

**PENINGKATAN KADAR DAN PEROLEHAN NIKEL HASIL
REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT KADAR
RENDAH DENGAN ADITIF NATRIUM SULFIDA DAN
REDUKTOR ANTRASIT DALAM PRODUKSI FERONIKEL**

(Skripsi)

Oleh

Riska Nadia Tirmayani



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

ABSTRAK

PENINGKATAN KADAR DAN PEROLEHAN NIKEL HASIL REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT KADAR RENDAH DENGAN ADITIF NATRIUM SULFIDA DAN REDUKTOR ANTRASIT DALAM PRODUKSI FERONIKEL

Oleh

RISKA NADIA TIRMAYANI

Telah dilakukan penelitian reduksi selektif bijih nikel laterit kadar rendah dengan menggunakan aditif natrium sulfida 10% berat dan reduktor antrasit 5%, 10% dan 15% berat. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur, dosis reduktor antrasit dan waktu tahan reduksi terhadap kadar dan *recovery* besi nikel dalam ferronikel. Proses reduksi selektif dilakukan pada temperatur 950 °C, 1050 °C dan 1150 °C dengan waktu tahan selama 60 menit, 90 menit dan 120 menit diikuti dengan proses pemisahan magnetik untuk menghasilkan konsentrat dan tailing. Karakterisasi XRD hasil reduksi selektif menunjukkan fasa yang dominan seperti *iron nickel* (FeNi), *iron sulfide* (FeS), fayalite (Fe₂SiO₄) dan *wuestite* (FeO). Karakterisasi XRF menunjukkan nilai optimum yaitu pada temperatur 1150 °C dengan reduktor 10% dan waktu tahan reduksi selama 60 menit dengan kadar dan *recovery* nikel masing-masing sebesar 3,026% dan 89,32%. Ukuran partikel ferronikel pada sampel tersebut terbentuk dengan rata-rata ukuran butir sebesar 29,23.

Kata kunci: bijih nikel laterit, reduksi selektif, uji karakterisasi.

ABSTRACT

INCREASED LEVELS AND EARNINGS RESULTS SELECTIVE REDUCTION OF NICKEL LATERITE ORE WITH LOW LEVELS OF SODIUM SULFIDE AND REDUCTANT ADDITIVE ANTHRACITE IN THE PRODUCTION OF FERRONICKEL

By

RISKA NADIA TIRMAYANI

Experiments have been carried out selective reduction of low grade laterite nickel ore by using the additive sodium sulfide 10% by weight and a reductant anthracite 5%, 10% and 15% by weight. This study was conducted to determine the effect of temperature, anthracite and a reductant dose reduction resistant to high levels of iron and nickel in ferronickel recovery. The process of selective reduction carried out at a temperature of 950°C, 1050°C and 1150°C with a holding time of 60 minutes, 90 minutes and 120 minutes followed by magnetic separation process to produce a concentrate and tailings. Characterization of selective reduction XRD results show that the dominant phase such as iron nickel (FeNi), iron sulfide (FeS), fayalite (Fe₂SiO₄) and wuestite (FeO). Characterization XRF shows optimum value at a temperature of 1150°C with reductant 10% and holding time reduction for 60 minutes with a nickel grade and recovery respectively 3.026% and 89.32%. The particle size of ferronickel in the sample formed with an average grain size of 29,23µm.

Keywords: nickel laterite ore, selective reduction, characterization test.

**PENINGKATAN KADAR DAN PEROLEHAN NIKEL HASIL
REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT KADAR
RENDAH DENGAN ADITIF NATRIUM SULFIDA DAN
REDUKTOR ANTRASIT DALAM PRODUKSI FERONIKEL**

Oleh

Riska Nadia Tirmayani

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

Judul Skripsi : PENINGKATAN KADAR DAN PEROLEHAN NIKEL HASIL REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERIT KADAR RENDAH DENGAN ADITIF NATRIUM SULFIDA DAN REDUKTOR ANTRASIT DALAM PRODUKSI FERONIKEL

Nama Mahasiswa : Riska Nadia Tirmayani

Nomor Pokok Mahasiswa : 1417041071

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Pembimbing I,

Pembimbing II,

Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.

Achmad Shofi, S.T., M.T.

NIP. 19610723 198603 1 003

NIP. 19811022 201012 1 001

2. Ketua Jurusan Fisika

Arif Surtono, M.Si., M.Eng.

NIP. 19710909 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.

Sekretaris

: Achmad Shofi, S.T., M.T.

Penguji

Bukan Pembimbing

: Dr. Yanti Yulianti, M.Si.

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Drs. Suratman., M.Sc.

NIP. 19640604 199003 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 13 September 2019

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain. Kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, September 2019



Riska Nadia Tirmayani
NPM. 1417041071

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Sidokerto, Kecamatan Bumiratu Nuban, Kabupaten Lampung Tengah pada tanggal 22 Mei 1996. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Turiman dan Ibu Tarmiyati.

Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Sidokerto pada tahun 2008, SMPN 1 Trimurjo pada tahun 2011 dan SMA Muhammadiyah 1 Metro pada tahun 2014. Pada tahun 2014 penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN dan menerima beasiswa bidikmisi.

Selama menempuh jenjang pendidikan S1 di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, penulis memilih konsentrasi keilmuan bidang Fisika Material, kemudian melakukan Praktik Kerja Lapangan di Balai Penelitian Teknologi Mineral-LIPI Tanjung Bintang, Kabupaten Lampung Selatan dengan bidang penelitian non-logam (Pasir Cetak). Selanjutnya penulis mengikuti program pengabdian masyarakat dengan mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Penyandingan, Kecamatan Kelumbayan, Kabupaten Tanggamus pada tahun 2018. Selanjutnya penulis memilih penelitian bidang logam sebagai topik skripsi di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung dengan judul “Pengaruh Kadar dan Perolehan Nikel Hasil Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit Kadar Rendah dengan Aditif Natrium Sulfida dan Reduktor Antrasit dalam

Produksi Feronikel” dan melakukan penelitian di Laboratorium Analisis Kimia dan Laboratorium Heat Treatment BPTM-LIPI Tanjung Bintang.

MOTTO

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”
(QS. Asy-Syarh:5-6)

“Ketika seorang anak adam meninggal, semua amalannya terputus kecuali tiga hal;sedekah jariyah, ilmu yang bermanfaat, serta anak saleh yang selalu mendoakannya”
(HR. Muslim)

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala
kupersembahkan karya ini untuk orang-orang
yang kucintai dan kusayangi

Almarhum Ayahandaku Turiman dan Ibundaku Tarmiyati

Kedua orang tuaku yang selalu mendo'akanku,
Mendidikku dan menyayangiku

Keluargaku

Para Sahabat dan Teman Seperjuangan

Terimakasih atas kebaikan dan kebersamaan
yang telah kita lalui

dan

Universitas Lampung

Almamater tercinta

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala, yang telah memberikan kesehatan, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Peningkatan Kadar dan Perolehan Nikel Hasil Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit Kadar Rendah dengan Aditif Natrium Sulfida dan Reduktor Antrasit dalam Produksi Feronikel”**. Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana dan melatih mahasiswa untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua. Aamiin.

Bandar Lampung, September 2019

Penulis

Riska Nadia Tirmayani

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, karena atas karunia-Nya penulis masih diberikan kesempatan menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah banyak memberikan do'a, motivasi, bimbingan dan dukungan terutama kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Turiman dan Ibu Tarmiyati yang tidak pernah berhenti mendo'akan dan memberikan dukungan kepada penulis.
2. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si., selaku Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan nasehat selama perkuliahan dan dalam menyelesaikan skripsi ini dari awal sampai akhir penulisan.
3. Bapak Achmad Shofi, S.T., M.T., selaku Pembimbing II yang senantiasa membimbing dalam melakukan penelitian dan menyelesaikan skripsi ini dari awal sampai akhir penulisan.
4. Ibu Dr. Yanti Yulianti, M.Si., selaku Penguji yang telah memberikan kritik dan saran selama penulisan skripsi.
5. Ibu Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc., selaku Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan dan nasehat selama perkuliahan.
6. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung

7. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., selaku Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
8. Bapak Drs. Suratman M.Sc., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
9. Bapak Driszal Fryantoni, M.Eng.Sc., selaku Kepala Balai Pengolahan Teknologi Mineral – LIPI yang telah memberikan izin penelitian serta memberikan fasilitas selama penulis melakukan penelitian.
10. Bapak Fajar Nurjaman, S.T., M.T., selaku Peneliti di BPTM - LIPI yang senantiasa membimbing dan memberikan masukan-masukan serta nasehat untuk menyelesaikan skripsi ini.
11. Seluruh staf dan karyawan di BPTM - LIPI atas segala bantuannya.
12. Seluruh staf dan karyawan di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung atas segala bantuannya.
13. Bapak dan Ibu Dosen di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah banyak membekali ilmu bagi penulis selama perkuliahan.
14. Rekan Penelitian yang selalu mendukung dan membantu satu sama lain: Ami, Eli, Fida dan lain-lain yang tidak bisa disebutkan satu per satu.
15. Teman-teman Fisika angkatan 2014 yang selama ini memberikan semangat. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan nikmat iman dan sehat kepada kita semua, Aamiin.

Bandar Lampung, September 2019

Riska Nadia Tirmayani

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
MOTTO	ix
HALAMAN PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4

1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	4

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bijih Nikel.....	6
2.2 Pengolahan Bijih Nikel Laterit	8
2.3 Pengaruh Temperatur Reduksi.....	11
2.4 Pengaruh Zat Aditif Terhadap Reduksi Bijih Nikel Limonit.....	13
2.5 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	14
2.6 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	18
2.7 SEM-EDX.....	21

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	19
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	19
3.3 Prosedur Penelitian.....	25
3.4 Diagram Alir Penelitian	29

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Bahan Baku Bijih Nikel Laterit.....	30
4.2 Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit dengan Aditif 10% Na ₂ S.....	43

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	71

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Profil Nikel Laterit pada Kerak Bumi	7
Gambar 2.2 Diagram Alir Sederhana Ekstraksi Nikel Secara Komersil dari Bijih Nikel Laterit	9
Gambar 2.3 Diagram Biner Fe-S	12
Gambar 2.4 Evolusi Partikel Fe-Ni dan FeS Setelah Proses Reduksi dengan 20% wt Na ₂ S Waktu 60 Menit pada Temperatur Reduksi (a) 700 °C, (b) 800 °C, (c) 900 °C, (d) 1000 °C, (e) 1100 °C dan (f) 1200 °C	13
Gambar 2.5 Skematik XRF	16
Gambar 2.6 Skema Kulit Atom	17
Gambar 2.7 Skematik Hukum Bragg	19
Gambar 2.8 Skema Difraksi Sinar X	20
Gambar 2.9 Urutan Operasi Sistem SEM-EDX	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 4.1 Analisis XRD Bijih Nikel Laterit	32
Gambar 4.2 (a) SEM Image dan Bijih Nikel Laterit Sebelum di Reduksi, (b) Karbon, (c) Oksigen, (d) Magnesium, (e) Alumunium, (f) Silikon, (g) Khrom, (h) Besi, (i) Nikel (j) Tembaga	33

Gambar 4.3 Pengaruh Temperatur Terhadap Perubahan Fasa pada Bijih Nikel Hasil Reduksi dengan Aditif pada Waktu Reduksi 90 Menit dan Reduktor 5% Berat.....	37
Gambar 4.4 Hasil SEM Bijih Nikel Setelah Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Waktu Reduksi 90 Menit dan Reduktor 5% Berat.....	40
Gambar 4.5 Hasil SEM Bijih Nikel Setelah Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Waktu Reduksi 90 Menit dan Reduktor 5% Berat.....	41
Gambar 4.6 Hasil SEM Bijih Nikel Setelah Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Waktu Reduksi 90 Menit dan Reduktor 5% Berat.....	43
Gambar 4.7 Hasil SEM Bijih Nikel Setelah Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Waktu Reduksi 90 Menit dan Reduktor 5% Berat.....	44
Gambar 4.8 Hasil SEM Bijih Nikel Setelah Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Waktu Reduksi 90 Menit dan Reduktor 5% Berat.....	46
Gambar 4.9 Pengaruh Waktu Tahan Reduksi Terhadap Perubahan Fasa Bijih Hasil Reduksi dengan 10% Na ₂ S pada Temperatur 1150 °C dan Reduktor 5% Berat.....	49
Gambar 4.10 Struktur Mikro Bijih Hasil Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Temperatur 1150 °C, Reduktor 5% Berat dan Variasi Waktu Tahan	51
Gambar 4.11 Hasil SEM Bijih Nikel Setelah Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Temperatur 1150 °C, Reduktor 5% Berat.....	52
Gambar 4.12 Hasil Pengamatan SEM pada Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit, Aditif 10% Na ₂ S dan Reduktor 5% Berat	53

Gambar 4.13 Hasil Pengamatan SEM pada Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 90 Menit, Aditif 10% Na ₂ S dan Reduktor 5% Berat	55
Gambar 4.14 Hasil Pengamatan SEM pada Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 120 Menit, Aditif 10% Na ₂ S dan Reduktor 5% Berat	57
Gambar 4.15 Pengaruh Jumlah Reduktor Terhadap Perubahan Fasa Biji Hasil Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Temperatur 1150 °C dan Waktu Tahan 60 Menit	61
Gambar 4.16 Struktur Mikro Biji Hasil Reduksi dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit dan Variasi Jumlah Reduktor	63
Gambar 4.17 Hasil SEM Biji Nikel Setelah Reduksi dengan Aditif Na ₂ S pada Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit dan Variasi Jumlah Reduktor	64
Gambar 4.18 Hasil Pengamatan SEM pada Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit, Aditif 10% Na ₂ S dan Reduktor 5% Berat	65
Gambar 4.19 Hasil Pengamatan SEM pada Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit, Aditif 10% Na ₂ S dan Reduktor 10% Berat	67
Gambar 4.20 Hasil Pengamatan SEM pada Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit, Aditif 10% Na ₂ S dan Reduktor 15% Berat	69

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Bijih Nikel Laterit.....	31
Tabel 4.2 Perhitungan <i>Rietveld Refinement</i> Bijih Nikel Laterit.....	32
Tabel 4.3 Pengaruh Temperatur Reduksi pada Konsentrat dengan Aditif 10 Na ₂ S pada Waktu Tahan Reduksi 60 Menit dan Reduktor 5% Berat Terhadap Kadar Ni dan Fe serta <i>Recovery</i> Ni dan Fe	34
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan <i>Rietveld Refinement</i> Senyawa Hasil Reduksi dengan Aditif (Variasi Temperatur).....	39
Tabel 4.5 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 950 °C	43
Tabel 4.6 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1050 °C	45
Tabel 4.7 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1150 °C	47
Tabel 4.8 Pengaruh Waktu Tahan pada Konsentrat dengan Aditif 10% Na ₂ S pada Temperatur 1150 °C dan Reduktor 5% Berat Terhadap Kadar Ni dan Fe serta <i>Recovery</i> Ni dan Fe	48
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan <i>Rietveld Refinement</i> Senyawa Hasil Reduksi dengan Aditif (Variasi Waktu Tahan).....	50
Tabel 4.10 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit	54
Tabel 4.11 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 90 Menit	56

Tabel 4.12 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1150 oC dengan Waktu Tahan 120 Menit.....	58
Tabel 4.13 Pengaruh Variasi Reduktor pada Konsentrat dengan Aditif 10 Na ₂ S Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 120 Menit.....	59
Tabel 4.14 Hasil Perhitungan <i>Rietveld Refinement</i> Senyawa Hasil Reduksi dengan Aditif (Variasi Reduktor)	63
Tabel 4.15 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit untuk Variasi Reduktor 5%	66
Tabel 4.16 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit untuk Variasi Reduktor 10%	68
Tabel 4.17 Hasil Berat Unsur Spektrum EDX Temperatur 1150 °C dengan Waktu Tahan 60 Menit untuk Variasi Reduktor 15%	70

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Logam atau yang sering disebut metal adalah sebuah material yang berupa unsur, senyawa maupun paduan yang biasanya keras, tidak tembus cahaya, berkilau dan memiliki konduktivitas listrik yang baik. Selain memiliki konduktivitas listrik yang baik, konduktivitas termal tinggi logam juga memiliki densitas yang tinggi pula, salah satu contoh logam ialah nikel.

Nikel merupakan salah satu jenis unsur kimia yang berbentuk metal dan biasanya ditambang di daerah-daerah tertentu. Nikel sendiri memiliki nomor atom 28 yang saat ini dalam tabel periodik dilambangkan dengan Ni. Walaupun merupakan salah satu unsur metal, namun nikel asli yang baru ditambang memiliki sifat lembek dan dapat dibentuk. Nikel adalah unsur paduan utama dari *stainless steel* dan mengalami pertumbuhan yang sangat cepat seiringan dengan peningkatan permintaan *stainless steel*. Saat ini lebih dari 65% nikel digunakan dalam industri *stainless steel*, dan sekitar 12% digunakan dalam industri manufaktur *super alloy* atau *nonferrous alloy* (Moskalyk *et al.*, 2011). Bijih nikel laterit dibagi secara kimia dan fisik menjadi dua jenis yang berbeda yaitu, saprolitik (silikat / hidrosilikat) dan limonitik (oksida) bijih (Rhamdhani *et al.*, 2009).

Berdasarkan data statistik dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2018, menyebutkan bahwa hingga saat ini terdapat 10 smelter nikel beroperasi dengan total produksi 1.468.596 ton/tahun. (Badan Geologi Kementerian ESDM, 2015). Sumber daya bijih nikel paling banyak terdapat di provinsi Maluku Utara sebanyak 457 juta ton dengan total keseluruhan sumber daya sebesar 1,412 juta ton. Sedangkan total keseluruhan cadangan bijih nikel sebesar 485 juta ton dengan perhitungan logam sebesar 7,5 ton (Rochani and saleh, 2013).

Berdasarkan Peraturan Kementerian ESDM No. 5 tahun 2017 tentang peningkatan nilai tambah mineral melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian didalam negeri. Berdasarkan ketentuan tersebut, pemilik tambang diwajibkan melakukan pengolahan terhadap produk tambang yang akan diekspor dengan minimal kadar nikel yang diekspor harus melebihi 70% untuk nikel matte 8% untuk FeNi dan 4% untuk nikel *pig iron* (Kementerian ESDM, 2017).

Berdasarkan bursa London Metal Exchange (LME) harga nikel terus mengalami penurunan. Sejak 5 Februari 2019, harga nikel mencapai US \$12.800 per ton dan terus mengalami penurunan hingga 15 Februari 2019 tetapi setelah itu mengalami kenaikan harga sampai dengan 5 Maret 2019. Rata-rata harga nikel di bulan Maret adalah US \$13.445 per ton (The London Metal Exchange, 2017). Dengan tantangan harga nikel yang terus menurun, pengembangan teknologi pengolahan nikel yang tetap efektif dan efisien perlu dilakukan. Teknik pengolahan bijih nikel menjadi feronikel yang dianggap tepat untuk dikembangkan adalah reduksi selektif. Beberapa penelitian sebelumnya telah melakukan peningkatan kadar dari nikel bijih laterit dengan metode reduksi selektif dengan penambahan aditif

seperti elemental sulfur, natrium sulfat, natrium karbonat, natrium klorida dan pirit. Reduksi selektif dilakukan pada temperatur 800-1200 °C untuk membentuk feronikel yang kemudian dapat dipisahkan dari mineral pengganggu dengan separasi magnetik (Zhou, 2016).

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki deposit laterit yang cukup tinggi, khususnya pulau Sulawesi, sehingga Indonesia memiliki bahan baku yang cukup untuk memproduksi feronikel. Tujuan dari skripsi ini adalah mengetahui pengaruh penambahan aditif Na_2S dan reduktor antrasit terhadap peningkatan kadar dan perolehan nikel dan besi yang terbentuk (nilai % *recovery* Ni dan Fe). Dari bijih laterit setelah dilakukan reaksi karbotermik, serta mengetahui variabel aditif Na_2S dan reduktor antrasit yang tepat antara sehingga dihasilkan feronikel yang optimum. Dalam studi saat ini, mengekstraksi konsentrat feronikel dari nikel bijih laterit dilakukan menggunakan reduksi selektif dan proses pemisahan dengan magnet, dengan penambahan aditif Na_2S . Fase dan transformasi mikro dari bijih laterit nikel dalam reduksi proses diselidiki menggunakan *X-ray Diffraction Analysis* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* dengan *X-ray Energy Dispersive Spectrum* (SEM-EDX). Dari penjelasan diatas maka kami ingin mengetahui potensi dari nikel laterit kadar rendah yang direduksi menggunakan reduktor antrasit sehingga diharapkan dapat menghasilkan konsentrat feronikel sebagai bahan baku pembuatan stainless steel.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana pengaruh temperatur reduksi terhadap kadar dan perolehan kembali besi nikel dalam feronikel?
- b. Bagaimana pengaruh dosis reduktor antrasit terhadap kadar dan perolehan kembali besi nikel dalam feronikel?
- c. Bagaimana pengaruh waktu tahan reduksi terhadap kadar dan perolehan kembali besi nikel dalam feronikel?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

- a. Mempelajari pengaruh temperatur reduksi terhadap kadar dan perolehan kembali besi nikel dalam feronikel.
- b. Mempelajari pengaruh dosis reduktor antrasit terhadap kadar dan perolehan kembali besi nikel dalam feronikel.
- c. Mempelajari pengaruh waktu tahan reduksi terhadap kadar dan perolehan kembali besi nikel dalam feronikel.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah :

- a. Bijih nikel laterit yang digunakan adalah bijih nikel laterit kadar rendah asal Torobulu, Sulawesi Tenggara dengan kadar nikel 50,5 Fe % dan 1,4 Ni %.
- b. Aditif yang ditambahkan adalah 10% Natrium Sulfida (Na_2S).
- c. Reduktor yang digunakan adalah antrasit yang berasal dari Sawahlunto, Sumatera Barat dengan variasi 5%, 10% dan 15%.

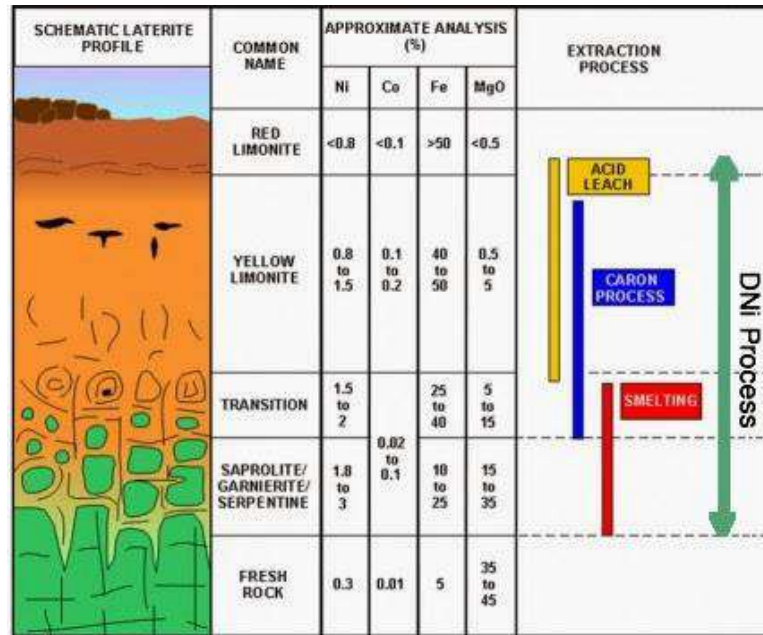
- d. Reduksi selektif bijih nikel laterit dilakukan dengan variasi temperatur 950°C, 1050°C, 1150°C dengan variasi waktu tahan (*holding time*) 60 menit, 90 menit dan 120 menit dengan menggunakan *muffle furnace*.
- e. Pengujian senyawa dari mineral yang terkandung sebelum dan sesudah proses reduksi dengan *X-ray Diffraction* (XRD).
- f. Analisa unsur yang terkandung pada bijih nikel hasil reduksi hasil magnetisasi (konsentrat dan tailing) dengan *X-ray Fluorescence* (XRF).
- g. Analisa struktur mikro dengan *Microscop Optic* dan *Scanning Electron Microscope* (SEM-EDX).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bijih Nikel

Nikel merupakan logam yang penting dan mempunyai banyak kegunaan. Penggunaan nikel sangat beragam, baik nikel primer (produk nikel yang berasal dari pemrosesan bijih nikel) maupun nikel sekunder (produk nikel yang berasal dari pemrosesan nikel primer). Sebanyak 48% nikel primer digunakan untuk produksi baja tahan karat (*stainless steel*) dan baja paduan, 39% digunakan untuk produksi paduan non logam (*nonferrous alloy*) dan *superalloy* dan 10% untuk elektroplating. Sedangkan untuk nikel sekunder, 30% digunakan untuk transportasi, 14% digunakan untuk produksi produk-produk metal, 12% untuk peralatan elektronik, 10% digunakan pada industri petroleum, dan masing-masing 8% digunakan pada industri kimia, konstruksi, peralatan rumah tangga dan industri mesin (Kuck, 2016).

Bijih nikel mempunyai 2 jenis, yaitu dalam bentuk sulfida dan oksida (laterit). Sedangkan untuk bijih nikel laterit sendiri dibagi menjadi 2 tipe, yaitu limonit dan saprolit. Bijih nikel tipe limonit merupakan bijih nikel kadar rendah, dengan kandungan nikelnya berkisar antara 0,8 sampai dengan 1,5% wt, sedangkan bijih nikel tipe saprolit adalah bijih nikel dengan kadar tinggi, yaitu mencapai 2 sampai 3% wt.



Gambar 2.1 Profil nikel laterit pada kerak bumi (Elias, 2002)

Mineral laterit sendiri jika dilihat dari profilnya pada Gambar 2.1 memiliki kandungan logam yang berbeda-beda. Mineral laterit terdiri dari *Red* Limonit, *Yellow* Limonit, Saprolit, Garnierit, dan Serpentin. Bijih saprolit, garnierit, serpentin yang terdapat pada Gambar 2.1 memiliki kandungan nikel terbesar mencapai 3% wt serta kandungan Fe bisa mencapai lebih dari 40% wt pada bijih limonit. *Red* limonit dan *yellow* limonit umumnya dapat diekstraksi menggunakan *leaching* asam, sedangkan saprolite lebih umum diekstraksi menggunakan proses pirometalurgi.

Secara kimiawi zona limonit umumnya ditentukan atas unsur-unsur yang tidak mudah larut (*residual*) seperti Fe, Al, Cr, Ti, Mn dan Co, akan tetapi dalam hal ini unsur yang paling sering dipakai adalah Fe karena biasanya berasosiasi dengan mineral utama yang dijumpai pada zona limonit. Pada zona limonit unsur Mg dijumpai dalam jumlah kecil karena Mg biasanya berasosiasi dengan mineral

olivine, piroksen dan serpentin yang tidak dijumpai di zona ini, sedangkan unsur Ni biasanya dijumpai dalam jumlah yang tidak terlalu tinggi.

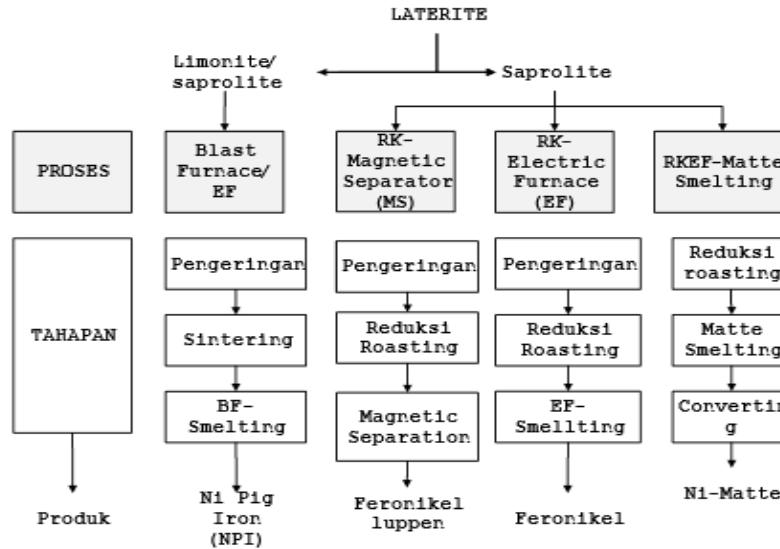
2.2 Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Secara garis besar, proses ekstraksi nikel laterit dikategorikan menjadi dua, yaitu hidrometalurgi dan pirometalurgi. Pada pemrosesan bijih laterit, proses pirometalurgi umumnya dilakukan untuk mereduksi saprolit, sedangkan proses hidrometalurgi umumnya dilakukan untuk mereduksi limonit (Habashi, 1997).

Proses pirometalurgi merupakan teknik ekstraksi logam paling tua, dimana logam diolah dan diekstraksi menggunakan energi panas yang sangat tinggi. Energi panas tersebut diperoleh dari *furnace* berbahan bakar batu bara (kokas) yang sekaligus berperan sebagai reduktor. Suhu yang umum dioperasikan pada proses pirometalurgi berkisar pada 500-1600°C. Proses pirometalurgi ini melibatkan proses pengeringan (*drying*), pemanggangan/kalsinasi (*roasting/calcing*), peleburan (*smelting*) dan pemurnian (*refining*) untuk menghasilkan produk berupa *ferro-nickel* (FeNi), *nickel matte* dan *nickel pig iron* (NPI).

Penentuan metode peleburan (*smelting*) dipengaruhi oleh rasio SiO₂ dan MgO pada bijih laterit. Bijih dengan titik leleh slag rendah dan memiliki rasio SiO₂/MgO pada kisaran 1,8-2,2 cenderung menghasilkan *Nickel sulfide matte*. Sedangkan bijih yang memiliki titik leleh slag yang tinggi dan rasio SiO₂/MgO <2 atau >2,5 lebih sesuai menghasilkan *ferronickel*. Untuk bijih yang memiliki rasio SiO/MgO antara 2,3-2,5 memiliki sifat korosif pada dinding furnace dan membutuhkan modifikasi lebih lanjut sebelum dilakukan proses peleburan (*smelting*) agar bahan refraktori pada *furnace* tidak ikut melebur dan larut dalam slag. Selain ditentukan oleh rasio SiO₂/MgO, penentuan metode peleburan

(*smelting*) juga ditentukan oleh Ni *grade*, rasio Fe/Ni dan rasio Ni/Co (Oxley, 2013).



Gambar 2.2 Diagram alir sederhana ekstraksi nikel secara komersil dari bijih nikel laterit (Iwan, 2016).

Proses pirometalurgi secara umum merupakan proses ekstraksi logam dengan produksi paling banyak. Namun, proses ini menghabiskan banyak energi dan menghasilkan gas polusi yang berlimpah. Sedangkan metoda hidrometalurgi digunakan untuk pengolahan bijih nikel melalui pelindian. Prinsip proses hidrometalurgi adalah pelindian atau melarutkan logam-logam yang terdapat dalam bijih nikel seperti nikel dan cobalt menggunakan reagen-reagen kimia tanpa terjadinya pelarutan logam lain yang tidak diinginkan seperti logam besi. Untuk mengendapkan logam tertentu dari hasil pelindian kemudian dilakukanlah perolehan tersebut. Diharapkan agar konsentrasi logam tertentu dapat ditingkatkan hingga level tertentu dan konsentrasi pengotornya dapat diminimalkan sehingga proses pada tahap selanjutnya dapat berlangsung dengan efisien. Pada beberapa proses, saprolit, juga dapat diolah dengan menggunakan metode ini. Terdapat beberapa tipe proses hidrometalurgi untuk mengolah bijih nikel laterit yaitu

meliputi *high pressure acid leaching* (HPAL), *atmospheric acid leaching* (AL), *enhanced pressure acid leaching* (EPAL), *heap leaching* (HL), and *sulphation atmospheric leaching* (SAL) (Habashi, 1997).

Metode hidrometalurgi memiliki persen perolehan logam yang lebih besar (lebih efektif) dibanding proses lainnya. Hanya saja, seluruh metode ini membutuhkan asam sulfat dalam jumlah besar. Kebutuhan asam sulfat ini tidak hanya menaikkan biaya untuk pembuatan dan operasi pabrik asam sulfat tetapi juga kurang ramah lingkungan karena asam anorganik yang digunakan dapat berdampak buruk dan senyawa-senyawa sulfat dalam limbah cair sulit untuk terdegradasi secara alamiah di alam. Selain proses pirometalurgi dan hidrometalurgi, terdapat pula metode pengolahan nikel yang merupakan gabungan dari keduanya, yaitu proses *caron*. Proses *caron* dimulai dengan pemanggangan mineral logam kering pada suhu tinggi kira-kira 850 °C kemudian diikuti dengan pelindian pada larutan ammonia (NH₃).

Namun belakangan proses *caron* mulai banyak ditinggalkan karena proses ini membutuhkan energi yang tinggi akibat adanya pemanggangan dan kebutuhan pengeringan mineral di awal proses. Meskipun lebih ramah lingkungan daripada metode HPAL namun biaya investasinya lebih mahal. Jika persen perolehan logam berharga dari mineral asalnya dengan metode HPAL mencapai 95% Nikel dan 90% Kobalt, perolehan nikel dan kobalt dari proses *caron* lebih rendah.

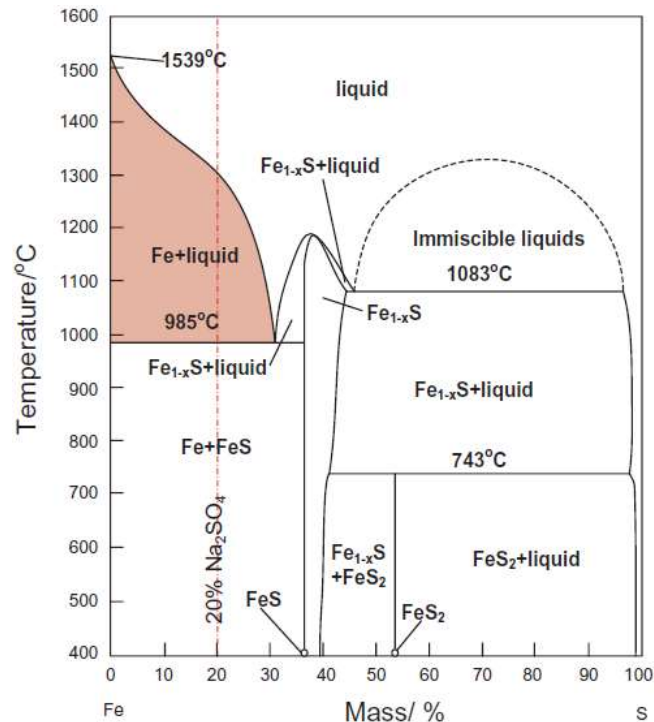
2.3 Pengaruh Temperatur Reduksi

Kenaikan temperatur juga akan mempengaruhi proses reduksi besi oksida menjadi bentuk logam besi (Zhu *et al.*, 2012). Kehadiran besi dalam bentuk logam akan mengurangi nilai *recovery* dan *grade* feronikel yang dihasilkan (Pickles,

Forster and Elliott, 2014). Secara kinetika, kenaikan temperatur dapat meningkatkan derajat metalisasi baik pada nikel maupun besi (Setiawan *et al.*, 2014). Selama proses reduksi, besar partikel feronikel yang dibentuk berbanding lurus dengan tingginya temperatur dan lamanya waktu reduksi (Tang *et al.*, 2014). Kenaikan temperatur juga akan meningkatkan ukuran partikel Fe-Ni yang terbentuk dan merubah bentuk morfologi partikel dari tidak beraturan menjadi *spherical* (Rao *et al.*, 2016).

Penelitian Rao *et al* pada tahun 2016, melakukan reduksi bijih nikel laterit dengan menambahkan Na_2SO_4 sebanyak 20% wt sebagai aditif selama 60 menit dan menggunakan karbon sebagai reduktor. Untuk menganalisa perubahan yang terjadi, digunakan diagram biner dari Fe-FeS. Diagram biner antara nikel dengan sulfida tidak digunakan karena rasio sulfidasi pada Ni sangat kecil dan kandungan Ni di dalam bijih yang cukup sangatsedikit (Rao *et al.*, 2016). Pada Gambar 2.3 memperlihatkan diagram biner yang dimaksud.

Dari Gambar 2.3 terlihat bahwa terdapat kondisi eutektik pada temperatur sekitar 985°C . Dengan mengasumsikan bahwa hanya logam Fe dan FeS yang merupakan fasa besi yang terdapat di dalam *pellet* yang direduksi, rasio massa dari S dan Fe hasil perhitungan adalah 20,4%. Garis putus-putus merah menunjukkan komposisi tersebut (Rao *et al.*, 2016).

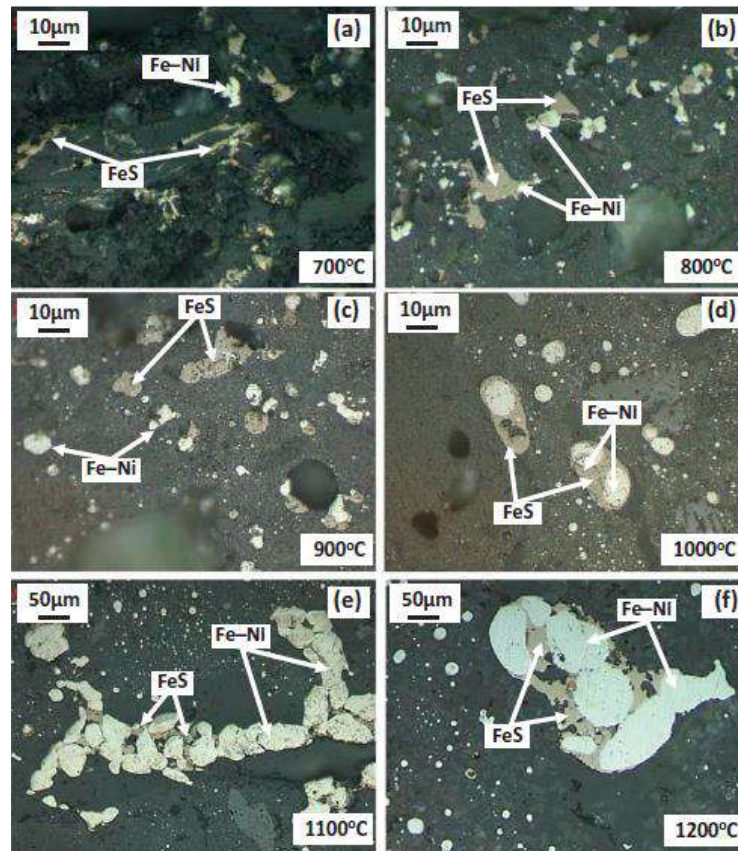


Gambar 2.3 Diagram Biner Fe-S (Rao *et al.*, 2016)

Dilihat dari diagram biner Fe-S, ketika temperatur reduksi yang digunakan lebih tinggi dari temperatur eutktik akan muncul lelehan *iron-saturated* (ditandai dengan zona berwarna merah muda pada diagram). Fe akan mengendap pada butiran Fe yang sudah ada selama solidifikasi, diikuti oleh presipitasi FeS sesuai mekanisme transformasi eutektoid. Kemudian, struktur logam berlapis FeS akan hadir fasa cair lebih (Rao *et al.*, 2016).

Selain itu, fenomena ini menjelaskan fakta bahwa fasa cair terbentuk pada kisaran temperatur 900-1000°C (Gambar 2.3) dimana temperatur eutektik (985°C) berada pada kisaran tersebut. Pembentukan eutektik Fe-FeS menurunkan karakteristik temperatur fusi campuran Na₂SO₄-laterit. Temperatur pengujian yang lebih tinggi akan menghasilkan banyak. Karena laju perpindahan massa dalam cairan jauh lebih besar dari pada fasa padat, dimana pembentukan fasa cair dapat

mempercepat perpindahan massa spesies logam dan akhirnya terjadi pertumbuhan butir Fe-Ni (Rao *et al.*, 2016).



Gambar 2.4 Evolusi partikel Fe-Ni dan FeS setelah proses reduksi dengan 20% wt Na_2SO_4 waktu 60 menit (Rao *et al.*, 2016)

2.3 Pengaruh Zat Aditif Terhadap Reduksi Bijih Nikel Limonit

Pada penelitian Rao, *et al* (Rao *et al.*, 2016a) menjelaskan pengaruh penambahan sulfur terhadap pembentukan partikel feronikel selama proses reduksi bijih nikel laterit. Selama proses reduksi bijih nikel saprolit dengan penambahan sulfur, ada tiga fasa utama akan terbentuk pada saat proses reduksi bijih nikel saprolit dengan penambahan sulfur yaitu logam oksida, logam sulfida dan feronikel dengan perkiraan fasa yang terjadi berupa Fe-O-S. Selama proses reduksi berlangsung, interaksi FeS dan Fe akan terbentuk sebagai pemicu pertumbuhan partikel

feronikel. Pada sistem biner FeS menunjukkan bahwa titik eutektik Fe-FeS berada pada temperatur 985°C, hal ini memungkinkan terbentuknya fasa cair pada temperatur rendah. Temperatur reduksi lebih tinggi dari eutektik, maka lelehan jenuh besi akan ada pada permukaan antar muka feronikel dan logam sulfida, sehingga terjadinya aglomerasi (Rao *et al.*, 2016).

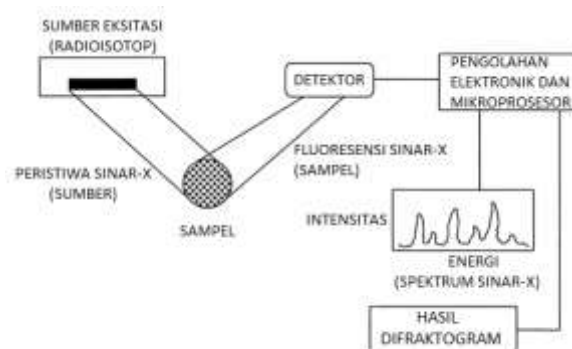
Senyawa lain yang dapat dijadikan sebagai aditif adalah sodium karbonat (Na_2CO_3) (Samadhi, 2017). Penambahan sodium karbonat dapat memperbesar ukuran partikel hasil reduksi dengan menghambat terbentuknya fasa fayalit (Fe_2SiO_4) (Jiang *et al.*, 2013). Selain sodium karbonat dan senyawa sulfur, senyawa yang juga dapat digunakan sebagai aditif tambahan untuk meningkatkan hasil ekstraksi logam nikel adalah garam klorin (Matsuura, 2008). Karakteristik klorida yang memiliki titik lebur rendah dan mudah menguap menjadikan senyawa klorida banyak digunakan untuk mengekstraksi logam dari bijih dengan menggunakan metode klorinasi dan penguapan (Matsuura, 2008).

2.4 X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF adalah alat uji yang digunakan untuk menganalisis unsur yang terkandung dalam bahan secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan yang dianalisis, yang ditunjukkan oleh adanya spektrum unsur pada energi sinar-X karakteristiknya. Sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi jumlah unsur yang terkandung dalam bahan yang ditunjukkan oleh ketinggian puncak spektrum. Analisis menggunakan XRF dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan sinar-X karakteristik yang terjadi dari peristiwa efek fotolistrik. Efek fotolistrik

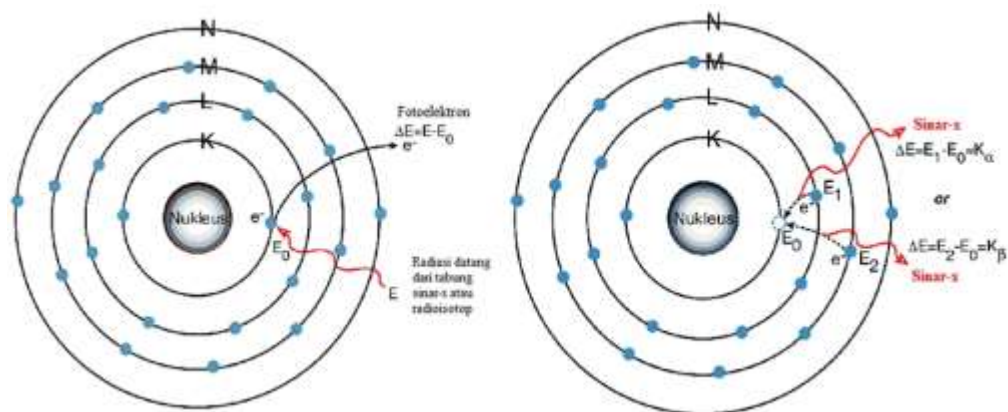
terjadi karena elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar berenergi tinggi (radiasi gamma, sinar-X). Bila energi sinar tersebut lebih tinggi dari pada energi ikat elektron dalam orbit K, L atau M atom target, maka elektron atom target akan keluar dari orbitnya. Dengan demikian atom target akan mengalami kekosongan elektron. Kekosongan elektron ini akan diisi oleh elektron dari orbital yang lebih luar diikuti pelepasan energi yang berupa sinar-X. Jika elektron kulit yang diganti adalah elektron kulit K, maka emisi sinar-X dikenal sebagai sinar-X deret K. Demikian pula, transisi kulit L menghasilkan sinar-X deret L. Garis-garis spektrum sinar-X dikelompokkan secara seri (K, L, M). Semua garis dalam rangkaian hasil transisi elektron dari berbagai tingkatan ke kulit yang sama. Sebagai contoh, transisi dari kulit L dan M ke kulit K menyediakan garis spektral yang masing-masing disebut $K\alpha$ dan $K\beta$. Spektrum sinar-X dihasilkan oleh semua elemen dalam sampel. Setiap elemen akan memiliki banyak garis karakteristik dalam spektrum, karena sinar-X yang berbeda akan dipancarkan untuk setiap jenis transisi orbital.

Adapun prinsip kerja XRF ditunjukkan pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Skematik XRF (Kalnicky and Singhvi, 2001)

Apabila sumber eksitasi digunakan untuk menyinari sampel dalam proses pemedaran. Kemudian fluoresensi sinar-X karakteristik dideteksi dan dianalisis. Seluruh proses dihubungkan dengan komputer yang menyediakan kontrol instrumen umum, pembuatan data, dan pengolahan. Beberapa teknik yang berbeda dapat digunakan untuk menginduksi fluoresensi dalam sampel dan untuk mendeteksi atau menganalisis sinar-X karakteristik yang dilepaskan oleh sampel. Sinar-X yang dihasilkan merupakan suatu gabungan spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu (*discreet*) yang berasal dari bahan sasaran yang tertumbuk elektron. Jenis spektrum *discreet* yang terjadi tergantung pada perpindahan elektron yang terjadi dalam atom bahan. Spektrum ini dikenal sebagai spektrum sinar-X karakteristik. Peristiwa tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Kalnicky dan Singhvi, 2001).



Gambar 2.6 Skema kulit atom (Kalnicky dan Singhvi, 2001)

Sinar-X dapat diproduksi di dalam sebuah wadah (tabung) keped udara dengan cara memanaskan filamen sehingga mengeksitasikan elektronnya yang kemudian diakselerasi (dipercepat) dengan listrik bertegangan tinggi sehingga elektron memiliki energi kinetik yang tinggi. Karena elektron bermuatan negatif, maka

elektron akan bergerak menuju sebuah plat logam yang diletakan pada bagian anoda yang bermuatan positif. Pada waktu mendekati inti atom, elektron ditarik mendekati inti atom yang bermuatan positif, sehingga lintasan elektron berbelok dan kecepatan elektron berkurang atau diperlambat.

Radiasi sinar-X dapat terjadi karena transisi elektron dari orbital yang memiliki tingkat energi lebih tinggi menuju orbital dengan tingkat energi yang lebih rendah dengan melalui tahapan yaitu ketika sebuah elektron yang terletak di kulit bagian dalam terpental ke luar atom karena adanya berkas cahaya atau berkas elektron dari luar. Kekosongan elektron ini selanjutnya digantikan oleh elektron dari kulit yang lebih luar. Sebagai contoh pengisian elektron kulit K oleh kulit L akan menghasilkan selisih energi yang akan memancarkan $K\alpha$ sinar-X dengan persamaan :

$$E_{X-ray} = E_K - E_L \quad (5)$$

dengan: E_{X-ray} = Energi kinetik sinar-X

E_K = Energi kinetik elektron kulit K

E_L = Energi ikat elektron kulit L

XRF adalah alat uji yang digunakan untuk menganalisis unsur yang terkandung dalam bahan secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan yang dianalisis, yang ditunjukkan oleh adanya spektrum unsur pada energi sinar-X karakteristiknya. Sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi jumlah unsur yang terkandung dalam bahan yang ditunjukkan oleh ketinggian puncak spectrum (Kalnicky dan Singhvi, 2001).

2.6 X-Ray Diffraction (XRD)

Sinar-X adalah gelombang elektromagnetik yang dihasilkan dari tumbukan elektron berkecepatan tinggi dengan logam sebagai sasarnya. Oleh karena itu, suatu tabung sinar-X harus mempunyai sumber elektron, voltase tinggi dan logam sasaran. XRD dilengkapi dengan beberapa komponen seperti tabung sinar-X, monokromator, detektor dan lain-lain. Sinar-X yang menembak sampel, kemudian didifraksikan ke segala arah dengan memenuhi Hukum Bragg. Detektor bergerak dengan kecepatan sudut yang konstan untuk mendeteksi berkas sinar-X. Sampel serbuk atau padatan kristalin memiliki bidang-intensitas yang tersusun secara acak dengan berbagai kemungkinan orientasi, begitu pula partikel-partikel kristal yang terdapat di dalamnya. Setiap kumpulan intensitas tersebut memiliki beberapa sudut orientasi sudut tertentu, sehingga difraksi sinar-X memenuhi persamaan Hukum Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4)$$

dengan:

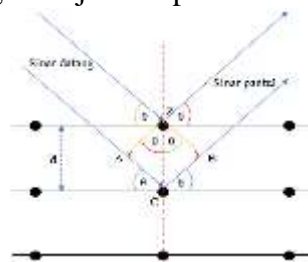
d = jarak antar bidang dalam kristal

θ = sudut difraksi

n = orde difraksi (0,1,2,3,.....)

λ = panjang gelombang

Skematik Hukum Bragg ditunjukkan pada Gambar 2.7

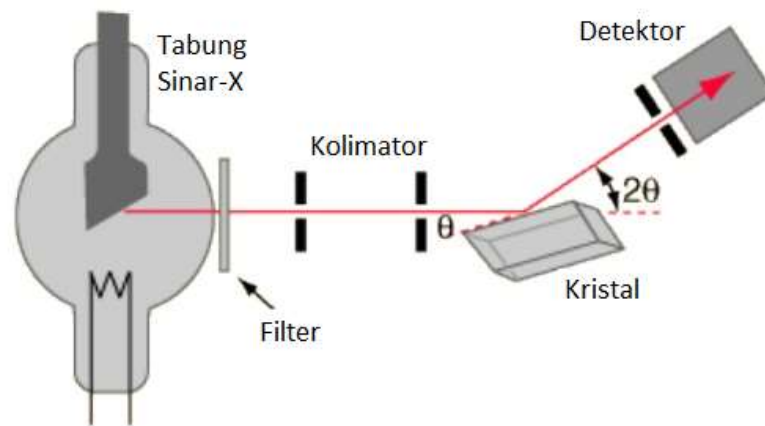


Gambar 2.7 Skematik Hukum Bragg (Kalnicky dan Singhvi, 2001)

Hukum Bragg merupakan perumusan matematik mengenai proses difraksi yang terjadi sebagai hasil interaksi antara sinar-X yang dipantulkan oleh material. Pantulan tersebut terjadi tanpa mengalami kehilangan energi sehingga menghasilkan pantulan elastis atau *elastic scattering*. Bragg menunjukkan bahwa bidang yang berisi atom-atom di dalam kristal akan memantulkan radiasi dengan cara yang sama persis dengan peristiwa pemantulan cahaya di bidang cermin.

XRD adalah metode karakterisasi yang digunakan untuk mengetahui senyawa kristal yang terbentuk. Teknik XRD dapat digunakan untuk menganalisis struktur kristal karena setiap unsur atau senyawa memiliki pola tertentu. Apabila dalam analisis ini pola difraksi unsur diketahui, maka unsur tersebut dapat ditentukan. Metode difraksi sinar-X merupakan metode analisis kualitatif yang sangat penting karena kristalinitas dari material pola difraksi serbuk yang karakteristik, oleh karena itu metode ini disebut juga metode sidik jari serbuk (*powder fingerprint method*). Penyebab utama yang menghasilkan bentuk pola-pola difraksi serbuk tersebut, yaitu ukuran dan bentuk dari setiap selnya serta nomor atom dan posisi atom-atom di dalam sel.

Adapun skema difraksi sinar-X ditunjukkan pada Gambar 2.8

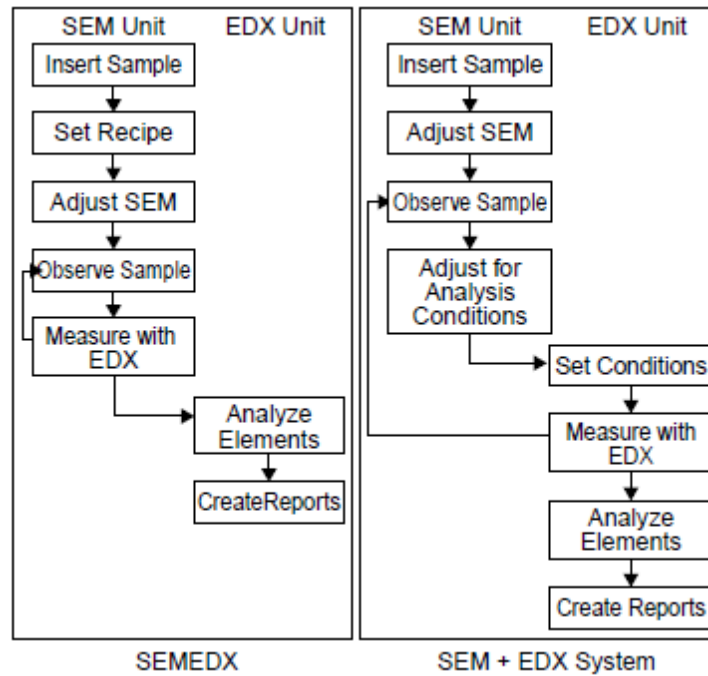


Gambar 2.8 Skema difraksi sinar-X (Kalnicky dan Singhvi, 2001)

2.7 SEM-EDX

SEM-EDX didesain dalam memudahkan operasi SEM untuk mengobservasi Gambar dengan baik, serta memudahkan operasi EDX untuk melakukan analisa komposisi di dalam komponen material. Agar dapat menghasilkan hasil yang akurat, analisis yang cepat, dan fungsi yang sesuai, maka perlu sistem harus diatur dalam keadaan optimum, baik dalam parameter SEM maupun EDX. Dalam sistem konvensional, SEM dan EDX merupakan unit yang tidak saling berhubungan. Pertama, sampel diamati melalui SEM sehingga menghasilkan Gambar dengan kondisi yang optimum, dan kemudian sampel diuji pada posisi yang sama agar mampu menerima deteksi sinar *X-Ray* selama analisis EDX. Berbeda pada sistem SEM-EDX, operasi cenderung lebih sederhana, dimana area sampel dianalisa dengan SEM menghasilkan Gambar mikrostruktur sampel, dan operasi dilanjutkan dengan menekan tombol “mulai pengukuran”, maka analisis EDX secara otomatis akan bekerja dan hasil pengukuran akan muncul di layar SEM. Dengan kata lain, seluruh operasi, meliputi pengukuran EDX, dapat dikontrol saat

melakukan analisis SEM. Gambar 2.9 menunjukkan urutan operasi SEM-EDX (Yurugi, *et. al.*, 2001).



Gambar 2.9 Urutan operasi sistem SEM-EDX (Yurugi, *et. al.*, 2001).

III. METODE PENELITIAN

Bijih nikel laterit tingkat rendah yang berasal dari Torobulu digunakan dalam penelitian ini. Pada tahap preparasi sampel komposisi kimia laterit dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) selain itu struktur nikel disintesis dianalisis dengan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) setelah melalui proses penggerusan dan lolos 100 *mesh*. Kemudian dilakukan proses pembuatan pellet, sampel yang telah lolos 100 *mesh* lalu melalui proses pengeringan dalam vakum pada 120°C dan dicampur dengan bahan aditif Na₂S 10% serta variasi reduktor 5%, 10% dan 15%. Sampel yang dipellet membentuk seperti bola-bola dengan ukuran diameter 10-15 mm. Tahap reduksi selektif dilakukan pada variasi temperatur reduksi sebesar 950°C, 1050°C dan 1150°C. Sedangkan variasi waktu tahannya sebesar 60 menit, 90 menit dan 120 menit. Sesaat setelah tahap pereduksian selesai sampel didinginkan dengan cepat (*quench*) dan dikarakterisasi dengan menggunakan XRF untuk melihat kadar Fe dan Ni, XRD untuk melihat perubahan senyawa hasil reduksi dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk melihat mikrostruktur dan morfologi. Tahap selanjutnya adalah penggerusan sampel hasil reduksi sampai ukuran lolos 200 *mesh* dan pemisahan dengan magnet ukuran 500 *gauss*. Pada tahap ini akan dilakukan pemisahan berdasarkan kuat tarik terhadap magnetnya, dimana bagian yang tertarik

magnet ukuran 500 *gauss*. Pada tahap ini akan dilakukan pemisahan berdasarkan kuat tarik terhadap magnetnya, dimana bagian yang tertarik oleh magnet disebut konsentrat dan bagian yang tidak tertarik oleh magnet disebut tailing. Masing-masing konsentrat dan tailing untuk selanjutnya akan dikarakterisasi dengan XRF untuk melihat kadar Fe dan Ni nya.

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November samapai dengan januari di Laboratorium Uji Kimia Balai Penelitian Teknologi Mineral-LIPI yang bertempat di Jl. Ir. Sutami Km. 15 Tanjung Bintang, Lampung Selatan. Sedangkan SEM-EDX dilakukan di Balai Penelitian Teknologi Bahan Alam LIPI Yogyakarta.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. *Muffle furnace*
2. *Crucible grafit*
3. Oven
4. *Shaker mill*
5. *Ball mill*
6. Timbangan
7. Ayakan
8. Gauss meter
9. Magnet
10. Mortar

11. *Beaker glass*
12. Labu *erlenmeyer*
13. Batang pengaduk
14. Kertas saring
15. Spatula
16. Mesin *polishing*
17. Mesin *X-Ray Fluorecence*
18. Mesin *X-Ray Diffraction*
19. *Microsop optic*
20. SEM EDX.

Bahan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bijih nikel laterit
2. Natrium sulfida (Na_2S)
3. Antrasit
4. Air (media quenching)
5. Resin dan binder

3.3 Prosedur Penelitian

a. Bahan baku

Bijih nikel laterit yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Torobulu, Sulawesi tenggara. Bijih tersebut diuji dengan XRF untuk mengetahui komposisi unsur dan pengujian XRD untuk mengetahui komposisi senyawa penyusunnya. Reduktor yang digunakan pada penelitian ini adalah batubara antrasit. Reduktor yang digunakan dilakukan penggerusan dengan *ball mill* dan diayak dengan ukuran 100 *mesh*. Bijih nikel dalam bentuk serbuk dan reduktor antrasit dalam bentuk serbuk.

b. Preparasi Sampel

Bijih nikel laterit, aditif natrium sulfida dalam bentuk serbuk dan reduktor batubara antrasit masing-masing ditimbang dengan timbangan sesuai wt % yang digunakan. Bahan yang digunakan dicampur hingga homogen. Sampel yang telah tercampur merata kemudian dilakukan *pelletizing* manual hingga membentuk pellet. Pellet yang telah dihasilkan kemudian dikeringkan dengan oven pada temperatur 110°C selama 4 jam.

c. Proses Reduksi Selektif

Sampel yang telah berbentuk pellet ditimbang sebanyak 60 gram dimasukkan kedalam *crucible grafit*, kemudian dilakukan proses reduksi didalam *muffle furnace*. Reduksi dilakukan dengan variasi waktu 60 menit, 90 menit dan 120 menit serta variasi temperatur 950°C, 1050°C dan 1150°C. Metode pendinginan yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan pendinginan cepat (*quenching*) dalam media air, kemudian melakukan proses pengeringan pada temperatur 120°C

selama 4 jam dalam oven yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air setelah dilakukan pendinginan cepat.

d. Separasi Magnetik

Hasil reduksi kemudian dilakukan penimbangan dan proses separasi magnetik yang akan menghasilkan konsentrat dan tailing. Proses magnetik dilakukan secara manual dengan metode basah. Menyiapkan empat buah *beaker glass* yang diisi air kemudian sampel hasil reduksi dimasukkan kedalam *beaker glass*, dilakukan pengadukan dan separasi magnetik secara seri dan dihasilkan konsentrat pada *beaker glass* ke empat sedangkan *beaker* pertama, kedua dan ketiga merupakan tailing. Komponen magnetik akan menempel pada alat separasi magnetik sedangkan partikel non magnetik tidak menempel pada magnet, sehingga didapatkan konsentrat dan tailing yang terpisah. Proses ini bertujuan untuk memisahkan konsentrat dan tailing secara menyeluruh dari hasil reduksi selektif yang dilakukan.

e. Pengujian XRF

Pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) ialah salah satu metode analisis tidak merusak yang digunakan untuk menganalisa unsur dalam bahan secara kualitatif dan kuantitatif. Pengujian ini dilakukan di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Lampung. Analisa XRF memanfaatkan pancaran radiasi sinar X. Proses preparasi sampel bijih nikel sebelum reduksi dan hasil magnetisasi dengan catatan sampel harus dengan keadaan bersih dan kering.

f. Pengujian XRD

Pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) bertujuan untuk mengetahui fasa dominan penyusun dari bijih nikel laterit dan sampel hasil selektif reduksi. Pengujian XRD untuk sampel awal bijih nikel laterit dan sampel hasil selektif reduksi dilakukan di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Lampung. Prinsip pengujian adalah dengan memancarkan elektron yang memiliki kecepatan tinggi dan kemudian menumbuk objek sehingga energi akan berubah menjadi energi panas dan pancaran sinar X. Proses preparasi sampel bijih nikel sebelum reduksi dan hasil magnetisasi dengan catatan sampel harus dengan keadaan bersih dan kering.

g. Pengujian Microscop Optic

Pengujian *Microscop Optic* dilakukan di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Lampung dengan melakukan preparasi sampel yang telah direduksi untuk di *mounting*. Proses *mounting* dilakukan dengan membuat resin dengan campuran hardener kemudian memasukkan kedalam paralon yang sudah dimasukkan sampel, setelah mengeras maka dilakukan polishing dengan ukuran (belum) *mesh*. Selanjutnya sampel yang sudah selesai dipreparasi siap untuk pengujian *Microscop Optic*.

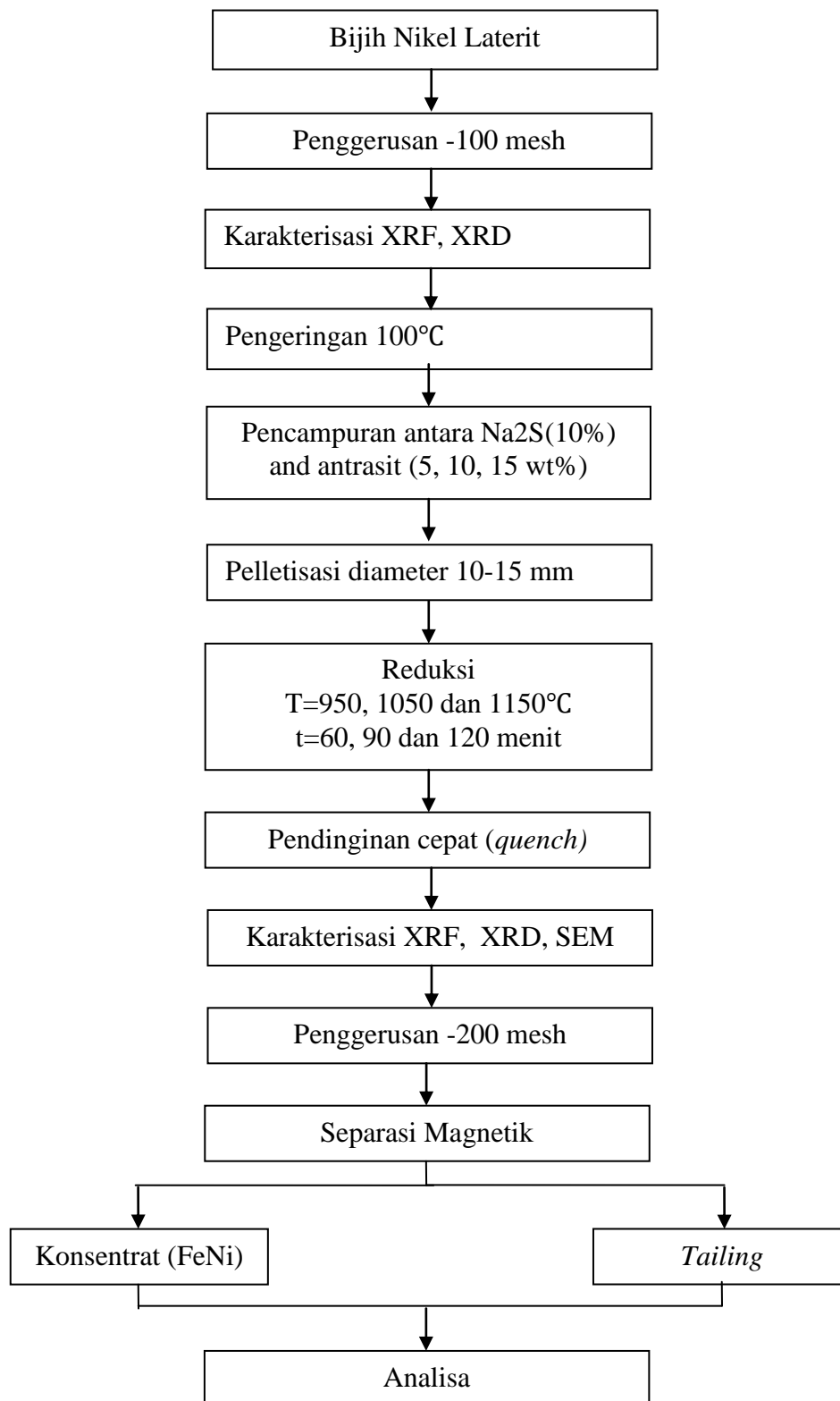
h. Pengujian SEM

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan EDX (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) dilakukan di Balai Penelitian Teknologi Bahan Alam LIPI Yogyakarta. Pengamatan dengan SEM EDX bertujuan untuk mengamati struktur mikro dengan resolusi yang lebih baik, selain itu juga untuk mengamati keberadaan fasa dengan lebih detail. Prinsip pengamatan SEM-EDX adalah

dengan penembakan *electron*. *Electron* yang ditembakkan ke sampel kemudian akan mengalami hamburan yang terdiri dari dua jenis yaitu elastis (*Backscattered Electron*) dan inelastic (*Scattered Electron*), sedangkan pengujian EDX berfungsi untuk mengetahui komposisi kimia atau keberadaan fasa pada titik-titik tertentu dengan lebih detail.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar, langkah kerja penelitian ini terbagi menjadi tiga bagian, preparasi sampel dari bijih nikel laterit dengan variasi reduktor, proses reduksi selektif dengan variasi suhu dan waktu tahan dan karakterisasi sampel.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Pada sampel dengan aditif 10% Na_2S , peningkatan temperatur reduksi menyebabkan kadar nikel meningkat. Pada temperatur 1150°C, kadar nikelnya sebesar 3,598% dengan perolehan 65,31%. Hal ini karena FeS semakin banyak terbentuk yang menyebabkan metalisasi besi berkurang sehingga kadar nikel semakin tinggi.
2. Pada sampel dengan aditif 10% Na_2S , sampel dengan waktu reduksi 90 menit menghasilkan kadar nikel tertinggi yaitu 3,598%. Hal ini karena intensitas dari fasa logam semakin meningkat sehingga berdampak pada meningkatnya kadar logam yang dihasilkan.
3. Pada sampel dengan aditif 10% Na_2SO_4 , peningkatan jumlah reduktor menyebabkan kadar nikel menurun karena penambahan karbon berlebih dapat meningkatkan reduksi oksida besi menjadi besi metalik. Sampel dengan reduktor 15% berat, menghasilkan kadar dan perolehan nikel terendah yaitu 2,653% dan 67,34%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan, maka didapat saran sebagai berikut:

1. Penggunaan jenis reduktor lain seperti lignit, gas CO atau reduktor lainnya.
2. Penggunaan jenis aditif lain seperti CaSO_4 , NaOH dan lainnya atau pencampuran dua/lebih jenis aditif.
3. Penggunaan kuat medan magnet yang berbeda untuk mempelajari efisiensi proses pemisahan magnetik.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggarda, D.Y. 2017. Studi Pengaruh Variasi Jenis Fluks dalam Proses Aglomerasi Bijih Nikel Laterit terhadap Kadar Ni dan Fe serta Morfologi Aglomerat sebagai Bahan Umpan Mini Blast Furnace. *Thesis*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Arifin, M., Widodo, S., dan Anshariah. 2015. Karakteristik Endapan Nikel Laterit pada Blok X PT. Bintang Delapan Mineral Kecamatan Bahodopi Kabupaten Morowali Provinsi Sulawesi Tengah. *Jurnal Geomine*. Vol. 01. Hal. 37-45.
- Barkas, J. 2010. *Drivers and risks for nickel demand*. 7th International China Nickel Conference. Shanghai.
- Brady, J.E. 1999. *Kimia Universitas Asas dan Struktur*. Jakarta: Binarupa Aksara
- Budevsky, D. 1979. *Foundation of Chemical Analysis*. London: Eliss Horwood.
- Cotton, W. 1989. *Kimia Anorganik Dasar*. UI-Press. Jakarta.
- Crawford, G.A. 1960. Segregation of Nickel in Laterites - The Falconbridge Experience. *Segregation Symposium*. Pp. 219-240.
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., and Davenport, W. G. 2011. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum - Group Metals*. Oxford: Elsevier.
- Dalvi, A.D., Bacon, W.G, and Osborne, R.C. 2004. The past and the future of nickel laterites. *PDAC 2004 International Convention*. Trade show & Investor Exchange. North Carolina USA.
- Diessel, C. F. K. 1992. Coal Facies and Depositional Environment. *Coal-Bearing Depositional System*. Pp. 161-264.
- Duke, J.M. 1990. Mineral Deposit Models: Nickel Sulfide Deposits Of The Kambalda Type. *Canadian Mineralogist*. Vol. 28. Pp. 379-388.

- Elliot, R., Pickles, C. A., and Forster, J. 2016. Thermodynamics of the Reduction Roasting of Nickeliferous Laterite Ores. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. Vol. 4. Pp. 320-346.
- Elliot, R., Pickles, C., and Peacey, J. 2017. Ferronickel Particle Formation During the Carbothermic Reduction of a Limonitic Laterite ore. *Minerals Engineering*. Vol. 100. Pp. 166-176.
- Fitiran, E.B., Massinai, M.A., dan Maria. 2011. Identifikasi Sebaran Nikel Laterit dan Volume Bijih Nikel Daerah Anoa menggunakan Korelasi data Bor. *Jurnal Geofisika*. Universitas Hasanuddin.
- Foster, J., Pickles, C.A., and Elliot, R. 2016. Microwave Carbothermic Reduction Roasting of Low Grade Nickeliferous Silicate Laterite Ore. *Minerals Engineering*. Vol. 88. Pp. 18-27.
- Harris, C., Peacey, J., and Pickles, C. 2011. Selective Sulphidation Of a Nickeliferous Lateritic Ore. *Minerals Engineering*. Vol. 24. Pp. 651-660.
- Henpristian, Y., Antoro, I.D., dan Oediyani, S. 2014. Pengaruh Waktu Reduksi dan Komposisi Pelet terhadap Persen Fe Metal dan Persen Fe Ni Spons dari Bijih Nikel. Vol. 29. ISSN. 126-3188-1205-214.
- Jenkin, S. 1995. Easy Estimation Methods for Discrete-Time Duration Models. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*. Vol. 57. No. 1.
- Jenkin, S., Addy, M., and Wade. 1988. The Mechanism of Action of Chlorhexidine. *Journal of Clinical Periodontology*. Vol. 15. No. 17.
- Jiang, M., Sun, T., Liu, Z., Kou, J., Liu, N., and Zhang, S. 2013. Mechanism of Sodium Sulfate in Promoting Selective Reduction of Nickel Laterite Ore During Reduction Roasting Process. *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 123. Pp. 32-38.
- Kartaman, M., Husna, M., dan Paid, A. 2013. Pengaruh Temperatur Terhadap Sifat Bahan Paduan Aluminium Feronikel. *Urania*. Vol. 19. No. 2. Hal. 63-118.
- Kawahara, M., Toguri, J.M., and Bergman, R.A. 1988. Reducibility of Laterite Ores. *Metall Trans*. Vol. 19. Pp. 181-186.
- Keenan, C. W. 1992. *Kimia untuk Universitas Jilid 2*. Erlangga : Jakarta.
- Kim, J., Dodbiba, G., Tanno, H., Okaya, K., Matsuo, S., and Fujita, T., 2010. Calcinations of Low-Grade Laterite for Concentration of Ni by Magnetic Separation. *Minerals Engineering*. Vol. 23. No. 4. Pp. 282-288.

- Kirk-Othmer. 1998. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 4th Edition Volume 1. John Willey & Sons Inc. USA.
- Kuck, P.H and Nickle, U.S. 2013. Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries*. <http://minerals.usgs.gov>.
- Kose, S. 2010. Hydrometallurgical Processing of Lateritic Nickel Ores. *Thesis. Metallurgical and Materials Engineering*. Pp.195.
- Kyle, J. 2010. *Nickel Laterit Processing Technologies-Where to Next*. Murdoch. University Repository.
- Lee, H.Y., Kim, S.G., and Oh, J.K. 2005. Electrochemical leaching of nickel from low-grade laterite. *Hydrometallurgy*. Vol. 77. Pp. 263 – 268.
- Li, B., Wang, H., and Wei, Y. 2011. The Reduction of Nickel From Low - Grade Nickel Laterite Ore Using a Solid - State Deoxidation Method. *Minerals Engineering*. Vol. 24. Hal. 1556-1562.
- Li, S. and Coley, K. S. 2000. Kinetics and Mechanism of Reduction Laterite Ore High in Serpentine. *The 39th Annual Conference of Metallurgists*. Pp 179-192.
- Liu, M., Xuwei. 2014. Novel Process of Ferronickel Nugget Production From Nickel laterite by Semi-molten State Reduction. *ISIJ International*. Vol. 54. No. 8. Pp. 1749-1754.
- Mudd, G. M. 2009. Nickel Sulfide Versus Laterite. The Hard Sustainability Challenge Remains, Proceeding of 48th Annual Conference of Metallurgists. *Canadian Metallurgical Society*. Sudbury, Ontario, Canada.
- Ningsih, S. 2012. Ekspolarasi Awal Nikel Laterit di Desa Lamuntoli. *Jurnal Ilmiah MTG*. Vol. 5. No. 2. Pp. 35-42.
- Norgate, T., Jahanshahi, S. 2011. Assesing the energy and greenhouse gas footprint of nickle laterite processing. *Mineral Engineering*. Vol. 24. Hal. 698-707.
- Nukdin, E. 2012. Geologi dan Studi Pengaruh Batuan Dasar Terhadap Deposit Nikel Laterit. *Jurnal Ilmiah MTG*. Vol. 5. No. 1.
- Prasetyo, A.B dan Puguh. 2011. Peningkatan Kadar Nikel (Ni) dan Besi (Fe) dari Bijih Nikel Laterit Kadar Rendah Jenis Saprolit Untuk Bahan Baku Nickel Containing Pig Iron (NCPII/NPI). *Majalah Metalurgi*. Vol. 26. No. 3. Pp. 123-130.
- Prasetyo, A.B., Firdiyono, dan Febriana, E. 2014. Optimasi Proses Reduksi Bijih Nikel Laterit Jenis Limonit Sebagai Bahan Baku NPI (Nickel Pig Iron). *Majalah Metalurgi*. Vol. 29. No. 1. Hal. 9-16.

- Pournaderi, S. 2014. Optimization of Ferronikel Reduction from Nickel Laterite Ores. *Thesis*. School of Natural and Science. Pp 195.
- Rahman, A., Djamaluddin, dan Bakri, H. 2015. Pemodelan Sumberdaya Nikel Laterit Pada Block C PT. Anugerah Harisma Barakah Kabaena Selatan Talaga Raya Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Geomine*. Vol. 01. Hal. 6-8.
- Rao, M., Li, G., Jiang, T., Luo, J., Zhang, Y., and Fan, X. 2013. Charbotemic Reduction of Nickeliferous Laterite Ores for Nickel Pig Iron Production in China. *Journal Metallurgy*. Vol. 65. No. 11. Pp. 1573-1583.
- Rao, M., Li, G., Zhang, X., Luo, J., Peng, Z., & Jiang, T. 2016. Reductive Roasting of Nickel Laterite Ore with Sodium Sulfate for Fe-Ni Production. Part I: Reduction/sulfidation characteristics. *Separation Science and Technology*. Vol. 51. No.8. Pp. 1408-1420.
- Rhamdhani, M. A., Hayes, P. C., and Jak, E. 2014. Nickel Laterite Part 2 Thermodynamic Analysis of Phase Transformation Occuring During Reduction Roasting. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. Vol. 118. Pp. 146-155.
- Setiawan, K.N.S., Achmadi, T., dan Lazuardi, S.D. 2018. Analisis Skala Penambangan Mineral dan Pengangkutan (Studi Kasus : Angkutan Nikel di Sulawesi Tenggara). *Jurnal Teknik*. Vol. 7. No. 1. Hal. 2337-3539.
- Shoubao Li. 1999. *Study of Nickeliferous Laterite Reduction*. Pp. 1- 8.
- Solihin, Mubarak, M.Z., Hapid, A., dan Firdiyono, F. 2014. Pelindihan Bijih Nikel Laterit Sulawesi Tenggara dalam Media Asam Sulfat. *Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Pusat Penelitian Geoteknologi Lipi*. ISBN: 978-979-8636-23-3.
- Sukandarrumidi. 2006. *Metodologi Penelitian*. Yogyakarta: Pers UGM.
- Tonggiroh, A., Suharto, dan Mustafa, M. 2012. Analisis Pelapukan Serpentin dan Endapan Nikel Laterit Daerah Pallanga Kabupaten Konawe Selatan Sulawesi Tenggara. *Prosiding*. Vol. 6. ISBN: 978-979-127255-0-6.
- Valix and Cheung. 2002. Effect of Sulfur On The Mineral Phases of Laterite Ores at High Temperature Reduction. *Minerals Engineering*. Vol. 15. No. 7. Pp. 523-530.
- Vlack, L.H.V. 1980. *Ilmu dan Teknologi Bahan (Ilmu Logam dan Bukan Logam)*. Jakarta: Erlangga.

- Watanabe, T.S. 1987. Direct Reduction of Garnierite Ore for Production of Ferronickel with a Rotary Kiln at Nippon Yakin Kogyo Co. *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 19. Pp. 173-187.
- Zhou, W., and Wang, Z.L. 2006. *Scanning Microscopy for Nanotechnology Techniques and Applications*. USA: Springer.
- Zhu, D. Q. and Cui, Y. 2012. Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed by Magnetic Separation. *Internasional Journal of Mineral Processing*. Vol. 106. No. 109. Pp. 1-7.