

SKRIPSI

**EFEK PEMANASAN TERHADAP TINGKAT PELINDIAN
NIKEL DAN KOBALT DARI BIJIH LIMONIT PULAU
KABAENA MENGGUNAKAN ASAM SULFAT**

Disusun dan diajukan oleh:

**RIDWAN SAPUTRA
D111 20 1027**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

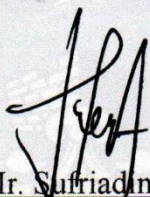
**EFEK PEMANASAN TERHADAP TINGKAT PELINDIAN NIKEL
DAN KOBALT DARI BIJIH LIMONIT PULAU KABAENA
MENGUNAKAN ASAM SULFAT**

Disusun dan diajukan oleh

Ridwan Saputra
D111 20 1027

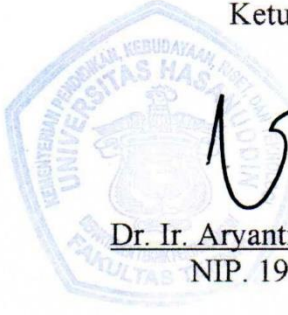
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 30 September 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



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

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T.
NIP. 197010052008012026

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ridwan Saputra
NIM : D111201027
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Efek Pemanasan Terhadap Tingkat Pelindian Nikel dan Kobalt dari Bijih
Limonit Pulau Kabaena Menggunakan Asam Sulfat}

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, 30 September 2024

Yang Menyatakan



Ridwan Saputra

ABSTRAK

RIDWAN SAPUTRA. *Efek Pemanasan Terhadap Tingkat Pelindian Nikel dan Kobalt dari Bijih Limonit Pulau Kabaena Menggunakan Asam Sulfat (dibimbing oleh Sufriadin)*

Pemanfaatan bijih limonit sangat mendesak untuk dilakukan karena ketersediaan bijih berkadar tinggi yang semakin berkurang. Bijih nikel laterit jenis limonit lebih cocok diolah secara hidrometalurgi, seperti pelindian pada tekanan atmosfer karena membutuhkan biaya investasi dan mempunyai resiko teknis yang relatif rendah. Proses pemanasan bijih dapat meningkatkan porositas mineral, sehingga memudahkan terjadinya interaksi asam dengan mineral dan logam lebih mudah diekstraksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efek pemanasan terhadap tingkat pelindian nikel dan kobalt dari bijih limonit menggunakan asam sulfat. Sampel bijih limonit direduksi hingga mencapai ukuran partikel < 200 mesh. Pemanggang bijih dilakukan pada suhu antara 100°C hingga 600°C dengan interval 100°C , kemudian dilakukan pelindian menggunakan asam sulfat dengan konsentrasi 2 M, suhu pelindian 80°C , persen padatan 10%, dan kecepatan pengadukan 400 rpm selama 1 jam. Karakterisasi sampel menggunakan analisis mikroskopis, *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF), dan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Hasil analisis mineralogi menunjukkan bahwa sampel tersusun dari *quartz* (SiO_2), *talc* ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), *goethite* (FeOOH), *lizardite* ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), *montmorillonite* ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$), dan *gibbsite* ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Hasil analisis kimia menunjukkan bahwa sampel mengandung SiO_2 (42,17%), Ni (1,67%), Co (0,06%), Fe (18,84%), MgO (4,48%), dan Al_2O_3 (3,83%). Setelah pemanggang bijih dengan suhu 500°C *goethite* bertransformasi menjadi fasa mineral lain yaitu *hematite-proto*. Tingkat pelindian nikel maksimum terjadi pada suhu pemanggang bijih 600°C sebesar 54,07% dan tingkat pelindian kobalt maksimum terjadi pada suhu pemanggang bijih 500°C sebesar 15,90%.

Kata Kunci: Nikel, Kobalt, Limonit, Pemanggang Bijih, Hidrometalurgi, Asam Sulfat, Tingkat Pelindian

ABSTRACT

RIDWAN SAPUTRA. *Effects of Roasting on Nickel and Cobalt Leaching Rates from Kabaena Island Limonite Ore Using Sulfuric Acid (supervised by Sufriadin)*

*The utilization of limonite ore is urgent due to the diminishing availability of high-grade ore. Limonite laterite nickel ore is more suitable for hydrometallurgical processing, such as leaching at atmospheric pressure because it requires low investment costs and has relatively low technical risks. The roasting process can increase the porosity of the mineral, making it easier for acids to interact with minerals and metals to be extracted more easily. This study aims to analyze the effect of roasting on the leaching rate of nickel and cobalt from limonite ore using sulfuric acid. Limonite ore samples were reduced to a particle size < 200 mesh. The ore was roasted at temperatures between 100°C and 600°C at 100°C intervals, then leached using sulfuric acid with a concentration of 2 M, a leaching temperature of 80°C, a solids percentage of 10%, and a stirring speed of 400 rpm for 1 hour. The samples were characterized using microscopic analysis, X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), and Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The mineralogical analysis showed that the sample was composed of quartz (SiO_2), talc ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), goethite (FeOOH), lizardite ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), montmorillonite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$), and gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$). The chemical analysis results show that the samples contain SiO_2 (42.17%), Ni (1.67%), Co (0.06%), Fe (18.84%), MgO (4.48%), and Al_2O_3 (3.83%). After roasting the ore at 500°C goethite transforms into another mineral phase, namely hematite-*proto*. The maximum nickel leaching rate occurred at a roasting temperature of 600°C at 54.07% and the maximum cobalt leaching rate occurred at a roasting temperature of 500°C at 15.90%.*

Keywords: *Nickel, Cobalt, Limonite, Ore Roasting, Hydrometallurgy, Sulfuric Acid, Leaching Rate*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Nikel.....	5
2.2 Nikel Laterit	8
2.3 Kobalt.....	15
2.4 Teknologi Pengolahan Bijih Nikel Laterit	23
2.5 <i>Roasting Pretreatment</i>	31
2.6 Pelindian Menggunakan Asam Sulfat.....	34
BAB III METODE PENELITIAN.....	37
3.1 Lokasi Pengambilan Sampel.....	37
3.2 Variabel Penelitian.....	38
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	39
3.4 Teknik Pengumpulan Data Penelitian.....	43
3.5 Teknik Analisis	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	58
4.1 Karakterisasi Sampel Bijih Limonit.....	58
4.2 Hasil Pelindian Bijih Limonit	66
4.3 Analisis Tingkat Pelindian Nikel dan Kobalt.....	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN.....	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Persebaran endapan nikel sulfida dan laterit di dunia (Elias, 2002)	8
Gambar 2 Lapisan endapan laterit, komposisi kimia dan jalur pengolahannya (Achmad, 2021).....	10
Gambar 3 Perbandingan skematis tipe-tipe profil laterit utama (Elias, 2002)	12
Gambar 4 Diagram alir proses pengolahan laterit (Rodrigues, 2013)	24
Gambar 5 Lapisan ideal laterit daerah tropis di alam dan pengolahannya (Prasetyo, 2016)	26
Gambar 6 Skema pengaturan <i>atmospheric leaching</i> (Asadrokht and Zakeri, 2022).....	36
Gambar 7 Lokasi pengambilan sampel bijih nikel laterit jenis limonit di lokasi penambangan PT Anugrah Harisma Barakah	38
Gambar 8 Proses pengambilan sampel dengan metode <i>random sampling</i>	44
Gambar 9 Proses pencampuran sampel menggunakan metode <i>quartering</i>	45
Gambar 10 Proses reduksi ukuran sampel menggunakan <i>agate mortar</i>	46
Gambar 11 Proses pengayakan sampel menggunakan ayakan 200 mesh.....	47
Gambar 12 Proses penimbangan sampel menggunakan timbangan digital Sartorius tipe CPA124S	47
Gambar 13 Pemanggang sampel bijih menggunakan <i>Muffle Furnace</i> tipe Yamato FO310	48
Gambar 14 Tahapan pengenceran larutan asam sulfat pekat	50
Gambar 15 Tahapan pelindian bijih limonit menggunakan asam sulfat.....	51
Gambar 16 Penyaringan larutan hasil pelindian	52
Gambar 17 Pengamatan sampel awal menggunakan mikroskop polarisasi tipe Nikon Eclipse LV100N POL	53
Gambar 18 Instrumen analisis XRD tipe Shimadzu Maxima X-7000.....	54
Gambar 19 Kegiatan analisis XRF melalui <i>software Spectra Results Manager</i> (kiri) dan Instrumen Bruker ED X-Ray S2 Puma (kanan).....	55
Gambar 20 Instrumen AAS 6000 <i>Flame Atomic Absorption Spectrometer</i>	55
Gambar 21 Diagram alir penelitian.....	56
Gambar 22 Kenampakan mineral hasil analisis mikroskopis sampel bijih limonit	58
Gambar 23 Difraktogram sampel awal bijih limonit	59
Gambar 24 Difraktogram sampel bijih limonit setelah pemanggang bijih	62
Gambar 25 Difraktogram residu hasil pelindian.....	68
Gambar 26 Perbandingan difraktogram sampel awal, pemanggang bijih, dan residu hasil pelindian	69
Gambar 27 Tingkat pelindian nikel menggunakan H ₂ SO ₄ pada setiap suhu pemanggang.....	73
Gambar 28 Tingkat pelindian kobalt menggunakan H ₂ SO ₄ pada setiap suhu pemanggang.....	76

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Hasil pengenceran asam sulfat (H_2SO_4).....	49
Tabel 2 Fasa mineral sampel awal bijih limonit	60
Tabel 3 Fasa mineral sampel bijih limonit setelah pemanggangan.....	63
Tabel 4 Hasil analisis XRF sampel awal.....	65
Tabel 5 Hasil analisis AAS sampel awal	65
Tabel 6 Hasil analisis AAS sampel hasil pelindian menggunakan asam sulfat (H_2SO_4)	66
Tabel 7 Fasa mineral residu hasil pelindian	68
Tabel 8 Perolehan nikel dan tingkat pelindiannya setelah pelindian menggunakan H_2SO_4	73
Tabel 9 Perolehan kobalt dan tingkat pelindiannya setelah pelindian menggunakan H_2SO_4	75

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta Lokasi Pengambilan Sampel.....	85
Lampiran 2 Perhitungan Pengenceran Asam Sulfat (H_2SO_4) 98%.....	87
Lampiran 3 Hasil Analisis Mikroskopis	89
Lampiran 4 Hasil Analisis <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	91
Lampiran 5 Hasil Analisis <i>Atomic Absorption Spectrophotometry</i> (AAS)	93
Lampiran 6 Perhitungan Tingkat Pelindian	95
Lampiran 7 Hasil Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	100
Lampiran 8 Kartu Konsultasi Tugas Akhir.....	115

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji syukur selalu penulis panjatkan atas kehadiran Allah *Subhanahu wa ta'ala* yang senantiasa melimpahkan rahmat, hidayah, serta inayah-Nya, sehingga penulis bisa menyelesaikan seluruh kegiatan penelitian tugas akhir ini yang berjudul “Efek Pemanasan Terhadap Tingkat Pelindian Nikel dan Kobalt dari Bijih Limonit Pulau Kabaena Menggunakan Asam Sulfat” dengan baik. Shalawat serta salam tidak lupa selalu penulis kirimkan untuk junjungan Nabi Muhammad *Shallallahu 'alaihi wasallam* yang telah menyampaikan petunjuk Allah *Subhanahu wa ta'ala* untuk kita semua.

Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini diharapkan mampu memberikan referensi pengolahan dan solusi pemanfaatan bijih nikel laterit berkadar rendah utamanya lapisan limonit sehingga dapat diolah dan diekstraksi secara efektif dan efisien.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah membantu, mulai pada saat penelitian hingga tahap penyusunan laporan tugas akhir ini, yaitu Pimpinan perusahaan PT Anugrah Harisma Barakah Site Malapulu yang telah memberikan kesempatan dan dukungan kepada penulis untuk melakukan pengambilan sampel di lokasi penambangan perusahaan. Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Bapak dan Ibu Dosen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmunya serta staff administrasi departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu segala bentuk administrasi yang diperlukan untuk mendukung jalannya penyusunan tugas akhir ini. Bapak Dr. Ir. Sufriadin, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dalam memberikan solusi dan mengarahkan serta membimbing penulis sehingga dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini dengan baik. Ibu Dr. Eng. Rini Novrianti Sutardjo Tui, ST., MBA., MT. dan Bapak Ir. Asta Arjunoarwan Hatta, ST., MT. selaku dosen penguji atas kesediaannya dan saran yang telah diberikan kepada penulis. Kak Muhammad Zahran Mubarak, ST., yang juga telah membantu penulis dalam melakukan analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) pada sampel bijih limonit yang diteliti.

Selain itu, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan seperjuangan Mahasiswa Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Angkatan 2020 (DRILLING 2020) yang selalu memberikan bantuan, dukungan, dan masukan kepada penulis sehingga dapat membantu kelancaran penyusunan tugas akhir ini. Teman-teman Presidium GenBI Wilayah Sulawesi Selatan (Selvi, Ichwan, Checen, Isma, Sadirah, Tauhid, dan Fahmi) serta seluruh Pengurus Deputi dan anggota GenBI Wilayah Sulawesi Selatan periode 2023-2024 yang selalu memberikan motivasi dan semangat kepada penulis untuk bisa

menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini. Hasbi. S dan Jumriah selaku Orang tua yang selalu memberikan doa serta dukungan moral dan materi selama melaksanakan penelitian hingga tahap penyusunan laporan tugas akhir ini selesai.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun penulis terima dari semua pihak demi kesempurnaan penyusunan tugas akhir yang berkaitan selanjutnya.

Gowa, 30 September 2024
Penulis,

Ridwan Saputra

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel adalah logam *nonferrous* yang penting dan banyak digunakan untuk baja tahan karat dan baja paduan, pelapisan baja, atau katalis dalam proses hidrogenasi industri kimia minyak bumi. Sumber daya nikel saat ini termasuk bijih nikel sulfida dan bijih nikel laterit, yang masing-masing menyumbang sekitar 30% dan 70% dari cadangan nikel dunia. Namun, lebih dari 60% produksi nikel berasal dari bijih nikel sulfida karena nikel dalam bijih sulfida dapat dengan mudah diperkaya dan diperoleh kembali dengan flotasi konvensional serta pemisahan magnetik dan gravitasi. Bijih nikel sulfida tingkat tinggi telah dieksploitasi terlebih dahulu dan semakin menipis, maka bijih nikel laterit dengan kadar nikel rendah secara bertahap menjadi sumber daya utama untuk produksi nikel (Bahfie dkk., 2021).

Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai cadangan nikel dalam bentuk bijih laterit terbesar di dunia. Hingga saat ini proses pengolahan dan pemurnian bijih nikel laterit di Indonesia lebih banyak dilakukan untuk bijih saprolit, yaitu untuk memproduksi ferronikel dan nikel *matte*, sementara bijih limonit yang berkadar nikel lebih rendah belum banyak dimanfaatkan. Pemanfaatan bijih limonit sangat mendesak untuk dilakukan karena ketersediaan bijih berkadar tinggi yang semakin berkurang, sebagai upaya peningkatan nilai tambah bijih berkadar rendah serta efektivitas penambangan karena keberadaan lapisan bijih limonit yang berada di atas lapisan bijih saprolit (Fathoni dan Mubarak, 2015).

Lapisan limonit adalah tempat terakumulasinya konsentrasi unsur residual pada batas nilai maksimum selama laterisasi dan pencucian terjadi. Semua unsur yang mudah larut secara kimia (Ca, Mg, dan Si) larut meninggalkan zona limonit selama pencucian dan terakumulasi pada lapisan saprolit. Lapisan limonit menyisakan kelompok unsur (Fe, Al, Mn, dan Cr). Pada lapisan ini pengayaan nikel dapat terikat pada struktur mineral *goethite* bersama sejumlah unsur seperti aluminium, mangan dan kromium. Pada zona limonit, struktur, tekstur, dan kehadiran mineral primer tidak lagi terlihat dan sepenuhnya telah terdekomposisi menjadi tanah laterit (Masri dkk., 2023).

Proses pengolahan nikel laterit dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu proses pirometalurgi dan proses hidrometalurgi. Kedua proses ini dapat diaplikasikan secara komersil dalam skala industri untuk proses ekstraksi nikel dari nikel laterit yang digunakan. Nikel laterit jenis saprolit lebih cocok untuk diolah dengan menggunakan proses pirometalurgi, sedangkan proses hidrometalurgi lebih cocok digunakan untuk mengolah nikel laterit jenis limonit (Mukhtar dkk., 2022). Bijih laterit merupakan bijih yang struktur mineraloginya kompleks, kadar nikelnya rendah, dan biaya pengolahannya tinggi, baik melalui peleburan konvensional maupun dengan *autoclave* bertekanan tinggi. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan nikel, diperlukan metode pengolahan nikel laterit yang lebih ekonomis. Untuk bijih nikel laterit jenis limonit lebih cocok diolah secara hidrometalurgi, seperti pelindian pada tekanan atmosfer. Proses pelindian atmosferik dipilih karena membutuhkan biaya investasi dan mempunyai resiko teknis yang relatif rendah. Selain itu, proses ini mampu memberikan *recovery* logam-logam bernilai yang tinggi seperti Ni dan Co serta memerlukan energi rendah, sehingga sangat efisien dari segi ekonomi dan operasional (Febriana dkk., 2018).

Pada proses pemisahan nikel secara hidrometalurgi terdapat faktor faktor yang mempengaruhi ekstraksi nikel yaitu jenis asam, pemanasan bijih, suhu, dan konsentrasi larutan. Jenis dan konsentrasi asam memberikan pengaruh terhadap persen ekstraksi nikel. Selain itu pengaruh perlakuan awal bijih nikel menggunakan proses pemanasan bijih juga berpengaruh terhadap hasil persen ekstraksi nikel. Proses pemanasan bijih menyebabkan terjadinya perluasan mineral yang mengakibatkan porositas jadi lebih besar sehingga memudahkan terjadinya interaksi asam dengan mineral dan logam lebih mudah diekstraksi. Ekstraksi nikel laterit menggunakan pelarut asam kuat yaitu asam sulfat, asam klorida, dan asam nitrat. Hasil menunjukkan bahwa proses *leaching* nikel laterit dengan menggunakan asam klorida, asam sulfat dan nitrat dapat menghasilkan nilai *recovery* yang cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan asam organik seperti asam oksalat. Dalam kondisi ideal, proses pemisahan nikel dengan *leaching* menghasilkan dua jenis fraksi yakni material tidak berharga yang telah dipisahkan dari mineral berharga dan fraksi lainnya adalah larutan dengan logam berharga yang digunakan dalam proses lebih lanjut (Yanuar dkk., 2024).

Atmospheric leaching menjadi perhatian karena dapat beroperasi pada temperatur $> 100^{\circ}\text{C}$ pada tekanan atmosferik, dapat mengolah bijih nikel laterit kadar rendah, memiliki biaya operasi rendah, dan dapat diaplikasikan pada bijih nikel limonit dan saprolit. Konsentrasi nikel terlarut yang dihasilkan dari proses *leaching* pada tekanan atmosfer dipengaruhi oleh jenis asam yang digunakan sebagai reagen pelindi, konsentrasi asam, temperatur dan waktu pelindian (Wahab dkk., 2021). Salah satu faktor yang mempengaruhi proses ekstraksi nikel secara hidrometalurgi yaitu faktor temperatur dan rasio padat cair. Penelitian yang dilakukan oleh (Solihin dan Firdiyono, 2018) menunjukkan bahwa persentase ekstraksi nikel bervariasi pada rentang suhu 30°C hingga 90°C . Pada suhu rendah, persentase ekstraksi nikel sangat rendah yaitu sekitar 36%, sementara pada suhu tinggi, persentase ekstraksi nikel meningkat drastis mencapai sekitar 70% pada suhu 90°C . Hasil percobaan tersebut membuktikan bahwa suhu berpengaruh terhadap persentase ekstraksi logam.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efisiensi *Atmospheric Leaching* (AL) menggunakan variasi suhu pemanasan bijih untuk menganalisis efek pemanasan terhadap tingkat pelindian nikel dan kobalt dari bijih limonit menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) yang diharapkan dapat menjadi alternatif solusi dalam pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana komposisi mineral dan kimia bijih limonit.
2. Bagaimana efek pemanasan terhadap tingkat pelindian nikel dan kobalt dari bijih limonit menggunakan asam sulfat.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui komposisi mineral dan kimia bijih limonit.
2. Menganalisis efek pemanasan terhadap tingkat pelindian nikel dan kobalt dari bijih limonit menggunakan asam sulfat.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu dapat meningkatkan pengetahuan tentang proses pelindian nikel dan kobalt dari bijih limonit menggunakan pelarut asam sulfat, memberikan referensi pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah utamanya lapisan limonit melalui proses hidrometalurgi dengan metode *atmospheric leaching* sehingga dapat diolah dan diekstraksi secara efektif dan efisien, dan meningkatkan perolehan produk nikel dan kobalt yang dihasilkan dari bijih limonit sehingga dapat menambah pendapatan dari pengolahan bijih nikel laterit.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan di *Laboratory Based Education* (LBE) Analisis dan Pengolahan Bahan Galian Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Fokus dari penelitian ini yaitu untuk mengekstraksi logam nikel dan kobalt dari bijih nikel laterit lapisan limonit yang berasal dari Blok A1-07 PT Anugrah Harisma Barakah (AHB) Site Malapulu dengan menggunakan metode *atmospheric leaching*. Penelitian ini melibatkan pemanggangan bijih sebelum dilakukan pelindian (*roasting pretreatment*) untuk mengubah komposisi mineralogi bijih limonit dan meningkatkan porositas serta luas permukaannya, sehingga bijih limonit lebih mudah untuk dilindi. Pelindian dilakukan menggunakan reagen asam sulfat dengan memvariasikan suhu pemanggangan bijih limonit sebelum pelindian untuk menghasilkan perbandingan tingkat pelindian nikel dan kobalt pada setiap suhu pemanggangan yang digunakan. Kondisi pelindian dilakukan pada suhu 80°C, ukuran sampel penelitian < 200 mesh (75 *micron*), konsentrasi asam 2 Molar, waktu pelindian 1 jam, persen padatan 10% (10 gram sampel bijih limonit dalam 100 mL pelarut asam sulfat), dan kecepatan pengadukan 400 rpm. Penelitian ini menggunakan beberapa instrumen dalam menganalisis sampel, baik itu sampel awal penelitian maupun sampel hasil pelindian seperti mikroskop polarisasi tipe Nikon Eclipse LV100N POL untuk analisis mikroskopis, Shimadzu Maxima X-7000 untuk analisis XRD, EDXRF (*Energy Dispersive XRF*) tipe Bruker ED X-Ray S2 Puma untuk analisis XRF, dan AAS 6000 *Flame Atomic Absorption Spectrometer* untuk analisis AAS.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nikel

Nikel adalah unsur logam yang terbentuk secara alami dan memiliki ciri mengkilap (*lustrous*) serta berwarna putih keperak-perakan (*silvery white*). Nikel termasuk salah satu dari lima unsur logam yang paling umum dijumpai di bumi dan ditemui secara luas terutama di kerak bumi. Nikel juga adalah penghantar (konduktor) listrik dan panas yang cukup baik. Di alam, nikel dapat berupa senyawa sulfida (bijih sulfida magmatik/*magmatic sulfide ore*) dan senyawa oksida (bijih lateritik). Hingga saat ini, sebagian besar nikel yang diproduksi di Indonesia diekspor, sedangkan pemanfaatannya di dalam negeri terbilang masih rendah. Produk nikel yang diekspor antara lain dalam bentuk bijih nikel (sebelum diberlakukannya larangan ekspor mineral mentah di Indonesia), nikel *matte*, feronikel, dan *Nickel Pig Iron* (NPI) (Arif, 2018).

Nikel termasuk dalam salah satu logam *nonferrous* yang banyak digunakan baik sebagai logam murni maupun sebagai paduan logam karena memiliki sifat kimia, fisik dan mekanik yang sesuai untuk berbagai keperluan. Beberapa sifat yang menjadi keistimewaan dari logam nikel antara lain adalah titik lelehnya yang tinggi (1.453°C), ketahanan terhadap korosi dan oksidasi, kemudahan dibentuk, konduktivitas panas dan listrik yang baik, sifat feromagnetik, serta kekuatan dan ketangguhan yang baik pada temperatur tinggi. Konsumsi terbesar nikel saat ini adalah sebagai bahan penguat untuk membuat baja tahan karat. Selain itu, nikel juga digunakan sebagai bahan baku untuk baterai, berbagai paduan *nonferrous*, *superalloy*, dan juga sebagai nikel murni untuk digunakan dalam proses *electroplating*. Logam dan paduan nikel umumnya digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan material dengan ketahanan korosi yang memadai, misalnya industri kimia, industri makanan dan minuman, industri pengolahan dan pemurnian minyak dan gas, alat-alat transportasi darat, laut dan udara, alat-alat kedokteran, alat-alat kemiliteran dan lain-lain (Achmad, 2021).

Nikel merupakan logam keras, elastis, dan feromagnetik yang digunakan dalam berbagai aplikasi termasuk baja tahan karat, baja paduan, baterai, dan

pelapisan logam. Seiring dengan semakin menipisnya sumber daya nikel sulfida yang tersedia secara ekonomi, laterit yang berkadar rendah semakin populer dimanfaatkan, namun secara teknis sulit diolah. Terdapat dua jenis bijih nikel oksida laterit yaitu bijih saprolit berbasis silika-magnesium dan bijih limonit berbasis *goethite* dengan kadar nikel masing-masing 1,8%-4,0% dan 0,8%-1,8%. Sejauh ini, laterit merupakan bijih nikel oksida yang paling banyak tersedia, mengandung nikel, besi, magnesium, kobalt, mangan, aluminium, dan skandium, serta memiliki keunggulan karena mudah dieksplorasi, tidak terlalu sulit untuk ditambang, dan lebih murah (He *et al.*, 2023).

Nikel (Ni) adalah logam yang sangat penting untuk pengembangan infrastruktur dan teknologi. Meskipun baja tahan karat tetap menjadi penggunaan akhir utama untuk nikel, permintaan nikel (sebagai garam nikel seperti nikel sulfat, nikel klorida, dan nikel nitrat) untuk *Electric Vehicle* (EV) berkembang pesat. Sumber daya nikel sebagian besar terkandung dalam bijih sulfida dan laterit dengan kadar yang lebih rendah yang terdiri dari 70% cadangan nikel global (Astuti *et al.*, 2023). Nikel menjadi salah satu unsur logam yang paling dibutuhkan saat ini seiring dengan cepatnya perkembangan kendaraan bermotor listrik berbasis baterai karena nikel merupakan salah satu unsur utama dalam katode baterai litium jenis NMC (*Nickel Manganese Cobalt*) maupun NCA (*Nickel Cobalt Alumina*). Katode baterai litium jenis NMC diperkirakan akan mendominasi baterai kendaraan bermotor listrik di dunia sampai beberapa tahun ke depan karena kandungan nikel dipercaya meningkatkan densitas energi baterai litium (Astuti dkk., 2021).

Menurut *Australian Department of Industry, Innovation and Science*, konsumsi nikel global pada tahun 2017 tercatat sekitar 2,1 juta ton nikel. Sebanyak 68% diantaranya digunakan dalam pembuatan *stainless steel* dan diikuti oleh pemanfaatan lainnya seperti logam paduan (16%), pelapisan logam (9%), pengecoran (3%), baterai (3%), dan penggunaan lainnya (1%). *Stainless steel* sendiri digunakan antara lain untuk peralatan rumah tangga, konstruksi, kendaraan bermotor dan alat transportasi lainnya, transportasi minyak dan gas, alat medis, bidang farmasi, serta industri makanan dan minuman. Berdasarkan berbagai jenis produk nikel yang tersedia di pasaran Indonesia, ada empat jenis produk nikel yang dihasilkan berdasarkan proses pembuatannya, yaitu (Arif, 2018):

1. Bijih Nikel (*Nickel Ore*)

Bijih nikel merupakan bentuk awal dari nikel yang masih dalam keadaan murni dan belum melalui proses pengolahan lebih lanjut sehingga masih belum bisa dipasarkan.

2. Nikel *Matte* (*Nickel Matte*)

Nikel *matte* adalah salah satu produk utama yang dihasilkan di Indonesia dan dapat memenuhi hingga 5% dari kebutuhan nikel global. Produk nikel *matte* dari Indonesia diproduksi oleh PT Vale Indonesia Tbk yang berlokasi di Sorowako, Sulawesi Selatan. PT Vale Indonesia Tbk memiliki fasilitas yang mampu mengolah dan memurnikan bijih nikel *matte*.

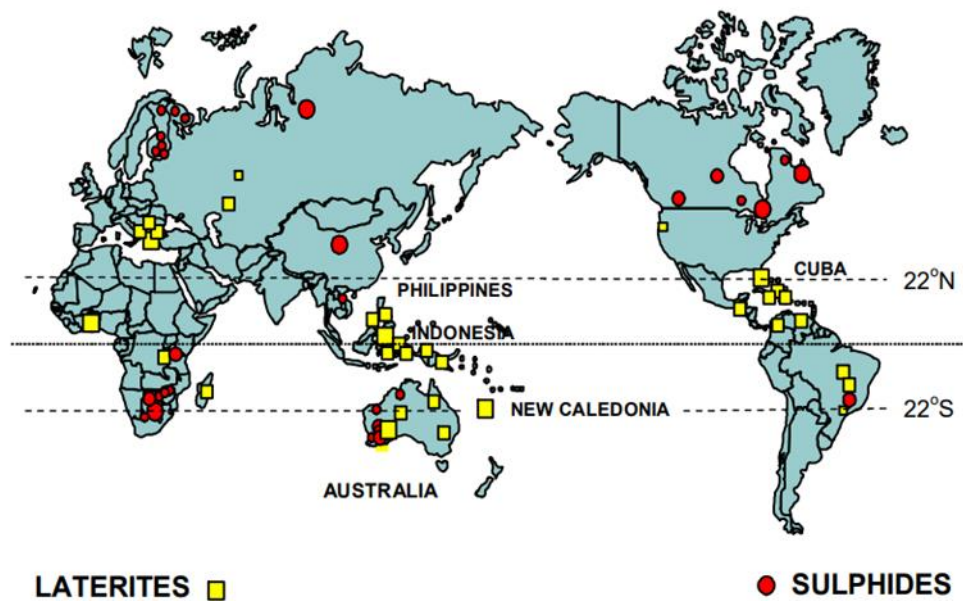
3. Feronikel (*Ferronickel*)

Feronikel adalah proses pirometalurgi yang digunakan untuk mengolah bijih nikel berkadar tinggi (saproilit). Di Indonesia, feronikel diproduksi oleh PT Aneka Tambang Tbk dengan kandungan nikel sekitar 20% dan besi 80%. Produk feronikel dapat berbentuk butiran (*shots*) atau batangan (*ingots*), dengan kandungan karbon tinggi atau rendah. Produk feronikel ini digunakan sebagai bahan baku dalam produksi baja nirkarat.

4. *Nickel Pig Iron* (NPI)

Nickel pig iron adalah feronikel dengan kadar rendah yang saat ini sedang dikembangkan di Tiongkok untuk menghasilkan nikel murni yang diperlukan dalam produksi baja tahan karat. Pembuatan *nickel pig iron* ini menggunakan bijih nikel laterit sebagai pengganti nikel berkadar tinggi yang biasanya dijual di pasar global.

Endapan nikel di dunia ditemukan dalam dua bentuk yaitu endapan bijih nikel sulfida dan endapan bijih nikel laterit. Endapan bijih nikel sulfida terbentuk melalui proses magmatik, sementara endapan bijih nikel laterit terbentuk akibat proses laterisasi pada batuan ultramafik (Dalvi *et al.*, 2004). Berdasarkan laporan *United States Geological Survey* (USGS) tahun 2021, total sumber daya nikel dunia adalah sekitar 300 juta ton nikel, dimana 60% berupa deposit laterit dan 40% berupa deposit sulfida. Total cadangan dunia dilaporkan sejumlah 94 juta ton nikel dengan jumlah cadangan terbesar berada di Indonesia yang didominasi oleh endapan laterit (Achmad, 2021). Persebaran endapan nikel dunia dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Persebaran endapan nikel sulfida dan laterit di dunia (Elias, 2002)

2.2 Nikel Laterit

Laterit adalah produk residu dari pelapukan kimiawi batuan di permukaan bumi, dimana berbagai mineral asli atau mineral primer yang tidak stabil dengan adanya air, larut atau terurai dan terbentuk mineral baru yang lebih stabil terhadap lingkungan. Laterit penting sebagai tuan rumah bagi endapan bijih yang ekonomis, karena interaksi kimiawi yang bersama-sama membentuk proses lateritisasi dalam kasus-kasus tertentu dapat sangat efisien dalam memusatkan beberapa unsur. Contoh yang terkenal dari endapan bijih laterit yang penting adalah bauksit alumina dan endapan bijih besi yang diperkaya, tetapi contoh yang kurang dikenal termasuk endapan emas laterit (Elias, 2002).

Bijih nikel laterit secara fisik dan kimiawi dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu saprolitik dan limonitik. Bijih saprolitik terutama terdiri dari silikat dan silikat hidrat, sedangkan bijih limonitik pada dasarnya terdiri dari oksida dan hidroksida. Nikel dalam bijih laterit, muncul terutama dalam kisi kristal oksida/hidroksida besi dan silikat, masing-masing menggantikan besi dan magnesium. Logam berharga lainnya yang terdapat dalam bijih nikel laterit adalah kobalt. Secara umum, kobalt diasosiasikan dengan *asbolane* atau sebagai pengganti besi dalam kisi kristal *goethite* atau beberapa *phyllosilicate*, seperti klorit.

Cadangan nikel laterit menyumbang sekitar 70% dari cadangan nikel yang diketahui di seluruh dunia, sehingga perluasan produksi nikel sangat bergantung pada eksploitasi cadangan bijih ini. Namun demikian, kompleksitas mineralogi bijih laterit masih menjadi tantangan untuk melakukan eksploitasi. Setiap jenis bijih mungkin memerlukan rute pemrosesan yang berbeda untuk mendapatkan perolehan nikel dan kobalt yang dapat diterima (Ribeiro *et al.*, 2020).

Nikel laterit merupakan mineral logam hasil dari proses pelapukan dan pengayaan mineral pada batuan ultramafik yang mengakibatkan pengkayaan unsur Ni, Fe, Mn, Co secara residual dan sekunder. Nikel laterit dicirikan oleh adanya logam oksida yang berwarna coklat kemerahan mengandung Ni dan Fe. Proses terbentuknya nikel laterit dimulai dari proses pelapukan yang intensif pada batuan peridotit. Batuan tersebut banyak mengandung *olivine*, magnesium silikat dan besi silikat. Batuan peridotit sangat mudah terpengaruh oleh proses pelapukan dimana air tanah yang kaya CO₂ yang berasal dari udara luar dan tumbuh-tumbuhan akan menghancurkan *olivine*. Penguraian olivin, magnesium, besi, nikel, dan silikat ke dalam larutan, cenderung membentuk suspensi koloid dan partikel-partikel silika. Larutan besi akan bersenyawa dengan oksida dan mengendap sebagai ferri hidroksida seperti *goethite* FeO(OH) dan *hematite* (Fe₂O₃) (Maharani dan Muin, 2023). Proses lateritisasi menghasilkan konsentrasi dengan faktor 3 hingga 30 kali lipat kandungan nikel dan kobalt dari batuan induk. Proses-proses tersebut dan karakter laterit yang dihasilkan, dikendalikan dalam skala regional dan lokal oleh interaksi dinamis dari faktor-faktor seperti iklim, topografi, tektonik, jenis dan struktur batuan primer (Elias, 2002).

Proses laterisasi berlangsung secara dinamis dan bertahap. Lapisan paling bawah mencerminkan tahap awal pelapukan batuan dasar dan setiap lapisan di atasnya merupakan transformasi dari lapisan yang ada di bawahnya, yang menunjukkan tahap-tahap proses yang semakin maju. Pada bagian paling bawah dari profil (batuan dasar), pelapukan terjadi pada kontak antar mineral dan pada batas-batas rekahan, dan terdapat banyak batuan segar dan sedikit produk ubahan. Lebih jauh ke atas profil, proporsi mineral primer yang masih hidup menurun, dan zona rekahan yang lebih kuat sepenuhnya berubah, yang pada akhirnya menyisakan batu-batu besar yang terpisah dari batuan dasar yang utuh (mengambang) dalam

campuran mineral primer dan mineral ubahan dimana struktur batuan primer tetap terjaga (saprolit). Lapisan yang lebih tinggi sepenuhnya terdiri dari mineral ubahan, dan ditandai dengan hilangnya struktur batuan primer. Zona di atas saprolit disebut sebagai pedolit dalam literatur teknis, namun istilah ini jarang digunakan dalam praktiknya. Pedolit lebih sering disebut sebagai zona limonit, istilah yang terakhir ini berasal dari mineralogi dominan (*goethite* dan hematit) di zona ini dalam oksida laterit (Elias, 2002). Ilustrasi lapisan endapan laterit, komposisi kimia tiap lapisan, dan korelasinya dengan jalur proses pengolahannya dapat dilihat pada Gambar 2.

	Komposisi – %brt.					Metode Ekstraksi
	Ni	Co	Fe	Cr ₂ O ₃	MgO	
Iron cap	<0,8	<0,1	>50	>1	<0,5	Overburden
Limonit	0,8	0,1	40	2	0,5	Hidrometalurgi
	s/d 1,5	s/d 0,2	s/d 50	s/d 5	s/d 5	
	1,5		25		5	Hidrometalurgi / Pirometalurgi
	s/d 1,7		s/d 40		s/d 15	
Saprolit	1,7	0,02		1		Pirometalurgi
	s/d 3	s/d 0,1	10 s/d 25	s/d 2	15 s/d 35	
Bedrock	0,25	<0,02	5	<1	>35	Tidak diproses

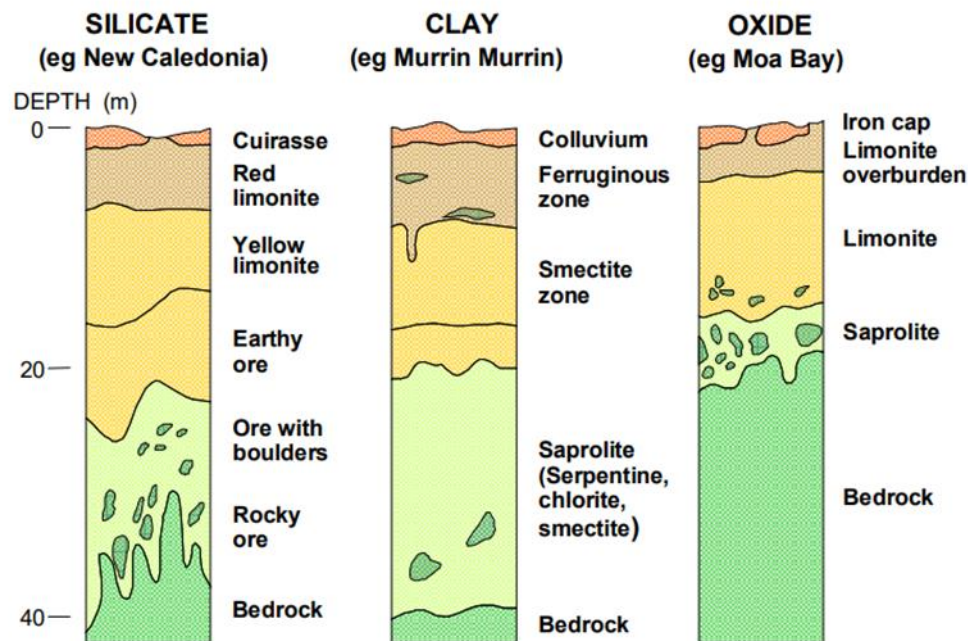
Gambar 2 Lapisan endapan laterit, komposisi kimia dan jalur pengolahannya (Achmad, 2021)

Profil nikel laterit pada umumnya adalah terdiri dari 4 zona gradasi sebagai berikut (Kurniadi dkk., 2018):

1. Tanah penutup atau *top soil* (biasanya disebut *iron capping*), yaitu tanah residu berwarna merah tua yang merupakan hasil oksidasi yang terdiri dari masa hematit, *goethite*, dan limonit. Kadar besi yang terkandung sangat tinggi dengan kelimpahan unsur Ni yang sangat rendah.
2. Zona limonit, yaitu berwarna merah coklat atau kuning, berukuran butir halus hingga lempungan, lapisan kaya besi dari limonit *soil* yang menyelimuti seluruh area.

3. Zona lapisan antara atau *silica boxwork*, yaitu zona ini jarang terdapat pada batuan dasar (*bedrock*) yang serpentinisasi. Berwarna putih-orange *chert*, *quartz*, mengisi sepanjang rekahan dan sebagian menggantikan zona terluar dari *unserpentine* fragmen peridotit, sebagian mengawetkan struktur dan tekstur dari batuan asal. Terkadang terdapat mineral opal, magnesit. Akumulasi dari garnierit-pimelit di dalam *boxwork* biasanya berasal dari nikel *ore* yang kaya akan silika.
4. Zona saprolit, yaitu campuran dari sisa-sisa batuan, bersifat pasir, *saprolitic rims*, vein dari *garnierite*, *nickeliferous quartz*, mangan dan pada beberapa kasus terdapat silika *boxwork*, bentukan dari suatu zona transisi dari limonit ke *bedrock*. Terkadang terdapat mineral *quartz* yang mengisi rekahan, mineral primer yang terlapukan yaitu *chlorit*. *Garnierite* di lapangan biasanya diidentifikasi sebagai *colloidal talk* dengan lebih atau kurang *nickeliferous serpentine*. Struktur dan tekstur batuan asal masih terlihat.
5. Batuan dasar (*bedrock*), yaitu tersusun atas bongkahan atau blok dari batuan induk yang secara umum sudah tidak mengandung mineral ekonomis (kadarnya sudah mendekati atau sama dengan batuan dasar). Bagian ini merupakan bagian terbawah dari profil laterit.

Ketebalan profil laterit ditentukan oleh keseimbangan antara laju pelapukan kimiawi di dasar profil dan penghilangan bagian atas profil secara fisik oleh erosi. Laju pelapukan kimiawi bervariasi dari 10 hingga 50 meter per juta tahun, umumnya sebanding dengan jumlah air yang merembes melalui profil, dan 2-3 kali lebih cepat pada batuan ultramafik dibandingkan batuan sialik. Laju erosi yang cepat membatasi perkembangan profil hingga ketebalan 50 hingga 100 meter, dan oleh karena itu usianya mungkin kurang dari 1 juta tahun. Perkiraan laju pelapukan kimiawi di lingkungan kratonik yang stabil dimana reliefnya tidak terlalu tinggi dan curah hujannya lebih rendah (misalnya Brasil dan Afrika Barat) juga berada di kisaran 10 meter per juta tahun. Di daerah-daerah ini, stabilitas tektonik dan tingkat erosi yang rendah memungkinkan pengembangan profil setebal lebih dari 100 meter, namun profil-profil ini lebih tua dibandingkan dengan profil-profil di daerah yang secara tektonik aktif (Elias, 2002). Perbandingan skematis tipe-tipe profil laterit utama dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Perbandingan skematis tipe-tipe profil laterit utama (Elias, 2002)

Adapun jenis profil laterit yang terbentuk di atas batuan ultramafik dalam tiga kategori utama berdasarkan mineralogi dominan yang dikembangkan dalam profil tersebut sebagai berikut (Elias, 2002):

1. Oksida Laterit

Oksida laterit adalah produk akhir yang paling umum dari laterisasi batuan ultramafik. Dengan adanya air, mineral pembentuk batuan primer (terutama olivin dan serpentin, ortopiroksen, dan yang lebih jarang adalah klinopiroksen) terurai melalui hidrolisis dan melepaskan konstituennya sebagai ion dalam larutan air. Olivin adalah mineral yang paling tidak stabil dan merupakan mineral yang pertama kali mengalami pelapukan di lingkungan tropis yang lembab, Mg^{2+} akan tercuci secara total dan hilang ke air tanah, dan Si sebagian besar tercuci dan hilang. Fe^{2+} juga dilepaskan tetapi dioksidasi dan diendapkan sebagai besi hidroksida, yang pada awalnya berbentuk amorf atau kurang kristalin tetapi secara progresif mengalami rekristalisasi menjadi *goethite* yang membentuk *pseudomorf* setelah olivin. Ortokroksen dan serpentin terhidrolisis setelah olivin, juga melepaskan Mg, Si dan digantikan oleh *pseudomorf goethite*. Pada awalnya, ketika mineral ferromagnesium yang hidup berdampingan tetap tidak lapuk dan mendukung

struktur batuan, transformasi bersifat isovolumetrik dan tekstur batuan primer tetap terjaga, tetapi seiring dengan meningkatnya tingkat kerusakan mineral primer, tekstur primer peninggalan hilang karena runtuhnya dan pemadatan struktur yang menghasilkan *goethite masif* tanpa tekstur. Endapan yang didominasi oleh oksida dapat berpindah langsung dari saprolit *goethite* yang telah berubah total ke batuan dasar yang masih baru dengan jarak hanya beberapa sentimeter. Secara umum, terdapat interval antara saprolit *goethite* dan antarmuka batuan dasar segar, yang terdiri dari campuran *goethite*, material ultramafik teroksidasi dan bongkahan batuan ultramafik segar. Contoh dari endapan oksida adalah terdapat pada Teluk Moa dan Pinares (Kuba), serta Goro dan Prony (Kaledonia Baru bagian selatan).

2. Lempung Laterit

Lempung laterit yaitu terjadi pelapukan yang tidak terlalu parah, misalnya di iklim yang lebih dingin atau kering, silika tidak tercuci seperti di lingkungan tropis yang lembab, dan sebagai gantinya bergabung dengan Fe dan sejumlah kecil Al untuk membentuk zona dimana lempung nontronit smektit mendominasi, menggantikan oksida Fe. Nontronit memainkan peran yang mirip dengan *goethite* dalam mengikat ion Ni di dalam kisi-kisinya dimana ion-ion tersebut menggantikan Fe^{2+} dan terikat pada posisi antar lapisan. Lempung nontronit biasanya mengandung 1,0-1,5% Ni dalam mineralisasi laterit. Silika yang melebihi yang dibutuhkan untuk membentuk nontronit dapat diendapkan sebagai *nodul opaline* atau kalsedonik dalam lempung. Profil lempung laterit juga lebih disukai untuk dikembangkan dimana terdapat pergerakan air tanah yang terbatas seperti di daerah yang luas dengan relief topografi yang rendah. Horizon lempung dapat ditutupi oleh zona tipis dari bahan oksida yang lebih kaya Fe yang umumnya rendah Ni, dan didasari oleh saprolit yang sebagian lapuk yang mengandung serpentin dan nontronit. Profil nikel laterit yang didominasi lempung dikembangkan secara luas di Australia, misalnya Murrin-Murrin, Bulong dan Marlborough serta di Brasil.

3. Laterit Silikat

Laterit silikat yaitu terjadi pengangkatan tektonik yang lambat dan terus menerus dan muka air tanah tetap rendah pada profil, pelapukan dalam jangka

waktu yang lama dapat menghasilkan pengembangan zona saprolit yang tebal, yang dapat ditutupi oleh zona limonit yang tipis, bergantung pada intensitas erosi di bagian atas profil. Laterit silikat dicirikan oleh pengayaan absolut atau konsentrasi Ni di zona saprolit yang terdiri dari mineral primer yang telah berubah seperti serpentin sekunder dan *goethite*, lempung smektit, dan garnierit (garnierit adalah istilah untuk silikat Ni-Mg hidrat berstruktur campuran dengan kristalinitas rendah yang memiliki kedekatan dengan serpentin, talk, dan klorit). Sebagian besar nikel berasal dari yang dilepaskan oleh rekristalisasi *goethite* menjadi hematit lebih jauh di dalam profil. Nikel diendapkan kembali di dalam saprolit dengan menggantikan Mg dalam serpentin sekunder (yang dapat mengandung hingga 5% Ni) dan di dalam garnierit yang dapat mengandung lebih dari 20% Ni. Kandungan rata-rata Ni dalam silikat laterit biasanya 2,0-3,0%. Contoh profil silikat adalah laterit yang berperan penting secara ekonomi pada massif Kaledonia Baru, yang mengandung sebagian besar sumber daya nikel laterit dunia. Laterit silikat juga merupakan sumber bijih dari sebagian besar nikel yang saat ini diproduksi dari laterit.

Nikel dari bijih nikel laterit sebagian besar terjadi pada serpentin dan olivin atau mineral besi oksida yang diperkaya sebagai substitusi isomorfisme sepanjang generasi bijih nikel laterit dari pelapukan batuan ultrabasa, sehingga tidak dapat diekstraksi dengan pemisahan konvensional. Selain itu, bijih nikel laterit memiliki kadar nikel yang rendah dan dibagi menjadi tiga lapisan, yaitu limonitik, saprolitik, dan garnieritik (Bahfie dkk., 2021). Nikel dapat diperoleh di alam terutama dari bijih jenis laterit. Saat ini, Indonesia merupakan negara dengan cadangan bijih nikel laterit terbesar di dunia yang tersebar di berbagai lokasi diantaranya Pulau Sulawesi, Pulau Halmahera, Papua, dan Pulau Gag sehingga potensial menjadi produsen nikel terbesar di dunia. Nikel yang digunakan sebagai bahan baku katode baterai dapat diekstrak dari bijih nikel laterit melalui serangkaian proses hidrometalurgi yang kompleks, yaitu melalui tahapan pelindian baik atmosferik maupun menggunakan tekanan serta proses pemurnian nikel dengan berbagai metode seperti ekstraksi pelarut, pengendapan pengotor, pertukaran ion, dan sebagainya (Astuti dkk., 2021).

2.3 Kobalt

Kobalt (Co) adalah logam transisi dari blok-d yang berada di periode keempat pada tabel periodik, terletak di antara besi dan nikel. Kobalt adalah unsur alami yang tersebar luas di batuan, tanah, sedimen, air, tanaman, dan hewan. Sejak tahun 2011, *European Commission* telah mengidentifikasi Co sebagai bahan baku kritis yang memiliki nilai strategis penting karena permintaan yang meningkat, terutama untuk penggunaan dalam baterai isi ulang. Selain itu, Co digunakan di berbagai industri, termasuk perawatan kesehatan, paduan suhu tinggi untuk mesin pembakaran, energi terbarukan seperti tenaga surya dan listrik, serta penyimpanan data. Hal ini disebabkan oleh berbagai karakteristik uniknya, seperti sifat magnetik dan ketahanan terhadap suhu tinggi, keausan, dan korosi (Ziwa *et al.*, 2021).

Kobalt memiliki sifat unik yang memberikan banyak kegunaan dikarenakan memiliki sifat valensi yang unik dengan kondisi oksidasi yang bervariasi, yang menjelaskan penggunaannya secara luas sebagai katalis, memiliki kekerasan logam yang tinggi sehingga dapat mempertahankan kekuatan dan ketahanan korosinya pada rentang suhu yang luas hingga titik lelehnya (1.495°C), yang sangat penting untuk memberikan kekuatan saat membentuk paduan dengan logam lain pada suhu tinggi, dan memiliki sifat feromagnetik yang memungkinkan untuk dimagnetisasi. Selain itu, kobalt memiliki titik Curie tertinggi yang diketahui (1.121°C), yang berarti bahwa sifat magnetiknya dipertahankan pada suhu ini dan karenanya dapat digunakan untuk menghasilkan magnet permanen (Dehaine *et al.*, 2021).

Baru pada awal abad ke-20 kobalt mulai digunakan dalam berbagai paduan dan sebagai katalis dalam industri kimia, yang menghasilkan peningkatan produksi yang pesat menjelang pertengahan abad ke-20. Pada tahun 1990-an, pemanfaatan kobalt yang dominan adalah dalam produksi *superalloy* yang sangat keras yang memiliki sifat magnetik yang berbeda dan tahan terhadap suhu tinggi. Penggunaan akhir dari *superalloy* yang mengandung kobalt ditemukan di industri kedirgantaraan, turbin darat dan laut, serta berbagai industri, medis, otomotif, dan yang berhubungan dengan pertahanan. Saat ini, pasar kobalt global didominasi oleh industri baterai isi ulang yang bertanggung jawab atas 58% penggunaan kobalt. Industri baterai hanya mewakili 10% dari pangsa pasar kobalt pada tahun 1999, dan pertumbuhan pasar baterai disebabkan oleh kemunculan *smartphone*, *tablet*, dan

laptop, dan baterai besar yang dibutuhkan untuk *Electric Vehicles* (EV) dan *Plug-in Hybrid EV* (PHEV). Tren ini diperkirakan akan terus berlanjut di masa mendatang terlepas dari kimia baterai, permintaan baterai isi ulang diperkirakan akan meningkat sejalan dengan target pemerintah, dukungan kebijakan, dan kebutuhan untuk memperkuat respons global terhadap ancaman perubahan iklim seperti yang ditegaskan kembali oleh Perjanjian Paris (COP21) pada tahun 2015. Karena konsentrasinya yang rendah dalam bijih, kobalt biasanya dianggap sebagai logam pendamping yang memiliki kepentingan ekonomi yang terbatas. Sebagian besar produksi kobalt global berasal dari produk sampingan ekstraksi komoditas seperti tembaga (55%), nikel (35%), dan arsenik. (Dehaine *et al.*, 2021).

Kobalt merupakan unsur logam utama yang diperlukan pembuatan baterai litium-ion pada industri mobil listrik. Seiring dengan tren dunia yang mengarah ke industri yang lebih ramah lingkungan, kebutuhan kobalt secara global juga meningkat secara signifikan dengan tingkat pertumbuhan sebesar 7-13% per tahun hingga mencapai 390 ribu ton pada tahun 2030. Saat ini, sebagian besar kobalt diproduksi dari cebakan tembaga-kobalt stratiform di bagian tengah Benua Afrika. Selain tipe cebakan ini, kobalt juga ditemukan berasosiasi dengan cebakan nikel laterit tetapi umumnya dengan kadar yang lebih rendah. Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi nikel-kobalt laterit terbesar di dunia, dengan jumlah sumber daya mencapai 2,9 miliar ton bijih atau setara dengan 4 juta ton logam kobalt. Tetapi hingga saat ini, sumber daya kobalt belum dapat dimanfaatkan dengan optimal dikarenakan belum tersedianya fasilitas pengolahan dan pemurnian yang dapat memproduksi kobalt di dalam negeri (Anbiyak dan Cahyaningrum, 2021).

Kobalt adalah logam transisi keabu-abuan, perak, dan rapuh yang berkilau dengan nomor atom 27. Kobalt tidak terlalu reaktif, dan stabil di udara pada suhu normal. Setelah dipanaskan, pertama-tama kobalt teroksidasi menjadi Co_3O_4 dan kemudian di atas 900°C menjadi CoO . Co^{2+} stabil dalam larutan asam tanpa adanya zat pengompleks, tetapi lebih mudah teroksidasi menjadi Co^{3+} dalam larutan basa atau dalam larutan apa pun, dengan adanya zat pengompleks Co^{3+} memiliki afinitas yang tinggi untuk pembentukan kompleks. Dalam kondisi oksidasi, kobalt menunjukkan kecenderungan yang kuat untuk terkonsentrasi dengan oksida

mangan. Selama pelapukan batuan mafik dan ultramafik, oksida mangan dan kobalt cenderung terakumulasi di tingkat atas deposit, sementara nikel bergerak ke bawah dengan magnesita dan silika untuk membentuk laterit (Dehaine *et al.*, 2021).

Unsur yang cukup umum didapatkan di kerak bumi yaitu kobalt dengan rata-rata sekitar 17,3 ppm yang menempatkannya sebagai unsur nomor 33 dalam hal kelimpahan di kerak bumi. Kobalt ditemukan dalam konsentrasi yang relatif tinggi pada batuan beku mafik dan ultramafik. Rasio Ni/Co menurun dari batuan ultramafik ke batuan asam karena nikel lebih mudah memasuki kisi-kisi silikat magnesium yang mengkristal lebih awal daripada kobalt. Di sisi lain, rasio Cu/Co secara global meningkat dari batuan ultramafik ke batuan asam. Pada batuan sedimen, kobalt sebagian besar terdistribusi dalam fraksi *argillaceous* dan tampaknya mengikuti Fe dan Mn, dengan jumlah kobalt yang bervariasi tergantung pada jenis batuan, yaitu kandungan kobalt rata-rata 19, 0,3, dan 0,1 ppm untuk serpih, batupasir, dan karbonat (Dehaine *et al.*, 2021).

Kobalt murni tidak ada di alam, tetapi kobalt hadir sebagai konstituen penting dalam sekitar 66 mineral, seperti yang tercatat dalam data *International Mineralogical Association's* (IMA) RRUFF, dan sebagai konstituen kecil atau jejak dari beberapa ratus mineral lainnya, terutama yang mengandung nikel, besi, dan mangan. Kobalt biasanya dapat ditemukan dalam konsentrasi ekonomis dalam olivin, spinel, dan klorit pada endapan laterit dan hidrotermal. Sebagai perbandingan, nikel dan tembaga merupakan elemen penting di lebih dari 160 dan 710 mineral. Kelangkaan relatif mineral kobalt ini dijelaskan oleh sifat kalsofil dan siderofilnya, yang merupakan konsekuensi dari muatan kobalt dan jari-jari ionik yang sangat dekat dengan unsur-unsur pembentuk mineral yang lebih umum seperti besi, nikel, dan mangan, sehingga lebih mudah bagi kobalt untuk digabungkan sebagai unsur kecil dalam mineral pembentuk batuan yang melimpah daripada diisolasi ke dalam spesiesnya sendiri (Dehaine *et al.*, 2021).

Kobalt laterit paling sering terbentuk di atas batuan beku ultrabasa yang telah mengalami berbagai tingkat serpentinisasi. Secara global, 15 persen dari laterit Ni-Co yang diketahui berkembang dari pelapukan komatit dan intrusi mafik-ultramafik berlapis, dan 85 persen berkembang dari dunit, harzburgit, dan peridotit di terran akresi. Mineral pembentuk kobalt yang umum, terkonsentrasi dalam mineral seperti

olivin, spinel dan klorit yang merupakan sumber utama unsur penting dalam endapan laterit dan hidrotermal. Mangan-oksida menampung sebagian besar Co di bagian atas zona lempung di atas transisi antara cakrawala lempung dan oksida profil laterit. Mineral mangan-oksida, seperti asbolana, litioforit, dan kriptomelan, terbentuk di dalam rekahan dan ruang terbuka oleh pengendapan Mn, Co, dan Ni terlarut (Okto dkk., 2023).

Pada iklim tropis dan subtropis, pelapukan yang intens pada batuan ultrabasa dapat menyebabkan kobalt dan nikel yang signifikan. Kobalt tersebar di dalam silikat dan sulfida di dalam batuan induk diremobilisasi dan diendapkan dalam lapisan yang lapuk sebagai hidroksida dan oksida di dekat itu permukaan dan sebagai silikat pada tingkat yang lebih dalam. Endapan ini umumnya tebalnya sekitar 20 meter dengan usia berkisar tersier pertengahan ke resen. Endapan ini terutama bekerja untuk nikel dengan kobalt sebagai produk sampingan. Kobalt terkandung dalam limonit dan *goethite* sebagai dengan baik sebagai eritrit dan asbolit. Nilai kobalt dalam endapan laterit sangat bervariasi dalam kisaran 0,1 ke 1,5 % (Okto dkk., 2023).

Mineralisasi kobalt biasanya ditemukan dalam bijih sulfida atau oksida Cu-Co, bijih sulfida magmatik Ni-Cu, atau laterit Ni-Co. Meskipun tingkat detail yang dicatat dalam literatur bervariasi, kobalt diketahui hadir dalam banyak jenis deposit. Secara umum dibagi 3 jenis deposit utama dari mana kobalt diekstraksi secara komersial dalam skala besar, yaitu endapan sedimen stratiform yang ditampung oleh endapan Cu-Co, laterit Ni-Co, dan endapan sulfida Ni-Cu-Co magmatik. Jenis endapan yang tersisa dikelompokkan kembali dalam endapan hidrotermal dan vulkanogenik. Adapun penjelasan secara rinci mengenai jenis deposit kobalt yaitu sebagai berikut (Dehaine *et al.*, 2021):

1. *Stratiform Sediment-Hosted (SSH)* Endapan Cu-Co

Kemunculan kobalt jenis ini sebagian besar terbatas pada wilayah yang berdekatan di *Democratic Republic of Congo* (DRC) dan Zambia di *Central African Copperbelt* (CAC) yang menjadi tuan rumah bagi konsentrasi tembaga dan kobalt terbesar di dunia. Kobalt hadir dalam batuan sedimen silikat dan karbonat serta batuan mafik vulkanik dan plutonik dari suksesi sedimen supraklastik Katangan, yang ditempatkan di celah benua. Di

Zambia, endapan tembaga-kobalt tersimpan di dalam batuan silikat para-autoklastik. Sedangkan di DRC, unit litologi utama adalah batugamping dolomit dan serpih yang kaya akan dolomit, dan endapan serta batuan induknya membentuk lembaran-lembaran dorong di dalam busur Lufilian.

Secara umum, ada tiga zona, yaitu zona oksida lapuk yang memanjang hingga kedalaman antara 70 dan 150 m, diikuti oleh zona oksida-sulfida campuran, dan zona sulfida yang memanjang pada kedalaman yang lebih besar dari 250 m. Proses pelapukan terutama diamati di DRC, dimana efek cairan meteorik telah menghasilkan pengayaan kobalt di bagian atas zona lapuk. Mineral kobalt teroksidasi yang paling melimpah adalah heterogenit, sementara di kedalaman, kobalt terutama terdapat dalam mineral sulfida karbida. Ketebalan badan bijih bervariasi dari beberapa hingga beberapa puluh meter dengan kandungan kobalt yang bervariasi. Zonasi logam lateral pada badan bijih berarti bahwa nilai kobalt dan tembaga yang tinggi tidak selalu bersamaan.

2. Endapan Ni-Co Laterit

Kelas endapan terpenting kedua terdiri dari laterit berumur Tersier pertengahan hingga terkini. Laterit dibentuk oleh pelapukan batuan dasar tropis yang dalam, dimana unsur-unsur tertentu dihilangkan dan unsur-unsur lainnya diperkaya oleh proses supergen. Meskipun endapan ini umumnya mengandung nikel dalam jumlah yang signifikan, kobalt dalam jumlah yang cukup besar juga dapat ditemukan. Terdapat tiga jenis endapan nikel-kobalt laterit, yaitu:

- a. Endapan silikat hidrat dengan lapisan atas oksida laterit, dimana silikat hidrat magnesium-nikel terjadi pada saprolit bagian bawah.
- b. Endapan silikat lempung, dimana lempung smektit berkembang pada bagian tengah atau atas saprolit.
- c. Endapan limonit, dimana batuan dasar yang telah berubah dilapisi oleh oksihidroksida besi.

Jenis endapan laterit yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh berbagai kondisi iklim yang ada pada daerah tersebut. Kobalt terkonsentrasi ketika mineral bijih sulfida dan silikat primer mengalami perubahan kimia dan fisika

yang terkait dengan pencucian atmosfer. Ketika laterit berkembang di atas substrat batuan beku mafik atau ultramafik, nikel dan kobalt sering terkonsentrasi di zona pelapukan. Jika batuan bersifat ultramafik, konsentrasi nikel dan kobalt dapat mencapai sepuluh kali lipat dari konsentrasi batuan dasar aslinya. Secara umum, lapisan laterit yang paling tebal dengan konsentrasi nikel, besi, dan kobalt yang paling tinggi cenderung terjadi dimana batuan dasarnya dicirikan oleh kekar yang berjarak dekat. Karakteristik geologi ini mendorong sirkulasi air tanah yang maksimum dan interaksi fluida-batuan dari waktu ke waktu. Laterit bermutu tinggi menunjukkan kontrol topografi dan cenderung terjadi di bawah bukit atau di tepi dataran tinggi atau teras, karena fluktuasi tingkat permukaan air dan erosi permukaan. Untuk pengembangan deposit nikel-kobalt laterit yang substansial, diperlukan kondisi geologi yang stabil dan laju pelapukan kimiawi harus lebih tinggi daripada laju erosi fisik.

3. Endapan Sulfida Ni-Cu-Co Magmatik

Endapan magmatik adalah konsentrasi nikel, tembaga dan logam kelompok platinum minor dan kobalt yang dihasilkan oleh proses magmatik bersuhu tinggi. Kobalt adalah intrusi mafik atau ultramafik dan aliran vulkanik ultramafik, yaitu komatiit. Sebagian besar endapan terjadi sebagai lapisan dan lensa yang selaras yang menempati cekungan di dasar tubuh magmatik. Endapan dan batuan induknya merupakan hasil dari magma mafik turunan mantel yang telah mengasimilasi belerang kerak bumi. Penambahan sulfur yang berasal dari luar menyebabkan terbentuknya lelehan sulfida yang tidak dapat bercampur, yang lebih padat daripada lelehan silikat, yang mengendap di dasar dapur magma atau saluran magma. Bijih yang telah mengalami deformasi tektonik dan remobilisasi berikutnya terjadi sebagai massa lentikular yang memanjang dan urat-urat breksi bermatriks sulfida. Secara umum, nikel merupakan komoditas ekonomi utama pada endapan magmatik. Tembaga dapat hadir sebagai produk sampingan, dengan kobalt sebagai produk sampingan minor dan dengan unsur-unsur kelompok platinum yang muncul di beberapa deposit sebagai produk sampingan atau bahkan sebagai komoditas utama. Mineral sulfida utama yang umum terdapat pada endapan

ini adalah pentlandit, kalkopirit dan pirhotit. Kadar kobalt biasanya bervariasi antara 0,04% dan 0,08% Co.

4. Endapan Hidrotermal dan Vulkanogenik

Endapan ini dikelompokkan bersama, meskipun deposit hidrotermal dan vulkanogenik dapat menunjukkan berbagai macam gaya pembentukan, logam, mineral, dan kadar yang terjadi. Contoh-contoh penting adalah Cu (-Zn-Co-Ag-Au) *Volcanogenic Massive Sulphides* (VMS), *Iron Oxide Copper Gold* (IOCG) -Ag-U (-REE-Co-Ni), Fe-Cu skarn, *Mississippi Valley Type* (MVT) Zn-Pb (-Co-Ni) sulfida dan deposit polimetalik (Ag-Ni-As-Bi) -Co-rich veins. Endapan yang terakhir ini adalah satu-satunya deposit yang menghasilkan kobalt sebagai komoditas utama. Contoh yang terkenal dan unik adalah deposit Bou Azzer di Maroko. Deposit ini terdiri dari arsenida kobalt-nikel-besi, dengan tambahan sulfarsenida, sulfida tembaga, molibdenit, dan emas dalam batuan kuarsa dan karbonat. Bijih tersebut telah mengalami beberapa fase breksi dan rekristalisasi yang terkait dengan deformasi Pan-Afrika dan Hercynian yang menghasilkan berbagai macam bentuk, seperti lodes, urat, stok, cangkang kompleks dan lensa datar. Mineralisasi kobalt dikembangkan melalui pencucian serpentinit oleh cairan magmatik, dalam kondisi reduksi dan dengan rasio fluida/batu yang tinggi. Pengendapan mineralisasi bijih terjadi sebagai respons terhadap peningkatan pH. Contoh lain dari mineralisasi kobalt hidrotermal adalah sabuk kobalt Idaho dan daerah Blackbird. Sejarah geologi yang kompleks membuat klasifikasi jenis-jenis deposit ini sedikit berubah-ubah, namun klasifikasi terbaru mengelompokkan deposit ini sebagai batuan metasedimen yang mengandung Cu-Co-Au.

Logam utama kobalt sangatlah jarang digunakan, tetapi banyak digunakan sebagai logam paduan. Hal tersebut diakibatkan karena kemampuannya untuk menghasilkan *superalloy* yang sangat keras dengan sifat magnetik yang berguna dan ketahanan terhadap suhu tinggi. Kobalt digunakan dalam pembuatan senyawa kimia untuk berbagai keperluan industri. Baterai isi ulang merupakan konsumen kobalt terbesar di sektor ini. Kobalt juga digunakan sebagai pigmen dalam kaca, enamel, tembikar dan porselen. tekanan mekanis dan suhu. Ketika kobalt dipadukan

dengan nikel maka struktur molekul paduan akan berubah dan dengan demikian meningkatkan kekuatan suhu tinggi dan ketahanannya terhadap korosi kimia. Sifat-sifat ini membuat kobalt *superalloy* ideal untuk digunakan dalam mesin jet dan turbin lain dimana suhu tinggi ditemui (Okto dkk., 2023).

Kobalt dapat dicampur dengan beberapa logam lain untuk menghasilkan magnet khusus, dengan aplikasi di dalam peralatan listrik kinerja tinggi. Kobalt memiliki kemampuan untuk meningkatkan sifat magnetik besi dan juga memiliki titik lebur tertinggi. Kobalt juga memiliki beberapa aplikasi lain dalam elektronik, Untuk tujuan ini kobalt dicampur dengan silikon untuk menghasilkan silikat logam dengan resistivitas rendah, stabilitas termal tinggi, dan sifat ikatan yang baik yang digunakan untuk konektor listrik pada sirkuit terpadu (Okto dkk., 2023).

Berbagai macam senyawa kobalt, termasuk logam, oksida, sulfat, hidroksida dan diasetat, digunakan sebagai katalis dalam proses desulfurisasi selama pembuatan gas alam dan produk minyak bumi yang dimurnikan. Penggunaan penting lainnya dari katalis kobalt adalah dalam sintesis prekursor yang digunakan dalam pembuatan plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*). Katalis kobalt juga digunakan dalam produksi aldehida dari alkena dalam proses reaksi OXO. Hal tersebut digunakan oleh industri kimia untuk memproduksi produk seperti parfum. Logam kobalt dan berbagai senyawa, seperti antimon kobalt, boron kobalt, germanium kobalt, dan lainnya, digunakan dalam berbagai produk elektronik yang mengandung sirkuit terpadu, prosesor, penyimpanan digital, dan semi-konduktor. Kobalt juga memiliki berbagai aplikasi dalam bidang kesehatan, termasuk pengukuran penyerapan vitamin B12 dan diagnosis defisiensi vitamin B12, deteksi tumor dan metastasis, pengobatan radioterapi kanker, dan sterilisasi peralatan medis (Petavratzi *et al.*, 2019).

Kobalt digunakan dalam berbagai aplikasi kimia, mulai dari obat hingga industri. Proses katalitik menyumbang sekitar sembilan persen dari total penggunaan kobalt, setara dengan 2.700 ton kobalt per tahun. Sebagian besar dari ini dikonsumsi oleh industri petrokimia dimana Sebuah kobalt oksida digabungkan digunakan untuk menghapus belerang dari minyak mentah dalam proses kilang. Katalis berbasis kobalt juga digunakan dalam teknologi gas ke cair dimana gas alam diproses menjadi bahan bakar diesel sintetis, sektor yang diprediksi akan meningkat

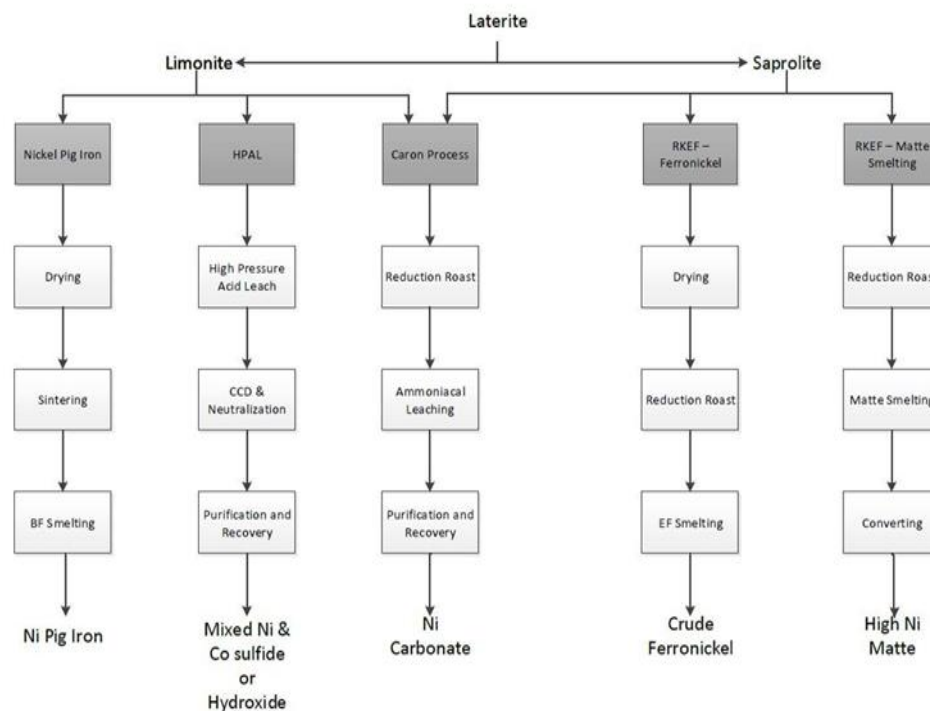
pesat di masa depan. Katalis berbasis kobalt asetat/mangan natrium bromida juga digunakan juga di dalam produksi dari plastik (Okto dkk., 2023).

Pengolahan kobalt umumnya dimulai hanya setelah logam utama (biasanya tembaga atau nikel) dipekatkan dan diekstraksi. Prosesnya seringkali unik untuk mineralogi bijih yang dieksploitasi. Ada tiga proses dasar yang digunakan untuk ekstraksi kobalt, yaitu hidrometalurgi (termasuk ekstraksi pelarut, elektrolisis, dan *electrowinning*), pirometalurgi dan vapometalurgi. Kobalt pertama kali dipisahkan dari nikel menggunakan amonia sebagai sebuah reagen, dan kemudian menghasilkan larutan lalu dimasukkan ke dalam sebuah autoklaf dimana kobalt direduksi oleh hidrogen di bawah tekanan tinggi. Bubuk kobalt padat kemudian dipisahkan, disaring, dan dikeringkan (Okto dkk., 2023).

2.4 Teknologi Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Bijih limonit dan bijih saprolit pada nikel memiliki ciri khusus, antara lain bijih nikel berjenis limonit memiliki ikatan yang lemah dengan mineral *goethite* yang membuatnya lebih mudah dipisahkan dan diolah dalam proses ekstraksi nikel. Sementara itu, pada jenis bijih saprolit, nikel masuk ke dalam struktur mineral serpentin atau olivin, sehingga menjadikannya lebih stabil dan memerlukan metode pengolahan yang berbeda untuk mengekstrak nikel dari bijih tersebut. Sehingga metode pengolahan bijih limonit lebih optimal diproses melalui metode hidrometalurgi. Sementara itu, bijih saprolit cocok diolah dengan metode pirometalurgi. Pirometalurgi merupakan suatu metode yang digunakan dalam proses pengolahan bijih menggunakan temperatur tinggi. Proses ini membutuhkan tanur sebagai komponen utama dalam memproses bijih mineral. Proses pirometalurgi ini biasanya digunakan untuk pengolahan bijih dengan kadar nikel yang tinggi. Secara umum, proses pirometalurgi berlangsung dengan cara mengeringkan bijih di *Rotary Dryer* (RD) agar kadar pengotornya sesuai dengan standar. Setelah itu, conditioner ore hasil dari proses RD di kalsinasi di *Rotary Kiln* yang hasil dari proses ini dileburkan di dalam *electric smelting furnace*. Sementara itu, proses pengolahan bijih laterit dapat dilakukan dengan menggunakan metode hidrometalurgi seperti proses *Caron*, proses *High Pressure Acid Leaching* (HPAL), dan proses *Atmospheric Pressure Acid Leaching* (APAL). Penggunaan metode

hidrometalurgi ini memiliki keunggulan, yaitu menghasilkan produk utama yang jauh lebih murni dibandingkan dengan penggunaan metode pirometalurgi. Pada umumnya proses hidrometalurgi meliputi dua tahap, yaitu pelindian dan pemerolehan kembali logam dari larutan hasil pelindian. Pengolahan bijih nikel melalui proses hidrometalurgi menggunakan reagen pelindi yang dinyatakan dalam kg/ton bijih yang diolah, dimana penggunaan reagen berbasis asam bergantung pada selektivitas pelindian terhadap besi dan kandungan magnesia dalam bijih yang diolah. Jenis asam yang umum digunakan dalam proses pelindian bijih nikel adalah asam organik dan inorganik (Suhaimi dan Indrawati, 2022). Adapun diagram alir proses pengolahan laterit yang sudah komersial dengan jalur hidrometalurgi dan pirometalurgi dapat dilihat pada Gambar 4.



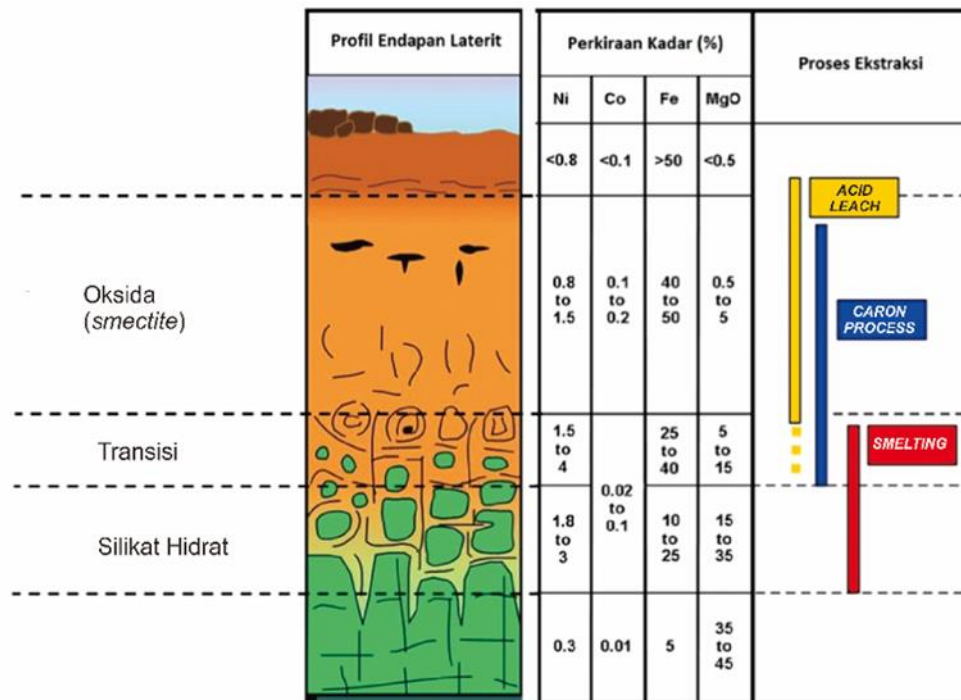
Gambar 4 Diagram alir proses pengolahan laterit (Rodrigues, 2013)

Nikel (Ni) dan kobalt (Co) digunakan secara luas di berbagai bidang, seperti manufaktur baterai lithium-ion, produksi baja, dan katalisis industri. Baterai lithium-ion telah menjadi perangkat penyimpanan energi yang paling banyak digunakan dalam beberapa tahun terakhir sebagai akibat dari meningkatnya permintaan energi dan kekhawatiran degradasi lingkungan. Sementara itu, baterai yang mengandung Ni dan Co memainkan peran penting dalam sistem penyimpanan

energi karena kepadatan energinya yang tinggi dan kapasitas penyimpanan yang besar. Total produksi Ni telah meningkat lebih dari 10 kali lipat sejak tahun 1950, dan konsumsi Ni mencapai 2,5 juta metrik ton di seluruh dunia pada tahun 2020. Lebih dari 70% sumber daya Ni adalah bijih laterit, yang merupakan sumber utama Ni dan Co. Terlepas dari metode hidrometalurgi dan pirometalurgi yang ada saat ini untuk mengekstraksi Ni dan Co dari bijih laterit, metode hidrometalurgi yang baru dan yang dimodifikasi telah dieksplorasi untuk meningkatkan efisiensi ekonomi ekstraksi dan mengurangi dampak lingkungan. Proses hidrometalurgi meliputi pelindian tekanan tinggi asam sulfat, pelindian tekanan asam nitrat, pelindian atmosfer, dan proses pelindian sulfasi-pemanggangan, yang sering kali lebih disukai karena tingkat perolehan yang tinggi, konsumsi asam yang moderat, dan efisiensi pelindian yang rendah untuk logam-logam pengotor. Namun, proses ini memiliki modal dan biaya operasi yang tinggi, persyaratan peralatan yang tinggi (autoklaf berlapis titanium), dan masalah konstruksi dalam kondisi operasi yang keras (250°C-270°C, 4-5 MPa). Namun demikian, proses ini praktis dan layak untuk memproses bijih laterit limonit kadar rendah karena dapat diterapkan pada tekanan dan temperatur atmosfer. Metode-metode ini membutuhkan biaya investasi yang rendah dan memudahkan pengoperasian (Zhao *et al.*, 2024).

Proses yang banyak digunakan di industri untuk mengolah bijih limonit adalah proses-proses hidrometalurgi seperti proses *caron*, pelindian pada tekanan tinggi (HPAL), pelindian agitasi pada tekanan atmosfer (AL) dan pelindian tumpukan (HL). Dengan jalur pirometalurgi, bijih limonit juga diproses untuk menghasilkan produk dengan kadar nikel rendah, seperti NPI (*Nickel Pig Iron*) (Fathoni dan Mubarak, 2015). Secara ideal, endapan laterit di alam dari daerah tropis memiliki kandungan mineral yang sangat bervariasi. Proses pengolahan bijih laterit harus disesuaikan dengan karakteristik spesifik dari bijih tersebut untuk memastikan efisiensi dan efektivitas pengolahan. Pemilihan proses pengolahan yang tepat sering kali didasarkan pada berbagai faktor, termasuk pertimbangan ekonomi yang mencakup biaya operasional dan potensi keuntungan, ketersediaan teknologi yang sesuai untuk ekstraksi dan pemurnian, serta sifat kimia dan sifat fisik bijih itu sendiri yang dapat mempengaruhi hasil akhir pengolahan. Sifat kimia bijih meliputi komposisi mineral dan reaktivitas kimia, sedangkan sifat fisik bijih

mencakup kekerasan, ukuran partikel, dan struktur bijih. Gambar 5 menggambarkan dengan jelas bagaimana endapan laterit di daerah tropis dapat dieksploitasi dan diolah menggunakan berbagai teknik pengolahan tersebut (Prasetyo, 2016).



Gambar 5 Lapisan ideal laterit daerah tropis di alam dan pengolahannya (Prasetyo, 2016)

Pada proses pengolahan dengan jalur hidrometalurgi, konsumsi reagen pelindi merupakan salah satu komponen utama biaya operasi. Pada umumnya konsumsi reagen pelindi dinyatakan dalam kg/ton bijih yang diolah, dimana konsumsi asam ini terutama bergantung pada selektivitas pelindian terhadap besi dan kandungan magnesia dalam bijih yang diolah. Proses HPAL umumnya mempunyai konsumsi asam yang signifikan lebih rendah (yaitu 300-600 kg asam/ton bijih) dibandingkan proses AL (yaitu 700-900 kg asam/ton bijih) karena proses pelindiannya lebih selektif terhadap besi. Pada proses HPAL, besi yang terlarut terpresipitasi kembali sebagai hematit (Fe_2O_3) dengan melepaskan asam, dimana presipitasi besi ini tidak terjadi pada proses AL dan HL oleh karena temperatur operasinya yang lebih rendah (Fathoni dan Mubarak, 2015). Secara umum, metode yang digunakan dalam skala komersial untuk mengekstraksi nikel laterit terdiri dari dua proses pengolahan utama, yaitu proses pirometalurgi dan hidrometalurgi. Proses pirometalurgi umumnya lebih sesuai untuk bijih nikel

saprolit yang memiliki kadar magnesium tinggi, sedangkan proses hidrometalurgi lebih efektif untuk bijih limonit yang mengandung besi tinggi. Kedua metode ini digunakan secara luas di industri untuk memenuhi permintaan nikel yang terus meningkat.

2.4.1 Proses Pirometalurgi

Proses pirometalurgi dalam ekstraksi bijih nikel laterit menghasilkan dua produk utama, yaitu *nickel matte* dan feronikel melalui metode peleburan reduksi (Bahfie dkk., 2021). Pirometalurgi digunakan untuk mengolah laterit jenis saprolit berkadar nikel tinggi ($\text{Ni} \geq 1,8\%$) (Prasetyo, 2016). Zona saprolit dengan kadar yang lebih tinggi, yang mengandung mineral magnesium silikat yang mengandung nikel seperti serpentin dan garnierit diolah dengan menggunakan metode pirometalurgi. Bijih limonit dianggap sebagai lapisan penutup dan ditolak sebagai bahan umpan karena kadar nikel yang lebih rendah dan kandungan besi yang jauh lebih tinggi. Proses pirometalurgi dibagi dalam beberapa metode yaitu sebagai berikut (Rodrigues, 2013):

1. Proses *Rotary Kiln-Electric Furnace* (RKEF)

Kelembaban dan air yang terikat secara kimiawi yang berkisar antara 30-45% berat yang terkandung dalam bijih harus dihilangkan terlebih dahulu. *Rotary kiln* berbahan bakar langsung, biasanya beroperasi pada suhu 250°C , mengurangi kandungan air yang terkandung hingga 15-20%. *Rotary kiln* dengan pembakaran balik yang beroperasi pada suhu $800-900^{\circ}\text{C}$ kemudian mendehidrosilasi dan mengkalsinasi/mereduksi atau mensulfidasi bijih, mengkondisikan material sebelum peleburan di dalam tanur busur listrik hingga suhu 1600°C . Peleburan menghasilkan feronikel melalui reduksi selektif fase oksida atau *nickel matte* melalui kondisi sulfidasi. Dari operasi peleburan laterit, 90% menghasilkan feronikel sedangkan 10% menghasilkan *nickel matte*. Pengolahan lebih lanjut dari *ferronickel* atau *nickel matte* menghasilkan produk nikel yang dapat dipasarkan dan pemulihan nikel dan kobalt secara keseluruhan dalam proses RKEF adalah 90-95% dan 50%. Meskipun tingkat perolehan kembali tinggi, kebutuhan energi untuk proses RKEF sangat besar karena menggunakan hidrokarbon dan energi listrik.

Volume produksi yang tinggi karena pengolahan seluruh bijih menambah biaya energi dan material.

2. Proses *Nippon Yakin Oheyama*

Proses *nippon yakin oheyama* untuk reduksi langsung bijih garnierit untuk produksi FeNi dalam tanur putar. Bijih silikat (2,3-2,6% Ni dan 12-15% Fe) bersama dengan antrasit, kokas dan batu kapur digiling dan dibuat briket. Briket diumpankan ke tanur putar berlawanan arah berbahan bakar batu bara dengan temperatur 700-1.300°C. Melalui tanur, muatan dikeringkan, didehidrasi, direduksi, dan dilebur dalam keadaan setengah lebur untuk membentuk partikel-partikel gabungan dari *ferro-nikel spons* yang disebut *luppen*, kemudian dipadamkan dengan air dan partikel-partikel *luppen*, dengan ukuran antara 2-3 mm dan dengan kadar 22% Ni dan 0,45% Co, dipisahkan dari terak melalui sirkuit penggilingan, penyaringan, *jigging*, dan pemisahan magnetik. Perolehan nikel awal hanya sebesar 80% karena tingginya kandungan material *gangue* dalam umpan yang sulit untuk diproses hanya dengan menggunakan tanur putar. Perolehan nikel meningkat menjadi 95% dengan peningkatan daur ulang debu cerobong, teknologi *pretreatment* dan pemisahan produk *luppen*.

3. *Nickel Pig Iron*

Nickel Pig Iron (NPI) dari bijih laterit di China dimulai pada tahun 2006/2007 karena harga *nickel London Metal Exchange* (LME) yang sangat tinggi. Tungku tanur tiup besi yang dimodifikasi dan tungku busur listrik digunakan untuk menghasilkan produk ferro-nikel berkadar rendah (10-15% Ni), yang digunakan sebagai alternatif nikel LME untuk produksi baja tahan karat. Produksi NPI mengikuti praktik tanur tiup bijih besi tradisional, yang memerlukan investasi minimal dalam modifikasi, dan dengan demikian lebih murah dibandingkan dengan mengoperasikan proyek-proyek *Greenfield laterite*. Limonit atau laterit transisi digunakan sebagai umpan untuk produksi NPI karena umpan bijih saprolit menghasilkan volume terak yang besar. Cina adalah importir nikel terbesar untuk produksi baja tahan karat dan pada tahun 2010 NPI menyumbang 30% dari konsumsi nikel primer Cina. NPI dianggap sebagai *dirty nickel* karena produksinya menghasilkan terak dalam jumlah

besar, konsumsi energi yang tinggi, mencemari lingkungan, dan menghasilkan produk dengan kualitas rendah. Oleh karena itu, produksi NPI hanya menjadi ekonomis pada saat harga nikel tinggi.

4.2.2 Proses Hidrometalurgi

Proses hidrometalurgi pada pengolahan bijih nikel laterit termasuk pelindian reduksi-amonia, pelindian asam bertekanan, pelindian asam tanpa tekanan, dan pelindian secara bertumpuk memiliki prinsip bahwa nikel dan kobalt dalam bijih nikel laterit dapat dipindahkan pada larutan pelindian, yaitu amonia atau asam, karena nikel dan kobalt akan membentuk kompleks dengan amonia atau larut dalam asam (Bahfie dkk., 2021). Hidrometalurgi digunakan untuk mengolah laterit kadar rendah (limonit dan saprolit) dengan kandungan Ni < 1,8% (Prasetyo, 2016). Proses hidrometalurgi telah dilakukan untuk mengolah lapisan limonit yang kaya *goethite* pada endapan laterit. Terjebaknya nikel dalam matriks magnesium silikat yang terdapat pada lapisan saprolit, bersama dengan keberadaan mineral yang mengandung asam, membatasi kemampuan proses hidrometalurgi untuk mengolah bijih saprolit. Pengolahan hidrometalurgi berfokus pada pemulihan nikel dan kobalt, terutama dari bijih limonit. Proses hidrometalurgi dibagi dalam beberapa metode yaitu sebagai berikut (Rodrigues, 2013):

1. Proses *Caron*

Proses *caron* adalah gabungan aliran piro/hidro yang dikembangkan untuk mengolah umpan campuran limonit dan limonit/saprolit. Bijih umpan, yang dikeringkan hingga kadar air 5%, direduksi secara selektif pada suhu 750°C untuk mengubah oksida nikel dan kobalt menjadi bentuk logam dengan tetap menyisakan kandungan besi dalam fase magnetit. Bijih tersebut didinginkan dalam kondisi non-oksidasi dan dilindi dengan menggunakan *lixiviant* amonium karbonat anammoniak, yang secara selektif memulihkan komponen logam. Larutan yang mengandung amoniak dihilangkan dengan cara dididihkan dan nilai Ni/Co diendapkan sebagai karbonat basa. Karbonat dapat dijual sebagai produk antara atau dikalsinasi pada suhu 900°C untuk menghasilkan sinter nikel oksida (90% Ni dan 10% O). Biasanya, perolehan nikel rendah (75%) dan menurun dengan meningkatnya kandungan saprolit

karena nilai Ni/Co yang terkandung di dalam matriks silikat yang sulit untuk direduksi pada temperatur yang dirancang. Bagian depan yang intensif energi dan reagen yang ekstensif yang diperlukan untuk tahap hidrometalurgi membatasi efektivitas biaya proses *caron*.

2. Proses HPAL

Sebuah tinjauan ekstensif oleh Whittington *and* Muir (2000) menguraikan proses pelindian asam bertekanan yang menggambarkan bagaimana operasi di Moa Bay dan tiga proyek HPAL di Australia Barat dipengaruhi oleh variasi mineralogi, kimia proses pelindian, kondisi operasi, sifat residu dan penskalaan. Proses HPAL dikembangkan sebagai alternatif dari proses *caron*, dengan menghilangkan langkah pengeringan dan pemanggangan reduksi yang intensif energi (50% konsumsi energi) yang diperlukan untuk menghilangkan kadar air yang tinggi yang terkandung di dalam bijih limonit. Bijih umpan dibatasi pada limonit dengan kandungan magnesia dan alumina yang rendah untuk membatasi konsumsi asam oleh mineral-mineral tersebut. Prosesnya dimulai dengan pencampuran bijih dengan air, kemudian pelindian bertekanan dengan asam sulfat pada suhu dan tekanan masing-masing 250°C dan 40 MPa. Kondisi pelindian ambien tidak dapat digunakan karena pelarutan total bijih terjadi. Pelindian asam bertekanan, pada suhu yang lebih besar dari 250°C secara selektif melarutkan Ni/Kooksida sebagai sulfat yang stabil, sementara sulfat besi menjadi tidak stabil dan mengendap sebagai hematit. Setelah tahap pelindian, pemisahan padat/cair memulihkan *pregnant solution*, yang kemudian mengalami pemurnian lebih lanjut, seperti ekstraksi pelarut, untuk memisahkan nikel dan kobalt. Operasi hilirisasi bervariasi di antara operasi HPAL yang berbeda, menghasilkan berbagai produk yang dapat dipasarkan yaitu sebagai berikut:

- a. Endapan sulfida campuran (Teluk Moa, Kuba).
- b. Endapan hidroksida campuran (Ravensthorpe, Australia).
- c. Endapan nikel karbonat (Cawse, Australia).
- d. Ekstraksi pelarut langsung (Goro, Kaledonia Baru).

Proses HPAL yang telah mapan mencapai perolehan nikel lebih dari 90%, memasok 100.000 ton Ni dan 10.000 ton Co setiap tahunnya. Pengeluaran

modal yang mahal untuk bahan konstruksi, biaya reagen, kesulitan dalam melakukan *commissioning* dan pembatasan bahan umpan telah membatasi efektivitas dari diagram alir HPAL.

3. *Atmospheric Leaching* (AL) dan *Heap Leaching* (HL)

Pelindian dibawah tekanan ambien memberikan keuntungan dibandingkan dengan proses HPAL yang dipraktekkan secara komersial dalam hal modal dan biaya operasi yang lebih rendah. *Atmospheric leaching* dari bijih laterit dan memberikan perbandingan yang ekstensif antara proses AL dan HPAL. *Atmospheric leaching* menghindari kebutuhan modal yang mahal yang terkait dengan pemasangan autoklaf dan mengurangi biaya operasi karena penurunan konsumsi energi dan biaya pemeliharaan. Sebagian besar proses *atmospheric leaching* beroperasi pada suhu di dekat titik didih *lixiviant*, yang biasanya berupa asam sulfat. Penyelidikan untuk memanfaatkan cairan pelindian alternatif termasuk, asam klorida, asam organik dan bio-teknologi, telah dilakukan tetapi belum diimplementasikan pada tingkat pabrik percontohan. *Atmospheric leaching* tidak selektif karena perilaku pelindian yang sama ditunjukkan oleh Ni, Co, Mg dan Fe. Agar AL menjadi ekonomis, sumber asam sulfat yang murah harus ada dan metode ekstraksi hilir yang lebih baik perlu dikembangkan untuk menghilangkan nikel dari *pregnant solution*.

Proses *Heap Leaching* (HL) telah berhasil diterapkan secara komersial untuk pengolahan bijih emas dan tembaga. *Heap leaching* menawarkan metode ekstraksi yang paling hemat biaya untuk pemulihan nikel dari bijih laterit. Operasi *heap leach* yang berhasil membutuhkan irigasi yang memadai, permeabilitas yang baik, dan waktu pelindian yang lama. Konsumsi asam yang tinggi, potensi kerusakan struktur mineral yang teragregasi dan selektivitas nikel yang rendah merupakan kelemahan yang membatasi penerapan *heap leaching* secara komersial.

2.5 *Roasting Pretreatment*

Roasting dapat diterapkan pada berbagai bijih dan konsentrat sulfida, karbonat dan tellurida. Secara tradisional, *roasting* bijih atau konsentrat dilakukan dengan

menggunakan pemanggang unggun terfluidisasi pada suhu sekitar 450-650°C (Celep *et al.*, 2010). *Pre-treatment* diperlukan sebelum ekstraksi untuk meningkatkan tingkat perolehan nikel. Dari sekian banyak perlakuan awal yang tersedia dalam literatur, *roasting* dan *alkali-roasting* terbukti dapat meningkatkan perolehan nikel. Adanya pemanasan sebelum ekstraksi dapat meningkatkan porositas bijih nikel laterit dan akan mengekspos mineral utama *goethite*, sehingga mempercepat interaksi antara gas pereduksi dan spesies nikel selama proses pelindian (Wulandari *et al.*, 2017).

Pemanggangan (*roasting*) bijih laterit sebelum pelindian asam umumnya tidak diterima secara umum oleh industri karena tingginya biaya pengeringan bijih dan pengembangan proses pelindian asam yang lebih ekonomis. Namun demikian, perlu diperhatikan berbagai metode pra-pengolahan pemanggangan dan perubahan fasa yang dihasilkan. Penggunaan sulfur dioksida untuk pemanggangan sulfasi pada suhu sekitar 650-750°C dilakukan pada sejumlah nikel laterit Australia. Suhu sulfasi nikel optimum menurun dengan meningkatnya kandungan magnesium, namun selektivitas untuk pelarutan nikel terhadap besi meningkat seiring dengan meningkatnya suhu pemanggangan. Faktor-faktor lain seperti %SO₂ dalam atmosfer pemanggangan, ukuran partikel dan kandungan magnesium dari bijih serta penambahan natrium klorida ditemukan mempengaruhi perolehan nikel dan selektivitas. Penerapan proses yang serupa pada beberapa laterit India juga menunjukkan ekstraksi nikel yang selektif setelah pemanggangan pada suhu 700°C yang sangat dipengaruhi oleh tekanan parsial SO₂ dan O₂ serta penambahan garam-garam logam (McDonald *and* Whittington, 2008).

Pemanggangan sederhana di udara untuk mengubah *goethite* menjadi hematit pada bijih limonit telah dibuktikan oleh beberapa kelompok sebagai proses yang bermanfaat bagi AL nikel dan kobalt. Untuk bijih saprolit, pemanggangan meningkatkan reaktivitas mineral serpentin. Berbagai metode pemanggangan reduksi telah diklaim dapat meningkatkan dan memperbaiki selektivitas pelindian asam selanjutnya. Hal ini mencakup berbagai macam agen pereduksi seperti serbuk besi, campuran gas CO/CO₂/H₂, aditif pirit dan campuran gas CO/CO₂, campuran gas CO/CO₂, aditif batubara, aditif pirit dan aditif batubara dengan gas CO dan hidrogen (McDonald *and* Whittington, 2008).

Proses *sulfation-roasting-leaching* telah muncul sebagai metode alternatif untuk ekstraksi nikel dari bijih laterit dengan konsumsi energi yang rendah dan tingkat pemulihan yang tinggi. Proses ini melibatkan konversi nikel dan kobalt dalam bijih ke dalam bentuk sulfat, yang dapat larut dalam air, diikuti dengan *roasting* untuk mengubah sulfat besi menjadi oksida besi yang tidak dapat larut. Hal ini menyisakan nikel dan kobalt sebagai ion-ion yang dapat larut dalam larutan pelindian. Namun demikian, sebagian besar penelitian mengenai proses *sulfation-roasting-leaching* telah difokuskan pada bijih-bijih laterit yang kaya akan limonit atau *goethite* (Hariyanto *et al.*, 2023).

Konversi limonit atau silikat nikeliferos dicapai dengan perlakuan termal (*roasting*) bijih. *Pre-roasting* dengan penambahan zat pereduksi seperti belerang, karbon, dan gas pereduksi lainnya merupakan metode yang populer untuk menangani bijih nikel laterit kadar rendah. Dehidrasi *goethite* dimulai pada suhu sekitar 300°C, dan terbentuklah hematit. Kehadiran ion H^+ tidak hanya diperlukan untuk menyerang gugus OH^- *goethite* tetapi juga untuk mempercepat laju pelarutannya. Nikel yang dibebaskan selama pelarutan *goethite* bereaksi dengan asam sulfat membentuk nikel sulfat. Stabilitas termodinamika hematit meningkat dengan meningkatnya temperatur, oleh karena itu diperlukan *preroasting* pada temperatur tinggi sebelum proses pelindian untuk menurunkan kelarutan besi (Dahani *et al.*, 2020).

Saat ini, berbagai proses hidrometalurgi diterapkan untuk ekstraksi nikel dan kobalt dari bijih laterit. Bijih laterit kaya akan besi dan setelah proses pelindian, kandungan nikel dan kobalt serta besi yang tinggi terdapat dalam larutan. Pada operasi *Atmospheric Leaching* (AL), yang belum terbukti secara komersial untuk laterit, kandungan besi yang tinggi terdapat pada larutan pelindian yang mengandung besi. *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) lebih diminati sebagai proses industri utama, karena kandungan besi dapat dikurangi dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Namun, biaya autoklaf dan perawatan merupakan kerugian yang paling penting untuk HPAL. Selain itu, terdapat proses industri lain yang dikenal sebagai proses Caron, dimana nikel direduksi pada suhu antara 500-800°C dan dilindi dengan larutan amoniak. Namun demikian, metode ekstraksi ini membutuhkan biaya modal yang signifikan termasuk infrastruktur dan peralatan.

Selain itu, deposit nikel laterit umumnya terletak di daerah dimana akses listrik dan transportasi mungkin sulit. Oleh karena itu, minat terhadap metode ekstraksi nikel alternatif telah meningkat. Untuk mengatasi masalah-masalah dari proses-proses tersebut, proses *sulfating roasting* menjadi penting dalam ekstraksi nilai logam dari bijih laterit. Pada proses ini nikel dan kobalt diubah menjadi bentuk sulfat yang sangat mudah larut dalam air, namun besi tetap berada dalam bentuk oksida yang tidak larut. Proses ini diaplikasikan dengan menambahkan asam sulfat pekat, *roasting*, dan *water leaching*. Dengan mempertimbangkan proses ini, proses *Pug-Roast-Leach* (PRL) juga telah dikembangkan, yang meliputi sulfasi selektif nikel dan kobalt dalam kondisi yang sesuai sehingga mengurangi konsumsi asam dibandingkan dengan proses lainnya. Dilaporkan bahwa pelindian bijih laterit dengan asam sulfat dan pemanggangan dalam dua tahap meningkatkan ekstraksi logam dibandingkan dengan pemanggangan satu tahap pada suhu 700°C (Basturkcü and Acarkan, 2016).

2.6 Pelindian Menggunakan Asam Sulfat

Ekstraksi padat-cair atau *leaching* adalah proses pemisahan cairan dari padatan dengan menggunakan cairan sebagai bahan pelarutnya. Pelarut dalam proses *leaching* biasa menggunakan pelarut asam kuat yaitu H_2SO_4 , HCl , HNO_3 (Mukhtar dkk., 2022). Asam sulfat (H_2SO_4) merupakan asam mineral anorganik yang kuat. Zat ini larut dalam air pada semua perbandingan. Asam sulfat mempunyai banyak kegunaan dan merupakan salah satu produk utama industri kimia. Asam sulfat murni yang tidak diencerkan tidak dapat ditemukan secara alami di bumi oleh karena sifatnya yang higroskopis. Asam sulfat 98% umumnya disebut sebagai asam sulfat pekat. Terdapat berbagai jenis konsentrasi asam sulfat yang digunakan untuk berbagai keperluan seperti kegunaan laboratorium, asam baterai, asam bilik atau asam pupuk, asam menara atau asam pekat (Arita dkk., 2015).

Proses pelindian dengan menggunakan pelarut H_2SO_4 merupakan sistem reaksi heterogen (*solid liquid*). Laju reaksi pada umumnya dikendalikan oleh salah satu tahapan yaitu difusi melalui lapisan pelarut, difusi melalui permukaan produk reaksi, atau reaksi kimia pada permukaan partikel yang bereaksi. Kinetika pelindian laterit dalam berbagai kondisi telah dipelajari oleh beberapa peneliti sebelumnya.

Pelindian nikel dengan asam sulfat pada tekanan tinggi dikendalikan oleh difusi pelarut melalui pori-pori limonit dengan mengikuti *grain* model. Proses pelindian bijih nikel laterit jenis saprolit dapat dikendalikan oleh difusi maupun reaksi kimia. Untuk bijih nikel laterit berkadar rendah dengan kandungan silika tinggi, proses pelindian dapat dikendalikan oleh reaksi kimia atau kombinasi reaksi dan difusi, sedangkan jenis limonit terutama limonit terdehidroksilasi, proses pelindian lebih dikendalikan oleh difusi (Febriana dkk., 2018).

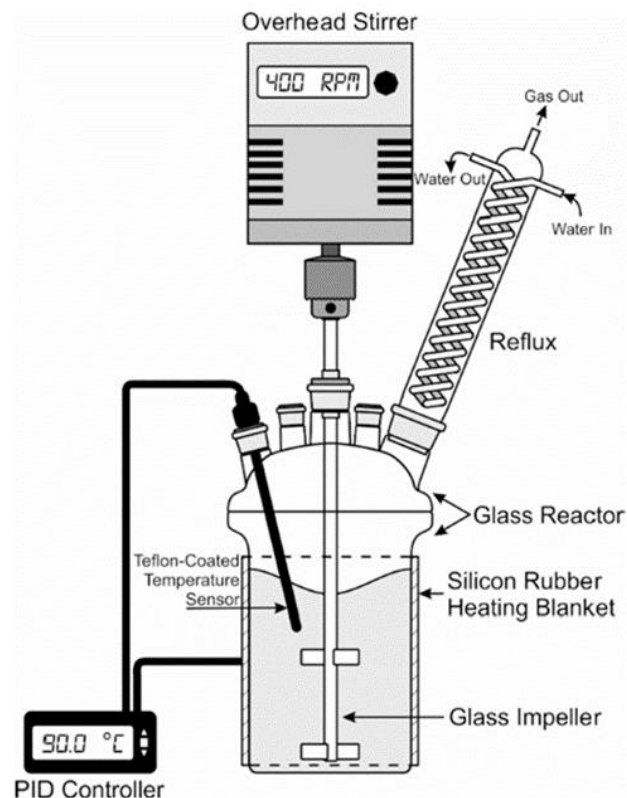
Proses hidrometalurgi yang digunakan untuk pengolahan nikel laterit yaitu proses *Caron*, proses *High Pressure Acid Leaching*, dan proses *Atmospheric Pressure Acid Leaching*. Dari ketiga proses tersebut, metode APAL dinilai lebih ekonomis bila diaplikasikan pada industri, karena proses ini menggunakan tekanan atmosfer, sehingga membutuhkan biaya operasional dan energi yang lebih rendah. Hasil akhir dari proses hidrometalurgi nikel laterit adalah logam murni yang kualitasnya sama dengan *intermediate products* (Nurfaidah dkk., 2020).

Salah satu metode hidrometalurgi yang menjadi perhatian yaitu pelindian pada tekanan atmosfer (*atmospheric leaching*) karena memiliki beberapa kelebihan yaitu cukup efisien dalam hasil *recovery* nikel dan kobalt karena biaya operasional dan kebutuhan energi yang relatif rendah, peralatan proses cukup simpel, dan mudah dilakukan *maintenance*. Selain itu, *recovery* nikel dan kobalt untuk metode *atmospheric leaching* lebih tinggi dibanding *heap leaching* (Wahab dkk., 2021).

Leaching nikel laterit pada tekanan atmosfer menggunakan asam sulfat dipengaruhi oleh variabel temperatur, konsentrasi asam, dan waktu pelindian. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Wahab dkk., 2021) mengenai studi pengaruh variabel proses dan kinetika ekstraksi nikel dari bijih nikel laterit menggunakan larutan asam sulfat pada tekanan atmosferik menjelaskan bahwa peningkatan temperatur, konsentrasi asam, dan waktu pelindian menyebabkan peningkatan persentase ekstraksi nikel terlindi. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut yaitu persen *recovery* tertinggi yaitu 62,81% pada temperatur 90°C, konsentrasi H₂SO₄ 0,8 molar, dan waktu pelindian 90 menit. Sedangkan persen *recovery* terendah yaitu 9,09% pada temperatur 30°C, konsentrasi H₂SO₄ 0,2 molar, dan waktu pelindian 30 menit. Dari analisis ANOVA 3 faktor diketahui bahwa semua variabel signifikan terhadap persen ekstraksi nikel dengan urutan variabel yang

paling berpengaruh yaitu temperatur, konsentrasi asam dan waktu pelindian. Hasil analisis kinetika pelindian menunjukkan bahwa pengendali laju proses pelindian yaitu difusi melalui lapisan produk padat tidak bereaksi.

Studi pelindian bijih nikel laterit menggunakan larutan asam sulfat telah dilakukan sebelumnya oleh (Mohammadreza *et al.*, 2014). Penelitian tersebut secara khusus meneliti pengaruh temperatur dan konsentrasi asam terhadap persentase ekstraksi nikel dari bijih laterit. Dalam penelitian yang dilakukan, berbagai kondisi temperatur dan konsentrasi asam diuji untuk menentukan kombinasi yang paling efektif dalam meningkatkan persentase ekstraksi nikel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase ekstraksi nikel tertinggi yang berhasil dicapai adalah 62,49%. Meskipun demikian, hasil tersebut masih dianggap belum maksimal karena nilai ekstraksi yang dicapai hanya berada di sekitar 60%. Hal ini menunjukkan bahwa masih diperlukan upaya lebih lanjut untuk mengoptimalkan proses pelindian agar dapat mencapai hasil yang lebih tinggi dan lebih efisien. Adapun skema pengaturan secara mendetail beserta komponen yang terlibat dalam proses *atmospheric leaching* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Skema pengaturan *atmospheric leaching* (Asadrokht and Zakeri, 2022)