

SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH *ROASTING* BIJIH LIMONIT
TERHADAP LAJU EKSTRAKSI Ni DAN Co MENGGUNAKAN
ASAM SULFAT PADA TEKANAN ATMOSFER**

Disusun dan diajukan oleh:

PHETER DAVID CHRISTENSEN TINDOILO

D111 18 1310



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS PENGARUH *ROASTING* BIJIH LIMONIT TERHADAP LAJU EKSTRAKSI Ni DAN Co MENGGUNAKAN ASAM SULFAT PADA TEKANAN ATMOSFER

Disusun dan diajukan oleh

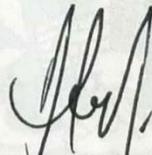
Pheter David Christensen Tindoilo

D111 18 1310

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 27 September 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

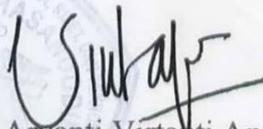
Menyetujui,

Pembimbing Utama,

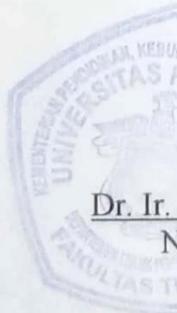


Dr. Ir. Sufriadin, ST., M.T
NIP. 196608172000121001

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Aryanti Virianti Anas, ST., MT.
NIP. 197010052008012026



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Pheter David Christensen Tindoilo

NIM : D1111813110

Program Studi : Teknik Pertambangan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Pengaruh *Roasting* Bijih Limonit Terhadap Laju Ekstraksi Ni Dan Co
Menggunakan Asam Sulfat Pada Tekanan Atmosfer

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 27 September 2024

Yang Menyatakan



Pheter David Christensen Tindoilo
D111181310

ABSTRAK

Pheter David C. Tindoilo. *ANALISIS PENGARUH ROASTING BIJIH LIMONIT TERHADAP LAJU EKTRAKSI Ni DAN Co MENGGUNAKAN ASAM SULFAT PADA TEKANAN ATMOSFER* (dibimbing oleh Dr. Ir. Sufriadin, ST., M.T)

Nikel adalah salah satu logam penting dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan kehidupan sehari-hari. Ada dua proses ekstraksi bijih nikel laterit yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi. Proses pirometalurgi digunakan untuk mengolah bijih nikel laterit dari zona saprolit sedangkan proses hidrometalurgi cocok untuk pengolahan bijih dari zona limonit. Proses hidrometalurgi dapat mengolah bijih nikel laterit dari zona limonit dengan kadar Ni di bawah 1,5% dan Co di bawah 0,2%. Salah satu metode hidrometalurgi dalam ekstraksi nikel dari bijih nikel laterit kadar rendah adalah *Atmospheric Acid Leaching*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik mineralogi dan kimia bijih limonit dan membandingkan pengaruh pemanasan (*roasting*) bijih limonit serta pengaruh waktu pelindian terhadap perolehan Ni dan Co. Berdasarkan hasil analisis mikroskopis menunjukkan mineral penyusun bijih limonit yang diteliti terdiri dari goetit, magnetit, talk, kuarsa, dan hematit. Berdasarkan hasil analisis XRD menunjukkan mineral penyusun pada bijih limonit terdiri dari goetit, lizardit, talk, kuarsa, dan gibbsit. Berdasarkan hasil pelindian bijih limonit dengan *roasting* pada suhu 500°C, menghasilkan laju ekstraksi nikel tertinggi sebesar 45,29% dan kobal tertinggi sebesar 36,85%, lebih tinggi dari pelindian bijih limonit tanpa *roasting*, dengan laju ekstraksi nikel sebesar 28,38% dan kobal sebesar 30,88%. Hasil ini dicapai pada waktu pelindian selama 120 menit.

Kata Kunci: Nikel Laterit; bijih limonit; *atmospheric leaching*; *roasting*, asam sulfat.

ABSTRACT

Pheter David C. Tindoilo. *ANALYSIS OF THE EFFECT OF ROASTING LIMONITE ORE ON THE EXTRACTION RATE OF Ni AND Co USING SULFURIC ACID AT ATMOSPHERIC PRESSURE* (supervised by Dr. Ir. Sufriadin, ST., M.T)

Nickel is one of the important metals and is widely used in various industrial applications and daily life. There are two extraction processes from laterite nickel ore, pyrometallurgical and hydrometallurgical. The pyrometallurgical process is used to process laterite nickel ore from the saprolite zone while the hydrometallurgical process is suitable for processing ore from the limonite zone. The hydrometallurgical process can process laterite nickel ore from the limonite zone with Ni content below 1.5%, Co below 0.2%, Fe above 40%, and MgO below 5%. One hydrometallurgical method of extracting nickel from low-grade laterite nickel ore is Atmospheric Acid Leaching. This study aims to determine the mineralogical and chemical characteristics of limonite ore and compare the effect of heating (roasting) limonite ore and the effect of leaching time on the acquisition of Ni and Co. Based on the results of microscopic analysis shows that the constituent minerals of limonite ore studied consist of goethite, magnetite, talc, quartz, and hematite. Based on the results of XRD analysis shows that the constituent minerals in limonite ore consist of goethite, lizardite, talc, quartz, and gibbsite. Based on the results of leaching limonite ore by roasting at 500°C, resulting in the highest nickel extraction rate of 45.29% and the highest cobalt of 36.85%, higher than the use of limonite ore without roasting, with nickel extraction rates of 28.38% and cobalt of 30.88%. This result was achieved at a leaching time of 120 minutes.

Keywords: Nickel Laterite; limonite ore; atmospheric leaching; Roasting, sulfuric acid

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yesus karena berkat dan kasih setia-Nya yang begitu besar kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Analisis Pengaruh *Roasting* Bijih Limonit Terhadap Laju Ekstraksi Ni dan Co Menggunakan Asam Sulfat pada Tekanan Atmosfer**” ini dengan baik meskipun masih banyak kekurangan didalamnya.

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi strata 1 pada Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Selain itu, tugas akhir ini juga dibuat sebagai salah satu wujud implementasi dari ilmu yang didapatkan selama masa perkuliahan di Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari pihak-pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, saran, serta ilmu yang bermanfaat bagi penulis. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Sufriadin, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian, sekaligus sebagai pembimbing yang senantiasa meluangkan waktu, tenaga, pikiran, serta motivasi bagi penulis. Terima kasih kepada Bapak Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T., dan ibu Dr. Eng. Rini Novrianti Sutardjo Tui, S.T., M.T., MBA. selaku dosen penguji. Terima kasih kepada Bapak/Ibu dosen yang telah memberikan ilmu selama berkuliah beserta pegawai dan staf Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Terima kasih kepada seluruh saudara seperjuangan TUNNEL 2018 yang senantiasa memberikan dukungan dan selalu mengisi hari-hari menjadi sangat menyenangkan, serta kepada seluruh anggota Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian terkhusus kepada kanda Akmal Saputno, S.T., M.T. yang senantiasa membantu dan memberikan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Terima kasih Kepada keluarga besar Ayahanda Yohan Tindoilo S.Pd. dan Keluarga Besar Ibunda Elsee Silas S.Pd. tercinta yang senantiasa memberikan dukungan, doa, dan semangat kepada penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, penulis menyampaikan permohonan maaf atas semua kekurangan yang dijumpai dalam proses penyusunan skripsi ini.

Makassar, 20 September 2024

Pheter David C. Tindoilo

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Tahapan Penelitian.....	3
BAB II BIJIH NIKEL LATERIT	6
2.1 Nikel	6
2.2 Genesis Endapan Bijih Nikel Laterit	8
2.3 Kobalt	16
2.4 Pengolahan Bijih Nikel Laterit	16
2.4.1 Pirometalurgi	16
2.4.2 Hidrometalurgi	20
2.5 <i>Roasting</i>	28
2.6 <i>Atmospheric Leaching</i> dengan Asam Sulfat (H ₂ SO ₄).....	29
2.7 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	30
2.8 <i>Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)</i>	32
BAB III METODE PENELITIAN.....	35
3.1 Persiapan	35

3.2 Variabel Penelitian.....	36
3.3 Prosedur Penelitian	37
BAB IV KARAKTERISTIK DAN LAJU EKSTRAKSI Ni DAN Co DARI BIJIH LIMONIT.....	50
4.1 Karakteristik Awal Sampel Bijih Limonit	50
4.2 Analisis Sampel Bijih Limonit Setelah Pelindian.....	54
BAB V PENUTUP.....	66
5.1 Kesimpulan	66
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	68
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Pembentukan profil nikel laterit (Sustina, 2006).	9
Gambar 2 Profil endapan nikel laterit (Elias, 2002).	13
Gambar 3 Distribusi cadangan nikel dunia (Mcrae, 2019).	14
Gambar 4 Metode pengolahan bijih nikel laterit berdasarkan profil lapisannya (Brand et al, 1998 dalam Oxley & Barcza, 2013).	17
Gambar 5 Diagram alir proses umum pengolahan bijih nikel laterit (Rodriguez, 2013).	18
Gambar 6 Diagram alir HPAL di Moa Bay (Meshram et al., 2019).	25
Gambar 7 Diagram alir EPAL di Weda Bay (LAPI ITB, 2013).	27
Gambar 8 Difraksi sinar-X (Munasir, Triwikantoro, Zainuri, & Darminto, 2012).	31
Gambar 9 Sampel bubuk	38
Gambar 10 Proses pengeringan sampel	38
Gambar 11 Proses mereduksi ukuran sampel.	39
Gambar 12 Proses pengayakan sampel	40
Gambar 13 Proses pengeringan sampel menggunakan oven	40
Gambar 14 Proses penimbangan sampel.....	41
Gambar 15 <i>Muffle furnace</i> FO 130.	41
Gambar 16 Proses <i>roasting</i> sampel menggunakan <i>furnace</i>	42
Gambar 17 Proses pelindian sampel bijih limonit.	44
Gambar 18 Proses penyaringan larutan hasil pelindian.	44
Gambar 19 Larutan pregnant solution hasil pelindian	45
Gambar 20 Analisis menggunakan mikroskop Nikon Eclipse LV-100 POL	46
Gambar 21 XRD tipe Shimadzu Maxima-X XRD 7000	47
Gambar 22 Skyray AAS 6000 <i>Atomic Absorption Spectrometer</i>	48
Gambar 23 Diagram Alir Penelitian	49
Gambar 24 Kenampakan mikroskopis sampel awal bijih nikel laterit. Keterangan: (Gth:goetit); (Qz:kuarsa); (Tlc:talc); (Hem:Hematit); (Mag:magnetit).....	50
Gambar 25 Hasil analisis XRD pada sampel bijih limonit sebelum pelindian	51

Gambar 26 Difaktogram residu hasil pelindian menggunakan asam sulfat berdasarkan pengaruh <i>roasting</i> dan <i>non-roasting</i> dengan waktu pelindian 120 menit.....	54
Gambar 27 Grafik hubungan laju ekstraksi Ni pada sampel yang telah <i>diroasting</i> terhadap waktu pelindian.....	58
Gambar 28 Grafik hubungan laju ekstraksi Ni pada sampel yang tidak <i>diroasting</i> terhadap waktu pelindian.....	58
Gambar 29 Grafik hubungan laju ekstraksi Co pada sampel yang telah <i>diroasting</i> terhadap waktu pelindian.....	60
Gambar 30 Grafik hubungan laju ekstraksi Co pada sampel yang tidak <i>diroasting</i> terhadap waktu pelindian.....	60
Gambar 31 Grafik perbandingan laju ekstraksi Ni pada sampel yang telah <i>diroasting</i> dan tanpa <i>roasting</i> menggunakan variabel waktu.....	61
Gambar 32 Hubungan antara energi dan ikatan struktur (Van Vlack Lawrence (2004) dalam Febrini, et al., 2014).	62
Gambar 33 Grafik perbandingan laju ekstraksi Co pada sampel yang telah <i>diroasting</i> dan tanpa <i>roasting</i> menggunakan variabel waktu	63

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Perbedaan antara bijih Nikel Sulfida dan bijih Nikel Laterit.....	7
Tabel 2	Komposisi mineral bijih limonit sebelum pelindian.....	50
Tabel 3	Hasil analisis kadar Ni dan Co sampel bijih limonit sebelum pelindian menggunakan metode AAS	52
Tabel 4	Hasil analisis Kadar Ni dan Co bijih limonit setelah pelindian berdasarkan pengaruh <i>roasting</i> dan <i>non-roasting</i> dengan variabel waktu menggunakan instrumen AAS	55
Tabel 5	Hasil laju ekstraksi Ni berdasarkan pengaruh <i>roasting</i> dan <i>non-roasting</i> dengan variabel waktu	56
Tabel 6	Hasil laju ekstraksi Co berdasarkan pengaruh <i>roasting</i> dan <i>non-roasting</i> dengan variabel waktu	58

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Analisis XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>).....	73
Lampiran 2 Hasil Analisis AAS.....	79
Lampiran 3 Perhitungan Kadar Ni dan Co.....	80
Lampiran 4 Perhitungan Laju ekstraksi Ni dan Co.....	84
Lampiran 5 Hasil Analisis Mikroskopis	88

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Cadangan terbukti untuk komoditas nikel Indonesia sebesar 689 juta ton, sementara cadangan terkira yaitu sebesar 2,8 miliar ton. Pemanfaatan bijih nikel kadar rendah menjadi bahan baku baterai prioritas sesuai dengan Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2009 Tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis *Battery* Untuk Transportasi Jalan (ESDM, 2020). Pasokan nikel dunia sebesar 60-70% disumbangkan oleh bijih nikel laterit (Butt & Cluzel, 2013).

Bijih nikel laterit merupakan material yang berasal dari *regolith* (lapisan yang merupakan hasil pelapukan batuan yang menyelimuti suatu batuan dasar) yang berasal dari batuan beku ultrabasa yang mengandung unsur Ni dan Co. *Regolith* biasanya terbentuk melalui proses pelapukan fisik dan kimia yang intensif pada daerah dengan iklim tropis-subtropis. Nikel laterit merupakan batuan mineral yang mengandung besi, Nikel, khrom, dan kobalt (Kyle, 2010).

Secara umum jenis bijih nikel laterit terbagi menjadi dua tipe, yaitu limonit dan saprolit. Bijih limonit terdapat dalam zona yang lebih dangkal, sedangkan saprolit terdapat pada zona yang lebih dalam (Prasetyo, Setiawan, & Metya, 2016). Ada dua jalur proses untuk mengolah bijih nikel laterit, yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi, pirometalurgi digunakan untuk mengolah laterit jenis saprolit berkadar nikel tinggi ($Ni \geq 1,8\%$) untuk memproduksi FeNi atau Ni *matte*. Hidrometalugi digunakan untuk mengolah laterit kadar rendah ($Ni \leq 1,8\%$) (Prasetyo, 2016).

Bijih nikel kadar rendah sebaiknya diolah melalui jalur hidrometalurgi sebab proses pengolahan melalui kondisi pelindian (*leaching*) tidak banyak mengonsumsi asam. Ekstraksi nikel oleh *atmospheric pressure leaching/ atmospheric leaching* dapat dengan mudah diawasi dan lebih murah dalam mengolah nikel serta memiliki resiko teknis yang rendah namun dapat memberi laju ekstraksi logam-logam yang bernilai tinggi (Thubakgale, Mbaya, & Kabongo, 2012).

Pelindian dengan larutan berbagai asam seperti asam sulfat, asam klorida dan asam nitrat pada tekanan atmosferik telah dilakukan beberapa peneliti sebelumnya

membuktikan bahwa asam sulfat yang digunakan untuk pelindian atmosferik bijih limonit bahwa asam sulfat yang digunakan merupakan asam yang paling efektif sebab cukup korosif untuk mengubah struktur mineral silikat sehingga mampu melarutkan nikel, mudah didapatkan dan harga jualnya lebih murah (Prasetyo, 2016).

Bijih limonit memiliki kadar rendah di bawah 1,5% Ni sehingga tidak ekonomis, walaupun volume bijih limonit biasanya lebih besar dari volume saprolit. Keadaan tersebut memungkinkan pemanfaatan nikel limonit sebagai sumber dapat ditingkatkan jika kadarnya melalui proses hidrometalurgi. Bijih limonit selain mengandung nikel dan kobalt juga mengandung kadar besi yang hampir menyamai bijih besi biasa (biasanya besi biasanya mengandung sekitar 60% besi).

Bijih laterit dengan kadar rendah dapat ditingkatkan kadarnya melalui proses pemanggangan. Seperti halnya kalsinasi, durasi proses penyangraian juga dievaluasi untuk menganalisis pengaruhnya terhadap ekstraksi nikel selama tahap pelindian (Granda et al., 2018). Penelitian-penelitian sebelumnya telah menjelaskan persiapan awal bijih dengan cara penyangraian awal pada beberapa temperatur dan menggunakan pemisahan magnetik, dapat meningkatkan kadar nikel dari 1,5% menjadi 2,9% (Rudi et al., 2016).

Metode yang digunakan untuk mengekstraksi nikel dan kobalt dari bijih laterit adalah dengan teknologi pelindian asam (*acid leaching technology*), yang merupakan salah satu proses hidrometalurgi. Keuntungan dari metode *leaching* adalah dapat mengekstraksi lebih banyak Ni daripada peleburan dari bijih limonit. Penelitian ini diharapkan dapat memperbaharui dan meningkatkan efektivitas penelitian sebelumnya dengan mempertimbangkan pengaruh pemanggangan sebelum pelindian bijih limonit dan menggunakan larutan asam sulfat.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik mineralogi dan kimia dari bijih limonit yang digunakan pada penelitian ini ?
2. Bagaimana pengaruh pemanasan bijih limonit (*roasting*) terhadap laju ekstraksi nikel dan kobalt menggunakan metode *atmospheric leaching* ?

3. Bagaimana pengaruh waktu pelindian pada bijih limonit dengan pelarut asam sulfat terhadap laju ekstraksi nikel dan kobalt ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik mineralogi dari nikel pada bijih limonit.
2. Menganalisis pengaruh pemanasan bijih limonit (*roasting*) terhadap laju ekstraksi nikel dan kobalt menggunakan metode *atmospheric leaching*.
3. Menganalisis pengaruh waktu pelindian pada bijih limonit dengan pelarut asam sulfat terhadap laju ekstraksi nikel dan kobalt.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi sumber referensi bagi akademisi, perusahaan tambang, dan industri pengolahan nikel laterit mengenai pengolahan nikel laterit kadar rendah sehingga pemanfaatan bijih nikel laterit kadar rendah dapat lebih meningkat di Indonesia serta dapat menjadi referensi tentang pentingnya pengaruh *roasting* dan pelindihan pada bijih limonit.

1.5 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 5 bulan mulai dari bulan Desember tahun 2022 sampai April tahun 2023. Berikut tahapan kegiatan penelitian:

1. Persiapan

Tahapan persiapan merupakan tahapan yang berisi kegiatan pendahuluan sebelum dilakukan penelitian. Tahapan ini terdiri dari perumusan masalah yang akan diangkat dalam kegiatan penelitian dan persiapan administrasi yang terkait dalam penelitian, pengumpulan referensi atau literatur mengenai masalah yang diteliti agar dapat menunjang penelitian, serta persiapan bahan-bahan dan alat-alat yang digunakan pada saat penelitian.

2. Studi Literatur

Tahapan ini merupakan tahapan yang dilakukan setelah dan selama dilakukannya penelitian ini. Tahapan ini melakukan kajian kepustakaan untuk menunjang dan memahami secara kompleks dari topik yang akan diteliti dan

sebagai petunjuk dalam menentukan rancangan penelitian serta persiapan yang menyangkut segala sesuatu yang dibutuhkan dalam proses penyusunan tugas akhir. Studi literatur terkait penelitian ini mengenai nikel laterit, pengolahan nikel laterit, *atmospheric leaching*, analisis *atomic absorption spectrophotometer*, dan *X-Ray Diffraction*.

3. Pengumpulan data

Tahapan pengumpulan data terdiri dari:

a. Preparasi Sampel.

Preparasi sampel adalah kegiatan mereduksi ukuran partikel menggunakan alat *Agate Mortar* sesuai dengan ukuran partikel atau ukuran butir yang dibutuhkan. Selanjutnya dilakukan proses pengayakan atau *sieving* untuk menyamakan atau menghomogenkan ukuran butir dari sampel sebesar 200 *mesh*.

b. Analisis Sampel Awal.

Metode yang digunakan untuk menganalisis sampel adalah *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) guna mengetahui kadar Ni dan Fe dari bijih nikel limonit dan *X-Ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik mineralogi, Sehingga melalui metode AAS dan XRD data Ni dapat diinterpretasikan dan diolah.

c. Percobaan Pelindian (*Leaching*).

Pelindian dengan kondisi *atmospheric leaching* menggunakan pelarut asam sulfat dengan konsentrasi pelarut 3 molar dimana volume pelarut sebanyak 100 ml. Berat sampel yang digunakan sebanyak 10 gram pada tekanan 1 atm dan suhu 85°C untuk mempercepat reaksi, dilakukan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* dimana kecepatan pengadukan 300 rpm. Variabel waktu yang dibutuhkan dalam percobaan ini adalah 30, 60, 90, 120 menit. Percobaan pelindian ini menghasilkan dua produk yaitu larutan *pregnant leach solution* yang mengandung Ni dan Residu dalam bentuk padatan yang akan dianalisis menggunakan XRD sedangkan hasil *pregnant leach solution* akan dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS).

d. Percobaan Kalsinasi

Kalsinasi merupakan proses suatu benda hingga temperatur tinggi, tetapi masih di bawah titik lebur untuk menghilangkan kandungan yang dapat menguap (menurut KBBI). Proses kalsinasi pada percobaan ini dengan temperatur sebesar 500°C selama 1 jam menggunakan *furnace*.

4. Tahap Pengolahan dan Interpretasi Data

Tahapan pengolahan dan interpretasi data dilakukan sebelum penyusunan laporan. Data yang diolah merupakan data hasil analisis XRD dan AAS untuk melihat perolehan nikel, serta karakteristik mineralogi bijih nikel limonit terhadap pengaruh kalsinasi dan tanpa kalsinasi pada laju ekstraksi Ni dan Co selain itu variabel yang digunakan dalam percobaan ini adalah waktu terhadap laju ekstraksi Ni.

5. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Tahapan ini merupakan tahapan paling akhir yang dilakukan dalam rangkaian kegiatan penelitian. Seluruh hasil penelitian akan disusun dan dilaporkan secara sistematis sesuai aturan penulisan buku putih yang telah ditetapkan oleh Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin.

6. Seminar dan Penyerahan Laporan

Laporan tugas akhir akan dipresentasikan pada seminar hasil dan ujian sidang. Tahapan ini dimaksudkan untuk memaparkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, melalui tahapan ini akan didapatkan saran untuk menyempurnakan laporan tugas akhir dari tim penguji, pembimbing dan peserta seminar.

BAB II BIJIH NIKEL LATERIT

2.1 Nikel

Nikel adalah logam berwarna putih keperakan yang termasuk dalam golongan VIIIb tabel periodik. Nikel sedikit lebih tahan terhadap oksidasi dibandingkan besi dan kobalt, dengan potensial standar $-0,236$ V relatif terhadap elektroda hidrogen. Beberapa ratus senyawa nikel telah diidentifikasi dan dikarakterisasi. Nikel memiliki massa jenis $8,90$ g/cm³, titik leleh 1555 °C, dan titik didih 2837 °C (Stoeppler, 1980). Nikel memiliki konduktivitas elektrik sebesar 22% dengan Struktur kristal dari mineral nikel adalah kubus berpusat muka dengan kekerasan $3,8$ Mohs. Nikel adalah salah satu logam yang paling penting dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan kehidupan sehari-hari seperti paduan nikel, *elektroplating*, baterai dan penggunaan paling banyak adalah sebagai baja tahan karat (*stainless steel*) yang banyak diaplikasikan pada peralatan dapur (sendok, dan peralatan memasak), ornamen-ornamen rumah dan gedung, serta komponen industri. Dalam keadaan murni, nikel bersifat lembek, tetapi jika dipadukan dengan besi, krom, dan logam lainnya, dapat membentuk baja tahan karat yang keras (Barkas, 2010).

Nikel sangat baik menyerap hidrogen, penyerapan hidrogen meningkat seiring dengan meningkatnya suhu. Bahkan pada suhu kamar oklusi yang cukup besar pada hidrogen dapat diamati ketika ion hidrogen dibuang pada elektroda nikel berpori. Ikatan nikel dapat diputus dengan tekanan dan suhu dengan pembentukan oksida dan hidrogen. Nikel bersifat elektropositif sama halnya dengan kobalt. Nikel dapat larut pada asam yang memiliki konsentrasi rendah dan relatif lebih lambat dibandingkan dengan besi. Sifat nikel yang terkenal adalah daya tahannya terhadap alkali pekat (Nicholls, 1973).

Nikel dapat ditemukan dalam bentuk nikel sulfida dan nikel laterit. Meskipun jumlah total cadangan nikel dunia dalam bentuk laterit jauh lebih 10 banyak dibandingkan dengan bijih nikel sulfida (secara berurutan 72% berbanding 28%), sampai saat ini, cadangan nikel jenis sulfida masih menjadi bahan baku utama dalam proses ekstraksi nikel di dunia (Kusuma, 2012). Seiring dengan waktu,

jumlah cadangan nikel sulfida akan semakin berkurang akibat eskplotasi yang dilakukan terus-menerus. Oleh karena itu, pemanfaatan nikel laterit sebagai bahan baku akan berperan penting dalam proses produksi nikel dunia di masa mendatang. Perbedaan antara nikel sulfida dan nikel letrit ditampilkan dalam Tabel 2.1.

Tabel 1. Perbedaan antara bijih Nikel Sulfida dan bijih Nikel Laterit

No	Bijih Nikel Sulfida	Bijih Nikel Laterit
1	Jenis ini dibentuk dari proses presipitasi dan segregasi mineral yang terjadi dalam tuang magma atau aliran lava	Jenis ini dibentuk dari proses pelapukan batuan ultramafik pada daerah tropis dan sibtropis
2	Jenis ini merupakan <i>high grade nickel</i> sebesar 0,15-8%	Jenis ini merupakan <i>low grade nickel</i> dengan kadar nikel sekitar 1-1,6%
3	Jenis bijih nikel ini ditemukan pada kedalaman ratusan meter di bawah permukaan tanah, sehingga biaya penambangan jenis nikel ini relative lebih mahal	Jenis bijih nikel ini ditemukan pada tempat yang relatif lebih dangkal, yaitu sekitar 15-20 meter di bawah permukaan tanah, sehingga biaya penambangan jenis ini relatif lebih murah

Sumber: (Kusuma, 2012; Shofi, 2003; Simate, 2010; British Geological Survey, 2008)

Nikel adalah salah satu logam paling penting dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan kehidupan sehari-hari. Nikel adalah logam penting yang digunakan dalam produksi *stainless steel* dan campuran logam (Zhu dan Cui, 2012). Penggunaan nikel saat ini 60% digunakan sebagai bahan baku *stainless steel*, penggunaan *stainless steel* digunakan untuk berbagai macam kebutuhan seperti peralatan proses industri, peralatan pembangkit listrik, peralatan transportasi, peralatan dapur dan masih banyak lagi pemanfaatannya pada peralatan yang membutuhkan kekuatan dan ketahanan korosi (Anyadike, 2002). Nikel juga dimanfaatkan untuk *nickle alloy* sebesar 14%, *casting* dan *alloy steel* sebesar 9%, *electroplating* sebesar 9% dan baterai yang dapat diisi ulang sebesar 5% (Mudd, 2010).

2.2 Genesis Endapan Bijih Nikel Laterit

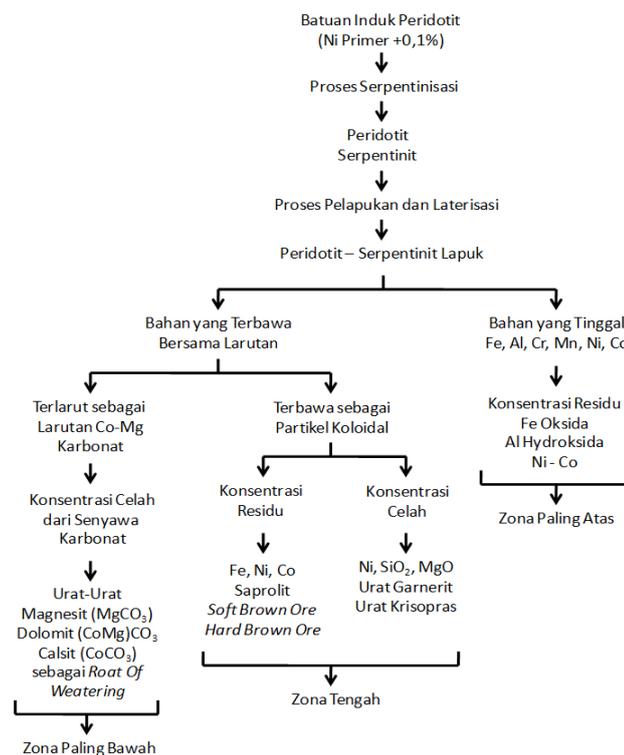
Bijih nikel laterit merupakan suatu produk yang dihasilkan dari proses pelapukan secara kimiawi dan berlangsung dalam waktu yang lama. Laterit terbentuk melalui proses pemecahan mineral induk yang tidak stabil pada kondisi lingkungan yang basah/lembab dan terjadi pelepasan unsur-unsur kimia ke dalam air tanah. Unsur-unsur kimia yang mudah larut dalam air tanah yang bersifat asam, hangat, dan lembab. Hal ini menyebabkan unsur-unsur yang tidak mudah larut tersisa dan membentuk mineral baru yang stabil pada kondisi lingkungan tersebut. Proses ini disebut dengan proses laterisasi (Shofi, 2003; Asy'ari, 2013).

Proses Laterisasi merupakan proses yang melibatkan pemecahan mineral utama dan pelepasan beberapa dari komponen tidak larut dan pembentukan mineral baru yang stabil pada lingkungan pelapukan (Elias, 2002). Transportasi mineral dan/atau unsur terjadi melalui proses pelindian (*leaching*). Proses pelindian ini merupakan proses pelarutan unsur-unsur hasil pelapukan dari tubuh batuan atau bijih melalui media air. Proses ini sangat dipengaruhi oleh nilai pH, reaksi reduksi oksidasi, material organik yang tidak terlarut, dan aktivitas mikrobiologi di lingkungannya (McGraw Hill, 2003). Proses laterisasi ini berawal dari infiltrasi air hujan yang bersifat asam masuk ke dalam zona retakan kemudian melarutkan mineral yang mudah larut pada batuan asal. Mineral dengan berat jenis yang tinggi akan tertinggal di permukaan membentuk pengkayaan residual, sedangkan mineral yang mudah larut akan turun ke bawah membentuk zona akumulasi dengan pengayaan supergen (Asy'ari dkk, 2013).

Bijih nikel laterit adalah produk lateritisasi batuan kaya Mg atau ultramafik yang memiliki kandungan Ni primer 0,2-0,4% (Golightly, 1981). Batuan seperti ini umumnya dunit, harzburgit dan peridotit yang berada di kompleks ofiolit, dan lapisan batuan intrusi mafik-ultramafik dalam pengaturan platform kratonik (Brand et al, 1998). Proses lateritisasi menghasilkan konsentrasi dengan faktor 3 hingga 30 kali kandungan nikel dan kobalt dari batuan induk. Proses dan karakter laterit yang dihasilkan dikendalikan pada skala regional dan lokal oleh faktor-faktor dinamis seperti iklim, topografi, tektonik, tipe dan struktur batuan primer (Elias, 2002).

Asal mula pembentukan endapan bijih nikel laterit berasal dari batuan peridotit [(Mg,Fe, Ni)₂SiO₄] yang mengalami proses serpentinisasi dan kemudian

terekspose ke permukaan. Pada kondisi iklim tropis dengan musim kemarau dan hujan yang berganti-ganti, proses pelapukan terjadi secara terus-menerus, sehingga batuan tersebut menjadi rentan terhadap proses pelindihan (leaching). Sirkulasi air permukaan yang bersifat asam akan mengabsorpsi karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer dan mempercepat proses pelapukan dan pelindihan menjadi lebih intensif. Air permukaan ini akan terkayakan kembali oleh material-material organik yang meresap ke bawah mencapai zona pelindihan di mana fluktuasi air tanah berlangsung. Fluktuasi ini mengakibatkan air tanah yang kaya CO_2 akan berkontak dengan nikel laterit yang masih mengandung batuan asal, kemudian melarutkan mineral-mineral yang tidak stabil, seperti serpentin dan piroksen. Logam magnesium (Mg), silika (Si), dan nikel (Ni) akan larut dan terbawa oleh aliran air tanah dan mengendap kembali, sehingga menghasilkan mineral-mineral baru (Asy'ari, 2013; Sutisna, 2006).



Gambar 1 Pembentukan profil nikel laterit (Djadjulis, 1992 dalam sustina, 2006).

Secara horizontal penyebaran nikel tergantung kepada arah aliran air tanah dan bentang alam. Air tanah di zona pelindihan mengalir dari pegunungan ke arah

lereng sambil membawa unsur Ni, Mg, dan Si. Berdasarkan cara terjadinya, endapan nikel dapat digolongkan menjadi dua macam, yaitu endapan bijih Ni-sulfida (primer) dan Ni-laterit (sekunder). Proses pembentukan Ni-laterit merupakan proses dekomposisi sekunder endapan Ni-sulfida yang diawali dari pelapukan batuan ultrabasa seperti harzburgit, dunit, dan piroksenit. Dalam deret Bowen, batuan ini banyak mengandung olivin, piroksen, magnesium silikat dan besi.

Endapan ini akan terakumulasi dekat ke permukaan tanah, sedangkan magnesium, nikel dan silikon akan tetap tertinggal di dalam larutan dan bergerak turun selama suplai air yang masuk ke dalam tanah terus berlangsung. Rangkaian proses ini merupakan proses pelapukan dan pelindian. Unsur Ni merupakan unsur tambahan di dalam batuan ultrabasa. Sebelum proses pelindian berlangsung, unsur Ni berada dalam ikatan kelompok silikat terutama olivin dan serpentinit. Rumus kimia kelompok silikat adalah $M_2-3SiO_2O_5(OH)_4$, dengan variabel M merupakan unsur-unsur seperti Cr, Mg, Fe, Ni, Al, Zn atau Mn atau dapat juga merupakan kombinasinya.

Adanya suplai air yang mengalir melalui kekar akan membawa nikel turun ke bawah dan lambat laun akan terkumpul di zona permeabel yang tidak dapat menembus batuan induk. Apabila proses ini berlangsung terus menerus, maka akan terjadi proses pengayaan supergen yang berada di zona saprolit. Dalam satu penampang vertikal profil laterit dapat terbentuk zona pengayaan lebih dari satu karena muka air tanah yang selalu berubah-ubah akibat perubahan musim.

Di bawah zona pengayaan supergen terdapat zona mineralisasi primer yang tidak terpengaruh oleh proses oksidasi maupun pelindian, yang sering disebut sebagai zona hipogen. Zona pelapukan kimiawi yang kaya akan bijih nikel berada pada zona saprolit. Bijih nikel tidak hanya berasosiasi dengan garnierit, tapi Ni juga dapat mensubstitusi Fe dan Mg pada mineral silikat, khususnya serpentinit. Komposisi kimia dari mineral-mineral mafik (olivin) dalam Iherzolit yang mengandung Ni dan Cr misalnya pada endapan Ni-laterit Soroako, Sulawesi Selatan.

Pembentukan nikel laterit dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya adalah (Elias, 2002):

a. Batuan asal

Adanya batuan asal merupakan syarat utama untuk terbentuknya endapan nikel laterit. Batuan asal yang berperan penting dalam pembentukan nikel laterit berupa batuan ultrabasa seperti harzburgit. Batuan ultrabasa mengandung mineral-mineral yang kurang stabil dan mudah melapuk seperti olivin dan piroksin. Oleh karena itu, batuan ultrabasa mempunyai komponen-komponen yang mudah larut dan memberikan lingkungan pengendapan yang baik untuk nikel.

b. Iklim

Adanya pergantian musim kemarau dan musim penghujan menyebabkan terjadinya kenaikan dan penurunan permukaan air tanah, juga dapat menyebabkan terjadinya proses pemisahan dan akumulasi unsur-unsur. Perbedaan temperatur yang cukup besar akan mempercepat terjadinya pelapukan mekanis, menyebabkan rekahan dalam batuan yang akan mempermudah proses atau reaksi kimia pada batuan.

c. Senyawa kimia dan vegetasi

Senyawa kimia merupakan faktor yang mempercepat proses pelapukan, seperti air tanah mengandung CO_2 yang bersifat asam berperan penting dalam proses pelapukan kimia. Terkait dengan faktor vegetasi terdapat asam humus yang menyebabkan dekomposisi batuan serta mengubah pH larutan. Jenis vegetasi suatu daerah erat hubungannya dengan terbentuknya asam humus di daerah tersebut. Dalam hal ini, vegetasi yang rapat dan bervariasi mempengaruhi penetrasi air lebih dalam sehingga air tanah yang terkumpul akan lebih banyak dan untuk terbentuknya lebih tebal. Kondisi ini merupakan lingkungan yang baik untuk terbentuknya endapan nikel berkadar tinggi.

d. Struktur geologi

Batuan beku mempunyai porositas dan permeabilitas yang kecil sehingga penetrasi air sangat sulit, dengan adanya rekahan batuan akan lebih memudahkan masuknya air sehingga proses pelapukan akan lebih intensif. Sebagai contoh, di daerah Pomalaa terdapat struktur kekar yang lebih dominan dibandingkan dengan struktur patahannya. Daerah ini disusun oleh

batuan ultrabasa sebagai saluran tempat naiknya magma yang mengandung unsur nikel, sehingga struktur ini menjadi salah satu faktor dalam pembentukan cebakan bijih nikel.

e. Topografi

Topografi setempat sangat berpengaruh terhadap sirkulasi air dan senyawa lain; untuk daerah landai, air akan bergerak perlahan sehingga dapat menembus batuan lebih dalam melalui rekahan atau pori batuan. Endapan mengandung nikel akan terakumulasi pada daerah landai sampai kemiringan sedang. Hal ini menunjukkan ketebalan pelapukan tergantung kepada bentuk topografi. Pada daerah yang curam, air limpasan (*run off*) lebih banyak daripada air yang meresap sehingga pelapukannya kurang intensif.

f. Waktu

Semakin lama waktu pelapukan semakin besar endapan nikel yang terbentuk.

Pembentukan nikel laterit yang terdiri atas empat horizon yaitu (Elias, 2002):

1) Tudung besi (*iron cap*)

Tudung besi merupakan material lapisan berukuran lempung, berwarna coklat kemerahan, dan biasanya terdapat juga sisa-sisa tumbuhan. Lapisan dengan konsentrasi besi yang cukup tinggi sekitar >50% dan kandungan nikel yang rendah <0,6%, atau merupakan laterit residu yang dapat terbentuk pada bagian atas dari profil dan melindungi lapisan endapan nikel laterit dibawahnya. Lapisan ini kadang-kadang ditemukan hematit dan kromiferus.

2) Zona limonit

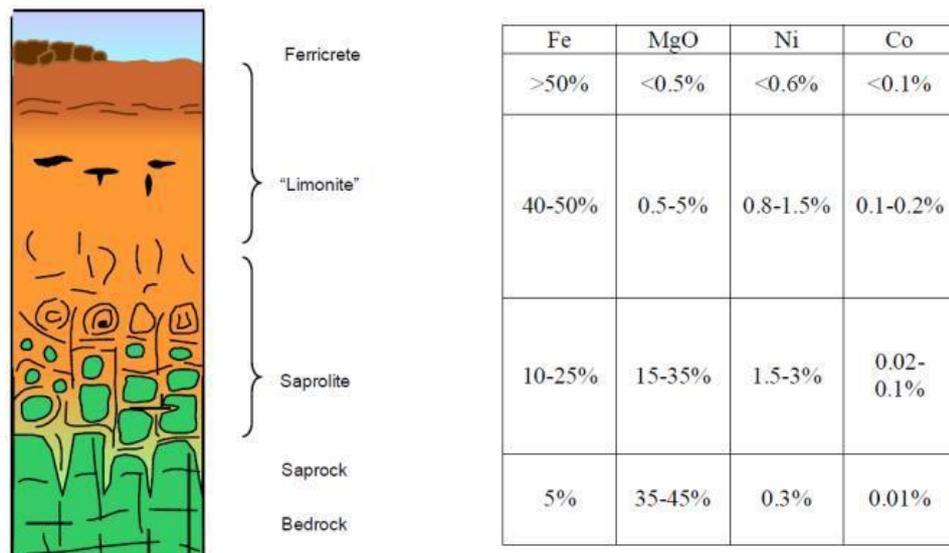
Zona limonit merupakan lapisan yang kaya besi sekitar 40-50% Fe, berukuran halus dan berwarna merah coklat atau kekuningan. Dalam limonit, sebagian besar nikel berada dalam gutit sebagai larutan padat, sebagian lagi berada dalam oksida mangan dan litioforit. Dalam lapisan ini juga kadang-kadang ditemukan talk, tremolit, kromiferus, kuarsa, gipsit dan magemit.

3) Zona saprolit

Dalam lapisan ini, mineral utamanya adalah serpentin ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$); nikel mensubstitusi Mg. Bijih saprolit memiliki kandungan nikel lebih tinggi daripada yang terdapat pada lapisan limonit, yaitu sekitar 1,5-3% Ni. Kandungan magnesia dan silikanya juga lebih tinggi, namun kadar besinya rendah.

4) Batuan dasar (*bedrock*)

Bagian ini berbentuk bongkah berukuran >75 cm. Secara umum kadar nikelnya kecil, sekitar 0,2 - 0,4% nikel. Zona ini mengalami perengkahan kuat dan kadang-kadang bersifat terbuka dan terisi oleh garnierit dan silika. Perengkahan ini diperkirakan menjadi *root zone* yaitu suatu zona dengan kandungan nikel tinggi berupa urat dalam batuan dasar. Profil endapan nikel laterit secara detail diperlihatkan pada Gambar 2.

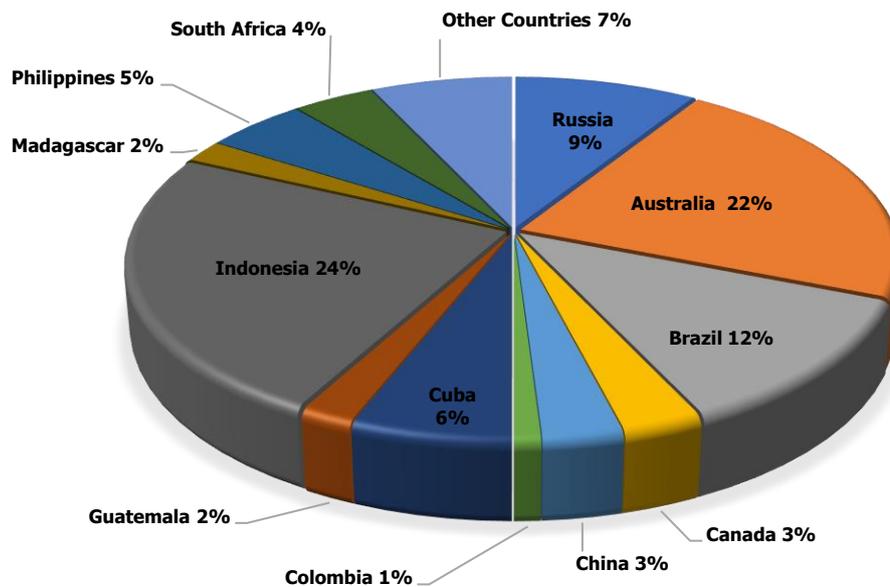


Gambar 2 Profil endapan nikel laterit (Elias, 2002).

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki endapan bijih nikel laterit dalam jumlah yang cukup besar. Endapan nikel laterit yang terdapat di Indonesia tersebar di beberapa daerah seperti di Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara, Maluku, dan Papua (Subagja dkk., 2016). Potensi deposit dari bijih nikel Indonesia mencapai 2,1 milyar ton atau sekitar 24% dari total sumber daya nikel di dunia. Negara-negara yang memiliki cadangan bijih nikel laterit yang besar adalah Indonesia, Australia, dan Brazil. Dari data tersebut, Indonesia sebagai pemilik

cadangan nikel laterit terbesar seharusnya dapat menjadi produsen material yang berbahan nikel seperti baja tahan karat dan baja paduan nikel lainnya (Mcrae, 2019). Distribusi cadangan nikel dunia dapat dilihat pada Gambar 3.

Cadangan Nikel Dunia



Gambar 3 Distribusi cadangan nikel dunia (Mcrae, 2019).

2.3 Kobalt

Kobalt adalah unsur logam dengan nomor atom 27. Kobalt adalah fase padat logam dengan kepadatan sekitar 8,85 g / cm³ dan titik leleh 1493°C. Kobalt telah menyatu untuk diubah menjadi fase cair dengan titik didih 3100°C. Kobalt diklasifikasikan sebagai logam strategis dan kritis untuk digunakan dalam industri pertahanan dan ketergantungan negara-negara industri pada impor kobalt (Davis, 2000). Kobalt adalah feromagnetik dan karena itu mampu menjadi magnet. Sifat berguna penting lainnya adalah kemampuannya untuk membentuk paduan dengan banyak logam lain (misal kromium, molibdenum, nikel) dan untuk mempertahankan sifat magnetiknya pada suhu tinggi (hingga 1.121°C) (Petavratzi, *et al.*, 2019).

Konsentrasi kobalt pada kerak bumi berkisar antara 15 hingga 30 *parts per million* (ppm). Batuan beku *Ultramafic* seperti dunit dan serpentinit memiliki

konsentrasi kobalt rata-rata antara 109 dan 115 ppm, sedangkan batuan beku mafik seperti basal mengandung sekitar 47 ppm kobalt. Meskipun kobalt murni tidak ditemukan di alam, sekitar 30 mineral pembawa kobalt diketahui, membentuk berbagai fase sulfida dan sulfarsenida misalnya *cobaltite*, *carrollite*, *skutterudite*, *erythrite* (Petavratzi, *et al.*, 2019). Sebagian besar kobalt diperoleh kembali sebagai produk sampingan dari penambangan tembaga atau nikel (Petavratzi, *et al.*, 2019).

Bijih nikel laterit biasanya dilebur menjadi feronikel, di mana kobalt tidak diperoleh kembali. Namun, beberapa bijih nikel laterit dilebur menjadi *matte* sulfida meskipun perolehan kobalt dari *matte* ini tidak efisien. Sebaliknya, kobalt biasanya diekstraksi sebagai produk sampingan dari lapisan limonit dan smektit bijih laterit dengan cara pelindian pada suhu dan tekanan tinggi dengan asam sulfat (pelindian asam bertekanan tinggi, HPAL, dalam autoklaf pada 250°C, tekanan 40 bar). Setelah pelindian, bijih tersebut didinginkan melalui *flash tank* di mana perolehan energi terjadi. Cairan kental yang didinginkan mengalami pranetralisasi dan pemisahan padat-cair. Nikel dan kobalt diendapkan sebagai campuran nikel kobalt sulfida menggunakan gas hidrogen sulfida. Ada beberapa alternatif untuk pengendapan sulfida campuran, termasuk pengendapan nikel karbonat, ekstraksi pelarut langsung dan pengendapan nikel-kobalt hidroksida (Petavratzi *et al.*, 2019).

Logam kobalt oksida, dan hidroksida digunakan dalam produksi katoda baterai yang dapat diisi ulang yaitu *Lithium-ion batteries* (LIBs). Logam kobalt digunakan dalam berbagai *alloys*, termasuk *superalloys*, *magnetic alloys*, *prosthetic alloys* dan *wear-resistant alloys*. *Superalloy* digunakan di sektor kedirgantaraan, di reaktor nuklir, pembangkit listrik dan pada peralatan kimia yang memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi dan stabilitas permukaan yang tinggi. Paduan kobalt-krom digunakan dalam penggantian pinggul dan lutut dan implan gigi (Petavratzi, *et al.*, 2019).

Kobalt biasa digunakan sebagai:

a. Baterai

Konsumsi kobalt di dunia adalah tingkat konsumsi baterai paling banyak sebesar 50%. Kobalt sangat penting. Komponen dari tiga teknologi baterai isi ulang utama adalah baterai nikel-kadmium: baterai nikel-metal hidrida

dan lithium-ion, dengan proporsi kobalt tertinggi ditemukan pada kinerja tinggi (Hannis & Bide, 2009).

b. *Super Alloy*

Konsumsi kobalt dunia untuk paduan super atau paduan berkinerja tinggi (*super alloy*) adalah 18%. Ketika kobalt dicampur dengan logam tertentu lainnya dapat menghasilkan '*super alloy*' yang mampu menahan tekanan mekanis dan suhu yang parah. Sebagian kecil *super alloy* diproduksi untuk digunakan dalam aplikasi kimia dimana ketahanan korosi sangat penting.

c. *Cemented carbide*

Konsumsi kobalt dunia untuk *cemented carbide* adalah 8%. Komponen utama *cemented carbide* adalah *tungsten carbide* dan sejumlah kecil fase peningkat logam Fe, Ni, dan Co yang meningkatkan ketangguhan (Li et al., 2018). Kobalt dalam *cemented carbide*, atau "logam keras," adalah untuk menyediakan pengikat logam ulet untuk partikel karbida keras. Kobalt digunakan sebagai matriks untuk partikel karbida karena kekuatan selama fase cair memungkinkan pencapaian kepadatan tinggi.

d. Katalis, konsumsi dunia kobalt untuk katalis adalah 5%.

e. Magnet, konsumsi dunia kobalt untuk magnet adalah 3%.

f. Keramik, konsumsi kobalt dunia untuk keramik adalah 6%.

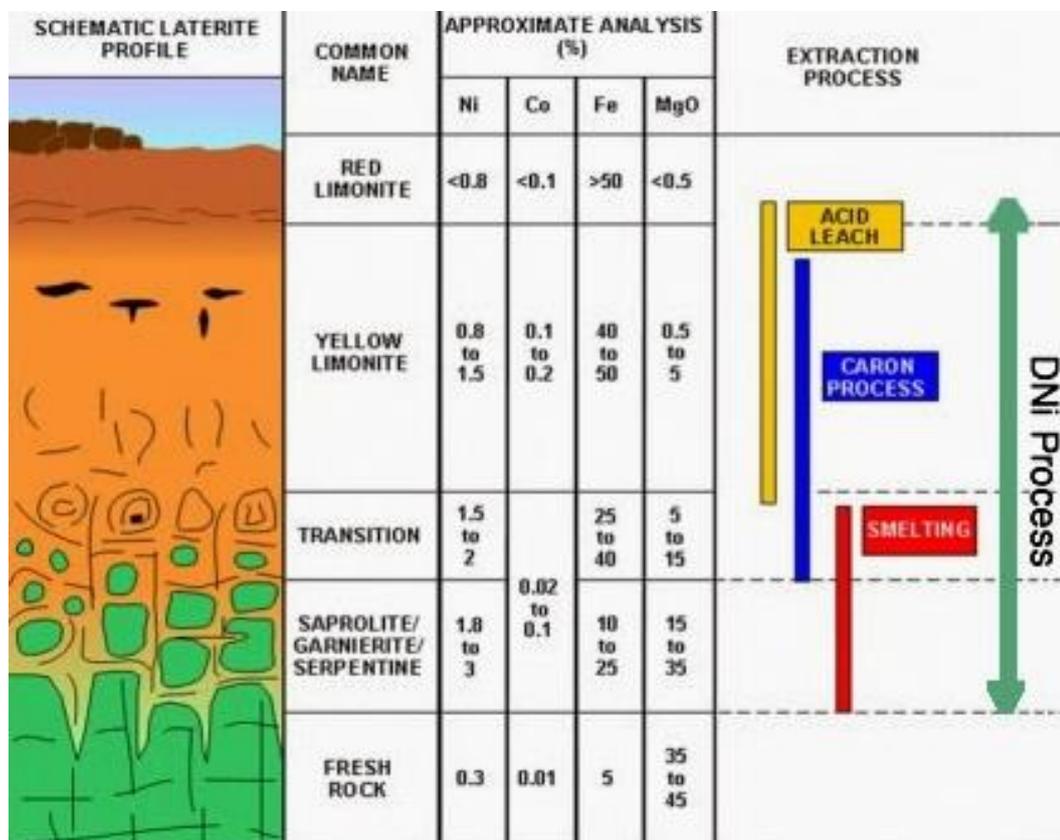
g. Kegunaan lain, konsumsi dunia kobalt untuk kegunaan lain adalah 10%.

2.4 Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Logam Nikel diperoleh dari endapan nikel laterit yang telah diambil dan melalui proses pengolahan. Ada beberapa proses pengolahan yang dapat digunakan untuk mendapatkan logam nikel tersebut seperti yang ada pada Gambar 4. Ada beberapa pengolahan yang dapat digunakan untuk memperoleh logam nikel dari bijih laterit. Mineralogi dan jenis bijih laterit mempengaruhi metode ekstraksi nikel. Ada dua proses ekstraksi bijih nikel laterit yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi. Proses pirometalurgi digunakan untuk mengolah bijih nikel laterit dari zona saprolit. Proses hidrometalurgi cocok untuk pengolahan bijih dari zona limonit. Komposisi kimia dan mineralogi bijih saprolit lebih heterogen dibandingkan dengan bijih limonit sehingga memerlukan metode pengolahan yang lebih fleksibel. Kandungan

magnesium yang tinggi dalam bijih saprolit juga mengakibatkan konsumsi asam yang tinggi jika menggunakan proses hidrometalurgi (Pournaderi, 2014).

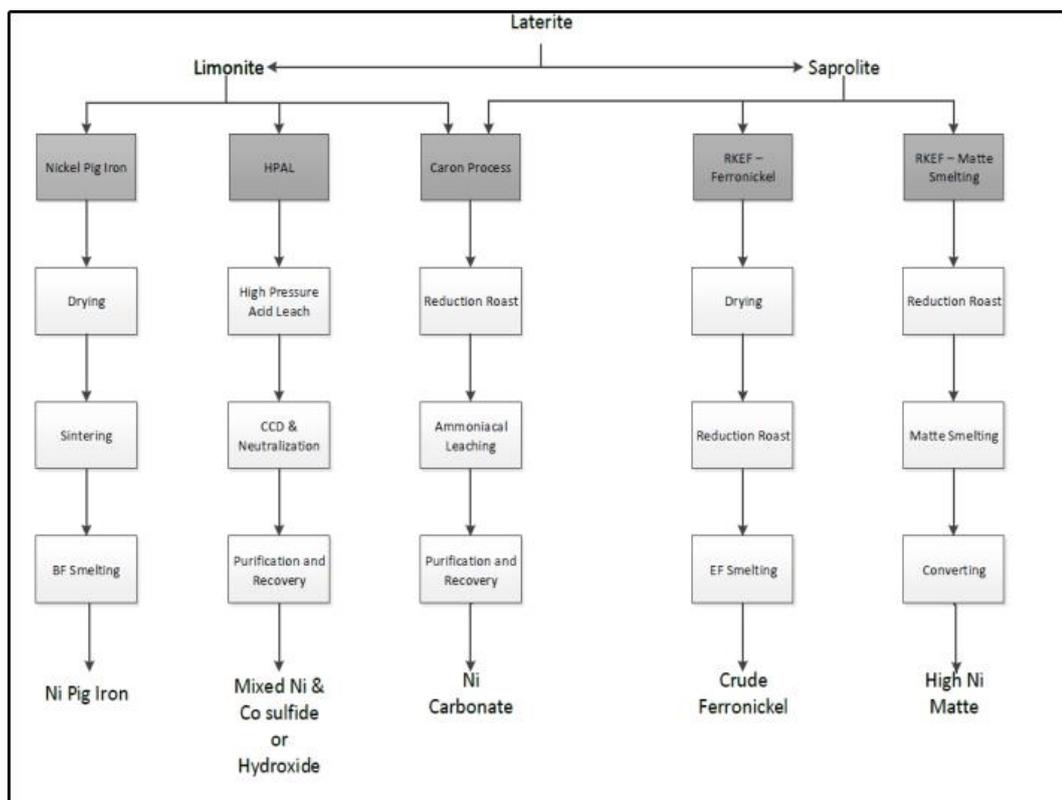
Proses hidrometalurgi dapat mengolah bijih nikel laterit dari zona limonit dengan kadar Ni dibawah 1,5%, Co dibawah 0.2%, Fe diatas 40%, dan MgO dibawah 5%. Proses pirometalurgi dapat mengolah bijih nikel laterit dari zona transisi dengan kadar Ni 1,5%-2%, Co 0,02%-0.1%, Fe 25%-40%, dan MgO dibawah 5%-15% dan zona saprolit dengan kadar Ni 1,8%-3%, Co 0,02%-0.1%, Fe 15%-35%, dan MgO 15%-35%. Gabungan proses antara pirometalurgi dan hidrometalurgi dapat mengolah bijih nikel laterit dari zona limonit dan saprolit.



Gambar 4 Metode pengolahan bijih nikel laterit berdasarkan profil lapisannya (Brand et al, 1998 dalam Oxley & Barcza, 2013).

Proses pengolahan bijih nikel laterit yang diterapkan secara komersial didasarkan pada kandungan magnesium (Mg) dan rasio nikel dengan besi (Ni/Fe). Saat ini metode yang ekonomis untuk digunakan dalam pengolahan bijih nikel yaitu metode pirometalurgi dan metode hidrometalurgi. Metode pirometalurgi digunakan untuk mengolah nikel dari endapan bijih laterit zona saprolit yang memiliki kadar

Ni dan MgO yang tinggi. Metode hidrometalurgi digunakan untuk mengolah nikel dari endapan bijih laterit zona limonit yang memiliki kadar Ni dan MgO yang rendah. Bijih nikel dengan kadar MgO yang tinggi kurang cocok diolah dengan menggunakan metode hidrometalurgi karena dapat meningkatkan konsumsi asam yang diperlukan saat melakukan proses ekstraksi (Prasetyo & Ronald, 2011). Diagram alir proses umum pengolahan bijih nikel laterit dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Diagram alir proses umum pengolahan bijih nikel laterit (Rodriguez, 2013).

2.4.1 Pirometalurgi

Metode ekstraksi pirometalurgi melibatkan beberapa proses yang biasanya digunakan, seperti: *roasting*, pengurangan karbothermik, reduksi bijih sulfida, dan reduksi *metallothermic*. Pemilihan proses yang akan digunakan terutama tergantung pada komposisi bijih atau konsentrat dan termodinamika, kinetik, dan kendala lingkungan yang terkait dengan setiap proses. Produksi feronikel dari bijih laterit memerlukan energi tinggi, hal ini dikarenakan bijih laterit atau bijih pra-reduksi umumnya langsung dilebur untuk menghasilkan sejumlah kecil produk

feronikel dan sejumlah besar *slag* serta FeNi *smelter* yang biasa beroperasi pada suhu sekitar 1350-1400°C (Setiawan, 2016).

Kelebihan dari metode ekstraksi pirometalurgi adalah (Kyle, 2010):

- a. Prosesnya sederhana dan terbukti dengan baik.
- b. Dapat menangani bijih magnesium tinggi (yang umumnya mengandung konsentrasi nikel tinggi). Pemulihan nikel tinggi (90%).
- c. Residu berbentuk granular dan mudah dibuang.
- d. Reagen umumnya tidak mahal dan tersedia.

Kekurangan dari metode ekstraksi pirometalurgi adalah (Kyle, 2010):

- a. Biaya modal tinggi.
- b. Penggunaan energi tinggi dan ekonomi proyek sangat sensitif terhadap biaya listrik.
- c. Hanya dapat menangani bijih magnesium tinggi - pencampuran yang diperlukan untuk menjaga rasio $\text{SiO}_2 / \text{MgO}$.
- d. Kobal tidak ditemukan sebagai produk terpisah.

Ada beberapa pengolahan yang dapat digunakan untuk memperoleh nikel dengan metode pirometalurgi.

1. Peleburan nikel matte

Proses ini didasarkan pada afinitas nikel yang lebih besar untuk belerang dibandingkan dengan besi dan afinitas besi yang lebih besar untuk oksigen dibandingkan dengan nikel. Bijih dicampur dengan fluks, reduktan dan sumber belerang. Sumber belerang dapat berupa mineral sulfida atau unsur belerang. Hampir semua nikel dan sebagian besar besi tereduksi dan bereaksi dengan belerang untuk membentuk matte. Fluks dan oksidasi selektif dalam konverter mengoksidasi besi dan menghilangkannya dalam terak untuk menghasilkan nikel matte dengan lebih dari 75% Ni, 20% – 22% S, dan kurang dari 1% Fe. Matte ini dilemparkan, digiling, dan dipanggang dalam pemanggang fluidized-bed untuk menghilangkan belerang. Kemudian diklorinasi melalui pemanggangan dalam rotary kiln, diikuti dengan pencucian asam untuk menghilangkan tembaga. Akhirnya, produk nikel oksida dilebur dan dikurangi dengan kokas dan logam diperoleh. Saat ini, laterit dilebur dalam tungku listrik, dan peleburan matte hanya dilakukan

di bekas Uni Soviet, dan operasi Inco Sorowako (Indonesia) (Pournaderi, 2014).

2. Peleburan feronikel (Fe-Ni)

Bijih dilebur untuk menghasilkan produk feronikel melalui *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF). RKEF adalah dua tahap proses yang melibatkan pengeringan, kalsinasi dan reduksi parsial bijih dalam rotary kiln, diikuti dengan peleburan dalam tungku busur listrik. Tergantung pada kadar bijih, produk feronikel dapat mengandung 20% - 40% nikel. Produksi feronikel menyumbang 19% dari produksi nikel baru tahunan pada tahun 2002. Nilai ini mencapai lebih dari 35% pada tahun 2010, menunjukkan semakin pentingnya peleburan feronikel di industri nikel. Dua klasifikasi feronikel yang khas, satu berdasarkan kadar nikel dan yang lainnya berdasarkan kandungan karbon produk feronikel (Pournaderi, 2014).

3. Produksi *nickel pig iron* (NPI)

Nickel Pig Iron (NPI) merupakan feronikel yang memiliki kandungan nikel rendah (1,5-8%). *Nickel Pig Iron* (NPI) dilakukan dengan *mini blast furnace* dan *electric arc furnace* (EF). Produksi NPI di tanur menggunakan kokas sebagai reduktan dan sumber energi. Karbon akan mengurangi zat besi, dan kandungan FeO dalam terak akan sangat kecil. Dalam proses ini juga ditambahkan aditif berupa batu kapur untuk mengatasi suhu leleh yang tinggi akibat kandungan FeO yang rendah serta silika dan magnesium yang bermutu tinggi pada terak. NPI disebut "nikel kotor" karena akan menghasilkan banyak terak, konsumsi energi yang tinggi, pencemaran lingkungan dan menghasilkan produk berkualitas rendah. Produksi NPI di tungku listrik, proses ini diyakini memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi daripada proses blast furnace. Keuntungan utama dalam proses ini adalah dapat memproses bijih kadar rendah yang sangat sulit diproses dengan pirometalurgi (Setiawan, 2016).

2.4.2 Hidrometalurgi

Hidrometalurgi merupakan proses pengolahan atau ekstraksi logam berharga dari bijih menggunakan media cair atau larutan pada kondisi atmosferik atau bertekanan. Proses hidrometalurgi dapat menjawab tantangan dalam pemanfaatan

bijih nikel laterit berkadar rendah seperti limonit (Arif, 2018). Dalam proses hidrometalurgi, ada tiga metode yang biasanya digunakan yaitu *atmospheric leaching*, *heap leaching* dan *high pressure acid leaching* (HPAL). *Tank leaching* menggunakan pengaduk dan reagen untuk memulai reaksi. Limpahan mengarah suspensi ke tangki lain, di mana *pregnant solution* dan pengotornya dipisahkan oleh proses pemisahan padat/cair. *Heap leaching* adalah proses yang sangat lambat, di mana asam tersebar setetes demi setetes di atas tumpukan, perlahan-lahan mengalir ke bawah.

Proses HPAL merupakan proses ekstraksi yang awalnya dikembangkan oleh Sheritt Gordon Canada untuk mengolah limonit murni yang jumlahnya berlimpah di Pinares de Mayari Cuba. HPAL merupakan proses metode ekstraksi hidrometalurgi yang sudah dapat digunakan secara komersial. Biaya pembangunan HPAL dan proses caron sama-sama mahal tapi memiliki tingkat perolehan yang berbeda dimana HPAL memiliki perolehan nikel ($\text{Ni} > 90\%$) dan kobalt ($\text{Co} > 90\%$) sedangkan proses caron memiliki perolehan nikel ($\text{Ni}: 70\% - 80\%$) dan kobalt ($\text{Co} \pm 50\%$) (Prasetyo & Ronald, 2011).

a. *Atmospheric Leaching* (AL)

Atmospheric leaching (AL) adalah proses untuk mengekstraksi suatu bahan yang dapat larut dari suatu padatan dengan menggunakan pelarut pada tekanan atmosfer. Proses kimia dari *Atmospheric Leaching* dengan pencucian asam bersuhu rendah umumnya dibawah 100°C dan tekanan rendah diprediksi dapat dikembangkan dimasa depan. *Atmospheric leaching* pada suhu yang lebih rendah dan kondisinya pada tekanan atmosfer menghindari kebutuhan *autoclave* pada *High Pressure Acid Leaching* yang mahal. Namun, terdapat dua masalah utama yang harus dihadapi pada penggunaan *atmospheric leaching* yaitu kinetika ekstraksi nikel yang lambat dan kemudahan dalam memisahkan logam pada proses selanjutnya misalnya, ekstraksi nikel dengan metode *atmospheric leaching* cenderung mengandung konsentrasi yang signifikan dari besi dan aluminium yang larut (McDonald and Whittington, 2008). *Atmospheric Leaching* adalah cara yang lebih sederhana, lebih murah, dan lebih andal untuk pelindian *matte* dibandingkan dengan *pressure leaching* (Gupta, 2003). Proses AL yang

dapat mengolah bijih limonit dan bijih saprolit, sering dibahas dalam hal investasi modal yang lebih rendah dan persyaratan proses yang lebih sederhana jika dibandingkan dengan proses HPAL. Terlepas dari kekurangan konsumsi asam yang tinggi dan periode pelindian yang berkepanjangan, AL, jika diterapkan dengan benar, dapat menjadi metode yang paling hemat biaya ekstraksi nikel dari laterit. Namun, efisiensi pelindian nikel dengan proses AL relatif rendah. Beberapa penelitian dan beberapa paten telah menjelaskan peningkatan ekstraksi nikel yang signifikan oleh AL, hanya setelah memanaskan bijih limonit pada berbagai temperatur. Namun pemanasan bijih saprolit diikuti dengan ekstraksi nikel dalam kondisi AL jarang diteliti (Dong, *et al.*, 2023) Jika dibandingkan dengan proses HPAL, proses ini lebih menguntungkan karena kebutuhan energi tidak setinggi proses HPAL, sehingga biaya operasional proses ini jauh lebih rendah (Kusuma, 2012). Proses leaching dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat dilakukan untuk meningkatkan hasil laju ekstraksi mineral, yaitu (McDonald, 2008; Kusuma, 2012):

1) Suhu operasi

Suhu yang digunakan dalam proses *leaching* akan mempengaruhi kinetika reaksi. Hal ini dapat dilihat dari persamaan Arrhenius. Penggunaan suhu operasi yang semakin tinggi menyebabkan terjadinya peningkatan laju ekstraksi mineral yang terlindi.

2) Ukuran partikel

Ukuran partikel bijih akan mempengaruhi seberapa besar luas permukaan yang akan terkontak dengan *leachant*. Pada berat sampel yang sama, penurunan ukuran partikel bijih akan menghasilkan luas permukaan total yang lebih besar. Hal ini akan mengakibatkan *laju ekstraksi* mineral akan meningkat.

3) Densitas *pulp*

Densitas *pulp* dapat diartikan sebagai perbandingan massa partikel terhadap volume asam yang digunakan. Pada umumnya, densitas *pulp* yang semakin besaar juga akan meningkatkan luas permukaan total dan meningkatkan hasil laju ekstraksi mineral.

- 4) Jenis asam dan konsentrasi asam
Jenis asam yang dapat digunakan pada proses leaching dapat berupa jenis asam inorganik (misalnya asam sulfat) maupun asam organik (misalnya asam sitrat). Perbedaan jenis asam ini akan mempengaruhi hasil akhir proses leaching. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan asam inorganik akan menghasilkan laju ekstraksi mineral yang lebih tinggi dibandingkan dengan asam organik.
- 5) Penambahan senyawa lain
Untuk meningkatkan nilai laju ekstraksi mineral, beberapa penelitian mengenai proses leaching mineral menambahkan beberapa senyawa lain yang berperan sebagai reduktor/oksidator dapat mempengaruhi proses redoks dalam proses leaching, sedangkan penambahan garam akan mengakibatkan terjadinya proses kompleksasi ion logam dengan ion negatif yang terkandung dalam asam.
- 6) Kecepatan pengadukan
Kandungan mineral dalam bijih akan mempengaruhi proses *leaching*, maka tumbukan antar molekul akan semakin besar. Akibatnya, laju proses *leaching* akan meningkat.
- 7) Komposisi mineral yang terkandung dalam bijih
Kandungan mineral dalam bijih akan mempengaruhi proses *leaching*. Sebagai contoh, nikel laterit jenis saprolit mengandung magnesium dan aluminium yang tinggi dibandingkan dengan jenis limonit. Apabila nikel laterit jenis saprolit dilakukan proses *leaching*, maka akan dibutuhkan jumlah asam yang tinggi. Hal ini akan menyebabkan proses *leaching* pada nikel laterit jenis saprolit tidak efektif.
- 8) Perlakuan bijih sebelum proses leaching (*pre-treatment*)
Pada beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, proses *pre-treatment* dilakukan untuk mengubah fasa mineral dengan cara proses pembakaran. Sebagai contoh, pada proses leaching nikel laterit jenis limonit, proses pemanasan nikel laterit dilakukan untuk mengubah fasa geotit menjadi hematit. Penggunaan proses *pre-treatment* ini dilakukan untuk mengefisiensikan proses leaching dalam upaya untuk

mempercepat proses leaching dan meminimalkan penggunaan jumlah asam. Namun dalam skala industri, proses *pre-treatment* ini tidak banyak dilakukan karena biaya operasional akan meningkat pada saat proses pemanasan bijih.

9) Waktu

Semakin lama proses leaching dilakukan akan meningkatkan laju ekstraksi mineral. Hal ini dikarenakan proses kontak asam dan padatan akan semakin terus terjadi.

Kelebihan proses atmospheric leaching adalah (Kyle, 2010):

- a) Proses ini dapat diterapkan untuk laterites kelas yang relatif rendah ($<1,5\%$ Ni) dan menggunakan bijih limonit dan saprolit.
- b) Ekstraksi nikel dan kobalt tinggi dibandingkan dengan tumpukan pelindian (umumnya $> 90\%$ untuk nikel dan $> 80\%$ untuk kobalt).
- c) Kelebihan asam sulfat bebas dinetralisasi dengan bijih saprolit.
- d) Pembakaran sulfur untuk menghasilkan asam sulfur menghasilkan keseimbangan energi positif secara keseluruhan.

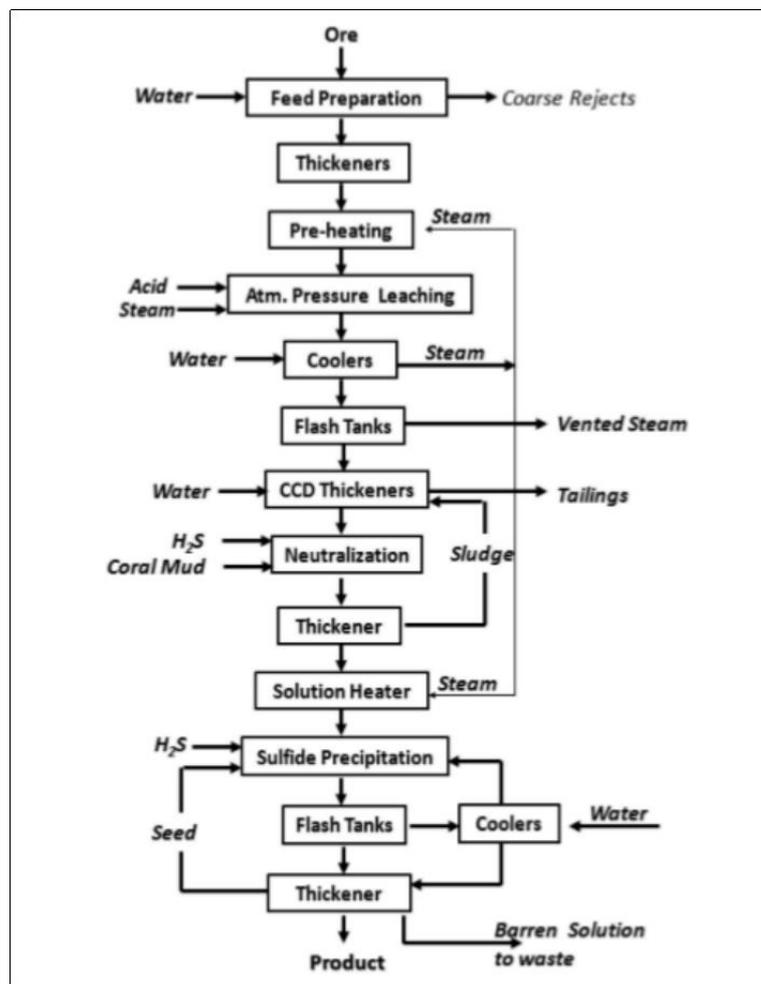
Kekurangan proses atmospheric leaching adalah (Kyle, 2010):

- a) Waktu pencucian jauh lebih lama dan pemulihan logam lebih rendah.
- b) Konsumsi asam sulfat lebih tinggi (umumnya dari 500 hingga 700 kg per ton bijih).
- c) Pemisahan padat-cair tidak efisien.
- d) Sejumlah besar cairan efluen magnesium sulfat diproduksi untuk dibuang.

b. *High Pressure Acid Leaching* (HPAL)

Proses HPAL merupakan proses ekstraksi yang awalnya dikembangkan oleh Sheritt Gordon Canada untuk mengolah limonit murni yang jumlahnya berlimpah di Pinares de Mayari Cuba. HPAL merupakan proses metode ekstraksi hidrometalurgi yang sudah dapat digunakan secara komersial. Biaya pembangunan HPAL dan proses caron sama-sama mahal tapi memiliki tingkat perolehan yang berbeda dimana HPAL memiliki perolehan nikel ($\text{Ni}>90\%$) dan kobal ($\text{Co}>90\%$) sedangkan proses caron memiliki perolehan nikel ($\text{Ni}:70\%-80\%$) dan kobal ($\text{Co}\pm 50\%$) (Prasetyo dan Ronald,

2011). *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) merupakan pelindian pada tekanan tinggi dalam larutan asam yang pertama kali diterapkan pada skala industri di Moa Bay, Kuba sejak 1959 untuk mengekstraksi bijih nikel laterit dengan kandungan magnesium rendah dan aluminium rendah. Pabrik di Moa Bay sukses beroperasi selama 30 tahun. Pabrik tersebut mengolah bijih dengan komposisi mineral 70% goetit, 20% gibsit, dan 10% serpentin serta kuarsa (Arif, 2018). Diagram alir HPAL di Moa Bay dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Diagram alir HPAL di Moa Bay (Meshram et al., 2019).

Kelebihan dari HPAL adalah (Kyle, 2010):

- 1) Dapat diterapkan untuk bijih nikel laterit kadar rendah ($Ni < 1,5\%$).
- 2) Memiliki fleksibilitas yang besar terhadap jenis bijih.
- 3) Laju ekstraksi kobalt umumnya $>95\%$ dan dapat diperoleh sebagai produk terpisah.

- 4) Uap pembakaran sulfur dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik.
- 5) Proses pengeringan bijih dan kalsinasi energi yang intensif dihilangkan.
- 6) Beberapa bijih dapat ditingkatkan kadarnya dengan melakukan penyaringan sebelum diproses.
- 7) Proses ini dapat digunakan dalam lingkungan air laut.

Kekurangan dari HPAL adalah (Kyle, 2010):

- 1) Kurang ekonomis untuk diterapkan pada lapisan saprolit yang mengandung konsentrasi tinggi karena banyak menggunakan asam.
- 2) Pelindian asam bertekanan tinggi sangat korosif dan membutuhkan material konstruksi dan pemeliharaan yang mahal.
- 3) Tingkat pengotor tinggi dalam cairan lindi menyebabkan pengolahan lebih mahal untuk produksi nikel dan kobalt.
- 4) Menghasilkan limbah yang cukup banyak.

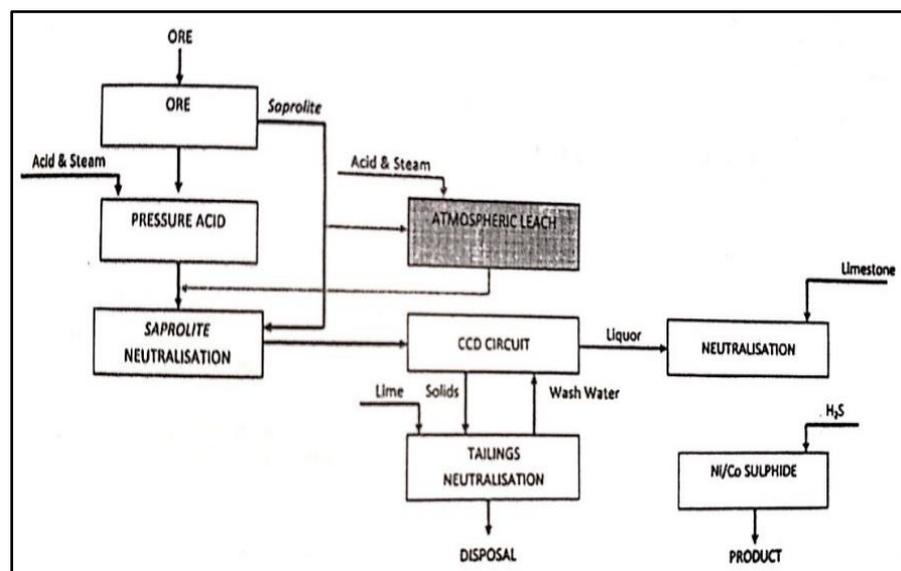
c. *Heap Leaching*

Heap leaching adalah proses yang biasanya digunakan untuk mengolah tembaga, emas, uranium dan digunakan dalam berbagai tingkatan oleh perusahaan seperti Glencore (Minara), Vale, BHPB dan Xstrata untuk mengolah nikel laterit. Proses *heap leaching* berpotensi menjadi proses pengolahan nikel laterit dengan modal terendah dan paling ramah lingkungan (Oxley and Barcza, 2013). Pada proses *heap leaching*, bijih ditumpuk di atas lapisan yang tak tembus seperti plastik atau aspal dan disemprot dengan larutan asam dari atas. Asam akan masuk ke dalam tumpukan (*heap*) dan melindi logam-logam yang terkandung dalam bijih, sehingga terbentuk larutan yang kaya akan logam. Larutan yang kaya akan logam tersebut, dikumpulkan pada bagian bawah tumpukan bijih selanjutnya dipompa dan diproses lebih lanjut secara kimiawi (Arif, 2018). Proses pelindian menggunakan asam, bergantung pada permeabilitas tumpukan bijih. Jika permeabilitasnya sangat kecil, larutan asam tidak dapat meresap ke dalam yang mengakibatkan pelindian tidak dapat terjadi. Untuk menghindari hal tersebut, umumnya bijih terlebih dahulu diaglomerasi. Proses pelindian dilakukan pada suhu kamar dan berlangsung selama

berbulan-bulan yaitu sekitar 3 – 12 bulan. Proses *heap leaching* tidak memerlukan proses pemisahan padatan seperti pada proses PAL dan AL. perolehan dari proses *heap leaching* ini tidak sebesar perolehan pada proses HPAL dan AL, sebab perolehan dan selektivitas proses ini terhadap besi sangat bergantung pada tipe bijih, khususnya komposisi mineral yang terkandung dalam bijih (Arif, 2018).

d. *Enhanced Pressure Acid Leaching (EPAL)*

Enhanced pressure acid leaching (EPAL) merupakan proses kombinasi antara PAL dan AL yang bertujuan untuk menurunkan *capital expenditure (CAPEX)* dengan mengurangi jumlah *autoclave* dan menurunkan total konsumsi asam dalam pelindian yang merupakan contributor utama biaya operasi. Penurunan konsumsi asam dilakukan dengan mereaksikan *liquor* hasil pelindian dalam PAL dan sejumlah bijih saprolit. Proses ini bias membutuhkan jumlah saprolit yang lebih banyak dibandingkan HPAL konvensional (Arif, 2018). Dibandingkan dengan proses HPAL dan AL, proses EPAL memiliki konsentrasi asam sisa (*residual acid*) yang paling rendah. Dalam hal ini, EPAL memiliki dampak lingkungan yang lebih ramah lingkungan daripada AL. Namun ditinjau dari sisi pengoperasian dan pemeliharaan masih perlu menjadi kajian karena adanya korosi dan *scaling* yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses AL (Arif, 2018). Diagram alir EPAL di Weda Bay dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Diagram alir EPAL di Weda Bay (LAPI ITB, 2013).

e. *Atmospheric Chloride Leaching Process (ACLPL)*

Atmospheric chloride leaching process merupakan salah satu proses yang dapat dijadikan solusi dalam pengolahan bijih nikel kadar rendah. Pada proses ini, penggunaan asam dan suhu yang rendah dengan tekanan atmosfer merupakan salah satu solusi dalam pengolahan yang hemat energi dibandingkan dengan metode HPAL. Kelebihan lainnya dari proses ACLPL yakni sisa asam dari pelindian yang dilakukan dapat diolah kembali menggunakan metode pirolisis. Persen ekstraksi Ni dan Co dari proses ini dapat mencapai Ni >90% dan Co >80%. Namun terlepas dari beberapa kelebihannya, proses ini memiliki kerugian yakni biaya perawatan alat yang cukup besar karena penggunaan asam kuat yang dapat membuat alat tidak tahan terhadap korosi.

2.5 Roasting

Pemanggangan (*roasting*) dapat mengubah goetit menjadi hematit dalam bijih limonit. Proses ini telah ditunjukkan melalui pencucian nikel dan kobalt di atmosfer (Sukla dan Das, 1987). Pemanggangan bijih saprolit dapat meningkatkan reaktivitas mineral serpentin. Berbagai metode reduksi pemanggangan telah diklaim untuk meningkatkan selektivitas pencucian. Ini termasuk berbagai zat pereduksi seperti serbuk besi (Shirane et al., 1983). Pemanggangan bijih ini berbeda dengan kalsinasi. Kalsinasi merupakan proses pemanasan suatu bahan atau material dengan menggunakan temperatur tinggi dengan adanya udara atau oksigen terbatas (Prasetyo dkk., 2016)

Transformasi goetit menjadi hematit dimulai pada suhu pemanggangan 250°C dengan durasi pemanggangan 2 jam. Transformasi goetit ini terus berlanjut seiring peningkatan suhu pemanggangan. Puncak goetit menghilang total ketika sampel dipanaskan pada suhu 430°C. Transformasi selesai pada suhu pemanggangan 800°C (Garces-Granda *et al.*, 2020). Transformasi struktur kristal yang disebabkan oleh pemanasan bijih adalah faktor penentu yang mempengaruhi ekstraksi logam. Suhu pemanggangan bijih dapat memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perolehan logam nikel. Pemanggangan bijih 600°C selama 1

jam memberikan perolehan nikel yang optimal karena pemanasan bijih pada suhu tersebut mengubah struktur kristal utama goetit yang memungkinkan interaksi yang cepat antara larutan dan nikel yang terperangkap selama pelindian. Pemanggangan bijih tidak hanya mengubah komposisi mineraloginya tetapi juga meningkatkan porositas dan luas permukaannya, sehingga membuatnya lebih mudah untuk pelindian. Dengan demikian, pemanggangan bijih yang dilakukan dapat mengefisiensikan proses *leaching* dalam upaya untuk mempercepat proses *leaching* dan meminimalkan penggunaan jumlah asam (Dong, *et al.*, 2023).

2.6 Atmospheric Leaching dengan Asam Sulfat (H₂SO₄)

Proses pengolahan hidrometalurgi dengan metode *atmospheric leaching* menggunakan asam (*lixiviant acid*) seperti asam sulfat, asam klorida, dan asam nitrat menjadi berkembang pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan untuk pengolahan bijih limonit berkadar rendah yang memiliki kandungan air tinggi (25-50%). Kisaran suhu yang cukup rendah dari proses *leaching* (25-275°C) secara signifikan dapat menurunkan biaya operasional. Proses pengolahan ini juga lebih ramah lingkungan karena tidak melepaskan gas beracun seperti SO₂. Kemampuan untuk mengekstraksi kobalt secara efisien menyebabkan proses ini menjadi lebih layak untuk pengolahan bijih limonit yang banyak mengandung kobalt (Gupta and Mukherjee, 1991).

Upaya pengembangan metode *atmospheric leaching* untuk pengolahan bijih nikel limonit telah dilakukan secara intensif. Beberapa studi dan riset percobaan skala laboratorium dari metode ini telah dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan model ekstraksi nikel-kobalt lebih efektif dan efisien. Uji ekstraksi ini dilakukan dengan menggunakan parameter seperti suhu, waktu, volume larutan, konsentrasi asam pelarut yang digunakan (Dry, 2015). Pelindian dengan berbagai asam seperti asam sulfat, asam klorida dan asam nitrat pada tekanan atmosfer telah dilakukan beberapa peneliti sebelumnya yang menunjukkan bahwa asam sulfat merupakan asam yang paling efektif karena cukup korosif untuk mengubah struktur mineral silikat sehingga mampu melarutkan nikel (Prasetyo, 2016). Keberadaan SO₂ sebagai reduktan secara efektif dapat meningkatkan persentase pelindian nikel laterit hingga 97% (Das & de Lange, 2011). Untuk meningkatkan efektifitas

pelindian dengan metode AL dapat ditambahkan senyawa natrium sulfit (Luo *et al.*, 2015) dan amonium biflorida (Li *et al.*, 2010).

2.7 X-Ray Diffraction (XRD)

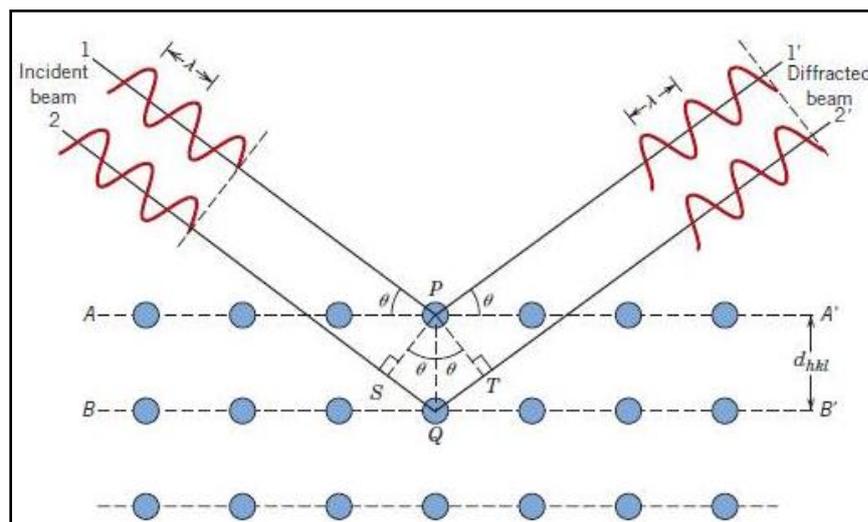
Analisis XRD merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui jenis mineral yang terdapat dalam sampel atau material. Cara kerja analisis XRD yaitu sampel atau material digerus sampai jadi bubuk (*powder*). Data hasil sinar X dalam bentuk spektrum difraksi yang terdeteksi oleh dektektor kemudian ditransfer atau terekam ke komputer berupa grafik peak intensitas, yang dilanjutkan dengan analisis jarak antar bidang kisi kristal kemudian dibandingkan menggunakan hukum Bragg (Munasir, Triwikantoro, Zainuri, & Darminto, 2012).

XRD merupakan alat difraktometer yang menggunakan prinsip difraksi. Analisis XRD adalah metode yang sangat penting untuk mengkarakterisasi struktur kristal material. Teknik ini biasanya dapat digunakan untuk analisis parameter kisi kristal tunggal, atau tahap tersebut, tekstur atau bahkan stres analisis bahan polikristalin (seperti serbuk) (Loye, 2013). Difraksi adalah suatu metode eksperimen hamburan elastis, dimana proses transfer/perubahan energi dapat diabaikan dalam proses hamburan tersebut. Informasi yang diperoleh dari metode difraksi ini yakni data koordinat atom-atom dalam kristal yang mendasari sifat dan karakteristik bahan pada umumnya (Bunaciu, *et all*, 2015).

Komponen utama XRD (*X-Ray Diffraction*) yaitu terdiri dari tabung katoda (tempat terbentuknya sinar-X), sampel holder dan pendeteksi. XRD memberikan data data difraksi dan kuantisasi intensitas difraksi pada sudut-sudut dari suatu bahan. Data yang diperoleh dari XRD berupa intensitas difraksi sinar-X yang terdifraksi dan sudut-sudut 2θ . Tiap pola yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu (Widyawati, 2012).

Proses analisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dengan pola difraktogram yang menghasilkan deretan puncak-puncak difraksi dengan intensitas bervariasi sepanjang nilai 2θ tertentu. Besarnya nilai intensitas dari deretan puncak-puncak tersebut tergantung pada jumlah atom atau ion yang terkandung didalam sampel. Pola difraksi pada padatan tergantung pada kisi kristal dan Panjang gelombang yang digunakan atau dihasilkan. Hasil difraksi sinar-x dicetakkan pada

kertas dengan sumber pancaran radiasi Cu Ka dan dengan filter nikel. Data difraksi sinar-X dari sampel kemudian dibandingkan dengan kartu JCPDS (*Joint Committee Powder Diffraction Standard*). Dari nilai difraksi sinar-X yang menghasilkan intensitas dan sudut difraksi, dianalisis untuk menentukan jenis struktur kristalnya dengan mencocokkan pada data ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) untuk semua sampel yang diuji. Informasi yang diperoleh dari data difraksi sinar X yaitu: (1) Posisi puncak difraksi memberikan gambaran terkait parameter kisi (a), jarak antar bidang (d_{hkl}), struktur kristal dan orientasi dari sel satuan; (2) intensitas relatif puncak difraksi memberikan gambaran tentang posisi atom dalam sel satuan; (3) bentuk puncak difraksi memberikan gambaran tentang ukuran kristal dan ketidak sempurnaan kisi (Munasir, Triwikantoro, Zainuri, & Darminto, 2012). Proses difraksi sinar-X dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8 Difraksi sinar-X (Munasir, Triwikantoro, Zainuri, & Darminto, 2012)

Ada 2 cara analisis data difraksi, yaitu: (1) analisis kualitatif yang sering disebut dengan proses identifikasi fasa, dengan melalui pencocokan puncak-puncak difraksi dengan kartu PDF (*Powder Diffraction File*). Langkah-langkah dalam mengidentifikasi fasa dengan menggunakan software, terdiri dari: *peak search* (menentukan posisi puncak) dan *search match* dapat dilakukan dengan cara manual maupun cara berbasis komputer. (2) Analisis kuantitatif digunakan untuk mengetahui informasi lebih lanjut mengenai material yang diuji, yaitu komposisi fasa. Pola difraksi yang diperoleh dari difraktometer menggambarkan status kristalinitas material yang diuji. Yang pertama dapat dilihat dengan kasat mata dari

sebuah pola difraksi adalah keberadaan fasa kristal dan fasa amorf. Keberadaan fasa kristal dapat segera dilihat dari adanya puncak-puncak difraksi, sedangkan material amorf memberikan pola berbentuk puncak difraksi atau intensitas latar yang tidak teratur. Komposisi fasa kristal dan material amorf pada material uji dapat dapat dihitung menggunakan metode analisis lanjut dari data difraksi yang telah terukur. Identifikasi berikutnya adalah menentukan fasa (kristal) apa saja yang terdapat di dalam materi uji. Pada dasarnya identifikasi fasa didasarkan pada pencocokan data posisi-posisi puncak difraksi terukur dengan basis data (database) fasa-fasa yang telah dikompilasi, misalnya dalam bentuk kartu PDF (*Powder Diffraction File*). Kartu PDF untuk sebuah fasa berisikan informasi mengenai: (1) nama fasa (termasuk nama khas fasa tersebut, misalnya nama mineralnya), (2) sifat fisik dan kristalografi (cara memperoleh material tersebut, densitasnya, grup ruang dan sebagainya), (3) posisi puncak dan intensitas relatif untuk Panjang gelombang radiasi tertentu (Nayiroh, 2014).

2.8 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) adalah suatu alat yang digunakan pada metode analisis untuk penentuan unsur-unsur logam dan metaloid yang pengukurannya berdasarkan penyerapan cahaya dengan panjang gelombang tertentu oleh atom logam dalam keadaan bebas. Metode ini sangat tepat untuk analisis zat pada konsentrasi rendah. Interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan sampel merupakan prinsip dasar spektrofotometri serapan atom (Sari, 2010).

AAS adalah alat spektroskopi yang dapat dipercaya dalam menganalisis adanya logam dalam sampel. Alat spektrophometer yang secara khusus mengukur konsentrasi bahan kimia berupa atom bukan senyawa disebut spektrophometer nyala (*flame spectrophometer*) karena menggunakan objek nyala api pembakar. Cara kerja AAS yaitu sampel berupa molekul aka diasosiasikan menjadi atom-atom di dalam nyala api pada alat spectrophometer serapan atom, atom menyerap energi sehingga atom-atomnya mengalami eksitasi. Energi energi eksitasi ini berasal dari pacarana sinar yang dikeluarkan dari sebuah sumber cahaya (lampu), dimana energi yang terserap sama dengan selisih energi antara dua nivo energi. Peralihan antara

dua nivo energi yang melibatkan posisi dasar biasanya mempunyai intensitas pancaran dan serapan yang lebih kuat daripada yang lain. Peralihan dari posisi dasar ke psisi eksitasi yang pertama disebut garis resonansi. Garis resonansi ini sangat penting pada atom absorpsi, sebab pada atom absorpsi ini tiap elemen dalam sampel akan menyerap sinar dengan jumlah jarak gelombang yang terbatas dalam Kawasan spektrum yang sempit. Daro spektrum serapan ini akan dapat diperoleh data-data mengenai zat sampel. Nyala api gas pembakar atom yang ada dalam sebuah proses spektrophometer srapan atom seolah-olah berfungsi sebagai kuvet pada spektrophometer Ultra Violet (UV-Vis) (Sari,2010).

Keuntungan dari proses pencucian (Kyle, 2010):

1. Proses ini dapat diterapkan pada laterit kelas yang relatif rendah (<1,5% Ni) dan menggunakan bijih limonit dan saprolit
2. Ekstraksi nikel dan kobalt tinggi dibandingkan dengan pencucian tumpukan (umumnya >90% untuk nikel dan >80% untuk kobalt)
3. Kelebihan asam sulfat bebas dinetralkan dengan bijih saprolit
4. Pembakaran sulfur untuk menghasilkan asam sulfat menghasilkan keseimbangan energi positif secara keseluruhan.

Kerugian dari proses pencucian (Kyle, 2010):

1. Waktu pencucian jauh lebih lama dan pemulihan logam lebih rendah
2. Konsumsi asam sulfat lebih tinggi (umumnya dari 500 hingga 700 kg per ton bijih)
3. Pemisahan padat-cair tidak seefisien
5. Sejumlah besar minuman keras limbah magnesium sulfat diproduksi untuk dibuang.

Penelitian terkait pencucian atmosfer menggunakan larutan asam sulfat telah dilakukan. Berbagai strategi dilakukan untuk meningkatkan laju ekstraksi nikel dengan proses *atmospheric leaching* dan juga meningkatkan selektivitas besi dan mengurangi konsumsi asam dengan meningkatkan suhu dan waktu pelindian, menggunakan reduktan, dan katalis (McDonald dan Whittington, 2008).

Metode analisi menggunakan AAS terdapat dalam 3 cara yaitu metode standar tunggal, metode kurva kalibrasi dan metode adisi standar. Ketiga metode tersebut menggunakan larutan standar sebagai pembanding. Pada metode standar

tunggal, hanya digunakan satu larutan standar yang telah diketahui konsentrasinya. Nilai absorbansi larutan sampel yang diperoleh dari AAS dibandingkan secara langsung terhadap nilai absorbansi larutan standar, sehingga konsentrasi larutan sampel dapat diketahui. Metode menggunakan kurva kalibrasi menggunakan suatu seri larutan standar. Nilai konsentrasi dan absorbansi larutan standar ini dibuat grafik dan dihitung persamaan linear. Persamaan linear ini digunakan untuk menghitung konsentrasi sampel berdasarkan nilai absorbansi yang didapatkan. Metode adisi standar dipakai secara luas karena mampu meminimalkan kesalahan yang disebabkan oleh perbedaan kondisi lingkungan (matriks) sampel dan standar. Dalam metode ini dua atau lebih sejumlah volume tertentu diukur absorbansinya tanpa ditambah larutan standar, sedangkan larutan yang lain ditambah terlebih dahulu dengan sejumlah larutan standar tertentu dan diencerkan seperti pada larutan yang pertama (Cantle, 1982).