

SKRIPSI

STUDI KARAKTERISTIK KIMIA ENDAPAN NIKEL LATERIT PADA BLOK MAWAR PT NATURAL PERSADA MANDIRI, KABUPATEN KONawe UTARA, PROVINSI SULAWESI TENGGARA

Disusun dan diajukan oleh

FITRI FEBRIANA

D111181009



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**STUDI KARAKTERISTIK KIMIA ENDAPAN NIKEL LATERIT PADA
BLOK MAWAR, PT NATURAL PERSADA MANDIRI, KABUPATEN
KONAWA UTARA, PROVINSI SULAWESI TENGGARA**

Disusun dan diajukan oleh

FITRI FEBRIANA

D111181009

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 16 Desember 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Irzal Nur, MT.

NIP.196604091997031002

Pembimbing Pendamping,



Dr. Phil. Nat. Sri Widodo, ST., MT.

NIP.197101012010121001

Wakil Dekan

Bidang Akademik dan Kemahasiswaan,



Dr. Anil Ahmad Ilham, S.T., M.IT.

NIP.197310101998021001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fitri Febriana
NIM : D111181009
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Studi Karakteristik Kimia Endapan Nikel Laterit Pada Blok Mawar PT Natural

Persada Mandiri, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara

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.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 16 Desember 2022

Yang menyatakan



Fitri Febriana

ABSTRAK

Penelitian mengenai karakteristik kimia endapan nikel laterit dilakukan di Blok Mawar PT Natural Persada Mandiri (PT NPM), Desa Waturambaha, Kecamatan Lasolo Kepulauan, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis sebaran unsur dan senyawa lateral dan vertikal dari lokasi penelitian, korelasi unsur dan senyawa pada setiap zona endapan nikel laterit, dan memprediksi jenis pengolahan bijih yang dapat diterapkan. Data yang digunakan terdiri dari 46 titik bor hasil kegiatan pengeboran eksplorasi. Hasil penelitian untuk sebaran lateral zona limonit didapatkan (Fe, Al₂O₃, dan Co), serta (SiO₂, CaO, dan MgO) memiliki area penyebaran dan *range* kadar yang hampir sama, sedangkan Ni memiliki area penyebaran kadar yang berbeda. Sebaran lateral Zona saprolite menunjukkan hampir tidak ada kemiripan area penyebaran, kecuali Fe dan Co. Sebaran vertikal menunjukkan Ni mengalami peningkatan kadar pada akhir limonit-awal saprolit dan mengalami penurunan kadar saat memasuki *bedrock*. Fe dan Al₂O₃ mengalami penurunan kadar yang drastis saat memasuki saprolit berkebalikan dengan SiO₂ dan MgO. CaO memperlihatkan peningkatan kadar dari limonit-pertengahan saprolit. Co memiliki kadar tertinggi di zona limonit, mengalami penurunan kadar dari zona limonit-*bedrock*. Korelasi antar unsur senyawa endapan nikel laterit pada setiap zona menunjukkan tren korelasi positif akan terbentuk jika berkorelasi dengan yang memiliki mobilitas yang sama dan tren negatif jika memiliki mobilitas berbeda. Jenis pengolahan yang dapat diterapkan pada bijih limonit yakni hidrometalurgi menurut kadar Ni, Fe, Co, MgO, SiO₂, tetapi perlu dilakukan *treatment* untuk kadar Al₂O₃. Sedangkan bijih saprolit memenuhi kriteria kadar Ni, Fe, Al₂O₃, MgO, SiO₂, rasio S/M, rasio Fe/Ni, dan rasio Ni/Co dalam metode pirometalurgi.

Kata kunci: Endapan nikel laterit, sebaran lateral, profil vertikal, analisis korelasi, Pengolahan nikel laterit

ABSTRACT

Research on the chemical characteristics of nickel laterite deposits was carried out in the Mawar Block of PT Natural Persada Mandiri (PT NPM), Waturambaha Village, Lasolo Kepulauan District, North Konawe Regency, Southeast Sulawesi Province. The purpose of this study was to analyze the lateral and vertical distribution of elements and compounds from the study site, the correlations of elements and compounds in each laterite nickel deposit zone, and predict the type of ore processing that can be applied. The data used consists of 46 drill points resulting from exploratory drilling activities. The results for the lateral distribution of the limonite zone found that (Fe, Al₂O₃, and Co), and (SiO₂, CaO, and MgO) had almost the same distribution area and grade range, while Ni had a different distribution area. Lateral distribution the saprolite zone shows almost no similarity in the distribution area, except for Fe and Co. The vertical distribution shows that Ni has increased levels at the end of limonite-early saprolite and has decreased levels as it enters the bedrock. Fe and Al₂O₃ experience a drastic decrease in levels upon entering the saprolite in contrast to SiO₂ and MgO. Cao shows increased levels of limonite-mid-saprolite. Co has the highest levels in the limonite zone, with decreased levels from the limonite-bedrock zone. Correlation between elements of nickel laterite deposit compounds in each zone shows a positive correlation trend will be formed if the correlation is with those with the same mobility and a negative trend if they have different mobility. The type of processing that can be applied to limonite ore is hydrometallurgical according to the levels of Ni, Fe, Co, MgO, and SiO₂, but it is necessary to carry out treatment for the levels of Al₂O₃. At the same time, saprolite ore meets the criteria for levels of Ni, Fe, Al₂O₃, MgO, SiO₂, S/M ratio, Fe/Ni ratio, and Ni/Co ratio in the pyrometallurgical method.

Keywords: Nickel laterite deposit, lateral distribution, vertical profile, correlation analysis, laterite nickel processing

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wrb.

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga Penulis dapat menyelesaikan Penelitian Tugas Akhir dengan judul Studi Karakteristik Kimia Endapan Nikel Laterit pada Blok Mawar, PT Natural Persada Mandiri (PT NPM), Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara.

Selama proses penyusunan laporan banyak hal yang telah dilakukan dan dibantu oleh berbagai pihak sehingga laporan ini dapat disusun dengan sebaik mungkin. Oleh karena itu, Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT NPM selaku perusahaan yang telah menerima Penulis untuk melaksanakan kegiatan penelitian dan membantu sehingga penelitian yang dilakukan berjalan dengan lancar. Bapak Heryanto, ST. selaku *Site Manager* PT NPM yang telah memberikan kesempatan penulis untuk melaksanakan penelitian Tugas Akhir pada lokasi kerja beliau dan juga Bapak Takbir Halim, S.T selaku Pembimbing yang membantu mengarahkan serta membantu selama kegiatan penelitian Tugas Akhir.

Kemudian penulis juga ingin berterima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, MT. dan Dr. Phil. Nat Sri Widodo, ST.,MT., selaku Pembimbing Penelitian Tugas Akhir yang telah banyak membantu dalam mengarahkan, dan membimbing Penulis sehingga Penulis dalam menyelesaikan laporan penelitian akhir ini dengan baik. Tidak lupa kepada Bapak Asran Ilyas, ST.,MT.,PhD. dan Bapak Dr. Sufriadin, ST.,MT., sebagai Dosen Penguji pada penelitian Tugas Akhir ini yang telah mengoreksi dan membantu Penulis dalam memperbaiki kesalahan-kesalahan yang telah dilakukan Penulis dalam menyelesaikan laporan penelitian Tugas Akhir ini. Seluruh Dosen serta Staf Administrasi Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah membantu dan memudahkan Penulis dalam segala urusan selama proses administrasi berlangsung.

Kepada La Ode Hasudin dan Rodiana, selaku orangtua yang telah memberikan banyak dukungan moril dan materil selama kegiatan dan penyusunan Tugas Akhir hingga selesai Penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya. Lalu juga saudara TUNNEL 18 (Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin Angkatan 2018) yang telah memberikan banyak dukungan, bantuan dan semangat kepada Penulis. Penulis menyadari banyak kekurangan yang mungkin terdapat dalam laporan penelitian Tugas Akhir ini. Terlepas dari hal itu, Penulis berharap bahwa laporan ini dapat memberikan manfaat bukan hanya untuk Penulis sendiri tapi juga dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Makassar, Desember 2022

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Tahapan Penelitian	3
1.6 Lokasi Penelitian	5
BAB II ENDAPAN NIKEL LATERIT, KARAKTERISTIK KIMIA, DAN PENGOLAHANNYA	6
2.1 Endapan Nikel Laterit	6
2.2 Profil karakteristik Endapan Nikel Laterit.....	13
2.3 Pengolahan Bijih Nikel Laterit.....	15
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Sumber Data	19
3.2 Pengolahan dan Analisis Data	20
3.3 Bagan Alir Penelitian	27

BAB IV KARAKTERISTIK KIMIA ENDAPAN NIKEL LATERIT DI LOKASI	
PENELITIAN	29
4.1 Sebaran Kadar Unsur dan Senyawa Secara Lateral	30
4.2 Sebaran Kadar Unsur dan Senyawa Secara Vertikal	30
4.3 Statistik Deskriptif dan Korelasi	42
4.4 Karakteristik Kimia Unsur dan Senyawa.....	48
4.5 Implikasi Terhadap Pengolahan.....	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA.....	71
LAMPIRAN	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Peta lokasi penelitian	5
2.1 Penyebaran endapan nikel global	7
2.2 Gambaran profil endapan nikel lateri	13
2.3 Diagram alir ekstraksi nikel secara pirometalurgi.....	16
3.1 Data komposit kadar pada zona limonit.....	20
3.2 Pembuatan peta sebaran kadar pada <i>software</i> ArcGIS 10.8	21
3.3 Pembuatan profil vertikal endapan nikel laterit.....	23
3.4 Proses analisis statistik deskriptif pada IBM SPSS <i>Statistics</i> v.20	26
3.5 Proses analisis analisis korelasi pada aplikasi IBM SPSS <i>Statistics</i> v.20.....	27
3.6 Bagan alir penelitian	28
4.1 Peta sebaran kadar Ni	30
4.2 Peta sebaran kadar Fe	31
4.3 Peta sebaran kadar Co	32
4.4 Peta sebaran kadar SiO ₂	33
4.5 Peta sebaran kadar MgO	34
4.6 Peta sebaran kadar Al ₂ O ₃	34
4.7 Peta sebaran kadar CaO	35
4.8 Peta sebaran titik bor di lokasi penelitian, dan lima titik bor yang dipilih untuk menggambarkan profil vertikalnya	36
4.9 Profil vertikal RBC_102.....	37
4.10 Profil vertikal RBC_087	38
4.11 Profil vertikal RBC_048	39
4.12 Profil vertikal RBC_052	40

4.13 Profil vertikal RBC_113	41
4.14 Hasil <i>core logging</i> pada titik RBC_087	54

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
4.1 Interpretasi nilai koefisien korelasi.....	29
4.2 Hasil analisis statistik deskriptif zona limonit	43
4.3 Nilai koefisien korelasi unsur dan senyawa zona limonit.....	43
4.4 Klasifikasi tingkat korelasai unsur dan senyawa zona limonit	43
4.5 Hasil analisis statistik deskriptif zona saprolit	44
4.6 Nilai koefisien korelasi unsur dan senyawa zona saprolit	45
4.7 Klasifikasi tingkat korelasai unsur dan senyawa zona saprolit	46
4.8 Hasil analisis statistik deskriptif zona <i>bedrock</i>	47
4.9 Nilai koefisien korelasi unsur dan senyawa zona <i>bedrock</i>	47
4.10 Klasifikasi tingkat korelasai unsur dan senyawa zona <i>bedrock</i>	48
4.11 Karakteristik kimia bijih terhadap pengolahan	67

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A Contoh data <i>assay, collar</i> dan litologi	77
B Komposit kadar zona limonit.....	80
C Komposit kadar zona saprolit.....	84
D Komposit kadar zona <i>bedrock</i>	88
E Nilai hasil korelasi pada <i>software IBM SPSS Statistics v.20</i>	92

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel merupakan salah satu sumberdaya berupa mineral ekonomis yang berperan penting untuk memenuhi kebutuhan di bidang industri. Nikel merupakan suatu logam yang mempunyai sifat tahan karat, keadaan murni bersifat lunak. Ketika dipadukan (*alloy*) dengan besi, krom, dan logam lain menghasilkan baja tahan karat (*stainless steel*) yang keras (Arifin, dkk., 2015). Indonesia memiliki cadangan bijih nikel laterit mencapai 12% dari total cadangan nikel dunia yang tersebar di beberapa daerah di Pulau Sulawesi, serta Maluku dan pulau-pulau kecil di sekitarnya (Dalvi, et al., 2004). Daerah di Sulawesi yang memiliki kelimpahan sumberdaya nikel laterit antara lain seperti Sulawesi Tengah pada Kabupaten Morowali dan Kabupaten Luwuk Banggai, Provinsi Sulawesi Tenggara, dan Provinsi Sulawesi Selatan pada daerah Sorowako, Kabupaten Luwu Timur (Tonggiroh, dkk., 2012).

Endapan nikel laterit berasal dari hasil pelapukan intensif batuan ultramafik yang mengandung unsur Ni seperti peridotit dan serpentinit yang terjadi di wilayah tropis yang dipengaruhi oleh iklim, batuan asal, struktur geologi, topografi, reagen-reagen kimia dan vegetasi, serta waktu (Arifin, dkk., 2015). Pelapukan intensif batuan tersebut mengakibatkan adanya pelindian unsur *mobile* yang mudah larut pada batuan dasar akan terlarutkan. Unsur *immobile* dengan berat jenis yang tinggi akan tertinggal dipermukaan dan mengalami konsentrasi residual. sedangkan unsur *semi-mobile* kemudian akan terlarutkan dan terkonsentrasi ke bawah membentuk zona akumulasi dengan pengkayaan (supergen) (Ahmad, 2006).

Keterdapatn endapan nikel laterit pada suatu daerah dipengaruhi oleh proses pembentukannya terutama proses pelapukan batuan dasar (ultramafik). Batuan dasar di

setiap daerah tidak selalu memiliki komposisi mineralogi batuan asal yang sama sehingga karakteristik dan profil endapan nikel laterit seperti zona laterisasi (limonit, saprolit, dan *bedrock*) akan berbeda (Kurniadi, dkk., 2017; Lintjewas, dkk., 2019). Cara mengetahui perbedaan karakteristik tersebut salah satunya dapat diketahui berdasarkan sifat kimia pada endapan nikel laterit tersebut menggunakan analisis kimia sehingga dapat diketahui kadar unsur dan senyawa seperti MgO, SiO₂, Fe, Al, Ni, Co, Cr, Mn, dan Ca (Arifin, dkk., 2015; Rinawan, dkk., 2018).

Sifat kimia dari endapan nikel laterit memberikan informasi mengenai karakteristik dari endapan nikel laterit yang ada pada setiap wilayah terutama sifat kimia dari setiap zona laterisasi yang berhubungan dengan zona kedalaman dari endapan nikel laterit. Hal tersebut dapat dipelajari menggunakan analisis statistik terhadap hasil analisis kadar, litologi, topografi, dan kedudukan yang didapatkan berdasarkan data lubang bor. Penelitian ini berfokus pada bagaimana karakteristik unsur dan senyawa dari endapan nikel laterit, bagaimana sebaran dari setiap unsur dan senyawa baik secara lateral maupun vertikal, korelasinya antar unsur dan senyawa berdasarkan zona laterisasi, serta menentukan bagaimana karakteristik kimia dari endapan nikel laterit menentukan jenis pengolahan (metalurgi) pada nikel laterit yang terdapat di lokasi penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini yaitu bagaimana karakteristik kimia endapan nikel laterit yang ada di Blok Mawar PT NPM yang meliputi bagaimana penyebaran unsur dan senyawa baik secara lateral dan secara vertikal, korelasi antar unsur dan senyawa di setiap zona endapan nikel laterit, serta penentuan jenis pengolahan seperti apa yang tepat digunakan berdasarkan karakteristik kimia bijih yang didapatkan pada lokasi penelitian.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui karakteristik kimia endapan nikel laterit terutama yang berada pada Blok Mawar PT NPM:

1. Menganalisis penyebaran unsur dan senyawa secara lateral yang berada di lokasi penelitian
2. Menganalisis penyebaran unsur dan senyawa secara vertikal yang berada di lokasi penelitian
3. Menganalisis korelasi kadar unsur dan senyawa pada setiap zona endapan nikel laterit di lokasi penelitian
4. Memprediksi jenis pengolahan bijih yang dapat diterapkan berdasarkan karakteristik kimia bijih pada lokasi penelitian.

1.4 Manfaat Penelitian

Merujuk dari tujuan penelitian yang telah disebutkan sebelumnya, penelitian ini diharapkan dapat menjadi literatur dan menambah pengetahuan mengenai endapan nikel laterit. Baik di bidang akademisi dan praktisi dalam kegiatan penambangan nikel laterit mengenai karakteristik kimia, terutama PT NPM di mana hal tersebut dapat menjadi bantuan dalam proses penambangan nikel laterit yang dilakukan. Setelah diketahui bagaimana penyebaran kadar Ni serta merekomendasikan jenis pengolahan yang tepat digunakan berdasarkan karakteristik kimia endapan nikel laterit yang berada di lokasi penelitian.

1.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini akan menguraikan secara runtut tahapan kegiatan penelitian yang telah dilakukan. Kegiatan penelitian yang dilakukan terbagi menjadi beberapa tahap yaitu:

1) Studi literatur

Merupakan tahap awal penelitian yang berupa pengumpulan berbagai referensi yang diperoleh dari artikel ilmiah, jurnal, dan buku terkait penelitian yang dilakukan yang kemudian digunakan sebagai acuan dalam melakukan penelitian.

2) Perumusan Masalah

Perumusan masalah dilakukan untuk menentukan masalah serta topik serta konsep seperti apa yang akan dibahas dalam penelitian. Sehingga dapat disusun mengenai bagaimana rencana dan tahapan penelitian yang akan dilakukan.

3) Pengambilan data

Sumber data yang digunakan dalam penelitian berupa data *spreadsheet* dari data hasil pengeboran eksplorasi di Blok Mawar PT NPM. Data *spreadsheet* meliputi data *assay*, data *collar*, dan data litologi.

4) Pengolahan dan analisis data

Pengolahan dan analisis data dilakukan dengan menggunakan beberapa aplikasi seperti Ms.*Excel* 2019, ArcGIS versi 10.8, serta IBM SPSS *Statistics* v.20. Pengolahan dan analisis data yang dilakukan terdiri dari pengelompokan dan komposit data kadar, pembuatan peta sebaran kadar, pembuatan profil vertikal, analisis deskriptif, dan penentuan nilai korelasi unsur dan senyawa pada setiap zona endapan nikel laterit. Interpretasi data yang telah didapatkan dan menyajikannya dalam bentuk tabel atau grafik serta menentukan jenis pengolahan berdasarkan karakteristik kimia di lokasi penelitian.

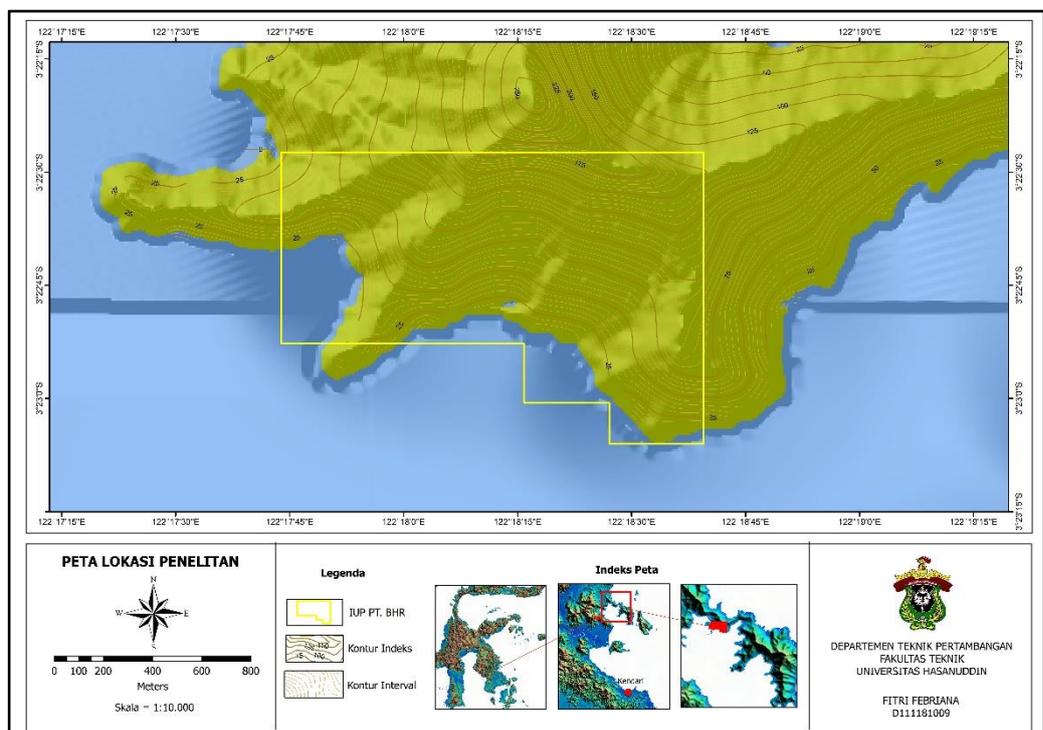
5) Penyusunan dan pembuatan Laporan Tugas Akhir

Setelah pengumpulan dan pengolahan data telah selesai dilakukan, maka tahap selanjutnya adalah penyusunan laporan. Semua data hasil penelitian yang telah dikerjakan akan dimasukkan kedalam satu laporan dan dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan tujuan dan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya.

1.6 Lokasi Penelitian

PT Natural Persada Mandiri (PT NPM) adalah perusahaan yang bergerak di jasa eksplorasi dan kontraktor tambang. Lokasi penelitian berada di salah satu lokasi kerja dari PT NPM yang berada pada Wilayah Izin Usaha Pertambangan (WIUP) yang berada di Desa Waturambaha, Kecamatan Lasolo Kepulauan, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. WIUP tersebut memiliki luas sebesar 185.000 Ha. PT NPM dalam kegiatan penambangan yang dilakukan dengan metode *open cast*. WIUP yang dikerjakan oleh PT NPM kemudian dibagi menjadi 4 blok utama, salah satunya adalah Blok Mawar yang menjadi titik lokasi penelitian yang dapat dilihat pada gambar 1.1

Lokasi kerja PT NPM dapat di jangkau dengan menggunakan pesawat udara dari Makassar ke Kota Kendari yang ditempuh kurang lebih 1 jam. Selanjutnya menggunakan transportasi darat menuju Desa Marombo, Kecamatan Lasolo Kepulauan, Kabupaten Konawe Utara dengan waktu kurang lebih 6 jam. Kemudian menuju lokasi kerja PT NPM melewati perairan dengan menggunakan perahu selama kurang lebih 1 jam.



Gambar 1.1 Peta Lokasi Penelitian

BAB II

ENDAPAN NIKEL LATERIT, KARAKTERISTIK KIMIA, DAN PENGOLAHANNYA

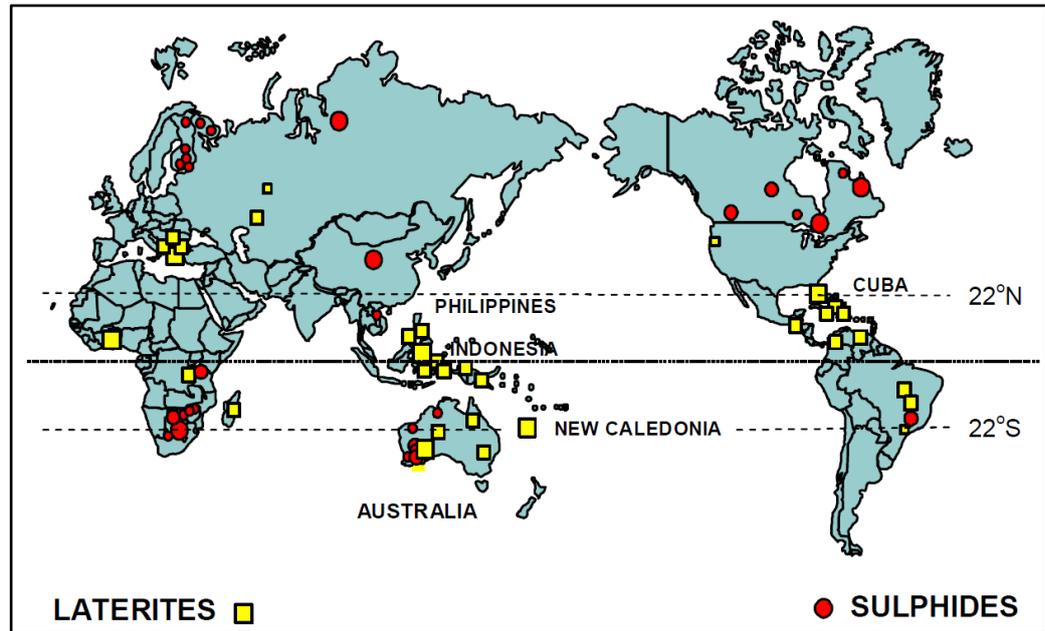
2.1 Endapan Nikel Laterit

Nikel merupakan salah satu unsur logam yang memiliki ciri mengilap (*lustrous*) dan berwarna putih keperak-perakan (*silvery white*) (Arif, 2018). Termasuk logam yang keras, cukup reaktif terhadap asam, lambat bereaksi terhadap udara pada suhu dan tekanan normal, serta logam yang stabil dan tidak dapat bereaksi terhadap oksida (Astuti, et al., 2016). Hal tersebut menjadikan nikel memiliki ketahanan terhadap korosi pada paduannya sehingga lebih dari 60% konsumsi nikel dunia digunakan dalam pembuatan baja tahan karat, pelapis ataupun campuran logam agar memperlambat korosi. Selain itu, nikel memiliki kemampuan untuk menahan suhu dan tekanan tinggi serta konduktivitas tinggi sehingga juga digunakan dalam pembuatan *superalloy*. Nikel juga digunakan sebagai pewarna hijau jika ditambahkan ke kaca serta sebagai katalis untuk beberapa reaksi kimia (Ahmad, 2006).

Sumber mineral utama dari nikel berasal dari dua tipe yakni sulfida dan oksida. Tipe sulfida mengandung 30% sumberdaya nikel sedangkan tipe oksida mengandung 70% sumberdaya nikel dunia (Janwong, 2012). Distribusi atau penyebaran endapan nikel dunia dapat dilihat pada gambar 2.1. Endapan nikel laterit yang termasuk tipe oksida merupakan hasil dari pelapukan batuan ultramafik yang secara terus menerus di permukaan bumi (Elias, 2002). Endapan nikel laterit memiliki ciri terdapat logam oksida yang berwarna coklat kemerahan yang mengandung Ni dan Fe (Helvaci, et al., 2017).

Bijih nikel laterit banyak dijumpai pada daerah yang memiliki iklim tropis atau subtropis yang memiliki tingkat pelapukan tinggi (Yildirim, et al., 2012). Indonesia

merupakan salah satu negara tropis yang memiliki endapan bijih nikel laterit yang melimpah yang tersebar di beberapa wilayah seperti daerah Sorowako dan Palakka pada Provinsi Sulawesi Selatan, Provinsi Sulawesi Tengah pada daerah Morowali, Bungku serta Luwuk, dan Provinsi Sulawesi Tenggara serta terdapat pada daerah Maluku dan Papua (Tonggih, dkk., 2012; Subagja, dkk., 2016).



Gambar 2.1 Penyebaran endapan nikel global (Elias, 2002)

2.2.1 Genesis Endapan Nikel Laterit

Seperti yang telah diketahui bahwa nikel laterit merupakan produk residual hasil pelapukan kimia yang terjadi pada batuan ultramafik seperti dunit dan peridotit maupun ubahannya seperti serpentinit (Sundari, 2012; Kurniadi, dkk., 2017). Salah satu proses yang dianggap sebagai awal dari cara terbentuknya endapan residu nikel adalah proses serpentinisasi. Proses ini terjadi akibat pengaruh larutan hidrotermal yang mengandung karbon dioksida mengubah batuan ultramafik seperti peridotit menjadi batuan serpentinit pada saat pembekuan magma (Dipatunggoro, 2010). Menurut (Ahmad, 2006), proses serpentinisasi memerlukan penambahan air, pelepasan magnesia atau penambahan silika, pelepasan besi (Mg, Fe) pada mineral olivin dan terkonversinya

bentuk *Ferrous* (Fe^{2+}) ke *ferric* (Fe^{3+}) menjadi bentuk magnetit (Puspita, et al., 2022). Proses serpentinisasi memberi pengaruh yang sangat besar terhadap perkembangan bijih Ni (Golightly, 1981; Alcock, 1988; Brand, et al., 1998). Proses serpentinisasi juga memberi pengaruh pada perubahan komposisi unsur Mg, Ni, Fe pada mineral olivin maupun piroksen serta perubahan tekstur mineralogi (Kurniadi, dkk., 2017).

Proses selanjutnya adalah proses laterisasi yang pada dasarnya merupakan rangkaian proses pembentuk nikel laterit yang terjadi pada iklim lembab dalam jangka waktu lama serta kondisi stabilitas tektonik *relative* (Butt & Zeegers, 1992; Mandalay, dkk., 2021). Berawal dari adanya proses pelapukan (fisika dan kimia) sehingga adanya dekomposisi pada batuan induk/ultramafik (Kurniadi, dkk., 2017). Pelapukan kimia yang memiliki pengaruh yang signifikan pada proses laterisasi terdiri dari empat proses yaitu hidrolisis, oksidasi, hidrasi, dan pelarutan (Ahmad, 2006; Mandalay, dkk., 2021). Batuan induk/ultramafik yang mengandung mineral seperti olivin, piroksen maupun serpentin mengalami pelindian sehingga melepaskan unsur Mg, Ni, Mn, Co, Ca, Fe, Na, Si, Cr dan Ca dari batuan dasar (Dipatunggoro, 2010; Anbiyak dan Cahyaningrum, 2020).

Pelepasan unsur suatu senyawa mineral tersebut karena adanya pengaruh oksigen yang mudah berikatan dengan unsur-unsur lain pada suatu senyawa sehingga dapat membentuk senyawa baru (Mandalay, dkk., 2021). Selain itu air tanah yang mengandung CO_2 membantu proses pelindian mineral ultramafik sehingga menghasilkan Mg, Ni, Fe yang larut (Isjudarto, 2015). Pembentukan mineral-mineral sekunder seperti lempung dan oksida besi yang menyerap unsur Ni dan Fe teroksidasi dan mengendap sebagai ferri-hidroksida. Reaksi kimia terjadi karena adanya pengaruh air yang sangat dominan dan menyebabkan pembentukan mineral-mineral *hydrous* seperti goethit, limonit, hematit (Dipatunggoro, 2010; Isjudarto, 2015).

Kemudian, akan terjadi proses pelarutan senyawa kimia yang menyebabkan produk yang lebih larut dari hasil pemecahan mineral terlarut dan terbawa dalam air

tanah. Terdapat sebagian unsur seperti Ca, Mg, dan Si yang akan mengalami dekomposisi, dan sebagian unsur lain akan terkayakan secara supergen seperti Ni, Mn, Co, Zn atau terkayakan secara residual seperti unsur Fe, Cr, Al, Ti, S, dan Cu (Golightly, 1981). Larutan yang mengandung Mg, Ni, dan Si yang bersifat asam akan terus bergerak kebawah hingga berubah menjadi netral selama melakukan kontak dengan batuan dan air tanah lalu membentuk endapan hidrosilikat, kemudian mengendap pada rekahan yang disebut urat-urat garnierit dan krisopras. Unsur seperti Ca dan Mg yang terlarut sebagai bikarbonat akan terus mengalir hingga terendapkan sebagai urat-urat dolomit dan magnesit. Untuk unsur-unsur yang tidak mudah larut akan terendapkan dan membentuk konsentrasi residual serta sebagian terbawa sebagai larutan koloid (Dipatunggoro, 2010; Isjudarto, 2015; Kurniadi, dkk., 2017).

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi pembentukan serta distribusi endapan nikel laterit antara lain (Ahmad, 2006):

1. Batuan Asal

Nikel laterit yang berasal dari pelapukan batuan induk memberi pengaruh yang besar dalam menentukan karakteristik nikel laterit. Sebagai contoh batuan mafik dan ultramafik akan menghasilkan besi hidroksida, batuan kaya akan karbonat yang mudah terlindi akan menyisakan konsentrasi residu material *argilaceous* dan silika, serta batuan yang banyak mengandung alumina menghasilkan konsentrasi aluminium hidroksida yang lebih banyak. Mineral yang terkandung dalam batuan induk juga menentukan tingkat dan kecepatan pelapukan. Hal ini disebabkan karena setiap mineral masing-masing memiliki ketahanan terhadap pelapukan kimia.

2. Struktur

Adanya bukaan seperti kekar, rekahan, dan patahan serta ukuran butir membantu proses pelapukan kimia dan proses pelindian material terlarut.

Diketahui bahwa batuan beku berbutir kasar lebih mudah mengalami pelapukan kimia dibandingkan dengan batuan berbutir halus. Adanya struktur memiliki peran penting dalam proses peresapan air dan membantu dalam pelarutan bahan terlarut dalam proses pelapukan.

3. Iklim dan cuaca

Sebagai faktor yang berpengaruh besar terhadap efisiensi dan laju pelapukan kimia. Tingkat curah hujan mengontrol tingkat kelembaban dalam proses reaksi kimia dan menyediakan air dalam proses pelindian unsur terlarut. Suhu mempengaruhi proses pemecahan unsur mineral. Menurut aturan Van't Hoff, dimana setiap perubahan suhu 10° akan meningkatkan kecepatan reaksi kimia sekitar 2-3 kali. Perkiraan bahwa tingkat pelapukan dan pelindian kimia di iklim tropis 20-40 kali lebih tinggi daripada daerah beriklim sedang. Pertumbuhan vegetasi di daerah beriklim tropis tinggi serta pembusukan materi vegetatif sehingga menyebabkan pembentukan asam organik juga tinggi.

4. Vegetasi dan reagen kimia

Tanaman baik pohon yang berukuran besar atau semak kecil dan rumput menyediakan bahan organik dan asam yang berperan dalam proses pelapukan. Pembusukan tanaman yang disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme, menyebabkan terjadinya oksidasi bahan organik dan melepaskan karbon dioksida. Karbon dioksida ini beraksi dengan air tanah membentuk asam yang berfungsi mempercepat pengharuncuran mineral dari batuan induk/primer. Selain itu asam tersebut juga dapat merubah pH larutan yang juga dapat membantu dalam proses reaksi kimia penghancuran mineral. Vegetasi juga berperan dalam meningkatkan akumulasi air, dan menjaga residu pengendapan dari erosi sehingga akan membentuk endapan nikel laterit yang tebal (Apriajum, dkk., 2016).

5. Topografi

topografi berpengaruh terhadap proses penyerapan air hujan kedalam profil, laju drainase bawah permukaan dan pembuangan material terlarut, serta tingkat erosi produk lapuk atau profil laterit. topografi yang curam menyebabkan penyerapan air hujan lebih sedikit dibandingkan topografi yang landai, tetapi memungkinkan pembuangan material terlarut lebih baik. Tetapi, topografi yang curam memungkinkan tingkat erosi yang tinggi sehingga akumulasi residu tidak dapat berlangsung, sehingga tingkat akumulasi harus lebih tinggi dibandingkan dengan tingkat erosi yang terjadi. Secara teoritis, relief topografi yang baik dalam pengendapan bijih nikel laterit yaitu punggung-punggung bukit yang landai dengan kemiringan 10° - 30° (Apriajum, dkk., 2016).

6. Waktu

Semakin lama waktu dalam proses laterisasi akan mempengaruhi ketebalan dari profil laterit yang terbentuk. Proses pelindian dan pengayaan supergen akan lebih mudah dikenali karena hasil pelapukan laterit yang menghasilkan besi dan hidroksida alumina yang sangat stabil dan tahan lama.

7. Muka Air Tanah/ *water table*

Kontrol laju dan lokasi laterisasi terjadi menjadi batasan sejauh mana pengayaan supergen terjadi merupakan peran dari bagaimana posisi dan ketinggian dari muka air tanah. Jika berada pada posisi yang tinggi menyebabkan ruang pori akan terisis air dan tidak memungkinkan oksigen mencapai permukaan kristal, mengurangi pengaruh air asam dan zona oksidasi dalam massa batuan. Posisi yang rendah merupakan kebalikan dari efek posisi muka air tanah yang tinggi, diikuti pembentukan zona pelindian yang lebih tebal sebelum unsur supergen terendapkan. Jika muka air tanah menjadi lebih fluktuatif maka pelindian bahan terlarut dan juga mekanisme pengayaan supergen menjadi lebih terkontrol.

2.2.2 Klasifikasi Endapan Nikel Laterit

Klasifikasi bijih endapan nikel laterit secara umum terbagi dalam tiga kategori utama berdasarkan mineraloginya yaitu (Butt and Cluzel, 2013):

1. *Oxide Deposits*

Merupakan produk akhir yang umum dari laterisasi batuan ultrabasa (Elias, 2002). Disebut juga bijih limonit yang didominasi oleh mineral goetit yang merupakan *Fe-oxyhidroxide*. Oksida mangan biasanya banyak dijumpai bersama Co dan Ni. Memiliki kadar Ni rata-rata (1,0-1,6) wt% dimana mineral goetit sebagai mineral *host* sebagai proses substitusi Fe ataupun proses adsorpsi. Mewakili 60% dari total sumberdaya Ni laterit yang ada di dunia.

2. *Hydrous Mg Silicate Deposits*

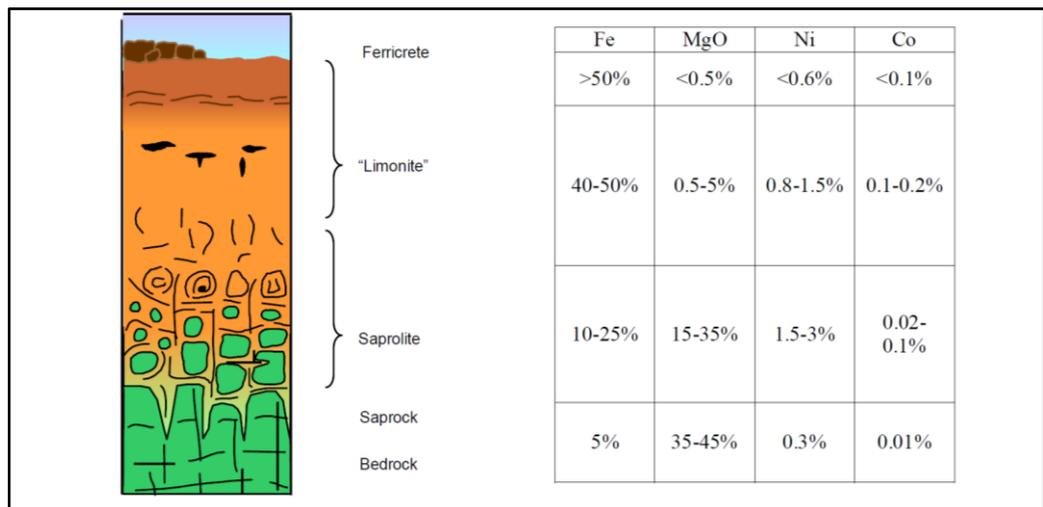
Terbentuk pada daerah saprolit menengah ke bawah, Ni terakumulasi dalam mineral serpentin, talk, klorit, dan sepiolit, dan beberapa mineral yang kurang teridentifikasi sehingga dikenal sebagai garnierit. Merupakan endapan dengan tingkatan tertinggi yang memiliki kadar Ni 2-5% dan secara historis sebagian mayoritas Ni laterit merupakan jenis ini. Mewakili 32% dari total sumberdaya Ni. Jarang memiliki tebal lebih dari 40 m karena relief dan tingkat pelapukan yang tinggi.

3. *Clay Silicate Deposits*

Keterdapatan tipe endapan ini terbatas pada daerah yang memiliki relief yang relatif rendah. mineral utama pada tipe endapan ini adalah mineral saponit yang kaya akan Ni dan smektit pada lapisan saprolit dan pedolit menengah keatas. Umumnya memiliki kadar 1,0-1,5 (wt%) Ni yang mewakili sekitar 8% dari total sumberdaya nikel laterit. Endapan ini dilapisi oleh zona tipis material oksida yang kaya akan Fe dengan kadar Ni rendah, juga dilapisi oleh saprolit yang terlupakan sebagian yang mengandung serpentin dan nontronit (Elias, 2002).

2.2 Profil karakteristik Endapan Nikel Laterit

Menurut (Gleeson, et al., 2003) profil nikel laterit terbagi menjadi tiga bagian yaitu zona limonit, saprolit, serta protolit/*bedrock*. Adapun menurut (Ahmad, 2006) profil nikel laterit terbagi atas limonit, smektit/nontronit/zona transisi, saprolit, dan *bedrock*. Sedangkan menurut (Kyle, 2010) profil nikel laterit terbagi atas limonit, saprolit, zona transisi, dan *Ferricrete*. Sedangkan menurut Elias (2002) gambaran mengenai profil endapan nikel laterit dapat dilihat pada gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Gambaran profil endapan nikel laterit (Elias, 2002)

1. Zona *Ferricrete*

Berada pada bagian paling atas dari profil endapan nikel laterit. tersusun atas humus, oksida besi, dan sisa-sisa organik. Bewarna coklat tua kehitaman dan gembur. Memiliki kandungan besi yang tinggi (sekitar 60%) dengan mineral utama yaitu hematit. Umumnya memiliki kadar nikel di bawah 0,6% (Kyle, 2010; Puspita, dkk., 2022).

2. Zona Limonit

Zona limonit merupakan zona yang kaya akan Fe-oksida dan goethit, berwarna merah coklat atau kuning, dan memiliki ukuran butir halus hingga lempungan

(Gleeson, et al., 2003; Kurniadi, dkk., 2017). Mengandung mineral yang tidak larut seperti spinel, magnetit, maghemit, dan talk primer. Struktur dan tekstur batuan pada zona ini tidak terlihat karena adanya proses pelapukan (Ahmad, 2006). Klasifikasi zona limonit menurut unsur kimia dari (Golightly, 1981) dengan Fe lebih dari 25%, MgO berada di bawah 5%, serta kadar Ni di bawah 1,5%. Tapi dalam hal ini klasifikasi unsur kimia ini tidak sepenuhnya dapat diterapkan karena sering ditemui anomali sehingga perlu disesuaikan walaupun menyimpang tidak terlalu jauh.

3. Zona Transisi

Zona transisi merupakan zona yang berada diantara zona limonit bawah dan saprolit atas. Mengandung lempung smektit lunak, nontronit serta kuarsa kristal keras. Biasanya berwarna pucat sampai hijau tua, memiliki drainase buruk (Kyle, 2010). Tekstur dan struktur batuan induk dapat dijumpai di zona ini. Pembentukan zona transisi ini tergantung pada iklim pembentukan profil laterit paling memungkinkan terbentuk pada iklim tropis basah-kering (Ahmad, 2006).

4. Zona Saprolit

Zona yang terdiri dari campuran sisa-sisa batuan, struktur dan tekstur batuan asal dapat terlihat lebih jelas (Kurniadi, dkk., 2017). Zona ini ditandai dengan kelimpahan unsur Mg dan Ni serta penurunan kadar Fe (Musnajam, 2011). Proses pelapukan batuan dasar terjadi paling aktif disepanjang kekar dan rekahan batuan serta pecahan pada kristal (Ahmad, 2006). Klasifikasi unsur kimia zona saprolit berada pada Fe kurang dari 25%, MgO diatas 5% dan kadar Ni diatas 1,5% (Golightly, 1981).

5. Zona Protolit/*Bedrock*

Bagian terbawah dari profil laterit yang terdiri dari bongkahan batuan induk yang masih segar yang tidak mengandung mineral ekonomis. Terjadi proses pelapukan

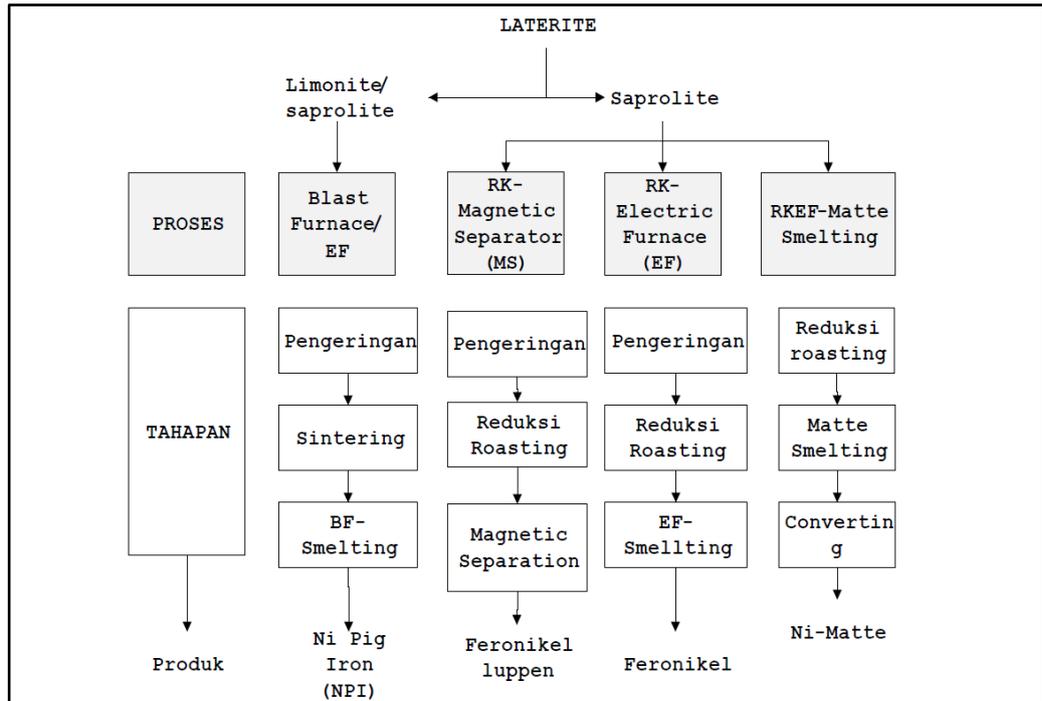
awal pada zona ini, terutama pada rekahan dan kekar yang ada (Ahmad, 2006). Unsur yang dijumpai dengan kadar tinggi pada zona ini adalah Mg sedangkan unsur Ni dan Fe rendah. struktur, tekstur dan komposisi asli dari batuan induk sangat jelas terlihat (Musnajam, 2011).

2.3 Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Secara umum, terdapat dua proses yang digunakan dalam pengolahan bijih nikel laterit yaitu pirometalurgi (*smelting*) dan hidrometalurgi (Ahmad, 2005; Kyle, 2010; Prasetyo, 2016). Proses pirometalurgi digunakan untuk bijih nikel laterit berkadar tinggi diatas 1,5% sedangkan proses hidrometalurgi digunakan untuk bijih nikel laterit berkadar rendah di bawah 1,5% (Subagja dan Firdiyono, 2015; Setiawan, 2016). Proses hidrometalurgi terdiri dari Caron (*Ammonia Leaching*) dan HPAL/PAL (*High Pressure Acid Leaching*). Proses pirometalurgi terdiri dari *rotary klin*-reduksi tungku busur listrik atau RKEF (Dalvi, et al., 2004; Ahmad, 2005; Kyle, 2010; Bahfie, dkk., 2021).

2.3.1 Pirometalurgi (*smelting*)

Proses pengolahan dengan menggunakan suhu tinggi (Suhaimi dan Indrawati, 2022). Bijih saprolit yang mengandung kobalt dan besi lebih rendah dibanding limonit cocok menggunakan proses pirometalurgi (Dalvi, et al., 2004; Kyle, 2010). Produk utama terdiri dari feronikel yang memiliki kadar rasio Fe/Ni yang rendah serta MgO yang tinggi dan nikel *matte* dengan rasio Fe/Ni yang tinggi serta titik leleh *slag* yang rendah (Elias, 2002; Dalvi, et al., 2004; Ahmad, 2005; Kyle, 2010). Dalam SiO_2/MgO , bijih yang memiliki perbandingan $SiO_2/MgO < 2$ atau $> 2,5$ lebih baik digunakan dalam pembuatan feronikel, sedangkan bijih yang memiliki perbandingan $SiO_2/MgO 2,3-2,5$ mempunyai sifat yang sangat korosif terhadap lapisan *furnace* sehingga perlu diberi bahan kimia sebelum dapat dilebur, lalu untuk bijih dengan perbandingan $SiO_2/MgO 1,8-2,2$ lebih baik digunakan pembuatan nikel *matte* (Dalvi, et al., 2004; Kyle, 2010; Subagja dan Firdiyono, 2015).



Gambar 2.3 Diagram alir ekstraksi nikel secara pirometalurgi (Setiawan, 2016)

Secara konvensional terdiri dari proses pengeringan, kalsinasi (terkadang reduksi) dalam tanur putar, dan dilebur dalam tungku listrik bersama karbon. Belerang jika ditambahkan ke klin akan menghasilkan nikel *matte* (Kyle, 2010). *Recovery* nikel yang didapatkan berada pada kisaran 90-95% dan kobalt sekitar 50% (Dalvi, et al., 2004). Memiliki keunggulan di mana prosesnya sederhana, perolehan tinggi, dapat menangani bijih magnesium tinggi tapi memiliki kelemahan yaitu penggunaan energi dan biaya tinggi serta perlu terus dilakukan pencampuran untuk mempertahankan rasio SiO_2/MgO (Elias, 2002; Kyle, 2010; Setiawan, 2016). Secara komersial, proses pirometalurgi terdiri atas *Rotary klin electric furnace* (RKEF), *Nippon Yakin Oheyema process*, serta *Nickel Pig Iron (NPI)* seperti yang terlihat pada gambar 2.3 (Setiawan, 2016).

2.3.2 Hidrometalurgi

Proses pengolahan nikel laterit dengan menggunakan cara hidrometalurgi memiliki keunggulan di mana menghasilkan produk utama yang jauh lebih murni

dibandingkan dengan proses pirometalurgi serta konsumsi dan energi yang lebih sedikit (Suhaimi dan Indrawati, 2022). Dengan menggunakan cairan asam memiliki kelemahan di mana adanya pengotor dalam bijih nikel laterit seperti magnesium dapat menurunkan efisiensi pemakaian asam (Subagja dan Firdiyono, 2015). Ekstraksi menggunakan metode hidrometalurgi lebih efisien dari segi konsumsi energi, limbah gas buang lebih sedikit, serta pengendalian proses dan sirkulasi media pelindi juga lebih sederhana jika dibandingkan dengan hidrometalurgi, Namun proses hidrometalurgi sangat kompleks dan panjang (Zhang, et al., 2015; Permana, dkk., 2020). Metode hidrometalurgi terdiri dari beberapa proses seperti proses Caron, pelindian pada tekanan tinggi (HPAL), pelindian agitasi dan tekanan atmosfer (AL) dan *heap leaching* (HP) (Fathoni dan Mubarak, 2015). Memproduksi NiO pada proses caron, dan NiS pada proses HPAL/PAL (Prasetyo, 2016; Bahfie, dkk., 2021).

1. Proses Caron (*Amonnia-roasting*)

Proses ini cocok digunakan untuk bijih limonit atau campuran limonit dan saprolit, dengan silika dan Mg yang rendah karena jika berlebih dapat menurunkan perolehan dari Ni (Elias, 2002; Dalvi, et al., 2004; Kyle, 2010). Proses yang terdiri dari pengeringan dan pemanggangan dalam atmosfer yang tereduksi menjadi nikel metalik pada suhu kurang lebih 700°C, dilanjutkan dengan pencucian amonia bertekanan rendah hingga Ni dan Co didapatkan dari ekstraksi pelarut dan secara maksimal pada tahap kalsinasi dan reduksi. Menghasilkan produk yang di *roasting* sebesar 75-80% berat Ni dan 40-50% berat Co. Kelebihan dari proses caron adalah terbukti efektif pada bijih kadar rendah, kemudahan pemisahan produk nikel dan *cobalt*, dan amonia yang dapat digunakan kembali sehingga biaya reagen murah. Kelemahannya membutuhkan energi dan biaya cukup besar karena pada dasarnya proses awal dari caron adalah proses pirometalurgi yang membutuhkan energi yang besar, serta perolehan Ni dan Co

lebih rendah dibandingkan menggunakan proses *smelting* atau HPAL, dan hanya bisa diterapkan pada bijih kadar rendah (Elias, 2002; Dalvi, et al., 2004; Kyle, 2010; Bahfie, dkk., 2021).

2. Proses Pelindian asam bertekanan (*High Pressure Acid Leaching*/HPAL)

Kriteria bijih yang cocok untuk proses ini adalah limonit yang memiliki Mg lebih rendah (<4%), kandungan Al yang lebih rendah (Elias, 2002; Ahmad, 2005; Kyle, 2010). Menggunakan asam sulfat dalam autoklaf pada suhu sekitar 250°C kemudian digunakan untuk mengekstraksi Ni dan Co. konsumsi asam sulfat ditentukan oleh tingkat Mg dalam bijih yang diekstraksi (Elias, 2002). Produk yang dihasilkan berupa elektro-nikel, nikel oksida atau briket nikel yang juga terdapat sulfida campuran atau hidroksida campuran (Dalvi, et al., 2004). Memiliki persentase perolehan Ni dan Co yang tinggi yaitu lebih dari 92% pada tahap pelindian (Elias, 2002). Selain asam sulfat, mulai digunakan asam nitrat, asam klorida, dan asam organik sebagai media pelindian (Wang, et al., 2012; Guo, et al., 2015; Astuti, et al., 2016; Bahfie, dkk., 2021). Memiliki keuntungan yakni memiliki tingkat ekstraksi dan efisiensi yang tinggi, tetapi juga memiliki kelemahan di mana proses pengolahan ini membutuhkan infrastruktur yang kompleks (Elias, 2002; Kyle, 2010; Bahfie, dkk., 2021).

3. Proses Hidrometalurgi Lain

Terdiri dari proses EPAL (*Enchanged Pressure Acid Lead*) yang berupa langkah pelindian tambahan untuk saprolit dengan sisa asam dari proses HPAL (Dalvi, et al., 2004; Kyle, 2010). Dapat mengkonsumsi lebih banyak saprolit. Selain itu, terdapat proses AL atau *atmospheric leaching*, *Heap leaching*, serta pencucian klorida untuk bijih campuran limonit dan saprolit (Dalvi, et al., 2004). Beberapa teknologi baru dalam pengolahan bijih nikel laterit menurut (Kyle, 2010) seperti *Sulphation atmospheric leach* (SAL), dan *bioleaching*.