

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Eksplorasi dan penambangan bijih nikel laterit kini semakin mendapat perhatian global seiring dengan meningkatnya permintaan nikel, terutama dalam industri produksi baja tahan karat (*stainless steel*), paduan logam (*alloy*), dan baterai (Choi *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2019). Sebagian besar endapan nikel laterit terkonsentrasi di negara-negara sekitar garis khatulistiwa, seperti Indonesia, Filipina, Kaledonia Baru, Brasil, Republik Dominika, Venezuela, dan Kolombia. Hal ini disebabkan oleh kondisi iklim tropis dan lembap yang mendukung pelapukan mendalam batuan ultramafik, seperti serpentin, yang kemudian membentuk endapan laterit kaya nikel (Butt & Cluzel, 2013; Choi *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2019). Di antara negara-negara tersebut, Indonesia diidentifikasi sebagai salah satu sumber bijih nikel global terkemuka, dengan endapan nikel laterit utama terletak di wilayah Maluku dan Sulawesi, menjadikannya sebagai pemain kunci dalam industri ini (Farrokhpay *et al.*, 2018; Sufriadin *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2019).

Bijih nikel laterit dapat diolah menggunakan proses pirometalurgi, hidrometalurgi, dan gabungan piro-hidrometalurgi (Dalvi *et al.*, 2004; Keskinilic, 2019). Proses pirometalurgi (peleburan) menghasilkan nikel matte, feronikel, dan *nikel pig iron* (NPI), sedangkan proses hidrometalurgi, termasuk proses karon dan pelindian asam tekanan tinggi (*high-pressure acid leaching*), cocok untuk mengekstraksi nikel dan kobalt; pelindian atmosferik (*atmospheric leaching*) dan *heap leaching* untuk produksi Ni-hidroksida (Dalvi *et al.*, 2004; Setiawan, 2016). Pemilihan metode ini terutama didasarkan pada sifat mineralogi dan kimia endapan bijih (Sufriadin *et al.*, 2011).

Saat ini, sebagian besar pengolahan bijih nikel laterit secara global dilakukan melalui proses pirometalurgi, seperti reduksi dan peleburan dengan *Rotary Kiln Electric Furnaces* (RKEF) atau *Blast Furnaces* (BF) (Pintowantoro & Abdul, 2019; Setiawan, 2016). Di Indonesia, proses pirometalurgi untuk bijih nikel

laterit biasanya mencakup produksi feronikel, nikel matte, atau *nikel pig iron* (Sufriadin *et al.*, 2011).

Efisiensi dan keberhasilan proses pengolahan bijih nikel laterit secara pirometalurgi sangat dipengaruhi oleh sifat kimia dan mineralogi bijih. Variasi komposisi kimia dan mineralogi akan berdampak pada pemilihan metode pengolahan, kondisi operasi, dan kualitas produk akhir. Beberapa faktor kunci yang mempengaruhi efisiensi dan hasil akhir dari proses ini termasuk rasio silika terhadap magnesia (SiO_2/MgO), rasio besi terhadap nikel (Fe/Ni), serta kandungan olivin (Oxley & Barcza, 2013; Oxley *et al.*, 2016). Rasio SiO_2/MgO sangat menentukan sifat terak (*slag*) yang terbentuk, di mana rasio yang tidak ideal dapat menyebabkan *slag* terlalu kental atau terlalu cair sehingga menghambat pemisahan logam. Sementara itu, rasio besi terhadap nikel (Fe/Ni) sangat berpengaruh dalam pemilihan metode pemisahan nikel dari bijih. Semakin tinggi rasio Fe/Ni , semakin kompleks proses pemisahan yang diperlukan. Olivin mengandung magnesium dan silika, yang dapat meningkatkan viskositas cairan dan suhu leleh bijih. Ini dapat memperlambat reaksi kimia dan mempengaruhi efisiensi ekstraksi nikel. Kandungan olivin yang tinggi dapat membentuk *slag* yang kompleks dan meningkatkan konsumsi energi dalam proses peleburan (Keskinilic, 2019; Oxley & Barcza, 2013).

Pulau Gebe, yang terletak di kepulauan Maluku di Indonesia bagian timur, merupakan salah satu wilayah dengan sumber daya nikel laterit yang signifikan yang sebelumnya dikelola oleh PT Aneka Tambang Tbk dan sekarang dikelola oleh beberapa perusahaan tambang swasta, salah satunya adalah PT Mineral Trobos. Daerah ini telah ditambang sejak tahun 1977 (Kadarusman, 2013; Leeuwen, 2019). Meskipun endapan ini telah berproduksi selama hampir empat dekade, informasi mengenai mineralogi dan karakteristik kimianya masih terbatas. Hal ini disebabkan oleh banyaknya kegiatan penambangan yang lebih terfokus pada hasil produksi dan profitabilitas jangka pendek, sehingga penelitian mendalam mengenai karakteristik bijih sering kali diabaikan, dan dalam konteks industri, aspek teknis serta ilmiah sering kali tidak mendapat perhatian yang sama dengan aspek ekonomis.

Untuk memanfaatkan potensi ini secara optimal, penting untuk memahami secara mendalam karakteristik mineralogi dan kimia bijih nikel laterit di Pulau

Gebe serta implikasinya terhadap proses peleburan guna mengembangkan metode pemrosesan yang efektif (Gao *et al.*, 2021; Sufriadin *et al.*, 2011). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengoptimalkan pengelolaan bijih nikel, pengembangan teknologi peleburan nikel yang lebih baik, meningkatkan efisiensi proses, dan mendukung pembangunan keberlanjutan dalam industri pertambangan nikel.

1.2 Rumusan Masalah

Endapan nikel laterit memiliki perbedaan karakteristik mineralogi dan kimia pada setiap daerah. Perbedaan karakteristik mineralogi dan kimia akan berpengaruh terhadap teknologi pengolahan dan pemurnian yang akan digunakan. Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a. Bagaimana karakteristik mineralogi bijih nikel di Pulau Gebe.
- b. Bagaimana karakteristik kimia bijih nikel di Pulau Gebe.
- c. Bagaimana implikasi pengaruh mineralogi dan kimia bijih nikel dalam proses pengolahan dengan metode peleburan bijih (pirometalurgi).

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang mendalam tentang karakteristik mineralogi dan kimia bijih nikel laterit di Pulau Gebe, Maluku Utara, serta implikasinya terhadap proses peleburan bijih. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Menganalisis distribusi dan asosiasi mineral dalam bijih nikel laterit.
- b. Menganalisis kandungan unsur kimia dan menentukan komposisi kimia bijih nikel laterit.
- c. Memprediksi pengaruh sifat mineralogi dan komposisi kimia bijih nikel laterit terhadap proses peleburan.

Dengan tercapainya tujuan-tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berarti dalam pemanfaatan bijih nikel laterit di Pulau Gebe, mendukung pembangunan yang berkelanjutan, serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat setempat dan daya saing industri pertambangan Indonesia di pasar internasional.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam berbagai aspek, baik bagi industri, masyarakat, maupun pengembangan ilmu pengetahuan. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Manfaat bagi Industri Pertambangan

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik mineralogi dan komposisi kimia bijih nikel laterit. Pengetahuan tersebut akan berguna untuk mengoptimalkan pengelolaan bijih nikel dan proses peleburan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan efisiensi dan hasil dari proses peleburan serta mengurangi biaya produksi. Selain itu, penelitian ini dapat memberikan rekomendasi bagi perusahaan pertambangan dan industri *smelter* nikel dalam memilih metode peleburan yang paling sesuai dengan karakteristik bijih di daerah penelitian. Penelitian ini juga diharapkan menjadi referensi penting bagi perusahaan pertambangan dan industri *smelter* dalam strategi pencampuran bijih yang digunakan untuk kebutuhan umpan pabrik.

b. Manfaat bagi Pengembangan Ilmu Pengetahuan

Penelitian ini akan menambah pengetahuan tentang karakteristik mineralogi dan kimia bijih nikel laterit, khususnya di wilayah Pulau Gebe. Pengetahuan ini dapat digunakan sebagai referensi untuk studi-studi selanjutnya dalam bidang mineralogi dan teknik peleburan.

c. Manfaat bagi Kebijakan dan Regulasi

Informasi yang diperoleh dari penelitian ini dapat digunakan untuk menyusun kebijakan dan regulasi yang lebih baik dalam pengelolaan sumber daya mineral dan perlindungan lingkungan, baik di tingkat lokal maupun nasional.

d. Manfaat bagi Masyarakat Lokal

Dengan pengolahan bijih nikel yang lebih efisien, diharapkan dapat meningkatkan hasil ekonomi dari kegiatan pertambangan di Pulau Gebe. Ini dapat menciptakan lapangan pekerjaan baru dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat setempat.

Dengan manfaat-manfaat tersebut, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif dalam pengelolaan dan pemanfaatan bijih nikel

laterit, serta mendukung pembangunan berkelanjutan di Pulau Gebe dan sektor pertambangan secara umum.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

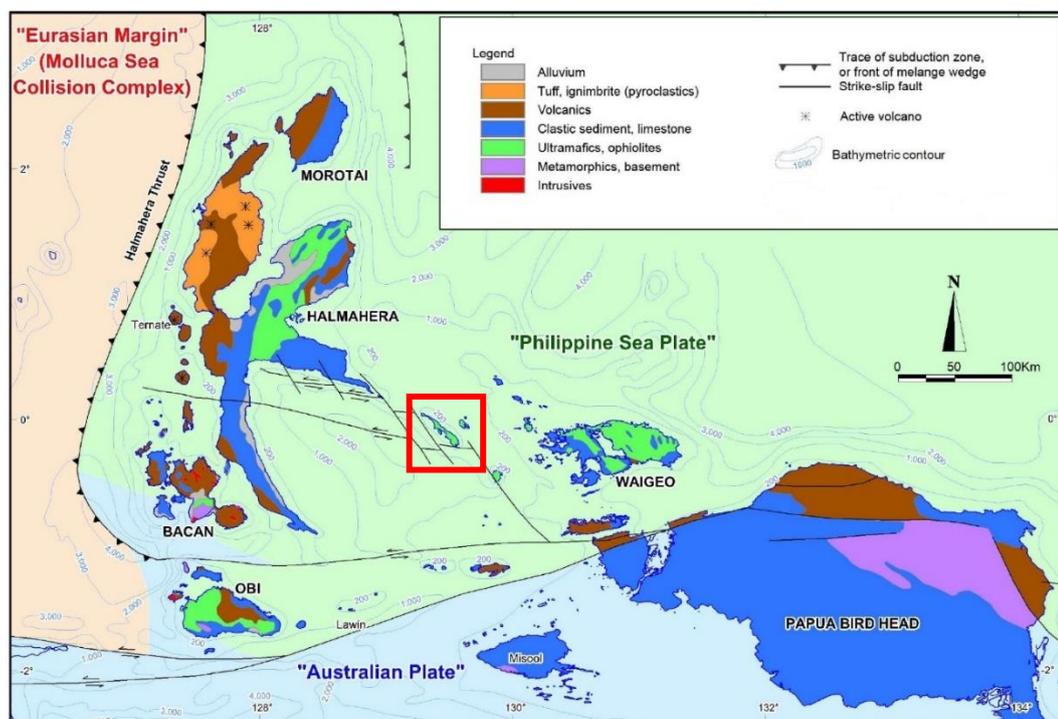
Ruang lingkup penelitian ini akan dibatasi pada beberapa aspek yang terkait dengan karakteristik mineralogi dan kimia bijih nikel laterit di Pulau Gebe, serta implikasinya terhadap proses peleburan. Fokus penelitian adalah pada bijih nikel laterit (saprolit) yang berasal dari lokasi tertentu di Pulau Gebe. Dalam penelitian ini, analisis mineralogi dan kimia dilakukan dengan metode XRD, XRF dan SEM-EDS. Penelitian ini membahas bagaimana hasil analisis mineralogi dan kimia dapat mempengaruhi proses peleburan bijih nikel, dengan fokus pada metode peleburan yang sesuai dengan karakteristik bijih di Pulau Gebe, tanpa mencakup seluruh metode peleburan yang digunakan dalam industri nikel.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Pulau Halmahera terletak di bagian timur laut kepulauan Indonesia, antara Sulawesi dan Papua. Pulau Halmahera mirip dengan Sulawesi dengan bentuk pulau 'K', terdiri dari empat lengan, yaitu lengan utara, selatan, timur laut dan tenggara (Gambar 1).



Gambar 1 Tektonik dan geologi Halmahera - wilayah Kepala Burung Papua (Prihatmoko *et al.*, 2013). Lokasi penelitian ditunjukkan oleh blok berwarna merah

Secara geologi dan tektonik, Halmahera memiliki keunikan tersendiri. Pulau ini terbentuk akibat tumbukan antara beberapa lempeng besar, yaitu Lempeng Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia (Hall *et al.*, 1991; Kadarusman, 2013). Tektonik regional Pulau Halmahera terbagi menjadi tiga wilayah geologi utama, yaitu mandala geologi Halmahera Timur (Lengan Timur), mandala geologi Halmahera Barat (Lengan Barat), dan busur kepulauan gunung api kuartar. Ketiga wilayah geologi tersebut memiliki karakteristik yang sangat berbeda (Apandi & Sudana, 1980; Kadarusman, 2013; Supriatna, 1980). Ketiga mandala tersebut saling

terhubung melalui jalur tektonik yang menunjukkan perlipatan dan pensesaran yang intens. Batuan yang membentuk Mandala Timur umumnya lebih tua dibandingkan dengan yang terdapat di Mandala Barat dan Busur Kepulauan Gunung Api Kuarter.

Perkembangan tektonik di lengan timur diperkirakan terjadi pada akhir periode Kapur hingga awal Tersier, yang ditandai oleh keberadaan batuan ultrabasa dan serpih merah yang diperkirakan berasal dari periode Kapur. Proses tektonik berikutnya terjadi pada awal Eosen hingga Oligosen, yang dapat dilihat dari ketidakselarasan antara Formasi Dorosagu dan batuan vulkanik pada Formasi Bacan, yang berusia Oligosen Akhir hingga Miosen Awal (Oligo-Miosen) (Oligo-Miosen) (Ali *et al.*, 2001; Ballantyne, 1991; Hall *et al.*, 1991).

Batuan dasar di bagian Timur Halmahera terdiri dari ofiolit, batuan metamorf, dan batuan sedimen. Ofiolit terbentuk melalui proses gerusan yang kuat dan breksiasi, serta batuan ultramafik yang meliputi peridotit yang terserpentinasi, gabro, basal, dan diabas (Ballantyne, 1991; Ballantyne, 1992; Hall *et al.*, 1991). Meskipun kompleks batuan dasar ini didominasi oleh batuan ultrabasa, juga ditemukan rijang radiolaria berwarna merah dan batulumpur merah, meskipun jenis batuan dapat bervariasi antar daerah (Hall *et al.*, 1995; Kadarusman, 2013).

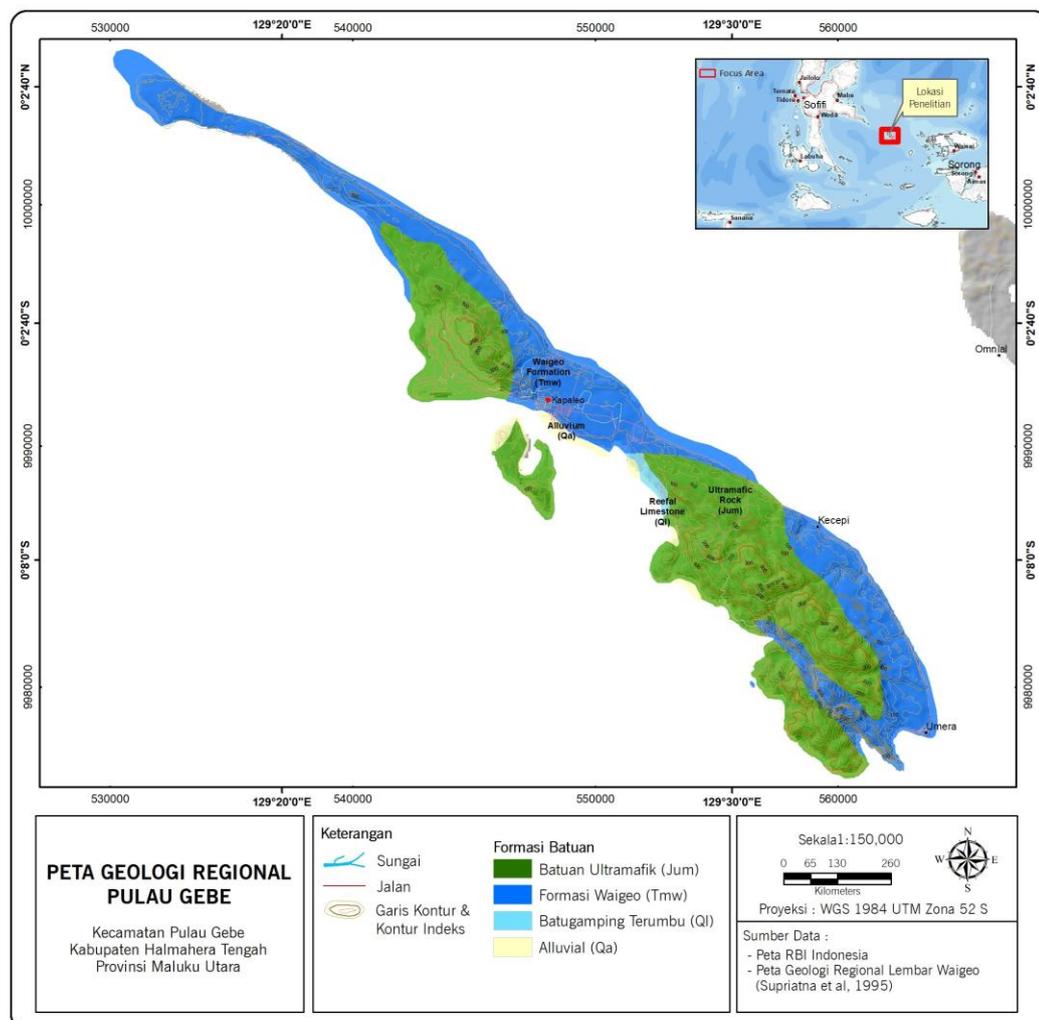
Ofiolit di daerah Halmahera (*East Halmahera Ophiolite* atau EHO) tersebar di lengan timurlaut dan lengan tenggara dari Halmahera dan meluas ke pulau-pulau kecil di timur Pulau Halmahera seperti Pulau Pakal, Gee, dan Gebe. EHO berumur Jura hingga Eosen dan berasosiasi dengan batuan sedimen di atasnya yang berumur Oligosen – Holosen. Batuan ultramafik pada EHO umumnya hadir sebagai batuan ultramafik dengan jenis harzburgit, dunit dan sedikit lerzolit (Kadarusman, 2013).

Fisiografi Mandala Halmahera Timur sebagian besar terdiri dari pegunungan dengan lereng curam dan lembah sungai yang dalam, sementara sebagian kecil memiliki morfologi karst. Morfologi pegunungan dengan lereng curam ini mencerminkan adanya satuan batuan ultrabasa, batuan sedimen, dan batuan vulkanik dari periode Oligo-Miosen serta batuan yang lebih tua. Morfologi karst ditemukan di daerah batu gamping, yang meliputi formasi berumur Paleosen-Eosen, Oligo-Miosen, dan Miosen-Paleosen. Batuan sedimen dari periode Miosen-Pliosen membentuk morfologi perbukitan yang lebih rendah dengan lereng yang

lebih landai dibandingkan batuan yang lebih tua (Apandi & Sudana, 1980; Supriatna, 1980).

Pada periode Miosen Tengah, Plio-Pleistosen, dan akhir Holosen, terjadi aktivitas tektonik yang mencakup perlipatan dan sesar naik yang sangat intensif dengan arah utama Utara - Timur Laut hingga Selatan - Barat Daya. Sesar normal yang berarah Barat - Barat Laut hingga Timur-Tenggara, yang terjadi pada fase tektonik terakhir, memotong semua sesar naik tersebut (Apandi & Sudana, 1980; Hall *et al.*, 1991; Supriatna, 1980).

Berdasarkan peta geologi regional Lembar Waigeo, Irian Jaya Skala 1 : 250.000 (Supriatna *et al.*, 1995), stratigrafi daerah penelitian terdiri dari Komplek Batuan Ultramafik, Formasi Waigeo dan aluvial (Gambar 2).



Gambar 2 Peta geologi regional area penelitian pada peta geologi lembar Waigeo skala 1: 250.000 (Supriatna *et al.*, 1995)

Komplek Batuan Ultramafik (Jum) merupakan batuan tertua yang diperkirakan berumur Jura, terdiri dari dunit (Du), hazburgit (Hz), piroksenit (Pyx) dan serpentinit (S). Di antara batuan ultramafik ini, sering ditemukan sedimen palagos dan retas yang tidak terpetakan. Sementara itu, Formasi Waigeo (Tmw) merupakan batuan sedimen yang diendapkan terakhir pada periode Miosen Awal - Akhir. Formasi ini terdiri dari batugamping dengan sisipan batugamping pasir dan napal (Supriatna *et al.*, 1995).

2.2 Endapan Nikel Laterit

2.2.1 Proses pembentukan nikel laterit

Endapan nikel laterit adalah jenis endapan mineral nikel yang terbentuk akibat proses pelapukan kimia yang intensif pada batuan mafik atau ultramafik yang mengandung olivin (Butt & Cluzel, 2013; Freyssinet *et al.*, 2005; Golightly, 1981). Proses pembentukannya ini dikenal sebagai laterisasi. Kandungan nikel dari batuan induk, yang terdiri dari olivin dan berbagai bentuk serpentin (lizardit, antigorit, *nepouite*, *chrysotile*, serpentin poligonal), dapat mengandung Ni hingga 0,2 - 0,4% (Butt & Cluzel, 2013; Golightly, 1981; Herzberg *et al.*, 2013).

Proses lateritisasi adalah perubahan kimiawi pada batuan yang terjadi di daerah yang sering hujan dan kondisi geologisnya stabil. Proses ini berlangsung dalam waktu yang sangat lama dan menghasilkan lapisan tanah yang tebal dan unik. Selama proses ini, mineral-mineral penyusun batuan akan hancur dan larut dalam air. Mineral yang tidak larut akan tertinggal dan membentuk lapisan-lapisan tanah yang berbeda. Proses ini juga menghasilkan mineral baru yang lebih stabil (Elias, 2002). Berikut adalah gambaran singkat tentang proses lateritisasi dan efeknya:

- a. Pemecahan mineral primer: proses dimulai dengan pelapukan kimia mineral-mineral primer dalam batuan. Mineral-mineral ini berinteraksi dengan air tanah, mengakibatkan pemecahan struktur kristal dan pembebasan komponen kimiawi mereka.
- b. Pelepasan (*release*) dan pelindian (*leaching*): komponen-komponen kimia yang larut dalam air, seperti silika (SiO_2) dan berbagai kation seperti Mg^{2+} , akan terlarut dan dipindahkan dari tempat asalnya oleh pergerakan air.

- c. Konsentrasi residu: komponen-komponen yang tidak larut atau kurang larut, seperti oksida besi (Fe_2O_3), oksida aluminium (Al_2O_3), dan mineral lempung tertentu, akan terakumulasi. Proses ini menyebabkan konsentrasi elemen-elemen tersebut di lapisan tanah yang terbentuk.
- d. Pembentukan mineral baru: di lingkungan pelapukan yang lembap dan sering terjadi pelindian, mineral-mineral baru yang lebih stabil, seperti mineral laterit yang mengandung aluminium dan besi, akan terbentuk. Mineral-mineral ini lebih tahan terhadap proses pelapukan lebih lanjut.
- e. Pembentukan profil laterit: akibat dari proses tersebut, terbentuklah mantel berlapis dari bahan pelapukan yang menyelimuti batuan induk. Ini dikenal sebagai "profil laterit," yang menunjukkan lapisan-lapisan dengan kandungan mineral dan komponen kimia yang khas akibat dari pelapukan tersebut.

Gambaran yang lebih jelas tentang mekanisme yang terjadi selama proses lateritisasi dan bagaimana proses ini membentuk karakteristik tanah laterit dapat dilihat pada Tabel 1.

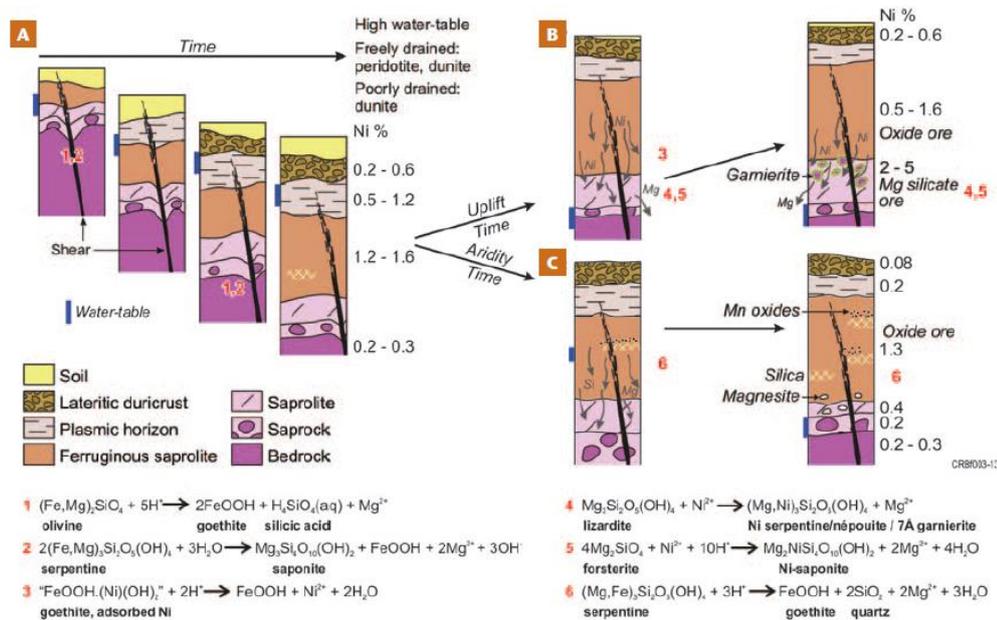
Tabel 1 Proses utama pelapukan kimia dan pengaruhnya pada batuan ultramafik (Elias, 2002)

Proses umum	Efek pada batuan ultramafik
Pelindian (<i>leaching</i>) unsur-unsur bergerak (<i>mobile</i>): alkali, alkali tanah	Pemecahan olivin, piroksen, serpentin dan pelindian Mg, Ni, Mn, Co
Pembentukan mineral sekunder yang stabil: oksida Fe dan Al, lempung (<i>clays</i>)	Pembentukan goetit, pembentukan smektit, adsorpsi Ni dari larutan
Pelindian (<i>leaching</i>) sebagian komponen yang kurang bergerak (<i>less mobile</i>): silika, alumina, Ti	Pelindian silika di hutan hujan (<i>rainforest</i>) dan iklim sabana lembab
Mobilisasi dan represipitasi parsial dari konstituen yang dikendalikan redoks: Fe, Mn	Pengendapan oksida Mn dan adsorpsi Ni dan Co dari larutan
Retensi dan konsentrasi residu mineral resisten: zirkon, kromit, kuarsa	Konsentrasi kromit sisa (<i>residual</i>)

Stratifikasi yang terlihat pada profil laterit merupakan hasil dari proses lateritisasi yang dinamis dan bertahap. Setiap lapisan pada profil merepresentasikan tahap perkembangan yang berbeda, mulai dari tahap awal pelapukan batuan dasar hingga tahap akhir di mana mineral-mineral yang lebih stabil terbentuk (Ahmad, 2008; Butt & Cluzel, 2013; Elias, 2002).

Pada lapisan paling bawah profil laterit, yang disebut *saprock*, pelapukan baru mulai terjadi pada bagian-bagian yang lemah di sepanjang batas mineral dan rekahan, sehingga banyak batuan segar masih tersisa dan produk alterasi relatif sedikit. Semakin ke atas, proses pelapukan semakin intensif sehingga sebagian besar mineral asli (primer) batuan sudah tergantikan oleh mineral baru. Pada zona yang mengalami rekahan lebih intens mengalami alterasi secara menyeluruh, sehingga menghasilkan fragmen batuan dasar yang tetap utuh tetapi tercampur dengan mineral primer dan produk hasil alterasi. Zona ini dikenal sebagai saprolit (Ahmad, 2008; Butt & Cluzel, 2013; Elias, 2002).

Pada lapisan-lapisan di atas saprolit, proses pelapukan telah begitu intensif sehingga struktur batuan asli sudah tidak terlihat lagi. Lapisan ini terutama terdiri dari mineral-mineral yang terbentuk akibat proses pelapukan, seperti goetit dan hematit. Zona ini sering disebut sebagai zona limonit karena kandungan mineral besinya yang tinggi (Ahmad, 2008; Butt & Cluzel, 2013; Elias, 2002). Ilustrasi yang memberikan gambaran menyeluruh tentang bagaimana nikel laterit terbentuk dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Pembentukan dan evolusi endapan oksida (*oxide*) dan *hydrous Mg silicate deposits*. (A) Perkembangan progresif regolith laterit yang berdiferensiasi baik di bawah iklim sabana yang lembab secara musiman di daerah dengan relief rendah dan tektonik yang stabil. (B) Dengan pengangkatan dan di bawah iklim yang sama, pelindian dan reaksi/pertukaran Ni menghasilkan silikat Mg yang mengandung air. (C) Profil dimodifikasi selama perubahan ke iklim kering, dengan presipitasi magnesit dan silika (Butt & Cluzel, 2013)

Proses pembentukan lapisan laterit pada batuan ultramafik sangat kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang dapat bervariasi di setiap lokasi. Akibatnya, setiap lapisan laterit memiliki ketebalan, kandungan mineral, dan susunan kimia yang unik. Faktor-faktor utama yang menentukan seberapa cepat dan sempurna batuan ultramafik melapuk menjadi laterit, serta karakteristik lapisan laterit yang terbentuk, adalah:

- a. Jenis batuan induk: Komposisi mineral dari batuan induk mempengaruhi komposisi kimia dari laterit. Jenis mineral penyusun batuan akan menentukan seberapa mudah batuan tersebut lapuk dan mineral baru apa yang akan terbentuk. Batuan ultramafik yang kaya akan mineral olivin dan piroksen merupakan bahan dasar utama yang umumnya menghasilkan bijih nikel laterit yang lebih baik (Butt & Cluzel, 2013; Freyssinet *et al.*, 2005; Golightly, 1981). Batuan ultramafik sebagai batuan dasar ada yang mengalami serpentinisasi. Derajat serpentinisasi akan sangat berpengaruh pada perkembangan bijih nikel ((Butt & Cluzel, 2013; Golightly, 1981)
- b. Iklim: Proses pembentukan nikel laterit sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim, terutama iklim tropis yang memiliki curah hujan tinggi dan suhu yang hangat. Curah hujan yang tinggi mempercepat pelapukan kimiawi dan penghilangan unsur-unsur larut, sedangkan suhu yang tinggi mempercepat reaksi kimia dalam proses pelapukan, sehingga batuan lebih cepat berubah (Butt & Cluzel, 2013).
- c. Topografi: Bentuk tanah dan topografi juga mempengaruhi distribusi dan pembentukan laterit. Kemiringan lereng dan ketinggian mempengaruhi laju erosi dan pencucian mineral. Kemiringan lereng memainkan peran penting dalam pembentukan endapan nikel laterit. Kemiringan lereng yang tinggi cenderung mengurangi ketebalan endapan karena peningkatan erosi, sedangkan kemiringan yang terlalu landai dapat mengakumulasi material pelapukan dengan lebih banyak tetapi mungkin menghadapi masalah drainase. Sistem drainase yang baik akan mengurangi waktu kontak antara air dan batuan, sehingga proses pelapukan menjadi lebih lambat. Kemiringan lereng yang sedang dianggap paling ideal karena memberikan keseimbangan antara akumulasi dan erosi, memungkinkan pembentukan endapan nikel laterit yang optimal.

- d. Waktu: Proses pembentukan nikel laterit memerlukan waktu yang sangat panjang, bahkan bisa berlangsung hingga jutaan tahun.
- e. Tektonik : Pergerakan lempeng tektonik dapat mengangkat atau menurunkan permukaan bumi, sehingga mempengaruhi erosi dan kedalaman air tanah. Sebaliknya daerah yang stabil secara tektonik akan memiliki bentuk lahan yang lebih datar dan proses pelapukan yang lebih lambat.
- f. Struktur Batuan : Retakan dan sesar pada batuan akan mempermudah air masuk dan mempercepat proses pelapukan.

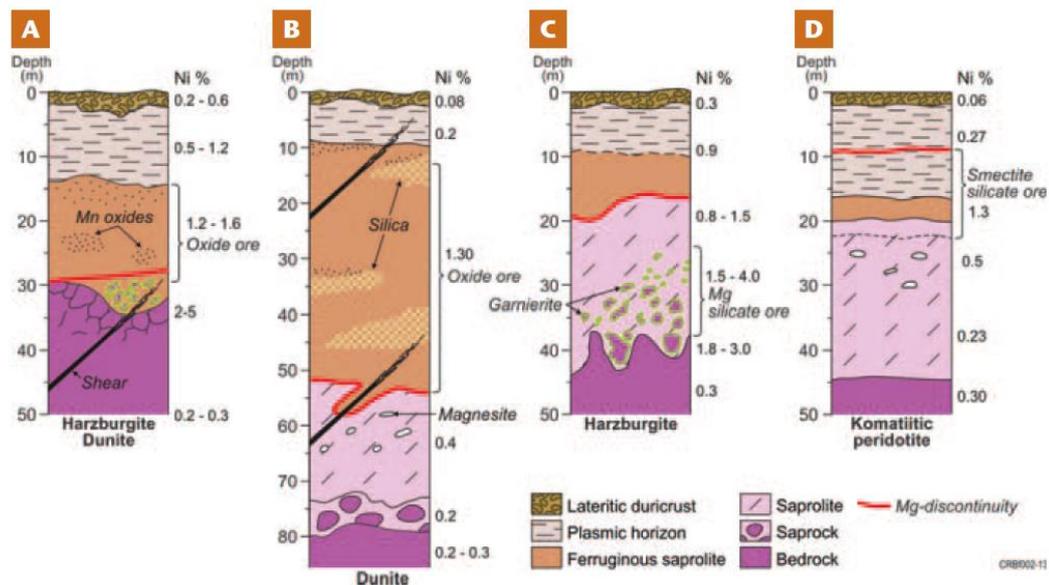
Pembentukan dan ketebalan profil laterit adalah hasil dari keseimbangan antara pembentukan lapisan baru akibat pelapukan kimia dan pengikisan lapisan atas akibat erosi. Berbagai faktor seperti jenis batuan, iklim, topografi, dan aktivitas tektonik saling mempengaruhi dan menentukan karakteristik profil yang terbentuk. Di lingkungan yang stabil, profil laterit dapat mencapai ketebalan yang signifikan dan usia yang tua, sedangkan di lingkungan yang aktif, profil cenderung lebih tipis dan lebih muda (Elias, 2002; Golightly, 1981).

2.2.2 Tipe profil laterit

Profil laterit nikel dapat bervariasi secara signifikan berdasarkan berbagai faktor geologis, lingkungan, dan mineralogi. Variasi ini mempengaruhi cara endapan nikel laterit terbentuk. Berdasarkan kumpulan bijih Ni utama, endapan Ni-laterit biasanya diklasifikasikan ke dalam kategori berikut:

- a. Endapan laterit oksida (*oxide*) yang didominasi (juga disebut “bijih limonit”) terdiri dari Fe-Mn-oksi-hidroksida (Gambar 4A,B).
- b. Endapan silikat lempung (*clay silicate*) yang terdiri terutama dari smektit yang kaya ini (Gambar 4D), dan
- c. Endapan silikat Mg hidrat (*hydrous Mg silicates*) yang didominasi oleh mineral silikat yang mengandung magnesium dan nikel, seperti serpentinit dan garnierit (Gambar 4C). Mineral-mineral ini terbentuk dari proses pelapukan batuan ultramafik dan biasanya berada di bawah lapisan laterit yang kaya akan oksida besi (Brand *et al.*, 1998; Butt & Cluzel, 2013; Freyssinet *et al.*, 2005).

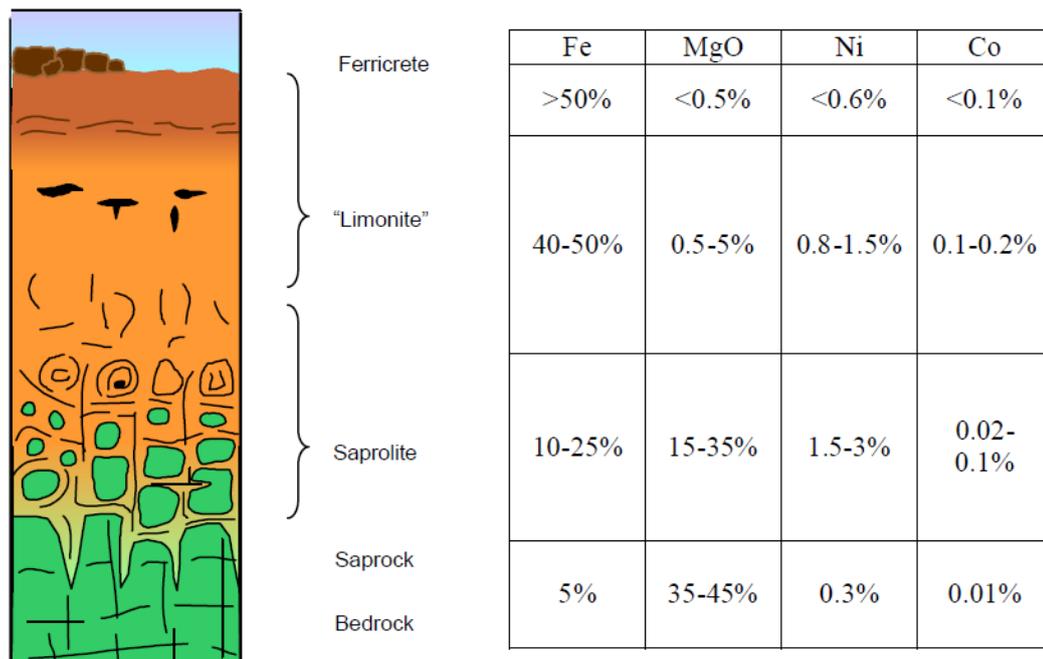
Karakteristik mineralogi endapan nikel laterit berkontribusi dalam menentukan jenis endapan nikel laterit dan pilihan pengolahannya (Fu *et al.*, 2014)



Gambar 4 Profil laterit yang terbentuk pada batuan ultramafik terserpentinisasi menunjukkan bijih nikel laterit utama. (A) *oxide*; (B) *partly silicified oxide*; (C) *hydrous Mg silicate*; (D) *Clay silicate* ((Butt & Cluzel, 2013)

Profil laterit yang khas umumnya terdiri dari peridotit yang belum mengalami perubahan atau telah terserpentinisasi di bagian bawah, yang kemudian dilapisi oleh zona saprolit. Zona saprolit ini mengandung sisa batuan induk dengan mineral sekunder seperti serpentin, goetit, dan *phyllosilicates* Mg-Ni hidrat (Butt & Cluzel, 2013; Freyssinet *et al.*, 2005). Pengayaan Ni umumnya terjadi pada lapisan ini tetapi juga terjadi pada zona transisi (antara limonit dan saprolit). Zona transisi ditandai dengan batas yang kaya smektit (Butt & Cluzel, 2013). Di dalam batuan ultramafik saprolitik, terdapat area “*boulder*” yang lebih tahan terhadap pelapukan dan ini cenderung membawa lebih sedikit mineralisasi Ni daripada saprolit yang lebih terdegradasi di sekitarnya.

Zona limonit terbentuk di bagian atas profil dan didominasi oleh oksida, yang meliputi goetit, hematit, maghemit, gibbsit, dan Mn-oksi-hidroksida. Bijih limonit dicirikan oleh kandungan besi (Fe) yang tinggi dan kandungan magnesium (Mg) dan silika (Si) yang rendah. Bagian paling atas dari profil adalah *iron cap* (yaitu ferikrit) dan umumnya diperkaya dengan hematit dan goetit (Elias, 2002; Freyssinet *et al.*, 2005). Secara umum, profil laterit nikel dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Profil nikel laterit secara umum (Elias, 2002)

Hal yang paling kritis yang mengontrol akumulasi dari profil laterit adalah topografi daerah tersebut. Medan yang curam cenderung kehilangan laterit sementara topografi yang lebih landai membantu menjaga produk sisa pelapukan di tempat untuk durasi yang lebih lama (Ahmad, 2008; Elias, 2002).

2.2.3 Mineralogi dan kimia endapan nikel laterit

Mineralogi endapan nikel laterit melibatkan berbagai mineral yang terbentuk melalui proses pelapukan dan lateritisasi batuan ultramafik. Di dalam batuan induk, mineral utama seperti olivin, serpentin, ortopiroksen, dan kadang-kadang klinopiroksen mengalami pelapukan (Tabel 2). Olivin merupakan mineral yang paling tidak stabil dan akan terurai pertama kali, melepaskan unsur magnesium (Mg) dan silikon (Si), sedangkan besi (Fe) yang terlepas teroksidasi menjadi goetit. Serpentin dan ortopiroksen juga mengalami hidrolisis, melepaskan Mg dan Si, dan digantikan oleh goetit (Ahmad, 2008; Butt & Cluzel, 2013; Elias, 2002).

Dalam proses pelapukan, mineral sekunder seperti garnierit, yang merupakan nikel silikat, terbentuk dari serpentin atau olivin. Goetit dan hematit, yang merupakan mineral besi hidroksida dan oksida, menggantikan mineral primer dan membentuk lapisan limonit di bagian atas profil laterit. Selain itu, mineral

lempung seperti smektit dan kaolinit mungkin terbentuk dari pelapukan lebih lanjut di bagian atas profil (Ahmad, 2008; Butt & Cluzel, 2013; Elias, 2002)..

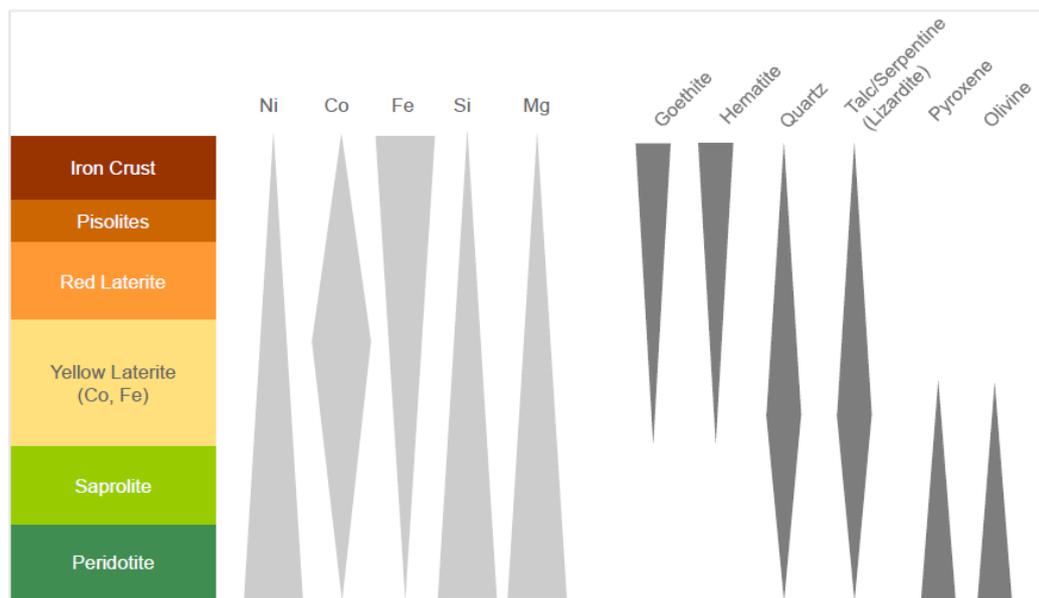
Endapan oksida mangan, seperti asbolan dan lioforit, juga dapat ditemukan dalam endapan laterit, memperkaya kandungan kobalt (Co) dan nikel (Ni). Selama proses lateritisasi, terdapat penurunan konsentrasi Mg ke atas dalam profil dan peningkatan konsentrasi Fe ke atas, mencerminkan perubahan mineralogi akibat pelapukan. Secara keseluruhan, nikel dalam endapan laterit biasanya ditemukan dalam mineral seperti garnierit, dengan konsentrasi Fe dan Mg yang bervariasi di sepanjang profil laterit sesuai dengan tingkat pelapukan dan transformasi mineral (Ahmad, 2008; Butt & Cluzel, 2013; Elias, 2002).

Tabel 2 Mineral yang umumnya berasosiasi dengan laterit dan batuan ultramafik

	<i>Primary Igneous Minerals</i>	<i>Hydrothermal Alteration Minerals (200-800 °C)</i>	<i>Laterite Weathering Minerals</i>
<i>Mafics</i>	<i>Olivine, Pyroxene</i>		
<i>Spinel</i>	<i>Magnetite, Chromite</i>		
<i>Hydrous mafic</i>		<i>Serpentine, Talc, Chlorite</i>	
<i>Clays</i>			<i>Kaolinite, Smectite (Montmorillonite, Nontronite), Illite, Mixed layer clays</i>
<i>Oxides</i>			<i>Hematite, Maghemite</i>
<i>Hydroxides</i>			<i>Goethite, Limonite, Bauxite, Gibbsite, Psilomelane, Manganese Wad</i>
<i>Garnierites (hydrous nickel silicates)</i>			<i>Serpentine equivalent (Nepouite, Pecroaite), Talc equivalent (Willemseite), Hydrous Talc (Kerolite) equiv. (Pimelite), Sepiolite equivalent (Commarite), High-water sepiolite equivalent (Falcondite), Chlorite equivalent (Nimite Brindleyite), Others (Noumeite, Reevesite)</i>

Karakteristik kimia endapan nikel laterit melibatkan beberapa elemen penting yang mempengaruhi komposisi dan distribusi nikel dalam profil laterit. Kandungan nikel dalam endapan laterit biasanya berkisar antara 0,3% hingga 3,0% Ni, dengan konsentrasi yang lebih tinggi ditemukan di bagian bawah profil di mana mineral seperti garnierit terkonsentrasi. Besi sering hadir dalam jumlah signifikan, terutama sebagai goetit dan hematit, dengan kadar Fe₂O₃ yang bervariasi antara 30% hingga 60%, dan lebih terkonsentrasi di bagian atas profil sebagai bagian dari lapisan limonit (Ahmad, 2008; Elias, 2002).

Secara keseluruhan, terdapat tren kimia khas dalam profil laterit di mana konsentrasi magnesium menurun dan konsentrasi besi meningkat ke atas, mencerminkan perubahan dari mineral silikat ke mineral oksida selama proses pelapukan (Gambar 6).



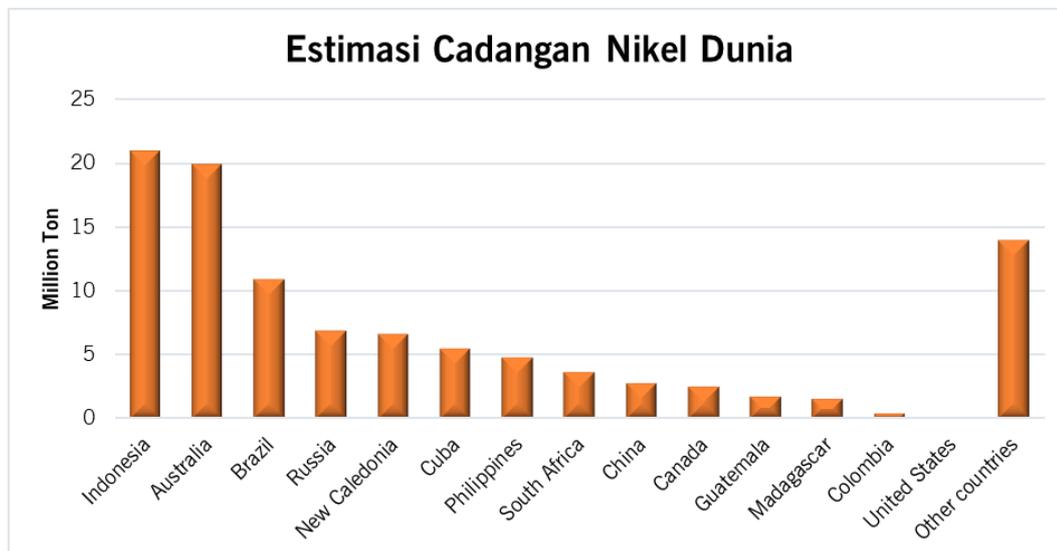
Gambar 6 Hubungan antara mineral dan kimia pada profil laterit silikat Mg-Si hidrat (König, 2021)

Magnesium, yang sering ditemukan di bagian bawah profil dalam mineral seperti serpentin dan olivin, menunjukkan kadar MgO yang dapat bervariasi dari kurang dari $< 2\%$ di bagian atas profil hingga lebih dari $> 20\%$ di bagian bawah. Kandungan magnesium biasanya menurun ke atas dalam profil akibat pelapukan. Silikon, sering kali dalam bentuk silika sekunder seperti kuarsa atau kalsedon, dapat menyebabkan pengenceran nikel. Kadar SiO_2 bervariasi tergantung pada tingkat pelapukan dan akumulasi silika, dengan silikon biasanya meningkat di bagian atas profil dan mempengaruhi kandungan nikel (Ahmad, 2008; Elias, 2002)..

Kobalt (Co), yang sering terakumulasi bersama nikel, biasanya memiliki kadar yang lebih rendah dibandingkan nikel. Kobalt dapat ditemukan dalam mineral oksida mangan seperti asbolan dan litioforit, dan terdistribusi serupa dengan nikel di bagian bawah profil limonit. Mangan juga sering terakumulasi dalam endapan laterit, biasanya dalam bentuk mineral oksida mangan seperti asbolan dan litioforit. Kadar MnO dapat bervariasi tergantung pada komposisi mineral, dengan mangan sering melimpah di lapisan oksida (Ahmad, 2008; Elias, 2002).

2.2.4 Distribusi endapan nikel laterit Indonesia

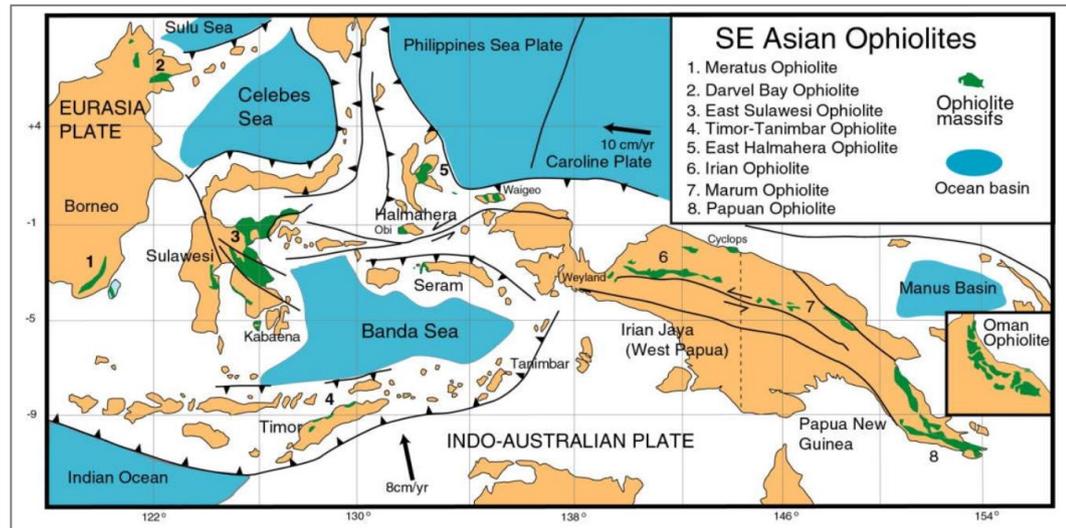
Indonesia merupakan salah satu negara penghasil nikel laterit terbesar di dunia. Berdasarkan data dari United States Geological Survey (USGS) tahun 2020, Indonesia berada di posisi teratas dengan potensi cadangan yang mencapai 20% dari total cadangan nikel global (Gambar 7). Ini menegaskan peran penting Indonesia dalam industri pertambangan bijih nikel dunia.



Gambar 7 Estimasi cadangan nikel dunia (USGS, 2020)

Batuan ultramafik yang tersingkap di permukaan terjadi di Indonesia Timur. Sebagian besar tersingkap di Kalimantan bagian Timur, Sulawesi, Halmahera, Busur Banda dan Papua. Batuan ultramafik yang tersingkap di daerah tersebut sebagian besar berasal dari lapisan peridotit batuan ofiolit. Gambar 8 menunjukkan sebaran ofiolit di Indonesia Timur dengan penyusun utama batuan ultramafik tersingkap di permukaan (Kadariusman, 2013).

Batuan ultramafik tersingkap besar di daerah tersebut terjadi karena kombinasi obduksi atau emplasemen ofiolit ke tepi kontinen/busur pulau dan laju erosi batuan kerak yang tinggi. Karena besarnya batuan yang tersingkap di permukaan ini, Indonesia sering dianggap sebagai negara dengan singkapan batuan ultramafik terbesar di dunia, yang menjadikan Indonesia juga sebagai negara dengan deposit nikel laterit terbesar di dunia. Secara singkat, sumber daya nikel di Indonesia mirip dengan "posisi Arab Saudi di sumber daya minyak dunia" (Kadariusman, 2013).



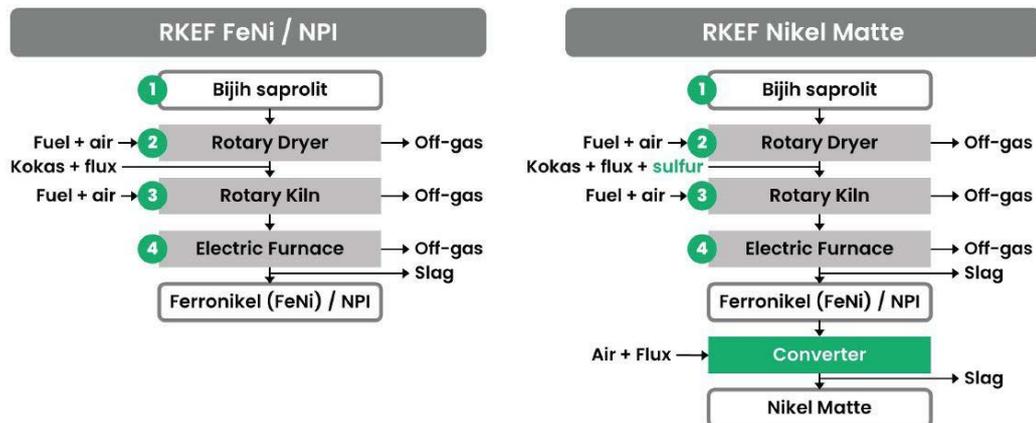
Gambar 8 Sebaran ofiolit di kawasan timur Indonesia (Kadarusman, 2013)

2.3 Proses Pengolahan Pirometalurgi Bijih Nikel Laterit

Metode pirometalurgi dalam pengolahan bijih nikel laterit meliputi produksi feronikel dan *nickel pig iron* (NPI) melalui proses peleburan *rotary kiln reduction–electric furnace* (RKEF), serta produksi nikel-sulfida matte melalui peleburan reduksi (*reduction-smelting*) (Prihatmoko *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017; Warner *et al.*, 2006). Metode pirometalurgi umumnya lebih cocok digunakan untuk bijih laterit saprolit (+/- pengayaan supergen garnierit) yang memiliki kandungan nikel tinggi. Bijih ini mengandung kobalt dan besi secara proporsional lebih rendah dibandingkan dengan bijih limonit. Rasio Ni/Co dalam umpan *smelter* umumnya ~ 40 (Dalvi *et al.*, 2004). Nikel dan besi dari bijih direduksi menjadi keadaan logam selama proses reduksi dan kemudian produk feronikel dipisahkan dari terak (*slag*) melalui peleburan. Produksi nikel-sulfida matte melalui peleburan reduksi merupakan variasi ekstraksi feronikel melalui reduksi dan peleburan dengan menambahkan sulfur ke umpan (*feed*) kalsin dalam tahap peleburan (Wang *et al.*, 2017).

Dalam pengolahan pirometalurgi konvensional dengan menggunakan RKEF bijih terlebih dahulu dikeringkan, kemudian dikalsinasi (dan kadang-kadang direduksi) dalam *rotary kiln* dan dilebur dalam *electric furnace* dengan adanya karbon (Pintowantoro & Abdul, 2019; Wang *et al.*, 2017). Jika matte adalah produk yang diinginkan, maka sulfur ditambahkan ke *kiln*. *Crude metal/matte* diproses

lebih lanjut/dimurnikan untuk menghasilkan produk akhir. Bagan alir proses RKEF digambarkan dalam Gambar 9.



Gambar 9 Diagram alir peleburan dengan metode RKEF (Pintowantoro & Abdul, 2019)

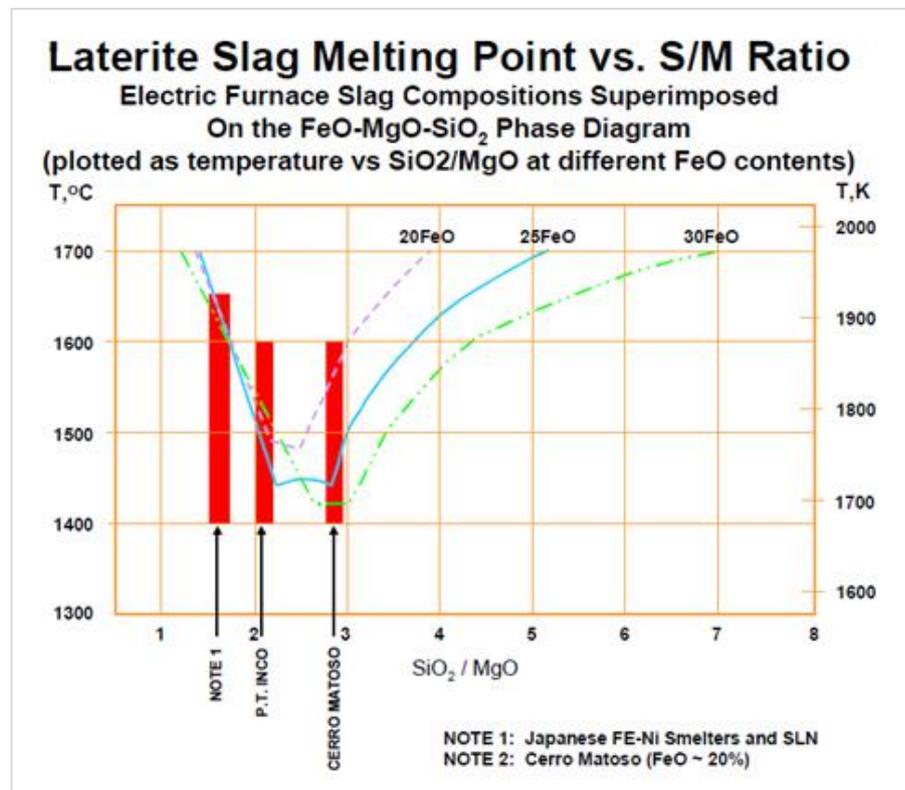
Proses pengolahan bijih laterit diawali dengan tahap pengeringan untuk mengurangi kadar air yang tinggi. Selanjutnya, bijih dikalsinasi pada suhu 700°C untuk menghilangkan air terikat dan senyawa volatil. Proses kalsinasi ini juga merubah mineral goetit menjadi hematit, yang merupakan bentuk besi oksida yang lebih stabil (Wang *et al.*, 2017). Perubahan mineral ini sangat penting karena mempengaruhi efisiensi proses reduksi berikutnya. Dalam penelitian oleh Zevgolis *et al.*, 2010, diteliti bagaimana fase bijih laterit berubah selama pemanasan awal dan reduksi dengan karbon monoksida untuk menilai dampaknya terhadap proses reduksi akhir (Zevgolis *et al.*, 2010). Penelitian ini mengidentifikasi bahwa selama pemanasan awal, terjadi transformasi dari goetit menjadi hematit, serta dekomposisi klorit dan serpentin. Bijih yang dominan mengandung goetit menunjukkan tingkat metalisasi besi yang lebih tinggi, dengan efisiensi reduksi mencapai 95%, sedangkan bijih yang dominan mengandung hematit hanya mencapai reduksi sebesar 50%. Reduksibilitas yang lebih tinggi tampaknya disebabkan oleh luas permukaan spesifik yang lebih tinggi dari jenis bijih goetit. Oleh karena itu, pengendalian tahap pra-reduksi dalam *rotary kiln* sangat penting karena berpengaruh signifikan terhadap perolehan (*recovery*) nikel dan kandungan feronikel/NPI (Wang *et al.*, 2017)

Nikel dalam bijih nikel saprolit terdapat dalam bentuk garnierit ($\text{Ni}_3\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$). Mineral garnierit akan terurai saat dipanaskan pada suhu 700°C . Selain garnierit, mineral yang terkandung dalam bijih laterit saprolit adalah goetit, serpentin, dan kuarsa. Saat suhu dinaikkan hingga 400°C , fase bijih berubah. Semua fase akan berubah menjadi serpentin. Ada dua jenis proses dehidroksilasi yang terjadi saat bijih laterit saprolit dipanaskan. Dehidroksilasi serpentin pertama selesai saat suhu proses di atas 650°C . Proses dehidroksilasi kedua selesai pada suhu 750°C (Wang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2015). Sebuah studi rinci tentang perlakuan termal bijih nikel garnieritik dengan fase awal bijih adalah klorit ($(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ni})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), talk ($(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ni})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), kuarsa (SiO_2), dan hematit (Fe_2O_3). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanggangan pada suhu yang lebih rendah yaitu 400°C dan 500°C tidak membuat perubahan pada fase mineral. Namun, ketika suhu mencapai 600°C , mineral didominasi oleh klorit dan klorit yang terdehidrasi sebagian. Ketika suhu dinaikkan hingga 700°C , sejumlah serpentin terurai menjadi forsterit (Mg_2SiO_4). Di atas 800°C , klorit berubah menjadi forsterit dan enstatit (MgSiO_3). Pada suhu 1000°C , mineral talk juga berubah menjadi forsterit dan enstatit. Jadi, setelah 1000°C , fase bijih adalah forsterit, enstatit, hematit, dan kuarsa. Ketika suhu dinaikkan menjadi 1300°C , fase bijih nikel saprolitik berubah menjadi mineral kompleks. Mineral tersebut didominasi oleh olivin ($\text{Mg}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{SiO}_4$) (Li *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017)

Proses pirometalurgi membutuhkan energi yang intensif karena semua *free moisture* dan air gabungan harus dihilangkan dalam proses dan semua bahan harus terlebih dahulu di kalsinasi dan kemudian dilebur untuk membentuk terak (*slag*) pada suhu sekitar 1600°C . Ini membutuhkan bahan bakar hidrokarbon (batubara, minyak atau nafta) dan tenaga listrik (Dalvi *et al.*, 2004).

Gambar 10 menunjukkan titik leleh *slag* sebagai fungsi rasio SiO_2/MgO dan kandungan FeO yang berbeda. Dalam tungku listrik perbedaan suhu antara logam atau matte dan *slag* berada dalam kisaran tertentu, umumnya antara 100 hingga 200°C pada antarmuka logam-*slag*, tergantung pada kondisi listrik di tungku dan karakteristik *slag*. Untuk bijih dengan *slag* titik leleh rendah (yang memiliki komposisi *slag* dalam titik leleh rendah dalam kisaran rasio SiO_2/MgO 1,8 hingga 2,2) fase yang mengandung nikel harus meleleh rendah. Oleh karena itu produksi

matte lebih cocok untuk bijih tersebut. Bijih yang menghasilkan *slag* leleh tinggi (yaitu rasio $\text{SiO}_2/\text{MgO} < 2$ atau $> 2,5$) lebih cocok untuk menghasilkan feronikel. Bijih dalam rasio SiO_2/MgO dalam kisaran menengah (2,3 - 2,5) sangat korosif terhadap lapisan tungku dan memerlukan perubahan pada bahan kimia umpan (dengan pencampuran/ *blending* atau fluks) sebelum dapat dilebur (Dalvi *et al.*, 2004).

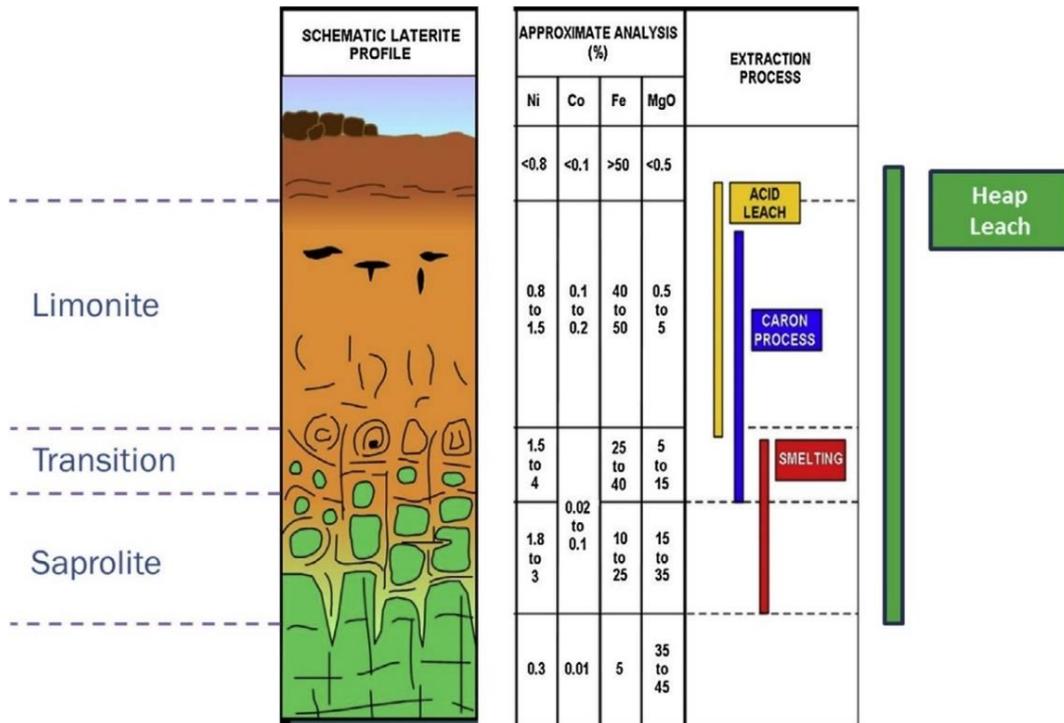


Gambar 10 Titik leleh *slag* vs rasio SiO_2/MgO (Dalvi *et al.*, 2004)

Untuk semua operasi nikel laterit pirometalurgi, bijih harus memenuhi kriteria yang cukup spesifik untuk menghasilkan proyek yang menarik secara komersial (Oxley & Barcza, 2013; Oxley *et al.*, 2016). Opsi pemrosesan untuk laterit nikel dapat dilihat pada Gambar 11.

Pabrik peleburan FeNi, *Nickel Pig Iron* (NPI) dan Ni matte saat ini beroperasi dengan bijih nikel laterit yang memenuhi kriteria yang cukup spesifik dalam hal rasio kadar Ni, Fe/Ni, Ni/Co dan SiO_2/MgO (Oxley & Barcza, 2013; Oxley *et al.*, 2016). Biasanya rasio Fe/Ni 12, rasio Ni/Co 40 dan rasio SiO_2/MgO 1,9 jika kriteria ini terpenuhi maka *recovery* dan kualitas produk yang baik dapat diperoleh. Rasio ini dapat diperpanjang tetapi kemudian *recovery* dan kualitas

produk jauh lebih rendah dengan biaya operasi yang serupa sehingga menghasilkan operasi yang tidak menguntungkan (Tabel 3).



Gambar 11 Opsi pemrosesan untuk laterit nikel (Brand *et al.*, 1998)

Tabel 3 Karakteristik bijih nikel laterit untuk peleburan menjadi FeNi, NPI atau Ni matte (Oxley & Barcza, 2013)

Deskripsi	Fe/Ni	Ni/Co	SiO ₂ /MgO	Keterangan
<i>Typical</i>	<12	40	<1,9	<i>Good grade/recovery</i>
<i>Extended</i>	>12 <20	20	>3,5 <7	<i>Lower grade/recovery</i>
<i>NIP (Ni intermediate product) blend</i>	5 - 30	10 - > 40	1,5 - 5	<i>High grade/recovery</i>

Pabrik peleburan feronikel membutuhkan kadar Ni biasanya di atas 1,8%, dengan kadar awal >2% diperlukan hingga 5 tahun untuk memungkinkan pengembalian modal. Mereka juga membutuhkan rasio Fe/Ni <12, Ni/Co >30 dan SiO₂/MgO <1,9 untuk menjadi operasi yang sukses secara komersial (Oxley & Barcza, 2013; Oxley *et al.*, 2016).

Persyaratan kimia bijih di setiap *smelter* berbeda-beda tergantung dari teknologi pengolahan yang digunakan. Pada umumnya pabrik peleburan nikel di

Indonesia menggunakan teknologi pirometalurgi. Tabel 4 berikut adalah persyaratan kimia bijih umum dalam teknologi pirometalurgi.

Tabel 4 Karakteristik bijih nikel laterit untuk peleburan bijih nikel di Indonesia (Kadarusman *et al*, 2020)

Pirometalurgi						
Teknologi Pemrosesan	Produk	Contoh Perusahaan	Ni (%)	Fe (%)	S/M Rasio	Fe/Ni Rasio
<i>Direct Reduction Kiln</i>	NPI, <i>Sponge Iron</i>	Silo, Blackspace	1,2	>35	>2	>12
RKEF	FeNi, Ni Matte	Antam, Vale	>2	14 - 18	1,8 - 2,2	<6,5 - 7,5
	NPI	ENFI, IMIP, VDNI, IWIP, Harita (MSP)	>1,6 - 1,8	16 - 20	1,8 - 2,5	>10
BF	NPI (4 - 8% Ni)	IMIP, BSI, COR, Fajar, dll.	1,4 - 1,6	20 - 30 / 35	<2,5	>12
			1,3	>35		