sangat baik sehingga meningkatkan ukuran partikel dari logam yang dihasilkan sehingga akan meningkatkan nilai *recovery* dari nikel.



**Gambar 4.22** Hasil SEM pada produk dalam penelitian Widyartha, dkk., 2020

Berdasarkan teori yang telah dibahas di atas yang mana menjelaskan mengapa pada hasil percobaan dengan menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dimana semakin banyak ditambahkan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  akan meningkatkan nilai *recovery* dari nikel dan menurunkan nilai *recovery* besi. Hal ini sesuai dengan hasil percobaan Jiang, dkk., dan percobaan Widyartha, dkk., dimana nilai *recovery* dari produk nikel yang tinggi dan nilai *recovery* besi yang sangat rendah.

Berdasarkan pembahasan dari data-data percobaan yang ada serta teori-teori yang ada terkait pengaruh zat aditif terhadap nilai *recovery* dari nikel dalam proses reduksi selektif dapat dirangkum yaitu terdapat pengaruh yang besar dari zat aditif terhadap nilai

*recovery* dari nikel. Berdasarkan data hasil percobaan yang ada, zat aditif NaCl memberikan nilai *recovery* nikel tertinggi yaitu dalam percobaan Zhou, dkk., pada tahun 2016 dan percobaan Qu, dkk., pada tahun 2019 dengan nilai *recovery* nikel sebesar 98,31% dan 97,76%. Kemudian disusul oleh zat aditif CaSO<sub>4</sub> dalam percobaan Zhu, dkk., pada tahun 2012 dan percobaan Mayangsari, dkk., pada tahun 2018 dengan nilai *recovery* nikel sebesar 92,3% dan 66,73%. Dan zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dalam percobaan Jiang, dkk., pada tahun 2013 dan percobaan Widyartha, dkk., pada tahun 2020 dengan nilai *recovery* nikel sebesar 88,56% dan 68,17%.

### 4.2.3 Pengaruh Zat Aditif Terhadap Faktor Selektivitas Nikel

Dengan metode serta banyaknya variasi yang dilakukan dalam percobaan proses reduksi selektif nikel maka perbandingan hasil dari kadar nikel yang dihasilkan serta nilai *recovery* nikel yang diperoleh tidak dapat menjadi parameter yang optimal dalam membandingkan performa dari masing-masing proses percobaan yang ada. Diperlukan suatu parameter yang optimal dalam menilai performa masing-masing percobaan proses reduksi selektif, menurut Elliot, dkk., pada tahun 2015 perhitungan faktor selektivitas nikel mampu dijadikan suatu pembanding yang ideal karena membandingkan fraksi nikel dalam feronikel yang terbentuk dengan fraksi besi yang tereduksi.

Data hasil percobaan yang telah diperoleh dari masing-masing jurnal penelitian telah dirangkum pada Tabel 4.3, Tabel 4.6 dan Tabel 4.9. Dengan berdasarkan pada data hasil percobaan yang ada maka untuk mengetahui nilai faktor selektivitas nikel dari masing-masing zat aditif yaitu zat aditif CaSO<sub>4</sub>, zat aditif NaCl, dan zat aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> maka dilakukan perhitungan. Perhitungan faktor selektivitas nikel dilakukan dengan menggunakan data berupa kadar nikel dan kadar besi dalam bijih nikel laterit yang digunakan dalam percobaan serta data berupa kadar nikel dan kadar besi dari produk reduksi selektif. Perhitungan dilakukan

dengan menggunakan rumus yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.23.

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai faktor selektivitas nikel dengan menggunakan zat aditif  $\text{CaSO}_4$  sebesar 2,617 pada percobaan yang dilakukan oleh Zhu, dkk., pada tahun 2012 dan sebesar 1,057 pada percobaan yang dilakukan oleh Mayangsari, dkk., pada tahun 2018.

Setelah dilakukan perhitungan, diperoleh nilai faktor selektivitas nikel dengan menggunakan zat aditif  $\text{NaCl}$  sebesar 1,231 pada percobaan yang dilakukan oleh Zhou, dkk., pada tahun 2016 dan sebesar 4,015 pada percobaan yang dilakukan oleh Qu, dkk., pada tahun 2019.

Perhitungan yang dilakukan dengan menggunakan data hasil percobaan proses reduksi selektif dengan menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  menghasilkan nilai faktor selektivitas nikel sebesar 21,796 pada percobaan yang dilakukan oleh Jiang, dkk., pada tahun 2013 dan sebesar 20,363 pada percobaan yang dilakukan oleh Widyartha, dkk., pada tahun 2020.

Berdasarkan pada Persamaan 2.23 dapat diketahui bahwa salah satu faktor yang sangat mempengaruhi faktor selektivitas nikel adalah kadar nikel dalam produk hasil reduksi. Sebagaimana yang telah dibahas pada pembahasan sebelumnya bahwa masing-masing dari zat aditif yaitu zat aditif  $\text{CaSO}_4$ , zat aditif  $\text{NaCl}$  dan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tentunya memiliki mekanisme tersendiri dalam menjalankan fungsinya sebagai agen selektivitas dalam proses reduksi selektif nikel.

Seperti yang telah dibahas pada pembahasan sebelumnya, zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang sama-sama tergabung kedalam zat aditif *sulfocompound* dimana zat aditif *sulfocompound* memiliki mekanisme selektivitas dengan cara menghasilkan gas sulfur dimana gas sulfur akan berikatan dengan besi yang ada di dalam bijih nikel laterit untuk membentuk senyawa *troilite* ( $\text{FeS}$ ). Namun yang menjadi pembeda antara zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  adalah pada zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  memiliki mekanisme pembentukan *troilite* yang jauh lebih banyak yaitu dari gas sulfur

yang dihasilkan oleh dekomposisi  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  berikatan dengan besi di dalam bijih nikel laterit serta dari reaksi antara  $\text{Na}_2\text{S}$  dengan besi di dalam bijih nikel laterit yang mana  $\text{Na}_2\text{S}$  merupakan senyawa dekomposisi  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Hal ini menjelaskan mengapa nilai faktor selektivitas nikel berdasarkan data hasil penelitian menggunakan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  jauh lebih tinggi ketimbang zat aditif  $\text{CaSO}_4$ .

Sesuai dengan yang telah dibahas sebelumnya, zat aditif  $\text{NaCl}$  memiliki mekanisme selektivitas dengan cara membentuk agen klorinasi berupa  $\text{HCl}$  yang akan berikatan dengan besi dan nikel yang ada dalam bijih nikel laterit membentuk senyawa  $\text{NiCl}_2$  dan  $\text{FeCl}_2$  yang kemudian dengan karbon dan moisture content akan bereaksi dan menghasilkan feronikel.

Berdasarkan dari perhitungan dan pembahasan yang dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa zat aditif mempengaruhi faktor selektivitas nikel dalam proses reduksi selektif nikel. Zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  menghasilkan faktor selektivitas tertinggi yang kemudian diikuti oleh zat aditif  $\text{NaCl}$  dan yang terakhir adalah zat aditif  $\text{CaSO}_4$ .

### 4.3 Kritisasi Jurnal

Setelah melakukan pembahasan dari masing-masing data-data hasil penelitian dari masing-masing jurnal, maka penulis menemukan beberapa hal yang perlu dikritisasi, yaitu:

1. Terdapat beberapa data-data hasil penelitian yang hanya dituliskan namun tidak didukung dengan lampiran hasil pengujian ataupun data pendukung lainnya.
2. Terdapat beberapa data-data yang tidak disertakan ke dalam paper sehingga mengurangi poin pendukung dari bahasan paper.
3. Terdapat beberapa gambar hasil pengujian yang tidak terlalu jelas juga disertai dengan penjelasan yang kurang sehingga membingungkan pembaca.

Besar harapan untuk kedepannya kritik-kritik tersebut dapat diperbaiki sehingga dapat menghasilkan hasil penelitian yang

---

informatif demi kemajuan riset dan penelitian khususnya dalam bidang metalurgi ekstraksi.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil dari beberapa penelitian yang telah direview dan dilakukan pembahasan, maka dapat ditarik suatu kesimpulan sebagai berikut:

1. Zat aditif mempengaruhi kadar nikel dalam produk reduksi selektif. Zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  menghasilkan kadar nikel tertinggi yang diikuti oleh zat aditif  $\text{NaCl}$  dan zat aditif  $\text{CaSO}_4$ .
2. Zat aditif mempengaruhi nilai *recovery* nikel dalam produk reduksi selektif. Zat aditif  $\text{NaCl}$  menghasilkan *recovery* nikel tertinggi yang diikuti oleh zat aditif  $\text{CaSO}_4$  dan zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .
3. Zat aditif mempengaruhi besar faktor selektivitas nikel dalam produk reduksi selektif. Zat aditif  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  menghasilkan faktor selektivitas nikel tertinggi yang diikuti oleh zat aditif  $\text{NaCl}$  dan zat aditif  $\text{CaSO}_4$ .

#### **5.2 Saran**

Demi menunjang kemajuan ilmu pengetahuan dalam bidang pengolahan mineral khususnya dalam bidang ekstraksi dan pengolahan nikel maka alangkah baiknya penulis memberikan masukan dan saran untuk penelitian kedepannya. Adapun saran dari penulis adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian pengaruh variasi aditif yang sudah ada pada proses reduksi selektif dengan menggunakan variabel kontrol yang sama sehingga dapat menghasilkan parameter proses yang optimal.
2. Perlu dilakukan penelitian berbasis inovasi zat aditif dalam proses reduksi selektif nikel.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- 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". **Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology (ICOMET 2017)** (pp. 020033-1-020033-9). AIP Publishing.
- Abdul, F., Pintowantoro, S., Kawigraha, A., & Nursidiq, A. 2018. "Effects of Reduction Temperature to Ni and Fe Content and the Morphology of Agglomerate of Reduced Laterite Limonitic Nickel Ore by Coal-Bed Method". **Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology (ICOMET 2017)** (pp. 020034-1-020034-9). AIP Publishing.
- Amilton, B. B., Dreisinger, D. B., & Espinosa, D. C. 2018. "A Review of Nickel, Copper, and Cobalt *Recovery* by Chelating Ion Exchange Resins from Mining Processes and Mining *Tailings*". **Mining, Metallurgy & Exploration**, 1-15.
- Arsyanjani, E. 2018. **Studi Variasi Jenis Aditif ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ) Terhadap Kadar Ni dan Fe Serta *Recovery* pada Proses Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit Limonitik**. Undergraduate Thesis: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Callister, J. W., & Rethwisch, D. G. 2014. **Materials Science and Engineering An Introduction**. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- 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**, 9-15.

- 
- Chen, S., Guo, S.-q., Jiang, L., Xu, Y.-l., & Ding, W.-z. 2015. "Thermodynamic of Selective Reduction of Laterite Ore by Reducing Gases". **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 3133–3138.
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., & Davenport, W. G. 2011. **Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals**. Oxford: Elsevier.
- Dong, J., Wei, Y., Lu, C., Zhou, S., Li, B., Ding, Z., . . . Ma, B. 2017. "Influence of Calcium Chloride Addition on Coal-Based Reduction Roasting of Low-Nickel Garnierite Ore". **Material Transactions**, 1161-1168.
- Dong, J., Wei, Y., Zhou, S., Li, B., Yang, Y., & Mclean, A. 2018. "The Effect of Additives on Extraction of Ni, Fe and Co from Nickel Laterite Ores". **Technical Communication**, 1-13.
- Elliot, R., Pickles, C., & Forster, J. 2016. "Thermodynamics of the Reduction Roasting of Nickeliferous Laterite Ores". **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, 320-346.
- Elliot, R., Rodrigues, F., Pickles, C., & Peacey, J. 2015. "A Two-Stage Thermal Upgrading Process for Nickeliferous Limonitic Laterite Ores". **Canadian Metallurgical Quarterly**, 1-11.
- Febriana, E., Manaf, A., Prasetyo, A., & Mayangsari, M. 2018. "Thermal Characteristic of Limonite Ore Upon Calcination and Reduction". **Proceedings of the International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM2017)** (pp. 020026-1-020026-6). AIP Publishing.
- Febriana, E., Prasetyo, A. B., Mayangsari, W., Irawan, J., Hakim, M. I., Prakasa, T. A., . . . Subagja, R. 2020. "Effect of Sulfur Addition to Nickel *Recovery* of Laterite Ore". **Jurnal of Scientific and Applied Chemistry**, 14-20.
- Jiang, M., Sun, T., Liu, Z., Kou, J., Liu, N., & Zhang, S. 2013. "Mechanism of Sodium Sulfate in Promoting Selective
-

- Reduction of Nickel Laterite Ore During Reduction Roasting Process". **International Journal of Mineral Processing**, 32-38.
- Jiangan, C., Tichang, S., & Qi, L. 2014. "Study of the Mechanism of the Direct Reduction Roasting of the Limonite in Jiangxi". **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, 671-678.
- Kim, J., Dodbiba, G., Tanno, H., Okaya, K., Matsuo, S., & Fujita, T. 2010. "Calcination of Low-Grade Laterite for Concentration of Ni by Magnetic Separation". **Minerals Engineering**, 282-288.
- Li, G., Luo, J., Peng, Z., Zhang, Y., Rao, M., & Jiang, T. 2015. "Effect of Quaternary Basicity on Melting Behavior and Ferronickel Particles Growth of Saprolitic Laterite Ores in Krupp-Renn Process". **ISIJ International**, 1828-1833.
- Li, G., Shi, T., Rao, M., Jiang, T., & Zhang, Y. 2012. "Beneficiation of Nickeliferous Laterite by Reduction Roasting in the Presence of Sodium Sulfate". **Minerals Engineering**, 19-26.
- Li, J., Li, Y., Gao, Y., Zhang, Y., & Chen, Z. 2016. "Chlorination Roasting of Laterite Using Salt Chloride". **International Journal of Mineral Processing**, 23-31.
- 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**, 901-906.
- Mayangsari, W., & Prasetyo, A. B. 2016. "Proses Reduksi Selektif Bijih Nikel Limonit Menggunakan Zat Aditif  $\text{CaSO}_4$ ". **Metalurgi**, 7-18.
- Mayangsari, W., Prasetyo, A., & Prasetyo, P. 2018. "Upgrading Nickel Content of Limonite Nickel Ore Through Pelletization, Selective Reduction and Magnetic Separation". **Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Metallurgical**

- 
- Engineering and Technology (ICOMET 2017)** (pp. 020021-1-020021-6). AIP Publishing.
- Moskalyk, R., & Alfantazi, A. 2002. "Nickel Laterite Processing and Electrowinning Practice". **Minerals Engineering**, 593–605.
- Mudd, G. M. 2010. "Global Trends and Environmental Issues in Nickel Mining: Sulfides Versus Laterites". **Ore Geology Reviews**, 9-26.
- Norgate, T., & Jahanshahi, S. 2011. "Assessing the Energy and Greenhouse Gas Footprints of Nickel Laterite Processing". **Minerals Engineering**, 698-707.
- Oxley, A., & Barcza, N. 2013. "Hydro-Pyro Integration in the Processing of Nickel Laterites". **Minerals Engineering**, 1-12.
- Pickles, C., Forster, J., & Elliot, R. 2014. "Thermodynamic Analysis of the Carbothermic Reduction Roasting of a Nickeliferous Limonitic Laterite Ore". **Minerals Engineering**, 33-40.
- Pintowantoro, S., & Abdul, F. 2019. "Selective Reduction of Laterite Nickel Ore". **Materials Transactions**, 2245-2254.
- Qu, G., Zhou, S., Wang, H., Li, B., & Wei, Y. 2019. "Production of Ferronickel Concentrate from Low-Grade Nickel Laterite Ore by Non-Melting Reduction Magnetic Separation Process". **Metals**, 1-11.
- Quast, K., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. 2017. "Preconcentration Strategies in the Processing of Nickel Laterite Ores Part 5: Effect of Mineralogy". **Minerals Engineering**, 31-39.
- Rizov, B. 2012. "Phase Transformations from Goethite to Hematite and Thermal Decomposition in Various Nickeliferous Laterite Ores". **Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy**, 207-210.
- Rodrigues, F., Pickles, C., Peacey, J., Elliot, R., & Forster, J. 2017. "Factors Affecting the Upgrading of a Nickeliferous
-

- Limonic Laterite Ore by Reduction Roasting, Thermal Growth and Magnetic Separation". **Minerals**, 1-21.
- Samouhos, M., Taxiarchou, M., Hutcheon, R., & Devlin, E. 2012. "Microwave Reduction of a Nickeliferous Laterite Ore". **Minerals Engineering**, 19-29.
- Tsuji, H., & Tachino, N. 2012. "Ring Formation in the Smelting of Saprolite Ni-ore in a Rotary Kiln for Production of Ferromagnetic Alloy: Mechanism". **ISIJ International**, 1724-1729.
- Widyarta, A. B. 2020. **Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit Limonitik Dengan Variasi Aditif Natrium Tiosulfat dan Sulfur Alam Kawah Ijen Menggunakan Reaktor Bed Batubara-Limestone**. Thesis: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Widyarta, B., Setiyorini, Y., Abdul, F., Subakti, T., & Pintowantoro, S. 2020. "Effective Beneficiation of Low Content Nickel Ferrous Laterite Using Fluxing Agent Through  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  Selective Reduction". **Materialwiss. Werkstofftech.**, 750-757.
- Wills, B. A., & Finch, J. A. 2016. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 8th edition**. Oxford: Elsevier.
- Xiao, J., Ding, W., Peng, Y., Chen, T., Zou, K., & Wang, Z. 2020. "Extraction of Nickel from Garnierite Laterite Ore Using Roasting and Magnetic Separation with Calcium Chloride and Iron Concentrate". **Minerals**, 1-13.
- Xueming, L., Wei, L., Mei, L., Zhixiong, Y., Xuewei, L., & Chenguang, B. 2018. "Effect of Sodium Sulfate on Preparation of Ferromagnetic from Nickel Laterite by Carbothermal Reduction". **ISIJ International**, 799-807.
- Yang, J., Zhang, G., Ostrovski, O., & Jahanshahi, S. 2013. "Changes in An Australian Laterite Ore in the Process of Heat Treatment". **Minerals Engineering**, 110-115.

- 
- Yang, S., Du, W., Shi, P., Shangguan, J., Liu, S., Zhou, C., . . . Fan, H. 2016. "Mechanistic and Kinetic Analysis of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Modified Laterite Decomposition by Thermogravimetry Coupled with Mass Spectrometry". **PLoS ONE**, 1-21.
- Yildirim, H., Morcali, H., Turan, A., & Yucel, O. 2013. "Nickel Pig Iron Production From Lateritic Nickel Ores". **Efficient Technologies in Ferroalloy Industry**, 237-244.
- Yu, M., Patrick, H., Annette, v. J., & Alexandre, Y. 2019. "Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements". **Energies**, 1-20.
- Zevgolis, E., Zografidis, C., & Halikia, I. 2010. "The Reducibility of the Greek Nickeliferous Laterites: A Review". **Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min Metall. C)**, 9-17.
- Zhai, Y. C., Mu, W. N., Yan, L., & Qian, X. 2010. "A Green Process for Recovering Nickel from Nickeliferous Laterite Ores". **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, s65-s70.
- Zheng, G.-l., Zhu, D.-q., Pan, J., Li, Q.-h., An, Y.-m., Zhu, J.-h., & Liu, Z.-h. 2014. "Pilot Scale Test of Producing Nickel Concentrate from Low-Grade Saprolitic Laterite by Direct Reduction-Magnetic Separation". **J. Cent. South Univ**, 1771-1777.
- Zhou, S., Wei, Y., Li, B., Wang, H., Ma, B., & Wang, C. 2016. "Mechanism of Sodium Chloride in Promoting Reduction of High-Magnesium Low-Nickel Oxide Ore". **Scientific Reports**, 1-12.
- Zhu, D., Y. Cui, K., Vining, Hapugoda, S., Douglas, J., Pan, J., & Zheng, G. 2012. "Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed by Magnetic Separation". **International Journal of Mineral Processing**, 1-7.
-

## LAMPIRAN

### Lampiran Perhitungan Faktor Selektivitas Nikel

#### 1. Zat Aditif CaSO<sub>4</sub>

Penelitian Zhu, dkk.

$$SF = \frac{5,94\% \times 33,8\%}{66,69\% \times 1,15\%}$$

$$SF = 2,617$$

Penelitian Mayangsari, dkk.

$$SF = \frac{2,42\% \times 27,02\%}{47,93\% \times 1,29\%}$$

$$SF = 1,057$$

Rata-rata faktor selektivitas zat aditif CaSO<sub>4</sub>

$$= \frac{2,617\% + 1,057\%}{2}$$

$$= 1,837$$

#### 2. Zat Aditif NaCl

Penelitian Zhou, dkk.

$$SF = \frac{7,09\% \times 9,67\%}{67,90\% \times 0,82\%}$$

$$SF = 1,231$$

Penelitian Qu, dkk.

$$SF = \frac{8,15\% \times 35,79\%}{64,28\% \times 1,13\%}$$

$$SF = 4,015$$

Rata-rata faktor selektivitas zat aditif NaCl

$$= \frac{1,231\% + 4,015\%}{2}$$

$$= 2,623$$

3. Zat Aditif Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Penelitian Jiang, dkk.

$$SF = \frac{10,86\% \times 34,69\%}{11,6\% \times 1,49\%}$$

$$SF = 21,796$$

Penelitian Widyartha, dkk.

$$SF = \frac{22,93\% \times 55,37\%}{49,88\% \times 1,25\%}$$

$$SF = 20,363$$

Rata-rata faktor selektivitas zat aditif NaCl

$$= \frac{21,796\% + 20,363\%}{2}$$

$$= 21,0795$$

Lampiran dari paper yang direview

1. Zhu, dkk., 2012 doi: 10.1016/j.minpro.2012.01.003

International Journal of Mineral Processing 106–108 (2012) 1–7



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

**International Journal of Mineral Processing**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ijminpro](http://www.elsevier.com/locate/ijminpro)



---

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

D.Q. Zhu <sup>a</sup>, Y. Cui <sup>a,\*</sup>, K. Vining <sup>b</sup>, S. Hapugoda <sup>b</sup>, J. Douglas <sup>b</sup>, J. Pan <sup>a</sup>, G.L. Zheng <sup>a</sup>

<sup>a</sup> School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China  
<sup>b</sup> CSIRO Process Science and Engineering, PO Box 883, Kensington, QLD 4080, 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 ferro-nickel 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 52.1% could be produced with over 75% of the reduced ore, containing low nickel concentrate, 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 Alfanzati, 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).

Ferro-nickel 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 ferro-nickel 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<sub>2</sub> 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: [cuiyacu@163.com](mailto:cuiyacu@163.com) (Y. Cui).

0304-7516/\$ – see front matter © 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.  
doi:10.1016/j.minpro.2012.01.003

## 2. Mayangsari, dkk., 2018 doi: 10.1063/1.5030243

**Upgrading Nickel Content of Limonite Nickel Ore through Pelletization, Selective Reduction and Magnetic Separation**W Mayangsari<sup>1,a)</sup>, A B Prasetyo<sup>b)</sup> and Puguh Prasetyo<sup>c)</sup><sup>1</sup>Research Center for Metallurgy and Material, Indonesian Institute of Sciences, PUSPIPTEK Area building 470 South Tangerang, Banten, IndonesiaEmail: a) [wahy035@iipi.go.id](mailto:wahy035@iipi.go.id)  
b) [agus080@iipi.go.id](mailto:agus080@iipi.go.id)  
c) [pprasetyo2002@yahoo.com](mailto:pprasetyo2002@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<sub>4</sub> 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 36fold and 1.56fold respectively from raw ore used when reduced at 1100°C for 60 minutes with composition of coal and CaSO<sub>4</sub>, both 10%. The excess of CaSO<sub>4</sub> addition caused fayalite formation. Moreover, S<sub>2</sub> from CaSO<sub>4</sub> also support to reach low melting point and enlarge 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. Calculation of laterite nickel ore from Indonesia at 500°C 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 al 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 550°C [8]. Zhu, et al [5] used laterite nickel ore (a mixture of

3. Zhou, dkk., 2016 doi: 10.1038/srep29061

www.nature.com/scientificreports

# SCIENTIFIC REPORTS

OPEN

Received: 16 March 2016  
Accepted: 14 June 2016  
Published: 04 July 2016

## Mechanism of sodium chloride in promoting reduction of high-magnesium low-nickel oxide ore

Shiwei Zhou<sup>1</sup>, Yonggang Wei<sup>1</sup>, Bo Li<sup>1</sup>, Hua Wang<sup>2</sup>, Baozhong Ma<sup>2</sup> & Chengyan Wang<sup>2</sup>

Sodium chloride has been proved that it is an effective promoter for the reduction of high-magnesium, low-nickel oxide ore. The aim of current work is to clarify the promotion behavior of sodium chloride in the roasting reduction process. The influence of moisture on the reduction of ore in the presence of sodium chloride is studied to get clear comprehension of promotion process. In the presence of moisture, the HCl is produced by pyrohydrolysis of sodium chloride for chlorinating nickel and iron oxides, moreover, interactions between metallic oxides and sodium chloride are also a way for chlorination at high temperature (>802 °C); subsequently, the metal chloride would be reduced by reductant. In the absence of moisture, the magnetic separation results show that the recoveries of iron and nickel have a significant increase; moreover, olivine structure would be destroyed gradually with the increase of roasting temperature in the action of sodium chloride, and the sodium chloride existed in high-magnesium, low-nickel oxide ore could make the NiO isolate from NiO-bearing minerals. The NiO reacts with Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at high temperature to form NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, which is conducive to the formation of Ni-Fe alloy during the reduction process.

Nickel is an important strategic alloying metal due to its special physical and chemical characteristics. The continued depletion of tractable high grade nickel sulfide ore have led to greater efforts to extract nickel from laterite ore<sup>1,2</sup>. Nickel laterites, which contain ~60% of the world's total landbased nickel resources, account for ~40% of annual global nickel production on the basis of literature reported<sup>3</sup>. Nickel is mainly hosted in a variety of hydrous Mg silicates and smectites within laterite ore in the form of isomorphism and/or adsorption. There isn't, therefore, a unified treatment method for utilization of nickeliferous laterite ores.

Laterite ore processing methods are classified on the basis of their chemical compositions. The limonitic ores, which contain typically 0.5–1.7% nickel and 40–60% iron<sup>4</sup>, are suitable for a hydrometallurgical process, in particular, High Pressure Acid Leaching (HPAL)<sup>5,6</sup>. The saprolitic ore deposit is rich in magnesium silicates and nickel content (1.5–3%). This ore deposit, therefore, is more amenable to treatment by pyrometallurgical techniques. However, the conventional pyrometallurgical processes are typically suitable for process laterite ore with nickel content over 1.5%, such as rotary kilns-electric furnaces (RKEF) and Krupp-Renn processes<sup>8–10</sup>. The low nickel laterite ores, which nickel grade less than 1.5%, widely exists in the nature; consequently, the process of roasting reduction followed by magnetic separation has been proposed to obtain ferronickel concentrate from low grade (<1.5% Ni) nickel laterite ore<sup>11,12</sup>. The key of this process is to add a suitable additive for promoting the reduction of ore.

According to the reported studies, sulfo compound is the most commonly additives, the mainly functions may be summarized as follow: (a) the sulphur additive can suppress the formation of forsterite phase when laterite ores are calcined; (b) S can promote the grain growth of nickel and iron, so as to improve the Ni grade and recovery<sup>13–15</sup>. A ferronickel concentrate containing 6.00% Ni, with a nickel recovery of 92.10%, can be obtained from the nickel laterite ore (1.42% Ni), the reduction was carried out at 1100 °C for 60 min, with the addition of 6% calcium sulfate and 5% coal<sup>1</sup>. In addition, when the laterite ore (1.38% Ni) was roasted at 800 °C for 220 min at a total gas flow rate of 200 L/h (H<sub>2</sub>: 70%, N<sub>2</sub>: 30%), with the addition of 20% sodium sulfate, a ferronickel concentrate with 5.63% Ni can be obtained, and the corresponding recovery is 83.59%<sup>11</sup>. Nevertheless, complex

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China. <sup>1</sup>School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Correspondence and requests for materials should be addressed to Y.G.W. (email: weiygcp@ustb.edu.cn)

SCIENTIFIC REPORTS | 6:29061 | DOI: 10.1038/srep29061

## 4. Qu, dkk., 2019 doi: 10.390/met9121340




*Article*

## Production of Ferronickel Concentrate from Low-Grade Nickel Laterite Ore by Non-Melting Reduction Magnetic Separation Process

Guorui Qu <sup>1,2</sup>, Shiwei Zhou <sup>2,3</sup>, Huiyao Wang <sup>2,3</sup>, Bo Li <sup>1,2,3</sup> and Yonggang Wei <sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; qgr11@126.com (G.Q.); libokmst@163.com (B.L.)  
<sup>2</sup> Engineering Research Center of Metallurgical Energy Conservation and Emission Reduction, Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; swzhou90@126.com (S.Z.); wanghuiyao940921@163.com (H.W.)  
<sup>3</sup> Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China  
\* Correspondence: weiygcp@aliyun.com

Received: 20 November 2019; Accepted: 9 December 2019; Published: 12 December 2019

 check for updates

**Abstract:** The production of ferronickel concentrate from low-grade nickel laterite ore containing 1.31% nickel (Ni) was studied by the non-melting reduction magnetic separation process. The sodium chloride was used as additive and coal as a reductant. The effects of roasting temperature, roasting duration, reductant dosage, additive dosage, and grinding time on the grade and recovery were investigated. The optimal reduction conditions are a roasting temperature of 1250 °C, roasting duration of 80 min, reductant dosage of 10%, additive dosage of 5%, and a grinding time of 12 min. The grades of nickel and iron are improved from 2.13% and 51.12% to 8.15% and 64.28%, and the recovery of nickel is improved from 75.40% to 97.76%. The research results show that the additive in favor of the phase changes from lizardite phase to forsterite phase. The additive promotes agglomeration and separation of nickel and iron.

**Keywords:** nickel laterite; non-melting reducing; sodium chloride; magnetic separation

---

### 1. Introduction

As an important metal, nickel has an important position in industrial production due to its good physicochemical properties [1,2]. Nickel resources mainly exist in the form of nickel sulfide ore and nickel laterite ore. Among them, nickel laterite ore accounts for about 70% of the total nickel reserves in the world [3]. Due to the continuous decline of global nickel sulfide ore reserves, the development and utilization of nickel laterite ore have received increasing attention.

The treatment method of laterite ore can be divided into two types: hydrometallurgy and pyrometallurgy. The pyrometallurgical process has high requirements for the Ni grade, so it is impossible to treat the low-grade nickel laterite [4,5]. At the same time, high temperatures will cause slag and metal rings to form, which is not conducive to the production of ferronickel [6]. The disadvantage of the wet process is that the process is long and the wastewater is difficult to handle [3,7,8]. Therefore, the use of the “low-temperature roast reduction-magnetic separation process” to deal with such resources is attracting everyone’s attention [6,9].

The roasted reduction-magnetic separation process is mainly used for the treatment of laterite ore, which requires the laterite ore to be crushed and ground. Then the reductant and additive are mixed with the raw material and roasted at a certain temperature. After that, the roasted products were ground and wet-type magnetic separation was carried out to obtain ferronickel concentrate.

Metals 2019, 9, 1340; doi:10.3390/met9121340 www.mdpi.com/journal/metals

5. Jiang, dkk., 2013 doi: 10.1016/j.minpro.2013.04.005

International Journal of Mineral Processing 123 (2013) 32–38

Contents lists available at ScienceDirect

**International Journal of Mineral Processing**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ijminpro](http://www.elsevier.com/locate/ijminpro)

---

**Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process<sup>☆</sup>**

Man Jiang <sup>a,b</sup>, Tichang Sun <sup>a,b</sup>, Zhiguo Liu <sup>a</sup>, Jue Kou <sup>a</sup>, Na Liu <sup>a</sup>, Shiyuan Zhang <sup>a</sup>

<sup>a</sup> School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China  
<sup>b</sup> School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, P. R. China



---

**ARTICLE INFO**

**Article history:**  
Received 21 December 2012  
Received in revised form 15 April 2013  
Accepted 20 April 2013  
Available online 2 May 2013

**Keywords:**  
Laterite ore  
Sodium sulfate  
Reduction roasting-magnetic separation  
Selective reduction

**ABSTRACT**

A high nickel grade ferro-nickel was produced from laterite ore using the selective reduction-wet magnetic separation process, with the addition of sodium sulfate (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). The ferro-nickel concentrate assaying 9.87% Ni, with a nickel recovery of 90.96% can be obtained, when laterite ore was reduced at 1200 °C for 50 min with the addition of 10 wt.% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and 2 wt.% coal. Based on the results of the X-ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy, and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy analyses, the thermal decomposition and reduction reaction of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> were carried out. Sodium oxide from the thermal decomposition of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> reacted with silicate minerals to form nepheline. The formation of the molten phase accelerated the migration rate of the metallic particles and suppressed the reduction of the ferrous minerals in the weak reduction atmosphere. Sulfur reacted with metallic iron to form troilite, thereby facilitating the aggregation of ferro-nickel particles to form bigger particles.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

---

**1. Introduction**

Nickel laterite ore is divided chemically and physically into two distinct types, namely, saproplitic (silicate/hydroxysilicate) and limonitic (oxide/hydroxide) ores (Khamdani et al., 2009). The nickel in the nickel laterite ore is closely associated with iron oxide and silicate minerals as isomorphous substitution for iron and magnesium in the lattice (Daly et al., 2004; Mskalyk and Alfantazi, 2002). Laterites cannot be beneficiated via physical methods because of their complex mineralogy. Thus, the pyrometallurgical method has been applied commercially to extract nickel from the nickel laterite ore. Pyrometallurgical techniques have been used to treat saproplitic laterite to produce ferro-nickel concentrate or nickel matte (King, 2005; Kyle, 2010). However, this method is energy intensive during the production of ferro-nickel concentrate from laterite ores because it involves two high temperature steps: pre-reduction at 850 °C to 1000 °C, followed by smelting at 1500 °C to 1600 °C, in an electric furnace to separate the ferro-nickel from the silica-magnesia slag (Norgate and Jahanshahi, 2011). Therefore, an alternative route of direct reduction followed by physical separation with less energy consumption has been suggested. The proposed process is an easy and environmentally friendly technique, and exhibits selective extraction of nickel over iron. The ferro-nickel

concentrate obtained from this process can be directly used to make stainless steels.

Recently, several investigations on the reduction roasting of nickel laterite ore followed by magnetic separation to produce ferro-nickel concentrate have been performed. Kim et al. have investigated the concentration of nickel from low-grade laterite (Ni 1.50%, Fe 22.33%) using calcination at 500 °C for 1 hour and wet magnetic separation. He showed that the nickel grade increased from 1.5% to 2.9%, but the nickel recovery was only 48% (Kim et al., 2010). Li et al. have extracted nickel from low-grade nickel laterite ore (Ni 1.09%, Fe 9.16%) using a solid-state desulfurization method (Li et al., 2012a,b). A ferro-nickel concentrate with a nickel grade of 4.50% and recovery of 80.00% has been obtained. However, these studies have not obtained ferro-nickel concentrate with high nickel grade (> 8%) via reduction roasting and magnetic separation without additives.

Reduction roasting with additives for obtaining high nickel grade ferro-nickel concentrate has recently become a hot research topic. Cao et al. studied the reduction roasting-magnetic separation process of low-grade nickel laterite ores, with Ni 1.86% and Fe 13.59%. He found that effective reduction occurred, and the ferro-nickel concentrate containing 10.83% Ni, with a nickel recovery of 82.15%, was obtained. The reduction was carried out at 1200 °C for 40 min, with the addition of 20% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and 15% coal (Cao et al., 2010; Sun et al., 2011). Zhu et al. conducted selective reduction and wet magnetic separation of nickel laterite ores (Ni 1.423%, Fe 23.16%) at 1100 °C for 60 min, with the addition of 6% calcium sulfate and 5% coal. The experiments showed that the nickel grade of the ferro-nickel concentrate could reach up to 6.00%, with a nickel recovery of 92.10% (Zhu et al., 2012). Li et al. reported that the nickel grade and recovery of ferro-nickel were 9.48%

---

<sup>☆</sup> This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-No Derivative Works License, which permits non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

<sup>\*</sup> Corresponding author at: 30 Xueyuan St., University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China. Tel.: +86 10 6231 4078.  
E-mail address: [manjiang@ustb.edu.cn](mailto:manjiang@ustb.edu.cn) (T. Sun).

0301-7516/\$ – see front matter © 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2013.04.005>

## 6. Widyartha, dkk., 2020 doi: 10.1002/mawe.202000007

750
Materialwiss. Werkstofftech. 2020, 51, 750–757
DOI 10.1002/mawe.202000007

## Effective beneficiation of low content nickel ferrous laterite using fluxing agent through Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> selective reduction

### Effektive Aufbereitung von eisenhaltigem Laterit mit niedrigem Nickelgehalt unter Verwendung eines Flussmittels durch selektive Reduktion von Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

B. Widyartha<sup>1</sup>, Y. Setiyorini<sup>1</sup>, F. Abdul<sup>1</sup>, T.J. Subakti<sup>1</sup>, S. Pintowantoro<sup>1</sup>

To address the issue of high energy employment and un-green processing in limonitic laterites extraction, selective reduction using Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> additive with the introduction of different fluxes including quicklime, dolomite, and limestone followed by magnetic separation was studied. The objective of the research was to find out the influence of fluxes in optimizing ferronickel product of reduction. The reduction process was carried out at 1400 °C for 6 hours and the obtained product was characterized by scanning electron microscopy (SEM), emission dispersive x-ray (EDX), and x-ray diffraction (XRD) to image the morphology, determine the composition, and examine the mineralogical structure. Result showed that the employment of fluxes exhibited positive effect in improving the product. The highest nickel grade was 21.68 % using limestone flux, while the most promising recovery was 93.73 % utilizing dolomite flux. Meanwhile, mineralogical assessment also proved that the ascending of nickel content is due to the formation of trolite (FeS) as the result of synergy between Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> additives and carbonate minerals from fluxes. This result exhibits a notable performance of fluxes for improving the product of selective reduction.

**Keywords:** Selective reduction / laterites / flux / sodium sulphate / ferronickel

**Schlüsselwörter:** Selektive Reduktion / Laterit / Flussmittel / Natriumsulfat / Eisennickel

#### 1 Introduction

Nickel, a broadly utilized metal for household and manufacturing applications, exhibits a constant increment in demand reaching 2 million tons annual consumption which continuously shows prompt enhancement since 1940s [1]. The primary source of nickel ores is deposited as laterites (about 70 %)

and another type is buried as sulphides (about 30 %). However, an astonishing fact arises since United States Geological Survey revealed that only 40 % of global production comes from laterites, whereas the other 60 % is extracted from sulphide [2]. The paradox occurs due to several natural reasons such as low nickel content of ores (1 %–2.5 %), intricate mineralogy and complicated proc-

<sup>1</sup> Sepuluh Nopember Institute of Technology, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Jalan Raya ITS, 60111, SURABAYA, REPUBLIC OF INDONESIA

Corresponding author: S. Pintowantoro, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Jalan Raya ITS, 60111, SURABAYA, REPUBLIC OF INDONESIA, E-Mail: sungging@mat-eng.its.ac.id

© 2020 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
www.wiley-vch.de/home/maw

## UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai penutup penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang selalu menjadi sumber perlindungan dan kekuatan bagi penyusun dalam melaksanakan penelitian Tugas Akhir.
2. Bapak Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.
3. Kedua orang tua yaitu Bapak Ferdinand Tajujung dan Ibu Olga Carolien Annes yang selalu mendukung serta tak henti-hentinya memberikan doa selama penulis mengerjakan Tugas Akhir.
4. Judith Angelica Pangau sebagai *supporting system* penulis dalam mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Erick Nicolas Sebayang dan Iqbal Maulana Affandi sebagai *partner* tugas akhir penulis yang sudah membantu dan mendukung serta menjadi teman diskusi selama penulis mengerjakan Tugas Akhir.
6. Teman-teman anggota laboratorium teknologi pengolahan mineral dan material yang telah berbagi canda dan tawa selama proses pengerjaan Tugas Akhir yaitu Mas Berryl Widyartha, Satrio Prambodo, Vito Valdano, Tetty Manik, Nanda Rizky, Bayu Murti, Arif Rahman, Kevin Oktaviandra, Henokh Vidhi, Safira Firdausi, Amri Ilham, Naufal Muzakkii, Rizki Sumantri, Muhammad Najib, Muhammad Afni, Naufal Firdaus, Rachnanta Rifki, Radite Surya, & Fadel Devinto.
7. Teman-teman semasa SMA yang selalu memberikan semangat kepada penulis selama mengerjakan Tugas Akhir yaitu Gary Nathaniel, Rizal Firdaus, Afriyadi Ramadhani,

---

Maroghi Yoshi, Iklil Amrullah, Vania Griselda, Nadzila Anindya, Rifdah Raniah, & Aldirra Naufa.

8. Kepada seluruh teman-teman mahasiswa material & metalurgi angkatan 2016 dan Matrice 18 yang selalu menjadi motivasi penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
9. Kepada Liverpool FC yang berhasil meraih gelar juara Premier League setelah 30 tahun tanpa gelar yang sudah memberikan penulis semangat pantang menyerah dalam menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
10. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dan membantu kelancaran proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

Bogor, 9 Agustus 2020  
Penulis

Mahanaim Nicolas S  
0251164000063

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Bogor pada tanggal 31 Mei 1999, penulis merupakan anak semata wayang dari keluarga Ferdinand Tajujung. Penulis menempuh pendidikan dasar di Perguruan Advent Bogor, kemudian penulis melanjutkan ke jenjang menengah di SMP Mardi Yuana Bogor, dan penulis melanjutkan ke pendidikan jenjang atas di SMA Negeri 3 Bogor. Lalu penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Material dan

Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama menempuh aktivitas perkuliahan, penulis tercatat aktif dalam keorganisasian baik di tingkat departemen maupun di tingkat institut. Penulis tercatat sebagai Staff Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTI-ITS 17/18. Penulis juga menjadi panitia di tingkat Institut dalam kegiatan Pembinaan Kerohanian Mahasiswa Baru Kristen Institut Teknologi Sepuluh Nopember (PKMBK ITS) sebagai staff sie. Pembinaan. Kemudian penulis juga mengemban amanah sebagai Koordinator Senat Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi pada tahun 2018 hingga 2019. Selain itu, penulis juga aktif mengikuti berbagai pelatihan pada tingkat departemen hingga tingkat fakultas seperti pelatihan LKTI TD, Basic Media Schooling, Basic Entrepreneurship Schooling, LKMM Pra-TD, LKMM TD, & LKMM TM. Selain itu, penulis juga memiliki pengalaman kerja praktik di PT. Dirgantara Indonesia (Persero) pada Juni-Agustus 2019 dengan judul laporan kerja praktik “Analisis Proses dan Kontrol Kualitas Cadmium Plating Pada Baja Paduan 15CDV6 Dalam Program Airbus Helicopter CD 7 dan CD 10”. Tugas akhir dari penulis berupa review jurnal dalam bidang metalurgi ekstraksi berjudul “Review Pengaruh Zat Aditif Sebagai Agen Selektivitas Dalam Proses Reduksi Selektif Nikel”. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: [mahanaimnicolas@ymail.com](mailto:mahanaimnicolas@ymail.com)