

**SKRIPSI**

**STUDI PENGARUH PEMANGGANGAN BIJIH TERHADAP  
TINGKAT PELINDIAN NIKEL, KOBALT, DAN BESI DARI  
BIJIH LIMONIT MENGGUNAKAN ASAM KLORIDA  
DAN ASAM NITRAT**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**MALYANUS YEFTA  
D111 19 1042**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

**STUDI PENGARUH PEMANGGANGAN BIJIH TERHADAP  
TINGKAT PELINDIAN NIKEL, KOBALT, DAN BESI DARI BIJIH  
LIMONIT MENGGUNAKAN ASAM KLORIDA  
DAN ASAM NITRAT**

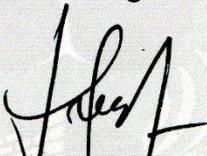
Disusun dan diajukan oleh

**Malyanus Yefta**  
**NIM. D111191042**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian  
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal 17 Oktober 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

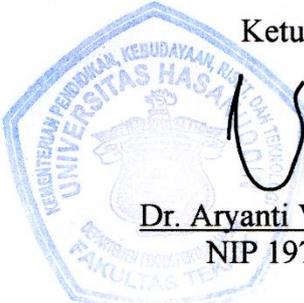
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



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

Ketua Program Studi,



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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama : Malyanus Yefta

NIM : D111191042

Program Studi : Teknik Pertambangan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Studi Pengaruh Pemanggangan Bijih Terhadap Tingkat Pelindian Nikel, Kobalt,  
dan Besi dari Bijih Limonit Menggunakan Asam Klorida dan Asam Nitrat

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, 17 Oktober 2023

Yang Menyatakan



Malyanus Yefta

## ABSTRAK

**MALYANUS YEFTA.** *Studi Pengaruh Pemanggangan Bijih Terhadap Tingkat Pelindian Nikel, Kobalt, dan Besi dari Bijih Limonit Menggunakan Asam Klorida dan Asam Nitrat (dibimbing oleh Sufriadin)*

Metode *atmospheric leaching* dapat digunakan untuk mengolah bijih limonit dan bijih saprolit dengan biaya yang lebih rendah dan proses lebih sederhana jika dibandingkan dengan proses *high pressure acid leaching* (HPAL). Namun, efisiensi pelindian nikel dengan proses *atmospheric leaching* relatif rendah. Pemanggangan bijih sebagai perlakuan awal pada proses *atmospheric leaching* diyakini dapat meningkatkan ekstraksi logam secara signifikan. Pemanggangan bijih limonit menyebabkan transformasi goetit dan juga dapat meningkatkan porositas dan luas permukaannya, sehingga membuatnya lebih mudah untuk dilindih. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suhu pemanggangan bijih limonit terhadap tingkat pelindian nikel, kobalt, dan besi dengan pelarut asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO<sub>3</sub>). Karakterisasi sampel menggunakan metode mikroskopis, *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF), dan *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS). Hasil pengamatan mikroskopis menunjukkan bahwa sampel sebagian besar mengandung goetit (FeOOH). Mineral lain yang terdapat pada sampel yaitu talk (Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>), gipsit (Al(OH)<sub>3</sub>), dan kuarsa (SiO<sub>2</sub>). Hasil analisis kimia sampel bijih limonit menggunakan XRF dan AAS menunjukkan bahwa sampel mengandung 25,98% SiO<sub>2</sub>, 16,43% MgO 1,7% Ni, 0,02% Co, dan 50,64% Fe<sub>total</sub>. Hasil pemanggangan bijih pada suhu 300°C menunjukkan persentase protohematit yang tinggi. Pemanggangan bijih pada suhu 300°C memberikan tingkat pelindian nikel dan besi yang maksimum. Sedangkan perolehan maksimum kobalt terjadi pada suhu pemanggangan 750°C. Berdasarkan perbandingan tingkat pelindian nikel menunjukkan bahwa penggunaan HCl lebih efisien dibandingkan HNO<sub>3</sub> dengan tingkat pelindian nikel masing-masing sebesar 66,94% dan 49,76%. Meskipun demikian, menggunakan HCl juga meningkatkan tingkat pelindian besi yaitu sebesar 84,38% yang berarti HCl tidak selektif terhadap besi.

Kata Kunci: Nikel, Kobalt, Limonit, Hidrometalurgi, Pemanggangan Bijih, Transformasi Fasa, tingkat pelindian.

## ABSTRACT

**MALYANUS YEFTA.** *The Effects of Pre-heating on The Atmospheric Hydrochloric and Nitric Acid Leaching of Nickel, Cobalt, and Iron from Limonitic Ore (supervised by Sufriadin)*

*The atmospheric leaching method can be used to process limonite ore and saprolite ore at a lower cost and simpler process when compared to the high pressure acid leaching (HPAL) process. However, the efficiency of nickel leaching with the atmospheric leaching process is relatively low. Roasting ore as a pre-treatment in the atmospheric leaching process is believed to increase the rate of metal extraction significantly. Roasting of limonite ore causes goethite transformation and can also increase its porosity and surface area, making it easier to be leached. This study aims to analyze the effect of the roasting temperature of limonite ore on the leaching rate of nickel, cobalt, and iron with hydrochloric acid (HCl) and nitric acid (HNO<sub>3</sub>) solvents. Sample characterization using microscopic methods, X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), and Atomic Absorption Spectrometry (AAS). Microscopic results showed that sample predominantly contain goethite (FeOOH). Other minerals present in the sample are talc (Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>), gibbsite (Al(OH)<sub>3</sub>), and quartz (SiO<sub>2</sub>). The results of chemical analysis of limonite ore sample using XRF and AAS showed that the sample contained 25.98% SiO<sub>2</sub>, 16.43% MgO, 1.7% Ni, 0.02% Co, and 56.64% Fe<sub>total</sub>. The ore roasting at 300°C shows a high percentage of protohematite. Roasting the ore at 300°C provides maximum nickel and iron leach rates. While the maximum recovery of cobalt occurs at a roasting temperature of 750°C. Based on the comparison of nickel leaching rates, it shows that the use of HCl is more efficient than HNO<sub>3</sub> with nickel leaching rates of 66.94% and 49.76%, respectively. However, using HCl also increased the rate of iron leaching by 84.38%, which means that HCl is not selective for iron.*

*Keywords: Nickel, Cobalt, Limonite, Hydrometallurgy, Ore Roasting, Phase Transformation, Leaching rate.*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR .....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN .....	ix
KATA PENGANTAR .....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Nikel .....	6
2.2 Nikel Laterit .....	8
2.3 Kobalt .....	10
2.4 Besi .....	13
2.5 Pengolahan Bijih Nikel Laterit .....	13
2.6 <i>Roasting Pretreatment</i> .....	20
2.7 Pelindian Menggunakan Asam Klorida (HCl) dan Asam Nitrat (HNO <sub>3</sub> ).....	21
BAB III METODE PENELITIAN.....	26
3.1 Lokasi Pengambilan Sampel.....	26
3.2 Variabel Penelitian.....	27
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	28
3.4 Teknik Pengumpulan Data Penelitian.....	30
3.5 Teknik Analisis .....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	42
4.1 Karakterisasi Sampel Bijih Limonit.....	42
4.2 Hasil Pelindian Bijih Limonit .....	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	57
5.1 Kesimpulan .....	57
5.2 Saran .....	58
DAFTAR PUSTAKA .....	59
LAMPIRAN.....	63

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Penggunaan nikel dunia pada Tahun 2016 (Nickel Institute, 2016) ....	6
Gambar 2	Persebaran nikel laterit dan nikel sulfida di dunia (Elias, 2002).....	8
Gambar 3	Zona endapan nikel laterit (Elias, 2002) .....	9
Gambar 4	Perkiraan rincian produksi tambang kobalt berdasarkan tipe endapan tahun 2017 (Sumber: British Geological Survey World Mineral Statistics Database).....	10
Gambar 5	Konsumsi kobalt global berdasarkan aplikasi pada tahun 2017 (Petavratzi, <i>et al.</i> , 2019) .....	11
Gambar 6	Lapisan ideal laterit daerah tropis di alam dan pengolahannya (Prasetiyo, 2016) .....	14
Gambar 7	Diagram alir proses pengolahan laterit (Prasetiyo, 2016).....	15
Gambar 8	Lokasi pengambilan sampel bijih nikel laterit jenis limonit di lokasi penambangan PT Vale Indonesia Tbk.....	26
Gambar 9	Proses komposit menggunakan metode <i>quartering</i> .....	31
Gambar 10	Proses reduksi ukuran sampel menggunakan <i>agate mortar</i> .....	32
Gambar 11	Proses pengayakan menggunakan ayakan 100 mesh .....	32
Gambar 12	Penimbangan sampel untuk pemanggangan menggunakan timbangan digital Sartorius tipe CPA124S .....	33
Gambar 13	Pemanggangan sampel menggunakan <i>Muffle Furnace</i> Yamato FO310.....	34
Gambar 14	Prosedur pengenceran larutan pekat.....	35
Gambar 15	Rangkaian komponen untuk kegiatan pelindian (kiri) dan kegiatan menuangkan cairan ke dalam labu kemudian mengatur kecepatan pengadukan serta suhu pemanasan (kanan) .....	36
Gambar 16	Penyaringan larutan hasil pelindian .....	37
Gambar 17	Pengamatan sampel awal dalam bentuk sayatan poles menggunakan mikroskop polarisasi tipe Nikon Eclipse LV100N POL .....	38
Gambar 18	Instrumen analisis XRD tipe Shimadzu Maxima X-7000 (kiri) dan Instrumen analisis ED-XRF (kanan).....	39
Gambar 19	Instrumen AAS 6000 <i>Flame Atomic Absorption Spectrometer</i> .....	39
Gambar 20	Diagram alir penelitian.....	40
Gambar 21	Fotomikrografi sampel bijih limonit yang menunjukkan mineral goetit (Gt) dan mineral hematit (Hm) yang berasosiasi dengan kromit (Cr).....	42
Gambar 22	Difraktogram sampel awal bijih limonit yang digunakan dalam penelitian ini.....	43
Gambar 23	Difraktogram sampel bijih limonit setelah pemanggangan bijih pada suhu 300°C .....	44
Gambar 24	Perbandingan difraktogram sampel awal, pemanggangan bijih, dan residu pelindian pemanggangan bijih menggunakan asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO <sub>3</sub> ) .....	48
Gambar 25	Grafik perbandingan tingkat pelindian nikel antara pelarut asam klorida (HCl) dengan pelarut asam nitrat (HNO <sub>3</sub> ) pada setiap suhu pemanggangan bijih .....	51

Gambar 26 Grafik perbandingan tingkat pelindian kobalt antara pelarut asam klorida (HCl) dengan asam nitrat (HNO <sub>3</sub> ) pada setiap suhu pemanggangan bijih .....	52
Gambar 27 Grafik perbandingan tingkat pelindian besi antara pelarut asam klorida (HCl) dengan asam nitrat (HNO <sub>3</sub> ) pada setiap suhu pemanggangan bijih .....	54

## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Hasil pengenceran asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO <sub>3</sub> ).....	35
Tabel 2 Hasil analisis AAS sampel awal .....	46
Tabel 3 Hasil analisis XRF sampel awal.....	45
Tabel 4 Hasil analisis AAS kadar nikel, kobalt dan besi hasil pelindian menggunakan HNO <sub>3</sub> dan HCl pada setiap suhu pemanggangan.....	47
Tabel 5 Perolehan nikel dan tingkat pelindiannya pada proses pelindian menggunakan asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO <sub>3</sub> ).....	50
Tabel 6 Perolehan kobalt dan tingkat pelindiannya pada proses pelindian menggunakan asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO <sub>3</sub> ).....	52
Tabel 7 Perolehan besi dan tingkat pelindiannya pada proses pelindian menggunakan asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO <sub>3</sub> ).....	53

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Pengenceran Asam Klorida (HCl) Dan Asam Nitrat (HNO <sub>3</sub> ) .....	64
Lampiran 2 Hasil Analisis <i>Atomic Absorption Spectrometry</i> (AAS) .....	65
Lampiran 3 Perhitungan Tingkat Pelindian .....	68
Lampiran 4 Hasil Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	77
Lampiran 6 Peta Lokasi Pengambilan Sampel .....	83
Lampiran 7 Kartu Konsultasi Tugas Akhir.....	85

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh kegiatan penelitian tugas akhir ini dengan baik. Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan menjadi kesempatan bagi penulis untuk menerapkan ilmu yang telah penulis dapatkan selama di perkuliahan.

Tugas akhir dengan judul “Studi Pengaruh Pemangangan Bijih Terhadap Tingkat Pelindian Nikel, Kobalt dan Besi dari Bijih Limonit Menggunakan Asam Klorida dan Asam Nitrat” diharapkan mampu memberikan referensi pengolahan nikel laterit kadar rendah yang ekonomis untuk menjadi solusi pemanfaatan nikel laterit kadar rendah yang melimpah di tanah air.

Penulis menyadari telah menerima banyak bantuan dari berbagai pihak baik selama melaksanakan penelitian ini maupun dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Pimpinan perusahaan PT Vale Indonesia Tbk secara khusus *Mines Department*, yang telah memberikan kesempatan dan dukungan kepada penulis untuk melakukan pengambilan sampel di lokasi penambangan perusahaan.
2. Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak/Ibu Dosen yang telah memberikan ilmunya serta staff administrasi departemen yang telah membantu segala bentuk administrasi yang diperlukan untuk mendukung jalannya penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Sufriadin, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang membantu memberikan solusi dan saran bagi penulis dalam menyelesaikan masalah yang dihadapi selama melaksanakan eksperimen dan penyusunan laporan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. phil.nat. Sri Widodo, S.T., M.T., Bapak Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T., dan Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. selaku dosen penguji atas kesediaannya dan saran yang telah diberikan kepada penulis dalam rangka penulisan karya tugas akhir yang lebih baik.
5. Bapak Akmal Saputno, S.T., M.T. yang juga telah membantu memberikan saran, mengajarkan metode dan ilmu yang diperlukan selama melaksanakan eksperimen dan menjadi teman diskusi selama melaksanakan eksperimen.
6. Mahasiswi dengan NIM D061201078 yang selalu memberikan dukungan dan semangat selama melaksanakan penelitian. Terima kasih atas perhatian dan kebersamaannya dalam setiap masanya.
7. Teman angkatan Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin 2019 (IGNEOUZ 2019). Terima kasih atas waktu luang yang diberikan untuk berbagi cerita, berkeluh kesah, serta motivasi yang diberikan. Terima kasih telah mejadi saudara sejak menjadi mahasiswa baru sampai detik ini menuju tahap mahasiswa yang bermutu.

8. Seluruh Anak Garuda, atas nama Aldi Rifaldi, A. Fadhil Pratama Toro, Caesar Alredo Barus, M. Ridzuan, Rivaldo Pratama, dan Salman. Ucapan terima kasih untuk kalian semua atas semua waktu dan perjalanan yang telah dilalui dan diterjang bersama. Semoga dikemudian hari kita dapat berjumpa kembali mewujudkan harapan kita menjadi sayap-sayap Garuda dan terbang tinggi di langit Ibu Pertiwi dengan ilmu yang kita miliki.
9. Kedua orang tua, adik dan kakak yang telah memberikan doa, dukungan dan kasih sayang kepada penulis. Tanpa itu semua penulis tidak akan sampai pada pencapaian ini.
10. *Last but not least, I want to thank myself for believing in me. I want to thank myself for doing all this hard work. I want to thank myself for having no days off. I want to thank myself for never quitting.*

Gowa, 17 Oktober 2023  
Penulis,

Malyanus Yefta

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Nikel adalah logam strategis yang sangat penting dalam aplikasi industri dan metalurgi modern (Kursunoglu & Kaya, 2016). Nikel banyak digunakan dalam produk untuk industri, militer, transportasi, luar angkasa, laut dan aplikasi arsitektur (Nickel Institute, 2016). Nikel secara alami terjadi dalam bentuk sulfida dan laterit. Sekitar 60% termasuk endapan laterit dan 40% dalam bentuk endapan sulfida. Menipisnya bijih nikel sulfida kadar tinggi, biaya bahan bakar yang tinggi, dan penerapannya menentukan produksi nikel dari bijih nikel laterit di masa depan. Secara umum nikel laterit yang diolah terbagi menjadi dua yaitu limonit dan Saprolit. Limonit mengandung 40-50% Fe, 0,5-5% MgO, 0,8-1,5% Ni, dan 0,1-0,2% Co sedangkan Saprolit mengandung 10-25% Fe, 15-35% MgO, 1,5-3% Ni, dan 0,02-0,1% Co (Elias, 2002). Sebagian besar kobalt (Co) diperoleh kembali sebagai produk sampingan dari penambangan tembaga atau nikel. Logam kobalt digunakan dalam berbagai *alloys*, termasuk *superalloys*, *magnetic alloys*, *prosthetic alloys* dan *wear-resistant alloys* (Petavratzi *et al.*, 2019).

Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai cadangan nikel dalam bentuk bijih laterit terbesar di dunia. Cadangan bijih nikel laterit di tanah air mencapai lebih dari 1,5 milyar ton berada di Kawasan Timur Indonesia (KTI) terutama di Sulawesi dan Halmahera. Bagian terbesar dari cadangan tersebut adalah nikel kadar rendah dengan kandungan Ni < 1,8% yang belum diolah di dalam negeri (Prasetyo, 2016). Salah satu perusahaan di Kawasan Timur Indonesia yaitu PT Vale Indonesia Tbk yang melakukan penambangan dan pengolahan bijih nikel laterit di tiga wilayah konsesi, yaitu Sulawesi Selatan, Sulawesi Tengah, dan Sulawesi Tenggara. Blok Sorowako yang berada di wilayah konsesi Sulawesi Selatan hanya menggunakan bijih saprolit dalam memenuhi kebutuhan pabrik peleburan bijih nikel laterit dalam memproduksi *nickel matte* di Sorowako sedangkan bijih limonit sampai saat ini belum diolah oleh perusahaan (PT Vale Indonesia Tbk, 2022).

Ada dua jalur proses untuk mengolah bijih nikel laterit, yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi. Pirometalurgi digunakan untuk mengolah laterit jenis saprolit berkadar nikel tinggi ( $Ni \geq 1,8\%$ ) dan hidrometalurgi digunakan untuk mengolah laterit kadar rendah ( $Ni < 1,8\%$ ) (Prasetiyo, 2016). Sebagian besar proses hidrometalurgi yang ada untuk pelindian nikel laterit menggunakan asam sulfat. Teknologi alternatif yang memanfaatkan agen pelindian lain seperti asam klorida dan berbagai asam organik saat ini sedang diteliti dan dikembangkan. Studi fundamental telah menunjukkan bahwa asam klorida lebih efektif daripada asam sulfat untuk ekstraksi bijih nikel laterit pada kondisi di bawah tekanan atmosfer. Proses yang menggunakan pelindian asam klorida menawarkan beberapa keuntungan potensial yang meliputi biaya modal lebih rendah, kebutuhan reagen berkurang, pengendapan besi sebagai hematit, meningkatkan karakteristik pengendapan dan filtrasi residu, dan perolehan magnesium sebagai kieserit (McDonald & Whittington, 2008b). Di samping itu teknologi *nitric acid pressure leaching* (NAPL) telah dipatenkan dan dikembangkan untuk mengolah bijih laterit di Cina. Pengolahan bijih laterit limonit dengan NAPL memiliki keunggulan, seperti perolehan Ni dan Co lebih dari 82%, Ni/Co hidroksida dengan 25,4% Ni dan 2,6% Co dapat diperoleh, di atas 85%  $HNO_3$  dapat diregenerasi/daur ulang, dan beberapa produk sampingan yang berharga dapat dihasilkan, termasuk kalsium sulfat ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) dengan kadar tinggi untuk pembuatan kertas, aluminium ( $Al > 24\%$ ), dan magnesium ( $Mg > 23\%$ ). Keuntungan seperti itu membuat teknologi NAPL untuk pemrosesan laterit menguntungkan (Ma *et al.*, 2013).

*High pressure acid leaching* (HPAL) dan *atmospheric acid leaching* (AL) adalah dua proses hidrometalurgi utama yang digunakan untuk mengolah bijih laterit. *Atmospheric leaching* adalah cara yang lebih sederhana, lebih murah, dan lebih andal untuk pelindian *matte* dibandingkan dengan *pressure leaching* (Gupta, 2003). Proses AL dapat mengolah bijih limonit dan bijih saprolit dengan modal yang lebih rendah dan proses yang lebih sederhana jika dibandingkan dengan proses HPAL. Namun, efisiensi pelindian nikel dengan proses AL relatif rendah. Beberapa penelitian dan beberapa paten telah menjelaskan peningkatan ekstraksi nikel yang signifikan oleh AL, hanya setelah memanaskan bijih limonit pada berbagai temperatur (Dong *et al.*, 2023).

Lapisan bijih limonit terdiri dari goetit dengan beberapa hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dan beberapa magnesium silikat. Sebagian besar nikel dari bijih limonit berada dalam struktur goetit. Pemanggangan bijih limonit menyebabkan transformasi fasa goetit menjadi hematit yang terjadi melalui modifikasi dalam struktur goetit. Transformasi struktur mineral yang disebabkan oleh pemanggangan bijih adalah faktor penentu yang mempengaruhi ekstraksi logam (Dong, *et al*, 2023). Suhu pemanggangan bijih dapat memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perolehan logam nikel. Pemanggangan bijih tidak hanya mengubah komposisi mineraloginya tetapi juga meningkatkan porositas dan luas permukaannya, sehingga membuatnya lebih mudah untuk dilindih. Proses dehidroksilasi goetit ini menyebabkan beberapa logam yang tidak kompatibel dengan struktur kristal hematit tersisihkan dari struktur goetit membentuk banyak rongga pada permukaan kristal (Dong, *et al*, 2023). Menurut Li *et al*. (2009) transformasi goetit menjadi hematit menyebabkan struktur kristal goetit berubah dan mengalami perombakan. Hal tersebut menimbulkan lebih banyak pori-pori dan terjadinya pelepasan nikel ke dalam larutan atau lebih banyak nikel yang terekspos menyebabkan ekstraksi lebih mudah terjadi. Dengan demikian, pemanggangan bijih yang dilakukan dapat mengefisienkan proses *leaching* dalam upaya untuk mempercepat proses *leaching* dan meminimalkan penggunaan jumlah asam.

Berdasarkan penjelasan di atas, maka penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi *atmospheric acid leaching* menggunakan variasi suhu pemanggangan bijih untuk menganalisis pengaruh suhu pemanggangan bijih terhadap tingkat pelindian nikel, kobalt, dan besi dari bijih limonit menggunakan asam klorida dan asam nitrat. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan alternatif dalam pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah yang bernilai ekonomis dan ramah lingkungan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana komposisi mineral dan kimia bijih limonit.
2. Bagaimana pengaruh suhu pemanggangan bijih terhadap transformasi goetit pada bijih limonit.

3. Bagaimana pengaruh suhu pemanggangan bijih terhadap tingkat pelindian nikel, kobalt dan besi dari bijih limonit menggunakan pelarut asam klorida (HCl) dan pelarut asam nitrat (HNO<sub>3</sub>).

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui komposisi mineral dan kimia bijih limonit.
2. Menganalisis pengaruh pemanggangan bijih terhadap transformasi goetit pada bijih limonit.
3. Menganalisis pengaruh suhu pemanggangan bijih terhadap tingkat pelindian nikel, kobalt dan besi dari bijih limonit menggunakan pelarut asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO<sub>3</sub>).

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Meningkatkan pengetahuan tentang proses pelindian nikel dan kobalt dari bijih limonit menggunakan pelarut asam klorida dan asam nitrat.
2. Memberikan referensi pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah utamanya lapisan limonit.
3. Meningkatkan tingkat pelindian nikel dari bijih limonit sehingga dapat menambah pendapatan dari pengolahan bijih limonit.

### 1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan di *Laboatoratory Based Education* (LBE) Analisis dan Pengolahan Bahan Galian Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Penelitian ini dilakukan untuk mengekstraksi nikel, kobalt dan besi dari bijih nikel laterit jenis limonit yang berasal dari Blok Timur penambangan PT Vale Indonesia Tbk 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 membuatnya lebih mudah untuk dilindi. Pelindian bijih dilakukan menggunakan reagen asam klorida

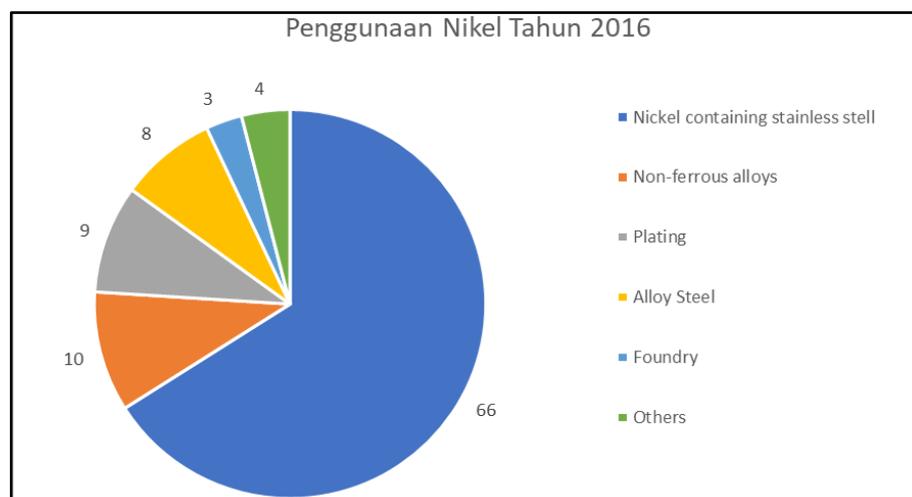
(HCl) dan asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ) dimana kondisi pelindian pada masing-masing reagen sama untuk membandingkan tingkat pelindian logam nikel, kobalt dan besi pada masing-masing reagen. Kondisi pelindian dilakukan pada suhu  $80^\circ\text{C}$ , ukuran sampel eksperimen 100 mesh, konsentrasi asam 4 Molar, waktu pelindian selama 1 jam, rasio padat-cair 1:10 (gram/mL), dan kecepatan pengadukan 400 rpm. Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu mikroskop polarisasi tipe Nikon Eclipse LV100N POL untuk analisis mikroskopis, Shimadzu Maxima X-7000 untuk analisis XRD, ED-XRF untuk analisis XRF dan AAS 6000 *Flame Atomic Absorption Spectrometer* untuk analisis AAS.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Nikel

Nikel merupakan logam berwarna putih keperakan yang memiliki kekerasan 3,8 skala Mohs, memiliki karakteristik *ductile* dan *malleable*, dengan nomor atom 28 dan berat atom 58,6934, serta dapat dipoles. Nikel merupakan logam fasa padat dengan massa jenis sekitar  $8,902 \text{ kg/m}^3$  pada suhu 293 K ( $20^\circ\text{C}$ ), konduktivitas elektrik rendah sebesar 22% dan dapat dimagnetisasi. Titik lebur nikel berada pada suhu  $1.453^\circ\text{C}$  dan setelah melebur akan berubah menjadi fasa cair dengan titik didih sebesar  $2.732^\circ\text{C}$ . Struktur kristal dari mineral nikel adalah *face centred cubic*. Karakteristik nikel yang paling penting adalah ketahanan terhadap oksidasi dan korosi oleh alkali, tahan pada suhu tinggi, dan kemampuan untuk membentuk paduan dengan logam lainnya (Bide *et al.*, 2008)

Nikel banyak digunakan dalam ratusan ribu produk untuk konsumen, industri, militer, transportasi, luar angkasa, laut dan aplikasi arsitektur. Penggunaan nikel dapat dilihat pada Gambar 1. Sifat fisik dan kimianya yang luar biasa membuat nikel sangat penting dalam banyak produk akhir. Sifat fisik dan kimia unik nikel adalah memiliki titik lebur yang tinggi ( $1.453^\circ\text{C}$ ), tahan akan korosi dan oksidasi, *tenacity very ductile*, magnetis di suhu ruangan, dapat disimpan dengan *electroplating*, bisa jadi katalis dalam reaksi kimia, serta dapat didaur ulang (Nickel Institute, 2016).

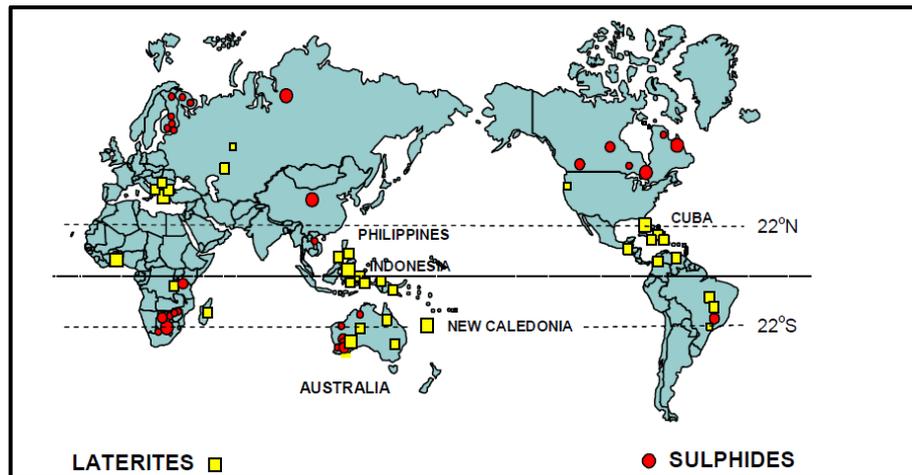


Gambar 1 Penggunaan nikel dunia pada tahun 2016 (Nickel Institute, 2016)

Penggunaan nikel terbesar adalah *stainless steel* (baja tahan karat) yang digunakan untuk berbagai keperluan. Hal ini dikarenakan *stainless steel* mudah dibersihkan dan tahan korosi yang umumnya digunakan dalam peralatan makanan dan peralatan medis. *Stainless steel* juga sering digunakan untuk aplikasi mekanis, seperti lapisan untuk pipa dan katup, transportasi, pengolahan bahan kimia, dan industri konstruksi. Sedangkan untuk keperluan lainnya, sekitar 10-12% nikel digunakan dalam *non-ferrous alloys* (paduan tidak mengandung unsur besi) yang umumnya berbentuk *cupronickel* yang digunakan secara luas dalam koin karena tahan terhadap korosi. Potensi elektroda *cupronickel* dapat disesuaikan sehingga stabil di air laut dan dapat digunakan untuk aplikasi kelautan dan desalinasi. Paduan nikel ini dapat juga digunakan untuk melapisi komponen untuk ketahanan terhadap korosi. Contohnya adalah menutupi bagian dalam unit desulfurisasi gas buang di pembangkit listrik tenaga batubara. *Nickel-titanium memory alloys* adalah contoh penggunaan *non-ferrous alloys*. Area pengembangan lainnya yang menggunakan *non-ferrous alloys* adalah baterai isi ulang (Bide, *et al.*, 2018).

Terdapat banyak jenis endapan nikel, namun endapan yang bernilai ekonomis terbagi menjadi dua lingkungan geologis yaitu sulfida magmatik dan laterit (Gambar 2). Endapan sulfida merupakan sumber utama nikel yang ditambang saat ini. Kadar nikelnya berkisar dari 0,15% sampai sekitar 8%, tetapi 93% dari endapan yang diketahui berada di kisaran 0,2-2% Ni. Bijih Laterit yang mengandung nikel memiliki kadar rata-rata 1-1,6% yang terbentuk akibat proses pelapukan batuan ultramafik di wilayah tropis dan subtropis. Mineral utama yang mengandung nikel di laterit adalah garnierit dan *nickeliferous limonite* (Bide, *et al.*, 2018).

Bergantung pada ukuran, kadar, dan morfologinya, endapan sulfida ditambang dengan metode tambang bawah tanah atau tambang terbuka, atau kombinasi keduanya. Jika badan bijih berada di dekat permukaan, ekstraksi dengan metode tambang terbuka lebih dipilih karena lebih hemat biaya daripada penambangan bawah tanah. Endapan laterit biasanya ditambang dengan metode tambang terbuka. Metode tambang terbuka biasanya melibatkan pemindahan *overburden*, penggalian bijih atau peledakan dengan bahan peledak, lalu pemindahan bijih dengan truk atau *conveyor belt* untuk disimpan sebelum diproses lebih lanjut (Bide, *et al.*, 2018).



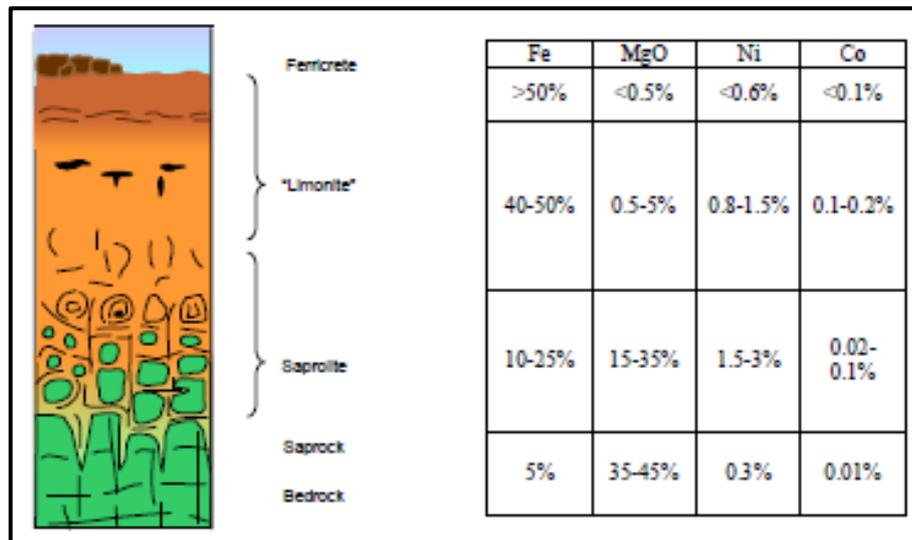
Gambar 2 Persebaran nikel laterit dan nikel sulfida di dunia (Elias, 2002)

## 2.2 Nikel Laterit

Laterit merupakan produk sisa pelapukan kimia dari batuan di permukaan bumi, di mana berbagai mineral asli atau primer tidak stabil dengan adanya air, sehingga mineral tersebut larut atau rusak dan mineral baru yang lebih stabil terhadap lingkungan terbentuk. Contoh terkenal dari endapan bijih laterit yang penting adalah aluminium bauksit dan endapan bijih besi yang diperkaya, tetapi contoh yang kurang dikenal termasuk endapan emas laterit (misalnya Boddington di Australia Barat) (Elias, 2002).

Nikel laterit adalah produk laterisasi batuan kaya Mg dan ultramafik yang memiliki kandungan Ni primer 0,2-0,4%. Batuan seperti ini umumnya dunit, *harzburgite* dan peridotit yang berada di kompleks ofiolit, dan lapisan batuan intrusi mafik-ultramafik dalam pengaturan platform kratonik. Proses lateritisasi menghasilkan konsentrasi dengan faktor 3 sampai 30 kali nikel dan kandungan kobalt batuan induk. Proses dan karakter laterit yang dihasilkan dikendalikan pada skala regional dan lokal oleh interaksi dinamis faktor-faktor seperti iklim, topografi, tektonik, jenis dan struktur batuan primer. Sebagian besar sumber daya nikel laterit terbentuk sekitar 22 derajat garis lintang di kedua sisi khatulistiwa (Gambar 2) dan dalam beberapa kasus kadar tertinggi, terkonsentrasi di zona tumbukan lempeng yang aktif secara tektonik (misalnya Indonesia, Filipina, dan Kaledonia Baru) di mana lembaran ofiolit obduksi yang luas terpapar pelapukan kimia agresif di daerah tropis kondisi curah hujan tinggi dan suhu hangat, dan ada peluang terbesar untuk pengayaan supergen (Elias, 2002).

Berdasarkan zonasinya yang dapat dilihat pada Gambar 3, endapan nikel laterit terbagi menjadi tiga, yaitu (Elias, 2002):



Gambar 3 Zona endapan nikel laterit (Elias, 2002)

1. Zona *Bedrock*

Lapisan ini merupakan lapisan terendah mencerminkan tahap awal pelapukan batuan dasar (*Bedrock*). Lapisan ini mengandung 5% Fe, 34-45% MgO, 0,3% Ni, dan 0,01% Co.

2. Lapisan *Saprolite*

Pada lapisan ini, pelapukan terjadi pada kontak antara mineral dan pada batas rekahan dan terdapat banyak batuan segar dan sedikit produk alterasi. Lebih jauh ke atas profil, proporsi mineral primer yang bertahan berkurang, dan zona rekahan yang lebih kuat sepenuhnya diubah akhirnya meninggalkan batu-batu terpisah dari batuan dasar utuh mengambang dalam campuran mineral primer dan alterasi di mana struktur batuan primer dipertahankan. Lapisan ini mengandung 10-25% Fe, 15-35% MgO, 1,5-3% Ni, dan 0,02-0,1% Co.

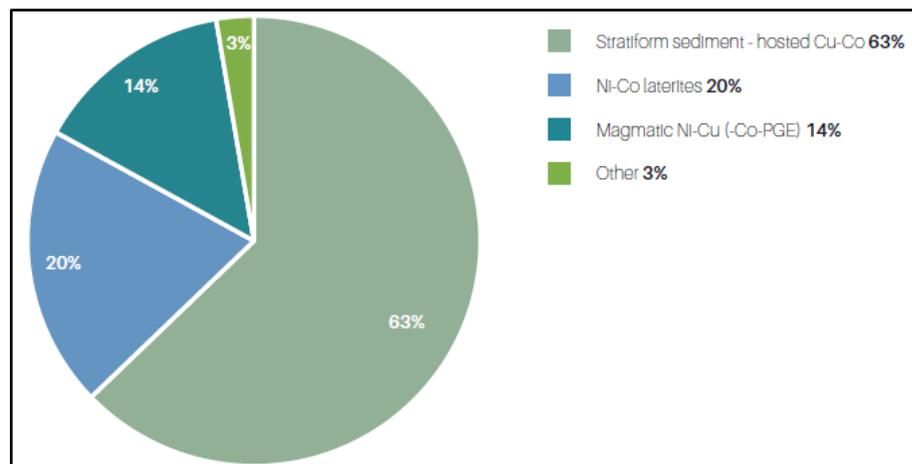
3. Lapisan *Limonite*

Lapisan ini juga disebut pedolit tetapi istilah ini jarang digunakan dalam praktik. Lapisan ini didominasi oleh goetit dan hematit dalam bentuk oksida laterit. Lapisan ini mengandung 40-50% Fe, 0,5-5% MgO, 0,8-1,5% Ni, dan 0,1-0,2% Co.

### 2.3 Kobalt

Kobalt adalah logam rapuh, berwarna perak keabu-abuan dengan kilap *lustrous* dengan nomor atom 27 dan massa jenis  $8.900 \text{ kg/m}^3$  pada suhu  $25^\circ\text{C}$ . Kobalt memiliki kekerasan 5-5,5 skala Mohs, dan dapat memoles tingkat tinggi. Kobalt memiliki ketahanan pada suhu tinggi dan memiliki konduktivitas termal dan listrik yang cukup rendah, titik leleh tinggi ( $1.495^\circ\text{C}$ ) dan banyak valensi. Kobalt adalah feromagnetik dan karena itu mampu menjadi magnet. Sifat berguna penting lainnya adalah kemampuannya untuk membentuk paduan dengan banyak logam lain (misal kromium, molibdenum, nikel) dan untuk mempertahankan sifat magnetiknya pada suhu tinggi (hingga  $1.121^\circ\text{C}$ ) (Petavratzi, *et al.*, 2019).

Konsentrasi kobalt pada kerak bumi berkisar antara 15 hingga 30 *parts per million* (ppm). Batuan beku *Ultramafic* seperti dunit dan serpentinit memiliki konsentrasi kobalt rata-rata antara 109 dan 115 ppm, sedangkan batuan beku mafik seperti basal mengandung sekitar 47 ppm kobalt. Meskipun kobalt murni tidak ditemukan di alam, sekitar 30 mineral pembawa kobalt diketahui, membentuk berbagai fase sulfida dan sulfarsenida misalnya *cobaltite*, *carrollite*, *skutterudite*, *erythrite* (Petavratzi, *et al.*, 2019). Sebagian besar kobalt diperoleh kembali sebagai produk sampingan dari penambangan tembaga atau nikel (Gambar 4).



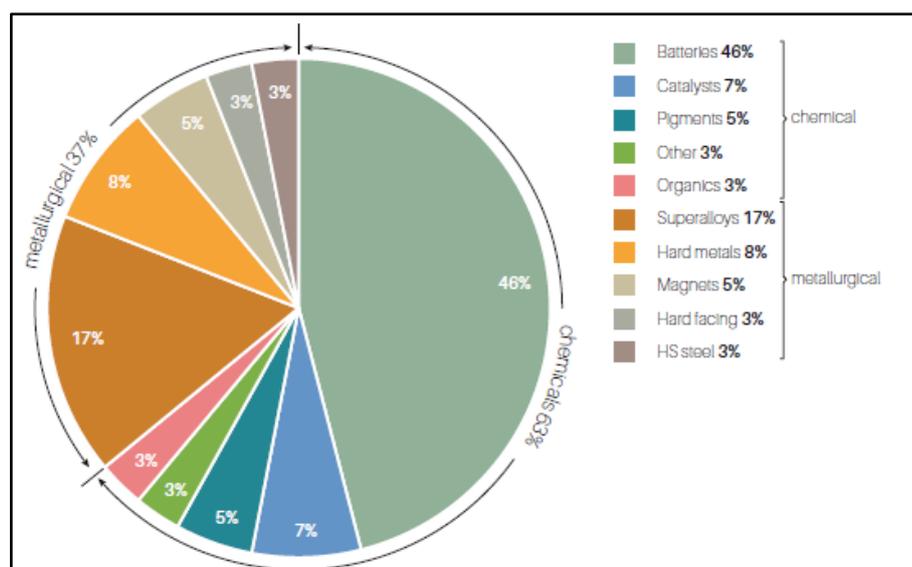
Gambar 4 Perkiraan rincian produksi tambang kobalt berdasarkan tipe endapan tahun 2017 (Sumber: British Geological Survey World Mineral Statistics Database)

Daerah penghasil kobalt utama adalah Republik Demokratik Kongo (*Democratic Republic of Congo/DRC*) dan Zambia, dengan beberapa simpanan besar juga dikenal di Australia, Rusia, Kuba, Kaledonia Baru dan Kanada. Kobalt dapat

ditemukan dalam tiga pokok jenis endapan yaitu endapan tembaga-kobalt yang mengandung sedimen stratiform, endapan laterit nikel-kobalt, dan endapan magmatik nikel-tembaga (*cobalt-platinum-group element/PGE*) (Petavratzi, *et al.*, 2019).

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

Penggunaan kobalt dapat dibagi menjadi dua kelompok utama yaitu aplikasi metalurgi (pangsa pasar 37 per persen pada tahun 2017) dan aplikasi bahan kimia (pangsa pasar 63 persen pada tahun 2017). Penggunaan akhir utama aplikasi untuk kobalt ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Konsumsi kobalt global berdasarkan aplikasi pada tahun 2017 (Petavratzi, *et al.*, 2019)

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

Kobalt juga digunakan dalam magnet, yang digunakan dalam produk seperti turbin angin, *hard disk drive*, sensor motor, aktuator dan pencitraan resonansi magnetik. Magnet bantalan kobalt permanen termasuk aluminium-nikel-kobalt yang digunakan dalam motor dan sensor, magnet samarium-kobalt digunakan dalam instrumentasi, elektronik dan motor, dan magnet neodmium-besi-boron, yang meliputi kobalt sebagai elemen pelapis. Aplikasi kobalt penting lainnya adalah dalam industri logam keras (semen karbida) untuk produksi alat potong dan gerinda yang tahan. *Hardmetal* terdiri dari partikel karbida yang diikat bersama oleh pengikat logam. Kobalt umumnya digunakan sebagai pengikat tungsten karbida dalam berbagai macam komponen dan peralatan yang digunakan oleh sektor otomotif, dirgantara, energi, pertambangan, dan teknik umum gigi (Petavratzi, *et al.*, 2019).

Berbagai macam senyawa kobalt, termasuk logam, oksida, sulfat, hidroksida dan diasetat digunakan dalam katalis dalam proses desulfurisasi selama pembuatan gas alam dan penyulingan produk minyak bumi. 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. Ini digunakan oleh bahan kimia industri untuk memproduksi produk seperti parfum gigi. Logam kobalt dan berbagai senyawa, seperti antimoni kobalt, kobalt boron, kobalt germanium dan lainnya, digunakan dalam berbagai produk elektronik yang mengandung sirkuit terpadu, prosesor, penyimpanan digital, dan semikonduktor. Kobalt juga memiliki jangkauan aplikasi dalam kesehatan, termasuk pengukuran penyerapan vitamin B12

dan diagnosis kekurangan vitamin B12; deteksi tumor dan metastasis; pengobatan radioterapi kanker; dan sterilisasi peralatan medis (Petavratzi, *et al.*, 2019).

## 2.4 Besi

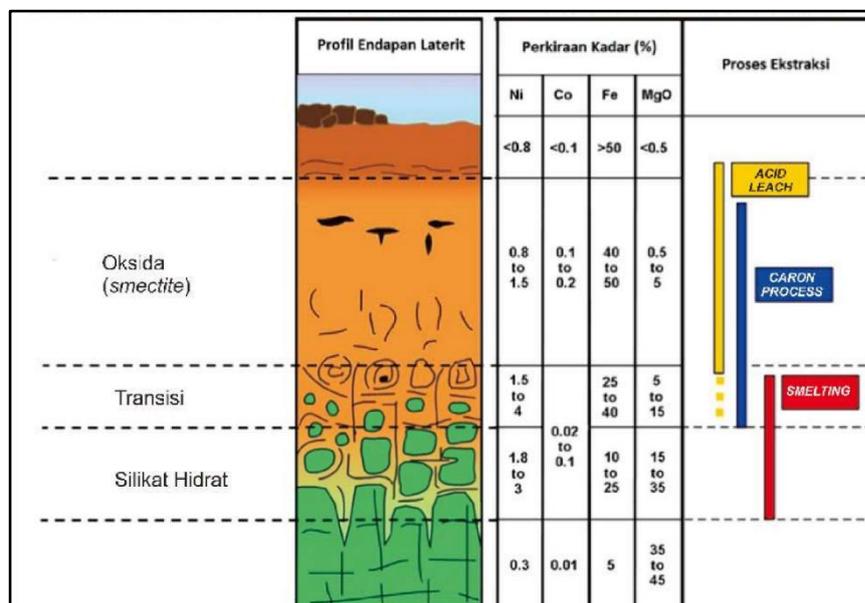
Industri besi dan baja merupakan bagian penting dari pembangunan ekonomi. Bijih besi digunakan untuk keperluan industri baja. Industri baja merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi oleh suatu negara yang ingin maju. Bersama dengan batubara, besi merupakan mineral utama yang diperlukan oleh umat manusia untuk mempertahankan peradaban (Ishlah, 2009).

Besi termasuk unsur utama pembentuk kerak bumi dengan kadar rata-rata di kerak bumi mencapai 5,4%. Penambangan besi saat ini membutuhkan bijih besi yang berkadar 55-65% Fe atau memiliki faktor pengkayaannya (*enrichment factor*) yang mencapai 10-12 kali dari kadar rerata kerak bumi. Secara komersial, bijih besi yang ditambang mempunyai komposisi mineral magnetit (*black ore*;  $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), hematit (*red ore*;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), limonit (*brown ore*;  $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), dan siderit (*clay iron stone*;  $\text{FeCO}_3$ ) (Ishlah, 2009). Di antara bijih tersebut, bijih limonit merupakan bijih besi tahan api yang khas dan tersebar luas di seluruh dunia (Elias, 2002). Di Cina, sumber daya bijih limonit berjumlah hampir 1,23 Bt, dan sebagian besar belum tereksploitasi karena keterbatasan teknologi pengolahan. Limonit adalah mineraloid dan sebagian besar terdiri dari oksida besi dan oksida besi hidrat. Ini biasanya mengandung hematit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), goetit ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), ferihidrit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), sejumlah kecil *lepidocrocite* ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ) dan *feroxyhite* ( $\delta\text{-FeOOH}$ ). Karena komposisi kimia yang tidak stabil dan kadar air yang tinggi sehingga sulit untuk memproses bijih limonit dengan metode tradisional seperti flotasi, *magnetic separation*, pemisahan gravitasi, dan proses kombinasinya (Sun *et al.*, 2020).

## 2.5 Pengolahan Bijih Nikel Laterit

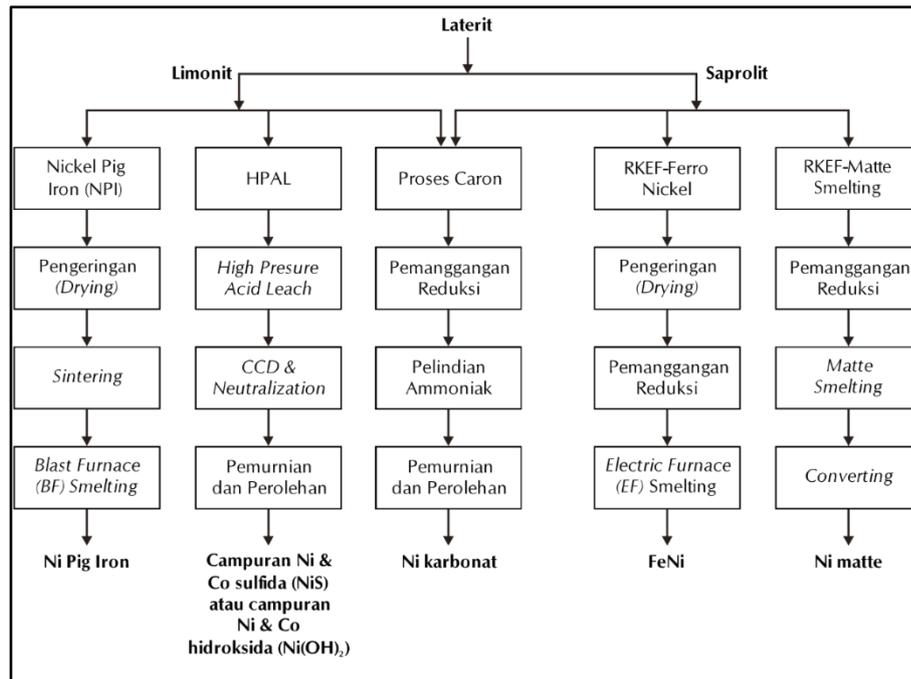
Metode pengolahan bijih nikel laterit yang saat ini digunakan dalam skala komersial untuk mengekstraksi nikel dari bijih laterit terdiri dari tiga opsi, yaitu pirometalurgi, *caron process*, dan hidrometalurgi. Karena perbedaan dalam komposisi kimia dan komposisi mineralogi pada setiap zona laterit maka pengolahan bijih nikel laterit

pada masing-masing profil akan berbeda (Elias, 2002). Secara ideal endapan laterit di alam dari daerah tropis dan proses pengolahannya, dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Lapisan ideal laterit daerah tropis di alam dan pengolahannya (Prasetyo, 2016)

Ada dua jalur proses pengolahan laterit untuk memasok kebutuhan nikel dunia, yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi. Adapun diagram alir proses pengolahan laterit yang sudah komersial dengan jalur pirometalurgi dan hidrometalurgi, dapat dilihat pada Gambar 7. Pirometalurgi digunakan untuk mengolah saprolit berkadar nikel tinggi ( $Ni \geq 1,8\%$  di Indonesia) untuk memproduksi FeNi seperti produksi PT Aneka Tambang di Pomalaa, Sulawesi Tenggara. Atau untuk memproduksi Ni-matte seperti produksi PT Vale Indonesia di Sorowako, Sulawesi Selatan. Secara global sebagian besar proses pirometalurgi digunakan untuk memproduksi FeNi. Selanjutnya FeNi digunakan untuk membuat baja tahan karat atau *stainless steel* (SS). Hidrometalurgi digunakan untuk mengolah laterit kadar rendah yang terdiri dari limonit dan saprolit kadar rendah dengan kandungan  $Ni < 1,8\%$  (di Indonesia). Pada umumnya proses Caron digunakan untuk mengolah serpentin (saprolit kadar rendah) guna memproduksi NiO (*nickel oxide*). Sedangkan proses HPAL/PAL (*High Pressure Acid Leaching/Pressure Acid Leaching*) untuk mengolah limonit guna memproduksi NiS (*nickel sulfide*) (Prasetyo, 2016).



Gambar 7 Diagram alir proses pengolahan laterit (Prasetyo, 2016)

### 2.5.1 Proses Caron

Proses Caron dapat digunakan untuk bijih limonit atau campuran limonit dan saprolit. Bijih dikeringkan dan nikel direduksi secara selektif (bersama dengan kobalt dan sebagian besi) menjadi logam nikel pada suhu  $700^{\circ}\text{C}$ . Logam diekstraksi dengan pelindian dalam larutan amoniak. Perolehan nikel dan kobalt menurun dengan meningkatnya jumlah saprolit karena nikel dan kobalt terkunci dalam silikat matriks dan sulit untuk dikurangi pada suhu ini. Namun, proses tersebut dapat mentolerir jumlah Mg yang lebih tinggi daripada proses PAL. Proses Caron memiliki beberapa kelemahan diantaranya *Front-end* dari proses Caron adalah pirometalurgi yang melibatkan pengeringan, kalsinasi dan reduksi. Langkah-langkah ini memerlukan energi yang intensif. Sedangkan *back-end* adalah hidrometalurgi yang membutuhkan berbagai reagen. Perolehan nikel dan kobalt lebih rendah dibandingkan dengan proses peleburan atau proses HPAL. Secara teknologi proses Caron sudah mapan (*proven*) namun proses ini mulai ditinggalkan sebagai akibat kenaikan harga minyak dunia yang dramatis setelah 1973. Sehingga bagi perusahaan perusahaan yang tidak mampu menyasati harga BBM (Bahan Bakar Minyak) yang mahal agar tetap beroperasi, terpaksa tutup. Akibat harga

BBM yang mahal maka dilakukan litbang (penelitian dan pengembangan) proses pengolahan laterit dengan proses HPAL/PAL (Prasetyo, 2016).

### 2.5.2 Proses pirometalurgi

Pirometalurgi menggunakan suhu tinggi untuk melakukan peleburan dan pemurnian untuk mengekstrak logam dari mineral. Metode pirometalurgi umumnya digunakan untuk memproses bijih kadar tinggi. Ekstraksi pirometalurgi melibatkan beberapa proses seperti pemanggangan, reduksi karbotermik, reduksi bijih sulfida, dan reduksi metalotermik (Anderson, 2016). Proses pirometalurgi bijih laterit secara komersial saat ini secara garis besar terdiri atas (Setiawan, 2017):

1. *Rotary kiln electric furnace* (RKEF)

Proses RKEF banyak digunakan untuk menghasilkan feronikel dan *nikel-matte*. Proses ini diawali dengan pengeringan kandungan *moisture* hingga 45% melalui proses *pretreatment*. Pada proses tersebut, bijih laterit dikeringkan dengan *rotary dryer* pada temperatur 250°C hingga kandungan *moisture*-nya mencapai 15-20%. Produk dari *rotary dryer* selanjutnya masuk ke tahap kalsinasi (prereduksi) menggunakan *rotary kiln* pada suhu 800-900°C. Adapun reaksi yang berlangsung di *rotary kiln*, yaitu evaporasi dari air, disosiasi dari mineral-mineral pada temperatur 700°C menjadi oksida-oksida dan uap air, reduksi dari nikel oksida dan besi oksida gas reduktor pada temperatur sekitar 800°C. Hasil proses kalsinasi kemudian dilebur di dalam *electric furnace* pada temperatur 1500-1600°C menghasilkan feronikel. Pada *electric furnace* terjadi pemisahan feronikel dari terak silika-magnesia, terjadi Reduksi nikel oksida dan besi oksida kalsin menjadi nikel logam, dan pelelehan dan pelarutan nikel dalam feronikel. Proses ini yang paling umum digunakan dalam industri pirometalurgi nikel saat ini karena tahapan proses dianggap lebih sederhana dan dapat diaplikasikan terhadap bijih dari berbagai lokasi. Walaupun pada kenyataannya konsumsi energi sangat tinggi dan hanya lebih rendah dari proses Caron.

2. *Nippon Yakin Oheyama Process*

*Nippon Yakin Oheyama Process* merupakan proses reduksi langsung *garnierite ore* yang menghasilkan feronikel dalam suatu *rotary kiln*. *Silicate*

*ore* (2,3-2,6% Ni, 12-15% Fe) bersama antrasit, *coke breeze*, dan batu kapur dicampur dan dibuat menjadi briket. Briket tersebut kemudian diumpankan ke dalam *rotary kiln* yang menggunakan pembakaran batu-bara dengan gradien temperatur 700- 1300°C. Dalam *rotary kiln* tersebut, briket akan mengalami proses pengeringan, dehidratasi, reduksi, dan dilebur membentuk feronikel yang disebut luppen. Hasil proses tersebut kemudian didinginkan cepat dalam air (*quenching*), dan luppen yang berukuran 2-3 mm dengan *grade* 22% Ni dan 0.45% Co dipisahkan dari teraknya melalui proses *grinding*, *screening*, *jigging*, dan *magnetic separation*. *Recovery* awal melalui proses ini hanya berkisar 80% diakibatkan tingginya kandungan pengotor dalam bijih yang sulit dipisahkan dengan *rotary kiln*. Proses ini mempunyai energi yang relatif rendah dibandingkan dengan pembuatan feronikel menggunakan ELKEM proses karena tidak dibutuhkan energi yang tinggi pada proses pemisahan feronikel dari pengotornya. Beberapa hal yang kritis dari proses ini yaitu masalah kontrol *moisture* briket yang sangat ketat karena menentukan reduksibilitas dan penggunaan antrasit yang relatif mahal dan kemungkinan ketersediannya semakin menurun.

### 3. *Nickel Pig Iron* (NPI)

*Nickel Pig Iron* diproduksi di China mulai tahun 2006 untuk menjawab tingginya harga dan permintaan nikel. *Nickel Pig Iron* (NPI) merupakan *ferronickel* yang memiliki kadar nikel yang rendah (1,5-8%). Pembuatan NPI dilakukan dengan *mini blast furnace* dan *electric arc furnace* (EF). Proses produksi NPI pada *mini blast furnace* menggunakan kokas sebagai reduktor dan sumber energi. Karbon akan mereduksi besi sehingga kandungan FeO di dalam terak akan sangat kecil. Pada proses ini juga ditambahkan bahan imbuhan berupa *limestone* untuk mengatasi temperatur leleh terak tinggi akibat rendahnya kandungan FeO dan tingginya kadar silika dan magnesia di dalam terak. NPI ini disebut sebagai *dirty nickel* karena akan menghasilkan *slag* yang banyak, konsumsi energi yang tinggi, polusi lingkungan dan menghasilkan produk dengan kualitas rendah. Tetapi bagaimanapun produksi NPI akan tetap menjadi sesuatu yang ekonomis selama harga nikel relatif tinggi. Proses produksi NPI yang lain yaitu menggunakan *electric furnace*.

Dengan peningkatan kualitas EF maka proses ini diyakini mempunyai efisiensi energi yang lebih tinggi dari proses *blast furnace*. Sehingga pada prakteknya dalam 10 tahun terakhir pembuatan NPI meningkat signifikan terutama di China dan Indonesia. Kelebihan utama dalam proses ini yaitu dapat mengolah bijih kadar rendah yang sulit dilakukan dengan proses pirometalurgi lain.

Dari proses-proses tersebut diatas dapat dibuat suatu ringkasan tahapan proses utama ekstraksi nikel secara pirometalurgi yaitu sebagai berikut:

1. Pengeringan (*drying*) yaitu eliminasi sebagian besar air bebas yang terdapat dalam bijih.
2. Kalsinasi-reduksi yaitu eliminasi air bebas yang tersisa dan eliminasi air kristal, pemanasan awal bijih dan reduksi sebagian besar unsur nikel dan pengontrolan terhadap reduksi besi.
3. *Electric furnace smelting* yaitu reduksi nikel yang tersisa dan pemisahan feronikel dari hasil sampingnya yaitu *slag* besi magnesium silikat.
4. *Refining* yaitu eliminasi unsur minor yang tidak dikehendaki dari produk *feronickel* untuk dapat memenuhi kebutuhan pasar.

### 2.5.3 Proses hidrometalurgi

Hidrometalurgi menggunakan larutan berair untuk memisahkan logam yang diinginkan (Anderson, 2016). Hidrometalurgi digunakan untuk mengolah laterit kadar rendah yang terdiri dari limonit dan saprolit kadar rendah dengan kandungan Ni < 1,8 % (Prasetyo, 2016). Sedangkan untuk proses Hidrometalurgi bijih laterit terbagi terdiri atas (Dalvi et al., 2004):

1. Proses *High Pressure Acid Leaching* (HPAL)

Proses HPAL membutuhkan bijih yang sebagian besar limonit; dalam kasus laterit kering yang mengandung nontronit dan/atau smektit. Secara umum bijih:

- a. Mengandung beberapa *saprolite*
- b. Memiliki mg lebih rendah biasanya terbatas pada < 4 % (konsumsi asam Mg lebih tinggi)

c. Membutuhkan kandungan Al yang lebih rendah (*clay* adalah konsumen asam tinggi; oleh karena itu kandungan Al seharusnya tidak terlalu tinggi) Pelindian bertekanan dilakukan baik dalam tangki pachuka (Teluk Moa) atau otoklaf berlapis titanium (semua pabrik modern). Suhu pelindian bervariasi dalam kisaran 245 hingga 270°C. Pemisahan padat-cair adalah dilakukan oleh *Counter-Current Decantation* (CCD). Ada berbagai cara memurnikan larutan yang mengandung nikel dan memisahkan nikel dan kobalt. Di pabrik modern, pemisahan seperti itu dilakukan dengan ekstraksi pelarut (SX). Produk akhir yang dihasilkan adalah elektro-nikel, nikel oksida atau nikel briket. Beberapa tanaman menghasilkan bahan perantara (campuran sulfida atau campuran hidroksida) disempurnakan di tempat lain.

## 2. *Atmospheric Leaching* (AL)

*Atmospheric pressure acid leaching* (pelindian asam pada tekanan atmosfer) adalah salah satu dari tiga hidrometalurgi yang umum proses yang digunakan untuk mengekstraksi nikel dan kobalt dari bijih nikel laterit pada skala industri. *High pressure acid leaching* (HPAL) dan *heap leaching* (HL) menawarkan beberapa keuntungan dalam hal proses pelindian, tetapi juga memiliki beberapa kelemahan, seperti biaya modal yang besar untuk pembangunan peralatan pelindian, diperlukan asam sulfat bebas yang lebih, pemeliharaan permeabilitas *bed* di bawah kondisi pelindian asam, kontrol konsumsi asam, persediaan dan manajemen waktu siklus, dan pengelolaan air (Kursunoglu and Kaya, 2016). *Atmospheric Leaching* adalah cara yang lebih sederhana, lebih murah, dan lebih andal untuk pelindian *matte* dibandingkan dengan *pressure leaching* (Gupta, 2003). Proses AL yang dapat mengolah bijih limonit dan bijih saprolit, sering dibahas dalam hal investasi modal yang lebih rendah dan persyaratan proses yang lebih sederhana jika dibandingkan dengan proses HPAL. Terlepas dari kekurangan konsumsi asam yang tinggi dan periode pelindian yang berkepanjangan, AL, jika diterapkan dengan benar, dapat menjadi metode yang paling hemat biaya ekstraksi nikel dari laterit. Namun, efisiensi pelindian nikel dengan proses AL relatif rendah. Beberapa penelitian dan beberapa paten telah menjelaskan peningkatan ekstraksi nikel yang signifikan oleh AL, hanya setelah memanaskan bijih

limonit pada berbagai temperatur. Namun dan pemanasan bijih saprolit diikuti dengan ekstraksi nikel dalam kondisi AL jarang diteliti (Dong, *et al.*, 2023).

### 3. Proses Hidrometalurgi Lainnya

Ada beberapa proses baru yang saat ini sedang diujicobakan dan dievaluasi. Ini termasuk Proses EPAL (*enhanced pressure acid leaching*) yaitu pelindian tambahan untuk saprolit menggunakan sisa asam dari HPAL (penambahan asam). Saprolit dilindih pada tekanan atmosfer konsumen dengan asam tinggi (diyakini hingga 1 t asam/t bijih). Proses ini dapat mengkonsumsi lebih banyak saprolit dibandingkan konvensional proses HPAL. Saat ini sedang diujicobakan oleh BHP-B untuk Ravensthorpe. Proses berikut berada di berbagai tahap uji coba tetapi tidak ada yang dikomersialkan.

- a. *Acid Heap Leaching* (untuk bijih saprolitik)
- b. *Chloride Leaching* (untuk bijih campuran limonit dan saprolitik)

## 2.6 Roasting Pretreatment

*Roasting pretreatment* (pemasanan bijih sebelum proses pelindian) mengacu pada proses reaksi kimia yang dilakukan pada suhu yang lebih rendah dari titik leleh. Perubahan yang terjadi pada mineral sebagai akibat pemanasan bijih sangat luas dan bervariasi. Bijih yang tidak dipanaskan tidak dapat dilarutkan oleh reagen. Pemanasan bijih akan mengubah komposisi bijih, sehingga bijih lebih mudah larut pada saat pelindian (Gupta, 2003). Pemanasan bijih ini berbeda dengan kalsinasi. Kalsinasi merupakan proses pemanasan suatu bahan atau material dengan menggunakan temperatur tinggi dengan adanya udara atau oksigen terbatas (Prasetyo dkk., 2016). Sedangkan pemanggangan bijih (*roasting*) dilakukan dengan udara atau oksigen berlebih.

Lapisan bijih limonit terdiri dari goetit ((Fe,Ni)OOH) dengan beberapa hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dan beberapa magnesium silikat. Sebagian besar nikel dari bijih limonit berada dalam mineral goetit. Pemanggangan bijih limonit menyebabkan transformasi fasa goetit menjadi hematit yang terjadi melalui modifikasi dalam struktur goetit (Dong, *et al.*, 2023). Transformasi ini dimulai pada suhu pemanggangan  $250^\circ\text{C}$  dengan durasi pemanggangan 2 jam. Transformasi goetit ini terus berlanjut seiring peningkatan suhu pemanggangan. Puncak goetit menghilang

total ketika sampel dipanaskan pada suhu 430°C. Transformasi selesai pada suhu pemanggangan 800°C (Garces-Granda *et al.*, 2020). Transformasi struktur kristal yang disebabkan oleh pemanasan bijih adalah faktor penentu yang mempengaruhi ekstraksi logam. Suhu pemanggangan bijih dapat memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perolehan logam nikel. Pemanggangan bijih 600°C selama 1 jam memberikan perolehan nikel yang optimal karena pemanasan bijih pada suhu tersebut mengubah struktur kristal utama goetit yang memungkinkan interaksi yang cepat antara larutan dan nikel yang terperangkap selama pelindian. Pemanggangan bijih tidak hanya mengubah komposisi mineraloginya tetapi juga meningkatkan porositas dan luas permukaannya, sehingga membuatnya lebih mudah untuk pelindian. Dengan demikian, pemanggangan bijih yang dilakukan dapat mengefisienkan proses *leaching* dalam upaya untuk mempercepat proses *leaching* dan meminimalkan penggunaan jumlah asam. Namun, Pemanasan bijih pada suhu lebih tinggi (lebih dari 600°C) akan menurunkan perolehan nikel (Dong, *et al.*, 2023). Hasil yang sama didapatkan oleh penelitian yang dilakukan Dahani, *et al.* (2020) yang menyatakan bahwa telah terjadi proses transformasi fasa goetit pada pemanggangan bijih di 600°C selama 1 jam. Hasil pelindian bijih mengandung Ni lebih tinggi pada suhu pemanasan 600°C dimana memberikan perolehan nikel maksimum sebesar 93,48%. Hasil penelitian Li *et al.*, (2009) menunjukkan hasil yang berbeda, disolusi nikel maksimum terjadi pada suhu pemanggangan 300°C dengan lama pemanggangan bijih yaitu 2 jam. Setelah pelindian bijih dilakukan selama 1 jam, hasil perolehan nikel pada *pregnant solution* menunjukkan nilai 93,1%.

## **2.7 Pelindian Menggunakan Asam Klorida (HCl) dan Asam Nitrat (HNO<sub>3</sub>)**

Pelindian adalah proses ekstraksi mineral atau zat terlarut dari padatan dengan melarutkan mereka dalam cairan atau pelarut, baik di alam atau melalui proses industri. Pembubaran, desorpsi atau kompleksasi merupakan faktor untuk memisahkan zat terlarut. Pelindian adalah operasi yang sangat penting dalam industri pertambangan. Ekstraksi logam dari bijih dilakukan dengan menggunakan berbagai pelarut. Waktu kontak, konsentrasi, suhu dan ukuran partikel merupakan

parameter penting dalam pelindian. Pelindian digunakan dalam industri biologi dan makanan untuk pemisahan berbagai produk. Litium dan kobalt dari baterai bekas bisa diperoleh dengan menggunakan asam organik. Hal itu bisa menyimpulkan bahwa pelindian sangat efisien dan sederhana untuk memperoleh komponen berharga dari limbah padat. Oleh karena itu, sangat penting untuk menggunakan pelarut yang tepat dan mempertahankan kondisi operasi optimal untuk perolehan yang efisien dan hemat biaya (Kulkarni, 2015).

Beberapa metode pelindian menggunakan asam telah dilakukan seringkali dengan menggunakan asam sulfat. Keberadaan  $SO_2$  sebagai reduktan secara efektif dapat meningkatkan persentase pelindian nikel laterit hingga 97%. Teknologi alternatif yang memanfaatkan agen pelindian lain seperti asam klorida dan berbagai asam organik saat ini sedang diteliti dan dikembangkan (McDonald & Whittington, 2008).

### **2.7.1 Pelindian menggunakan asam klorida (HCl)**

Pelindian menggunakan asam klorida banyak menarik perhatian karena memungkinkan ekstraksi nikel dalam jumlah besar dalam waktu yang singkat. Proses pelindian berbasis klorida memiliki beberapa keuntungan dibandingkan proses hidrometalurgi konvensional yaitu hasil pelindian lebih tinggi, stabilitas tinggi dari kompleks kloro, dan regenerasi pereaksi pelindian (Lakshmanan *et al.*, 2016). Studi fundamental telah menunjukkan bahwa asam klorida lebih efektif daripada asam sulfat untuk ekstraksi bijih nikel laterit pada kondisi di bawah atmosfer. Proses yang menggunakan pelindian asam klorida menawarkan beberapa keuntungan potensial yang meliputi biaya modal lebih rendah, kebutuhan reagen berkurang, pengendapan besi sebagai hematit, meningkatkan residu karakteristik pengendapan dan filtrasi, dan perolehan magnesium sebagai kieserit (McDonald & Whittington, 2008).

Pelindian bijih nikel laterit menggunakan metode *atmospheric leaching* dalam media asam klorida telah diteliti oleh Li *et al.*, (2019) dalam penelitian mereka tentang kinetik pelindian bijih nikel laterit dalam larutan asam klorida, telah memperoleh ekstraksi nikel maksimum hingga 92,3% selama pelindian kondisi konsentrasi asam klorida delapan molar, suhu  $80^{\circ}C$ , dan 2 jam waktu pelindian.

### 2.7.2 Pelindian menggunakan asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ )

Menurut penelitian Liu *et al.*, (2010), ekstraksi nikel dan kobalt sangat rendah melalui proses HPAL pada suhu di bawah  $200^\circ\text{C}$  untuk mengolah laterit Yuanjiang. Sebaliknya, konsentrasi besi(II) dalam cairan pelindian cukup tinggi. Kondisi ini mempunyai kelemahan seperti, konsumsi asam dalam jumlah besar dan hilangnya Ni dan Co karena proses penghilangan besi. Besi(II) dapat dioksidasi dan diendapkan dalam bentuk  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dengan menginjeksi oksigen. Namun menginjeksi oksigen selama proses pelindian meningkatkan risiko operasional autoklaf. Meskipun  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  (udara) dapat digunakan untuk mengoksidasi besi(II) dalam larutan pelindian, hanya sedikit informasi yang tersedia untuk penerapan praktis karena banyaknya proses dan kondisi pengendalian yang sangat ketat

Asam nitrat adalah cairan asam dan oksidan yang relatif kuat yang cukup dapat melarutkan logam berharga yang mengandung mineral besi dan sepenuhnya dapat mengoksidasi besi divalen sebagai hematit. Selanjutnya, asam nitrat dapat dengan mudah didaur ulang melalui eksternal oksidasi nitro oksida. Dengan demikian, teknologi NAPL (*Nitric Acid Pressure Leaching*) menguntungkan dan kompetitif karena kelebihanannya, seperti tingkat ekstraksi yang dapat diterima nikel, kobalt, dan besi; tekanan pelindian residu besi tanpa belerang untuk pembuatan besi; asam nitrat dapat didaur ulang; dan produksi tinggi produk samping kalsium sulfat berserat kelas, yang digunakan dalam pembuatan kertas (Ma, *et al.*, 2013).

NAPL dikembangkan dan dipatenkan pada tahun 2008. Tes berskala pilot dilakukan secara sistematis di Perusahaan Industri Nikel Yongtong Ltd. Dengan penggunaan NAPL untuk mengolah bijih laterit limonit, ekstraksi nikel dan kobalt masing-masing mencapai 84,50% dan 83,92%, dan ekstraksi besi sekitar 1%. Dalam memproses bijih laterit yang mengandung magnesium tinggi, semua ekstraksi nikel dan kobalt melebihi 98% sedangkan ekstraksi besi kurang dari 1,5%. Kita dapat dengan demikian disimpulkan bahwa NAPL dapat digunakan untuk mengolah semua jenis bijih laterit. Teknologi NAPL (*Nitric Acid Pressure Leaching*) berhubungan dengan mekanisme disolusi-oksidasi-presipitasi. Mineral yang mengandung besi bisa dilarutkan, dan ion besi divalen dapat dioksidasi menjadi besi trivalen ion. Secara bersamaan, endapan besi trivalen dalam bentuk hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) di lingkungan asam rendah. Selanjutnya, kandungan belerang di

residu besi pelindian hampir nol, yang mendukung pembuatan besi. Beberapa produk sampingan berharga lainnya dapat diproduksi, termasuk kalsium sulfat berserat bermutu tinggi ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) untuk pembuatan kertas, residu aluminium ( $\text{Al} > 24\%$ ), dan residu magnesium ( $\text{Mg} > 23\%$ ). Residu ini dapat diproses lebih lanjut untuk perolehan aluminium dan magnesium. Lebih dari 85% asam nitrat dapat diregenerasi dan didaur ulang, sehingga mengurangi biaya bahan baku (Ma, *et al.*, 2015).

### 2.7.3 Faktor yang memengaruhi kinerja *atmospheric leaching*

Berbagai strategi dapat dilakukan untuk meningkatkan perolehan nikel oleh AL atau selektivitasnya terhadap besi untuk mengurangi konsumsi asam. Hal ini termasuk meningkatkan suhu atau waktu pelindian, mengendalikan potensi redoks, menambahkan katalis atau perlakuan awal untuk mengubah fasa mineral (McDonald & Whittington, 2008a).

1. Peningkatan suhu atau waktu pelindian

Suhu yang lebih tinggi meningkatkan ekstraksi nikel untuk AL berbasis asam sulfat. Semakin lama proses pelindian dilakukan akan meningkatkan laju ekstraksi mineral. Hal ini karena proses kontak asam dan padatan akan terus terjadi.

2. Ukuran Partikel

Ukuran partikel bijih akan memengaruhi reaksi antarmuka partikel dan pelarut. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Coban, *et al.*, 2021 penurunan ukuran partikel menghasilkan efisiensi pelindian yang lebih tinggi. Hasil penelitian Kursunoglu & Kaya (2016) menyatakan bahwa tidak ada keuntungan yang diperoleh dari pelindian nikel pada ukuran partikel lebih halus dari 0,150 mm (100 mesh).

3. Jenis asam dan konsentrasi asam

Dalam proses pelindian, larutan yang digunakan biasanya adalah asam sulfat, asam nitrat dan asam klorida. Persen ekstraksi nikel terlarut meningkat seiring meningkatnya konsentrasi pelarut karena semakin tinggi konsentrasi  $\text{H}^+$  semakin mudah ia melarutkan dan mengikat Nikel Oksida yang terdapat pada bijih (Nurfaidah *et al.*, 2020).

#### 4. Densitas *pulp*

Densitas *pulp* merupakan perbandingan antara massa partikel dan volume asam pelarut yang digunakan. Coban *et al.*, (2021) berdasarkan penelitian yang menemukan bahwa efisiensi pelindian menurun saat densitas *pulp* melebihi 10% untuk konsentrasi asam 150 g/l. Selama nikel sebagai target utama, densitas *pulp* optimum ditentukan sebesar 10%.

#### 5. Penambahan garam

Penambahan berbagai garam telah dicatat oleh beberapa kelompok untuk meningkatkan AL laterit nikel. Untuk Misalnya, Weston (1974a) mencatat bahwa penambahan natrium klorida ke cairan pelindian pada tingkat hingga 45 kg per ton bijih (sesuai dengan 24 g/L NaCl) meningkatkan perolehan nikel. Sejalan dengan itu, Hirasawa dan Horita (1987) melaporkan bahwa garam fluorida meningkatkan pelindian bijih garnierit daripada garam klorida di Kaledonia Baru meskipun hal ini mungkin disebabkan oleh pembentukan fluorosilikat.

#### 6. Pemasanan bijih sebelum proses pelindian (*roasting pre-treatment*)

Pemasanan bijih sebelum proses pelindian (*roasting pre-treatment*) dilakukan untuk mengubah fasa mineral. Pada nikel laterit jenis limonit, *roasting pre-treatment* dilakukan untuk mengubah *goethite* menjadi hematit dalam dan telah terbukti menaikkan perolehan nikel dan kobalt. Namun, pemanasan bijih laterit sebelum pelindian asam umumnya tidak digunakan dalam skala industri karena tingginya biaya pengeringan bijih.

#### 7. Peningkatan selektivitas pelindian dengan sulfasi bijih laterit

Beberapa penelitian yang telah dilakukan melaporkan bahwa bijih laterit limonit yang dicampur dengan asam sulfat pekat dan sedikit air dimana campuran akan dipanggang pada suhu antara 500°C dan 725°C untuk mengubah besi sulfat menjadi hematit dan sulfat besi dasar yang tidak larut. Namun, ini membutuhkan energi yang cukup besar untuk menghilangkan air dan mengakibatkan pelindian relatif tinggi mengonsumsi asam. Oleh karena itu, Skye Resources mengembangkan *Sulphation Atmospheric Leach*. Proses ini diakui kuat dan menghasilkan ekstraksi pelindian 87% nikel dan 88% kobalt untuk penambahan asam sulfat sebanyak 600 kg/t bijih kering.