

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sumberdaya nikel saat ini 70% adalah jenis laterit dalam bentuk senyawa oksida dan sisanya sulfida (Dalvi *et al.*, 2004). Semakin berkurangnya cadangan sumber nikel sulfida maka praktis pengembangan diarahkan ke pemanfaatan nikel laterit sebagai sumber logam nikel. Untuk bijih laterit, kadar nikel minimum yang menguntungkan untuk diolah secara pirometalurgi adalah 1,8%, padahal lebih dari 50% cadangan nikel laterit mempunyai kadar $< 1,45\%$ (Setiawan, 2016). Kadar Ni 1,8% umumnya terdapat di profil saprolit. Dalam profil saprolit ini, mineral-mineral kaya magnesium seperti olivin dan piroksin mengalami pelapukan dan alterasi, yang menghasilkan konsentrasi nikel lebih tinggi dibandingkan profil limonit di bagian atas. Perbedaan kadar nikel dalam bijih saprolit tergantung pada tingkat pelapukan dan distribusi mineral nikel di dalamnya. Namun, terdapat variasi kadar nikel di dalam bijih saprolit, termasuk adanya fraksi bijih dengan kadar nikel rendah, di bawah 1,8%, yang dianggap kurang menguntungkan untuk diolah melalui pirometalurgi (Dalvi *et al.*, 2004)

Salah satu tantangan dalam pengolahan bijih saprolit yaitu kompleksitas mineral dimana bijih saprolit memiliki struktur mineral yang kompleks dan heterogen, sehingga sulit untuk memisahkan mineral-mineral yang diinginkan secara efektif (Oxley and Barcza, 2013; Farrokhpay *et al.*, 2019). Bijih saprolit umumnya mengandung partikel-partikel berukuran halus dengan kadar Ni yang lebih tinggi dibandingkan dengan partikel yang berukuran lebih besar dengan kadar Ni yang lebih rendah. Bolder bijih saprolit/atau fraksi batuan umumnya tidak lapuk atau tidak mengalami pelapukan sempurna sehingga tidak terjadi pengayaan Ni dan menjadi dilusi dalam bijih saprolit. Boulder dalam bijih saprolit selain dapat mempengaruhi kadar Ni juga mempengaruhi kadar elemen-elemen lainnya seperti Fe dan perbandingan silika magnesium (SM Rasio) yang sangat berpengaruh terhadap proses pengolahan/*smelting*.

Proses *upgrading*/benefisasi bijih nikel laterit (limonit dan saprolit) secara fisik, menggunakan metode *gravity separation* dan *magnetic separation* sangat sulit

dilakukan (Warner *et al.*, 2006; Farrokhpay *et al.*, 2019). Hal tersebut dikarenakan unsur nikel dan besi terikat dengan senyawa kompleks hidrosilikat yaitu berupa lizardit/serpentin $(\text{Mg, Fe, Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ dan hidroksida seperti gutit (FeOOH). Menurut Oxley and Barcza (2013) bahwa saat ini sebanyak 80% pengolahan bijih nikel laterit menjadi *Nickel Pig Iron* (NPI) dan ferronikel (FeNi) umumnya menggunakan teknologi pirometalurgi seperti *Blast Furnace* (BF), *Submerged Arc Furnace* (SAF) dan *Rotary Kiln Electric Arc Furnace* (RKEF), dikarenakan teknologi tersebut sudah terbukti (*well-proven*) pada skala industri (Rao *et al.*, 2013).

Salah satu tantangan dalam pengolahan bijih saprolit yaitu kompleksitas mineral dimana bijih saprolit memiliki struktur mineral yang kompleks dan heterogen, sehingga sulit untuk memisahkan mineral-mineral yang diinginkan secara efektif. Bijih saprolit umumnya mengandung partikel-partikel berukuran halus dengan kadar Ni yang lebih tinggi dibandingkan dengan partikel yang berukuran lebih kasar dengan kadar Ni yang lebih rendah. Bolder bijih saprolit/atau fraksi batuan umumnya tidak lapuk atau tidak mengalami pelapukan sempurna sehingga tidak terjadi pengayaan Ni dan menjadi dilusi dalam bijih saprolit. Boulder dalam bijih saprolit selain dapat mempengaruhi kadar Ni juga mempengaruhi kadar elemen-elemen lainnya seperti Fe dan perbandingan silika magnesia (SM Rasio) yang sangat berpengaruh terhadap proses pengolahan/*smelting*.

Fraksinasi ukuran butir bijih saprolit menjadi sangat penting untuk dilakukan sebelum proses pengolahan. Metode fraksinasi bijih saprolit merupakan metode yang memisahkan partikel-partikel bijih saprolit berdasarkan ukurannya. Fraksinasi ukuran butir bijih saprolit dapat meminimalkan sebagian besar material seperti fraksi kasar/bolder dengan kadar nikel rendah dan mengandung mineral *gangue*.

Metode fraksinasi bijih saprolit ini diharapkan dapat memenuhi spesifikasi komposisi kimia dan mineralogi sebagai *ore feed* dalam proses pirometalurgi. Fraksinasi bijih saprolit memungkinkan identifikasi dan seleksi ukuran butir yang optimal. Dengan memisahkan bijih berdasarkan ukuran butir, metode ini dapat meningkatkan kadar nikel baik sebagai umpan/*ore feed* maupun peningkatan kadar logam nikel di produk akhir, mengurangi kadar mineral *gangue*, dan menyesuaikan rasio SiO_2/MgO dan Fe/Ni sesuai dengan persyaratan pengolahan, sehingga meningkatkan stabilitas dan efisiensi keseluruhan proses peleburan nikel

1.2. Rumusan Masalah

Karakteristik bijih saprolit yang terbentuk melalui proses pelapukan batuan ultrabasa menunjukkan perbedaan komposisi mineralogi dan kimia. Perbedaan ini tidak hanya terkait dengan distribusi mineral pembawa nikel, seperti serpentin, olivin, dan gutit, tetapi juga distribusi ukuran butir atau fraksi bijih. Setiap fraksi bijih saprolit memiliki sifat fisik dan kimia yang berbeda, yang memengaruhi kadar nikel, komposisi mineral *gangue* dan efisiensi proses pengolahan. Fraksinasi bijih saprolit menjadi sangat penting untuk memahami bagaimana komposisi mineralogi dan kimia bijih saprolite pada berbagai fraksi ukuran.

Perbedaan distribusi ukuran butir memiliki pengaruh signifikan terhadap kadar nikel (Ni) dan tingkat *recovery*. Fraksi kasar umumnya didominasi oleh mineral primer cenderung memiliki kadar nikel lebih rendah, sementara fraksi halus sering kaya akan kandungan nikel. Akan tetapi distribusi kandungan Ni pada setiap fraksi belum sepenuhnya dipahami, terutama bagaimana hubungan antara fraksi ukuran butir terhadap kadar Ni dan *recovery*.

Adanya perbedaan fraksi bijih saprolit sebagai umpan sangat menentukan keberhasilan dan efisiensi terhadap proses peleburan khususnya pada teknologi pirometalurgi. Dalam penelitian ini juga, diuraikan bagaimana implikasi komposisi mineralogi dan kimia bijih sarolite sebagai umpan pada peleburan bijih. Komposisi mineralogi dan kimia bijih saprolit ini mempengaruhi parameter kunci peleburan, seperti rasio slag/metal, konsumsi energi, dan kadar Ni dalam nikel metal.

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan studi fraksinasi ukuran butir bijih saprolit terhadap peningkatan kadar Ni dan implikasinya sebagai *ore feed* pirometalurgi sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis komposisi mineralogi dan kimia bijih saprolite pada berbagai fraksi ukuran butir
2. Untuk menganalisis pengaruh/hubungan antara fraksi ukuran butir terhadap peningkatan kadar Ni dan *recovery*.
3. Untuk memprediksi pengaruh komposisi mineral dan kimia bijih saprolit sebagai umpan pada pabrik peleburan.

1.4. Manfaat Penelitian

Berdasarkan uraian di atas maka manfaat penelitian yang dapat diperoleh yaitu sebagai berikut:

- a. Penelitian ini memberikan wawasan mendalam mengenai hubungan antara ukuran butir bijih saprolit dengan kadar nikel dan *recovery*. Dengan memahami fraksi bijih, dapat ditentukan parameter proses benefisiassi yang optimal, seperti ukuran bijih sebagai *ore feed* dan ukuran *screen*.
- b. Informasi yang diperoleh dari penelitian ini memungkinkan pemilihan fraksi bijih saprolit yang lebih tepat untuk proses pengolahan. Dengan mengetahui fraksi bijih saprolit yang memiliki kadar Ni yang optimal, kualitas Ni metal dalam produk akhir dapat ditingkatkan dan meminimalkan biaya produksi.
- c. Informasi tentang persentase mineral memungkinkan pengembangan teknologi pengolahan yang lebih efektif dalam menangani komponen *gangue* seperti olivin dan piroksin, atau teknik pengolahan alternatif yang lebih sesuai dengan karakteristik mineralogi bijih saprolit.
- d. Penelitian ini dapat menjadi panduan bagi kegiatan eksplorasi dan penambangan bijih saprolit. Dengan mengetahui karakteristik bijih saprolit yang diinginkan, kegiatan eksplorasi dapat lebih fokus dan efisien dalam menemukan cadangan yang ekonomis untuk ditambang.
- e. Dengan pemilahan fraksi yang lebih selektif dan efisien, limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan dapat dikurangi sehingga mengurangi konsumsi energi dan dampak negatif lainnya terhadap lingkungan.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian fraksinasi ukuran butir bijih saprolit terhadap peningkatan kadar nikel dilakukan di PT. Ceria Nugraha Indotama Kecamatan Wolo Kabupaten Kolaka. Penelitian diawali dengan pengambilan sampel bijih saprolit yang representatif dilanjutkan dengan proses fraksinasi dengan menggunakan *screening*. Pengambilan sampel dilakukan di pit penambangan dan stockpile. Karakterisasi fraksi bijih saprolit dimana kadar kimia dengan analisis *X-ray Fluorescence* (XRF), komposisi mineralogi dengan analisis *X-ray Diffraction* (XRD) dan pengamatan petrografi (sayatan tipis). Perhitungan peningkatan kadar Ni fraksi bijih saprolit

dengan metode *weighted average* dimana nilai rata-rata yang dihitung dengan memperhitungkan timbangan/bobot untuk setiap data.

Hasil dari penelitian ini berupa rekomendasi fraksi bijih saprolit yang paling memungkinkan untuk diolah secara pirometalurgi khususnya untuk PT. Ceria Nugraha Indotama dengan pertimbangan kadar Ni maksimal fraksi kumulatif, *recovery*, dan komposisi mineralogi. Hasil penelitian ini tidak mewakili seluruh area PT Ceria Nugraha Indotama karena terbatasnya data sampling. PT Ceria Nugraha Indotama sendiri dalam hal ini melakukan *Feasibility Study* (FS) untuk pembangunan smelter pirometalurgi teknologi RKEF dengan spesifikasi bijih tersendiri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

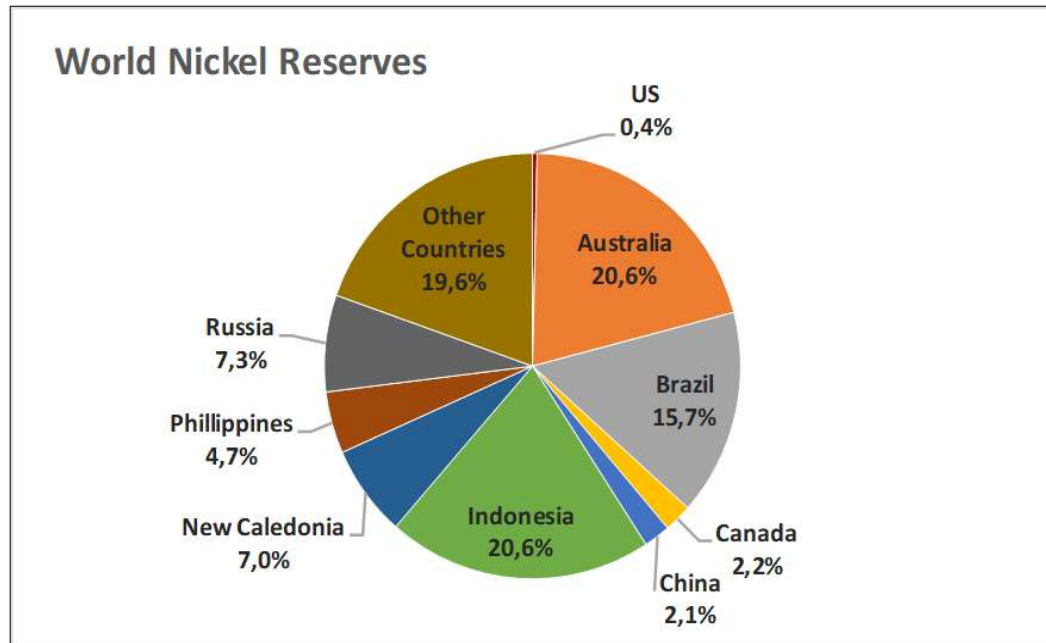
2.1. Endapan Bijih Nikel Laterit

Industri nikel Indonesia telah mengalami pertumbuhan pesat dalam beberapa tahun terakhir karena sumber daya nikel yang melimpah dimana Indonesia merupakan produsen nikel terbesar di dunia, dengan produksi sebesar 1,125 kt pada tahun 2022, naik sebesar 13% dibandingkan tahun 2021 (Global Data, 2022). Indonesia memiliki cadangan nikel yang besar dari deposit laterit, menjadikannya pemain penting di pasar nikel global, menurut *Mineral Commodity Summaries 2023* yang diterbitkan oleh USGS seperti pada Gambar 1. Indonesia merupakan salah satu negara dengan cadangan nikel terbesar, dengan cadangan nikel terbesar. perkiraan cadangan 21% dari cadangan nikel dunia. Endapan nikel sulfida, yang biasa ditemukan pada batuan ultrabasa, bermutu tinggi dan relatif mudah untuk diproses belum ditemukan secara masif. Namun eksplorasi dan pengembangannya di Indonesia masih dalam tahap *discovery*. Sebaliknya, endapan laterit yang lebih banyak terdapat di Indonesia, terbentuk melalui proses pelapukan dan dicirikan oleh akumulasi mineral oksida dan hidroksida yang kaya akan nikel. Deposito laterit umumnya memiliki kadar nikel yang lebih rendah tetapi tonase yang lebih besar.

Produk nikel biasanya dikategorikan menjadi dua kelas. Kelas 1 mengacu pada produk bermutu tinggi yang terutama digunakan dalam teknologi baterai. Sedangkan produk kelas 2 meliputi feronikel (FeNi) dan nickel pig iron (NPI). Nikel kelas 2 banyak digunakan sebagai logam paduan dalam produksi baja tahan karat, yang merupakan konsumen unit nikel terbesar. Kadar bijih nikel Indonesia untuk limonit umumnya berkisar antara 0,8% hingga 1,5%, sedangkan kadar saprolit dapat melebihi 1,8%. Saat ini, sebagian besar konsumsi nikel (60%-70%) berasal dari produksi baja tahan karat, namun proporsi ini diperkirakan akan berubah secara drastis karena pesatnya penggunaan baterai *Lithium Ion (Li-Ion)* yang digunakan pada kendaraan listrik.

Untuk mendukung pengembangan industri *Electric Vehicle (EV)* dalam negeri, pemerintah telah menerapkan berbagai kebijakan dan regulasi. Peraturan

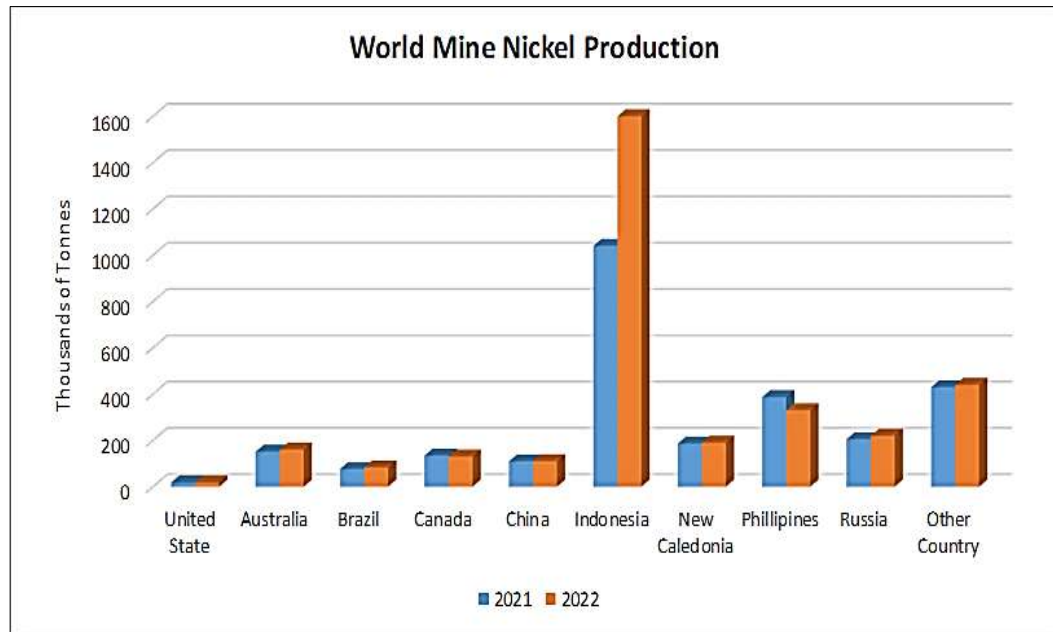
yang paling menonjol adalah Keputusan Presiden No.55/2019 yang secara tegas mengukuhkan pengembangan industri kendaraan listrik dalam negeri sebagai prioritas nasional (KISI, 2022).



Gambar 1. Estimasi Cadangan Nikel Dunia (USGS, 2023)

Permintaan global yang signifikan terhadap produk nikel, yang didorong oleh kebutuhan akan baja tahan karat dan baterai kendaraan listrik (EV), memberikan peluang yang baik bagi Indonesia. Sebagai produsen nikel terbesar di dunia, Indonesia memiliki posisi yang baik untuk memanfaatkan permintaan ini dan mendorong pertumbuhan industri smelter nikel di dalam negeri.

Produksi tambang nikel global meningkat sebesar 10,9% pada tahun 2021 dan selanjutnya sebesar 18,6% pada tahun 2022. Diperkirakan akan mengalami pertumbuhan sebesar 16,1% pada tahun 2023. Produksi nikel tambang dunia dapat dilihat pada Gambar 2. Larangan ekspor bijih yang diberlakukan Indonesia pada tahun 2020 mengakibatkan seluruh hasil tambang diubah menjadi produk nikel. Hal ini termasuk produksi *Nickel Pig Iron* untuk sektor *stainless steel* sehingga menyebabkan pergeseran *tren off-shoring* dari China ke Indonesia. Selain itu, terdapat fokus pada pengembangan kapasitas pemrosesan untuk sektor baterai, di mana para operator mengeksplorasi teknologi inovatif untuk mengatasi tantangan dalam mengubah sumber daya nikel laterit Indonesia yang berkadar rendah menjadi bahan yang cocok untuk baterai lithium-ion.



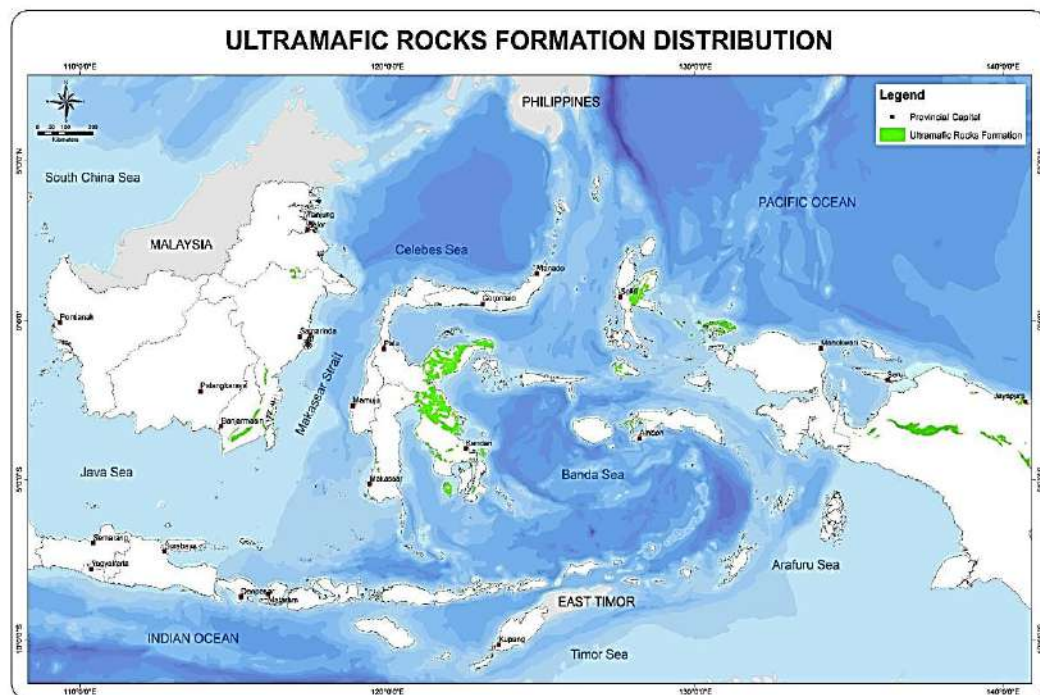
Gambar 2. Produksi Nikel Tambang Dunia (USGS, 2023)

2.1.1. Geologi dan Mineralisasi Nikel Laterit

Keberadaan batuan ultrabasa yang tersingkap dalam jumlah besar di daratan Indonesia disebabkan oleh kombinasi obduksi atau emplasemen ofiolit ke tepi benua atau busur pulau dan tingginya laju erosi batuan kerak. Contoh daerah dengan batuan ultrabasa besar yang tersingkap antara lain Ofiolit Sulawesi Timur (ESO) dan Ofiolit Halmahera. Batuan ultrabasa dalam kompleks akresi biasanya tidak terlihat jelas di permukaan dan bercampur dengan berbagai jenis batuan lain, selain peridotit. Contoh kompleks tersebut antara lain kompleks Lok-Ulo di Karangsambung, Jawa Tengah, dan kompleks Bantimala di Sulawesi Selatan.

Batuan ultrabasa permukaan dapat diamati di berbagai wilayah Indonesia, terutama di wilayah pedalaman Kalimantan Timur, Sulawesi, Halmahera, Busur Banda, dan Papua. Batuan ultrabasa yang tersingkap di Indonesia Timur terutama berasal dari lapisan peridotit batuan ofiolit. Namun, beberapa batuan ultrabasa diyakini berasal dari peridotit orogenik, seperti yang dijelaskan oleh beberapa penulis di Kalimantan Selatan dan Sulawesi Tengah (Monnier *et al.*, 1999; Kadarusman and Parkinson, 2000). Gambar 3 mengilustrasikan sebaran ofiolit di Indonesia Timur, yang menyoroti prevalensi batuan ultrabasa yang tersingkap (Kadarusman, 2001).

Deretan ofiolit, yang terdiri dari sekuen ultramafik dan mafik, ditemukan di sepanjang pesisir utara Lengan Barat. Pada sebagian besar wilayah ESO, sekuen ultramafik mendominasi area Lengan Tenggara, bagian selatan Lengan Barat, dan Pulau Kabaena, sementara unit batuan vulkanik basal muncul di wilayah Lamasi. Batuan ultramafik di Sulawesi Tenggara dan Sulawesi Tengah sebagian besar terdiri dari peridotit yang telah mengalami serpentinisasi dengan tingkat yang bervariasi (Kadarusman *et al.*, 2004).

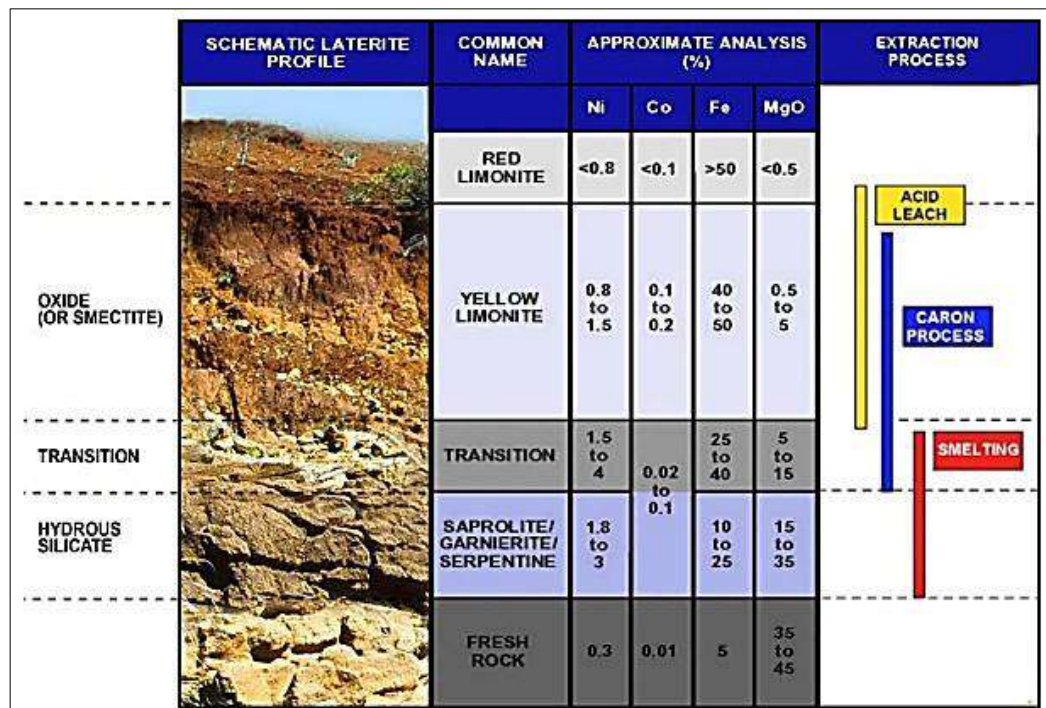


Gambar 3. Sebaran formasi batuan ultrabasa di Indonesia (Kadarusman *et al.*, 2020)

Indonesia memiliki wilayah batuan ultrabasa yang tersingkap luas, khususnya di Indonesia Timur, yang berasal dari sabuk orogenik berbeda. Memahami batuan ultrabasa ini sangat penting untuk memahami geografi lokal dan regional serta potensi endapan bijih yang signifikan secara ekonomi. Daerah Wolo dan sekitarnya termasuk dalam bagian dari Ofiolit Sulawesi Timur (*East Sulawesi Ophiolite/ESO*). Ofiolit Sulawesi Timur (ESO) adalah satu dari tiga ofiolit terbesar di dunia. Total panjang ESO lebih dari 700 km dari Teluk Gorontalo, melewati Lengan Barat dan Tengah mengarah ke Lengan Tenggara Sulawesi dan Pulau Buton serta Pulau Kabaena. ESO juga meluas ke Kompleks Lamasi Lengan Selatan melewati Teluk Bone. Total area singkapan lebih dari 15000 km² (Kadarusman *et al.*, 2004).

2.1.2. Pembentukan Nikel Laterit

Penempatan tektonik dari batuan ultramafik terserpentinisasi yang bervariasi di daratan dan pelapukan kimia berikutnya di bawah kondisi tropis hingga subtropis yang lembab menghasilkan pembentukan endapan nikel laterit yang terdiri dari limonit, saprolit dan bedrock (Aquino *et al.*, 2022). Profil endapan nikel laterit dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Profil endapan nikel laterit (Palabiyik, 2018)

Proses pelapukan dimulai pada batuan ultrabasa (peridotit, dunit, serpentin), di mana pada batuan ini banyak mengandung mineral olivin, magnesium silikat, dan besi silikat yang pada umumnya mengandung 0,30 % nikel. Batuan tersebut sangat mudah dipengaruhi oleh pelapukan lateritik. Air tanah yang kaya akan CO_2 berasal dari udara luar dan tumbuh-tumbuhan akan menghancurkan olivin. Terjadi penguraian olivin, magnesium, besi, nikel dan silika ke dalam larutan, cenderung untuk membentuk suspensi koloid dari partikel-partikel silika yang submikroskopis. Di dalam larutan besi akan bersenyawa dengan oksida dan mengendap sebagai ferri hidroksida. Akhirnya endapan ini akan menghilangkan air dengan membentuk mineral-mineral karat, yaitu hematit dan kobalt dalam jumlah kecil, jadi besi oksida mengendap dekat dengan permukaan tanah (Boldt, 1967).

Proses pelapukan dan pelindian akan menghasilkan unsur-unsur Fe, Cr, Al, Ni dan Co diperkaya di zona limonit dan terikat sebagai mineral oksida / hidroksida, seperti limonit, hematit dan gutit. Secara umum endapan nikel terbentuk pada batuan ultrabasa dengan kadar Fe pada olivin tinggi dan kadar nikel dari 0,2% menjadi 0,4%. Proses pembentukan endapan nikel laterit dapat dilihat pada Gambar 5.

Pembentukan bijih nikel laterit dipengaruhi oleh beberapa faktor. Adapun faktor-faktor yang memengaruhi pembentukan nikel laterit menurut Ahmad (2006) sebagai berikut :

1. Batuan Asal

Keberadaan batuan asal merupakan faktor utama dalam pembentukan endapan nikel laterit. Batuan ultrabasa, yang merupakan batuan asal endapan ini, memiliki kandungan nikel (Ni) tertinggi dibandingkan jenis batuan lainnya. Batuan ini juga mengandung komponen yang mudah larut, menciptakan kondisi yang mendukung pengendapan nikel. Selain itu, mineral-mineral utama dalam batuan ultrabasa, seperti olivin dan piroksen, bersifat tidak stabil dan sangat mudah mengalami pelapukan, menjadikannya sumber utama bagi pembentukan endapan nikel laterit.

2. Iklim

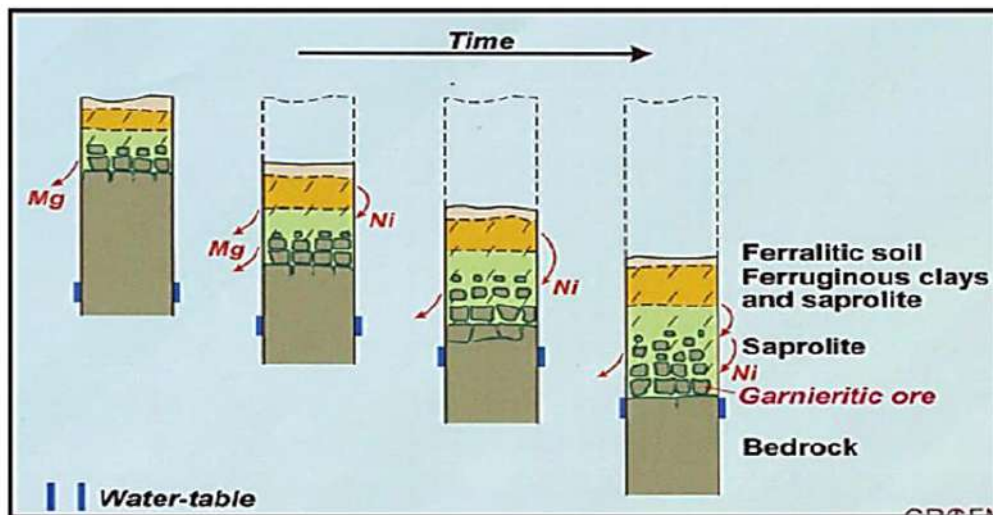
Perubahan antara musim kemarau dan musim hujan menyebabkan fluktuasi permukaan air tanah, yang mendorong proses pemisahan dan akumulasi berbagai unsur. Selain itu, perbedaan suhu yang signifikan dapat mempercepat pelapukan mekanis. Hal ini menyebabkan terbentuknya retakan-retakan pada batuan, yang kemudian mempermudah terjadinya reaksi kimia lebih lanjut pada material batuan tersebut.

3. Reagen-Reagen Kimia

Reagen kimia berupa unsur dan senyawa memainkan peran penting dalam mempercepat pelapukan batuan. Air tanah yang mengandung CO₂ menjadi faktor utama dalam proses pelapukan kimia. Asam humus yang berasal dari bahan organik berperan dalam dekomposisi batuan dan dapat memengaruhi pH larutan. Kandungan asam dalam humus ini terkait erat dengan keberadaan vegetasi di suatu wilayah, yang juga berkontribusi pada peningkatan infiltrasi air. Vegetasi membantu air menembus lebih dalam ke dalam tanah, sehingga mempercepat proses pelapukan batuan secara kimiawi.

4. Topografi

Topografi suatu wilayah sangat memengaruhi pola sirkulasi air dan reagen kimia lainnya. Pada daerah dengan kemiringan landai, pergerakan air berlangsung lebih lambat, memberikan peluang lebih besar untuk infiltrasi melalui celah atau pori-pori batuan. Endapan cenderung terakumulasi di wilayah dengan topografi landai hingga kemiringan sedang, yang menunjukkan bahwa ketebalan pelapukan berkorelasi dengan bentuk topografi. Sebaliknya, di daerah curam, sebagian besar air cenderung mengalir sebagai limpasan permukaan (*runoff*), sehingga jumlah air yang meresap lebih sedikit. Akibatnya, intensitas pelapukan di wilayah curam biasanya lebih rendah dibandingkan di daerah yang lebih datar.



Gambar 5. Proses pembentukan endapan nikel laterit (Freyssnet *et al.*, 2005)

5. Waktu

Waktu menjadi salah satu faktor kunci dalam proses pelapukan, transportasi, dan konsentrasi endapan pada suatu lokasi. Pembentukan endapan nikel laterit memerlukan periode yang sangat panjang, mencapai ribuan hingga jutaan tahun. Jika waktu pelapukan terlalu singkat, hanya akan menghasilkan lapisan endapan yang tipis. Sebaliknya, periode pelapukan yang cukup lama memungkinkan proses yang lebih intensif, sehingga terjadi akumulasi nikel dalam jumlah yang lebih tinggi. Faktor-faktor ini saling memengaruhi, dan karakteristik profil laterit di suatu lokasi biasanya merupakan hasil dari interaksi berbagai faktor tersebut selama kurun waktu yang panjang, bukan hanya karena dominasi satu faktor tunggal.

6. Struktur Geologi

Struktur geologi seperti rekahan (joint) dan patahan (fault) memiliki peran penting dalam pembentukan endapan laterit. Kehadiran rekahan dan patahan memfasilitasi infiltrasi air ke dalam tanah, mempercepat pelapukan batuan induk. Selain itu, struktur ini dapat menjadi tempat pengendapan larutan kaya nikel (Ni) dalam bentuk urat-urat (vein). Mengingat batuan beku memiliki porositas dan permeabilitas yang sangat rendah, air sulit menembusnya secara alami. Namun, keberadaan rekahan memungkinkan air masuk lebih mudah, sehingga proses pelapukan berlangsung lebih intensif.

2.2. Peneliti Terdahulu Tentang Benefisiasi Nikel Laterit

Nikel laterit dicirikan oleh kadar Ni yang rendah dan seringkali tidak ekonomis (khususnya dalam hal pengolahan menggunakan teknik seperti pelindian, mineralogi kompleks dimana unsur Ni berasosiasi dengan berbagai macam mineral dan kadar air yang tinggi. Diperlukan strategi prakonsentrasi/benefisiasi dalam keseluruhan alur proses penambangan sampai proses pengolahan (Quast *et al.*, 2015). Proses prakonsentrasi yang paling umum digunakan sebelum pemrosesan secara komersial pirometalurgi nikel laterit adalah penghilangan fraksi kasar dari umpan yang memiliki kadar nikel lebih rendah dibandingkan dengan fraksi yang lebih halus. Umumnya menggunakan *trommel* untuk material yang lebih kasar dan hidrosiklon untuk pemisahan material yang lebih halus. Berikut ini beberapa tambang atau pabrik yang menerapkan prakonsentrasi/*upgrading* kadar Ni sebelum menjadi umpan/*feed* pada proses pengolahan:

2.2.1. Nepou, New Caledonia

Proses prakonsentrasi terutama dari Deposit Surprise dimana sekitar setengah dari total material sebagai *waste* dengan Ni kualitas rendah. Kadar Ni batasnya 1% Ni dan nilai rata-rata bijih sebagai *feed* yaitu 1,7% Ni. Proses prakonsentrasi dilakukan dengan melewati bijih melalui *trommel* yang berputar menggunakan *wobbler grizzly feeder* yang bergetar. *Trommel* ini bertujuan memecah fraksi nikel laterit yang mengandung nikel-silikat yang sudah lapuk dan memisahkan fraksi kasar yang tidak mengalami pelapukan (peridotit) yang kemudian dibuang ke ujung

trommel. Fraksi yang lebih halus dengan kadar Ni yang lebih tinggi akan jatuh dalam *trommel* dan akan dikirim sebagai *ore feed*.

2.2.2. Le Nickel, New Caledonia

Testut *and* Raffinot (1985) dalam Connor *et al.*, 2015, memberikan gambaran geologi, mineralogi dan konsentrasi bijih nikel laterit yang ditambang di *New Caledonia*. Endapan nikel laterit dicirikan oleh lapisan limonit yang diikuti oleh serpentinit dengan mineral garnierit, lapisan paling bawah yaitu ultrabasa dengan komposisi mineral olivin dan kromit. Kadar Ni pada mineral serpentinit berkisar antara 1,6% hingga 3% Ni. Limonit umumnya memiliki nilai Ni yang lebih rendah (1–1,5% Ni). Bijih saprolit disortir secara mekanis menggunakan *tritout screen*, dimana bijih dilewatkan pada saringan putar yang berukuran besar kemudian menghasilkan abrasi dan penyaringan material. Proses ini menghilangkan material lapuk yang kaya akan Ni dari batuan peridotit yang masih fresh. Dimensi *tritout screen* berdiameter 2,5 m dan panjang 15 m, putaran mesin 10 *rpm* dilengkapi dengan pelat berlubang yang memiliki slot sejajar dengan sumbu, slot ini memiliki panjang 250 mm dan lebar 50–70 mm. *Screen* ditutup dalam ruang terisolasi di mana udara panas dihembuskan ke dalam *screen* dengan suhu sekitar 60 C°. Pemanasan ini diperlukan karena bijih bersifat lengket dan ini menghindari penyumbatan pada slot daripada untuk mengeringkan bijih. Pemulihan nikel ke dalam ukuran di bawah ayakan biasanya mencapai 82% dan meningkatkan kadar bijih dari 1,65% menjadi 2,70% Ni. Percobaan lainnya peningkatan kadar bijih dari 2,22% Ni dalam umpan menjadi 2,52% Ni.

2.2.3. Hanna Mine, Oregon, USA

Mineralisasi Ni terjadi pada peridotit yang teralterasi. Mineralogi bijih saprolit utamanya terdapat pada mineral garnierite dengan komposisi mineral oksida besi, magnesium dan silika. Nilai rata-rata deposit Ni adalah 1,2% Ni. Peridotit adalah mineral gangue dengan kadar rendah Ni utama dalam deposit ini dan jauh lebih keras daripada saprolit. Prakonsentrasi dimulai dengan *crushing* bijih saprolit dan bijih yang berkadar rendah yang masih terlihat oleh operator disortir dan dipisahkan setelah disaring pada ukuran *screen* 75 mm. Bijih dikeringkan dan

ukuran fraksi +30 mm direjek. Sampel kemudian diproses *crushing* dan *screening* kembali sampai dengan ukuran 6 mm. Kadar bijih dapat diupgrading dari 1,2% Ni menjadi 1,7% melalui *selective mining*, *blending* dan rejek bijih kadar rendah.

2.2.4. Nicaro Ore, Cuba

Dufour (1985) dalam Connor *et al.*, 2015, menjelaskan sifat mineralogi tambang nikel Nicaro Ore, Cuba, dimana ada dua fraksi nikel ore yang berbeda yaitu fraksi atas berupa limonite yang berukuran halus yang kemudian mengalami gradasi sampai pada fraksi serpentinit yang sudah lapuk. Fraksi limonit mengandung 1,2% Ni; 0,12% Co; 48% Fe dan 1,6% MgO. Fraksi serpentinit mengandung 1,7% Ni; 0,05% Co; 18% Fe dan 21% MgO. Metode penambangan dan prakonsentrasi bijih menghasilkan umpan yang konsisten dengan rata-rata sekitar 1,4% Ni; 0,1% Co; 38% Fe, dan 8% MgO. Ore dari penambangan dihancurkan dengan *double roll crusher* kemudian dikeringkan dimana debu yang keluar dari *cyclone collector* kemudian diendapkan melalui *electrostatic precipitator*. Material hasil pengeringan disarin ukuran 1,4 mm dan material ukuran lebih besar dicrushing kembali dalam *ball mill* dan material berukuran kecil, terutama limonit, diumpankan ke *hammer mill*. Pemisahan ukuran fraksi melalui pemisah udara mekanis. Material yang keluar pemisah udara mekanis dikumpulkan dan dilewatkan melalui pemisah elektrostatis. Proses ini meloloskan sekitar 90% material berukuran 150 μm dan 70% material berukuran 75 μm .

2.2.5. Moa Bay, Cuba

Dufour (1985) dalam Connor *et al.*, (2015) memberikan gambaran mengenai operasi pengolahan bijih nikel dan kobalt di Teluk Moa, Cuba, terutama berfokus pada pemanfaatan limonit yang kaya akan nikel dan kobalt. Proses ini melibatkan beberapa tahap utama:

- a. *Screening* material: Bijih mentah melewati *grizzly* untuk menghilangkan material berukuran besar (material yang tidak lolos *grizzly*) kemudian digosok dengan *trommel* untuk memisahkan material yang terlalu besar (ukuran bukaan 500 mm).
- b. Pencucian dan penggilingan: Material hasil gosokan *trommel* dicuci untuk menghilangkan batuan dan kemudian diumpankan ke bagian pencucian

kemudian di *crushing* kembali dan disaring lebih lanjut.

- c. Klasifikasi dan Pengentalan: Hasil dari proses penggilingan berupa *slurry* dengan kadar padatan 25% dan ukuran partikel 90% lebih kecil dari 75 μm . *Slurry* ini kemudian dikentalkan sebelum diumpankan ke proses pelindian. Komposisi kimia bijih limonit sebagai *feed* mengandung 1,35% Ni; 0,14% Co; 47,5% Fe; 1,7% MgO dan 8% Al_2O_3 .

2.2.6. Moa Bay, Cuba

Lithgow (1993), memberikan gambaran komposisi mineral nikel Falcondo Mine yang didominasi mineral serpentin, olivin, enstatit, diopside, kromit, dan magnetit. Adanya sedikit sulfida mengindikasikan potensi kecil untuk proses hidrometalurgi. Komposisi kimia Ni 1,81% dan Fe, 13-14%. Rasio Ni/Co yang tinggi (>33) menunjukkan potensi secara ekonomi untuk diekstraksi. Rasio SiO_2/MgO : 1,65-1,70 mengindikasikan tingkat serpentinisasi yang cukup tinggi pada bijih. Prakonsentrasi bijih dimulai dengan melewati bijih pada pabrik atrisi *autogenous* dimana bijih dapat di *upgrade* 0,04% Ni dengan recovery 66,6% dengan merejek *barren rock*. Setelah proses atrisi, bijih dikeringkan dan dihancurkan kemudian *screening* kembali dengan ukuran 8 mm. Kadar bijih untuk pengolahan secara pirometalurgi yaitu 1,70% Ni.

2.3. Upgrading Bijih Nikel Laterit

Istilah *upgrade* (pra konsentrasi untuk peningkatan kadar) digunakan untuk perlakuan bijih nikel sebelum diproses *smelting* (pirometalurgi atau hidrometalurgi ini. Pra konsentrasi ini menargetkan sifat fisik atau kimia dari mineral tertentu. Sebagai contoh pemisahan magnetik pada mineral bijih akan menghasilkan konsentrat magnetik akibatnya adanya sifat magnetik dari mineral tertentu. Demikian pula dengan sistem flotasi, untuk mendapatkan sifat hidrofobisitas pada mineral sulfida. Bijih nikel laterit yang ditambang biasanya mengandung 1,3%–2,5% Ni. Bijih saprolit terutama lebih kaya nikel daripada bijih limonit. Material lapuk dalam endapan laterit umumnya lunak dan kaya akan nikel, sedangkan batuan asal yang tidak terlapukkan bersifat keras dan tidak mengandung bijih nikel juga mengandung produk sampingan seperti kuarsa. Dengan adanya metode *upgrading*

ini biaya peleburan atau pencucian dapat menjadi lebih murah. Dengan penerapan *upgrading* juga dapat meminimalkan mineral seperti olivin dan piroksin yang kaya akan magnesium ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) yang dapat berpengaruh dalam penggunaan energi, suhu peleburan atau *proses leaching* (Doyle, 2004; Tuffrey *et al.*, 2009; Tian *et al.*, 2020). Beberapa metode *upgrading* yang telah diterapkan di tambang nikel laterit dunia seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Metode *upgrading* beberapa perusahaan tambang nikel laterit

<i>Mine</i>	Nikel ore, %	Nickel upgrading ore, %	<i>Methode of upgrading</i>	Referensi
Ravensthorpe Australia	1	2	Ore dibuat dalam bentuk <i>slurry</i> dengan putaran <i>scrubber</i> sehingga tererosi. Pemisahan partikel kecil yang kaya Ni dengan partikel besar yang rendah Ni dalam bentuk <i>slurry</i> dipisahkan oleh <i>screen hydrocyclones</i> dan <i>spiral classifiers</i> . Material dengan ukuran $>75 \mu\text{m}$ akan di rejek	Adam <i>et al.</i> , 2004
Falcondo, Republik Dominica	1,2	1,4	Ore dilewatkan dalam alat <i>wobbler feeder</i> dan <i>ball mill</i> kemudian tersaring. Fraksi dengan ukuran $>0.01 \text{ m}$ akan dibuang dan menjadi <i>tailing</i> .	Mast,Fanas, Frias, and Ortiz., 2005
Nepoui and Tiebaghi mines, New Caledonia	1,8	3	Ore dalam bentuk <i>slurry</i> dicampur air. Ukuran partikel yang kecil yang kaya Ni dipisahkan dengan partikel ukuran besar dengan <i>screening</i> dan <i>hydrocyclone</i> . Ukuran partikel kecil dengan <i>low density</i> akan lebih kaya nikel dibandingkan dengan <i>high density</i> . Ukuran partikel $50 \mu\text{m}$	Le Nickel, 2008
Coral Bay, Philippines	1,26	1,5	Bijih nikel disaring dan dicuci dalam jangka waktu yang ditentukan. Hanya partikel $<2 \text{ mm}$ yang	Nakai, Kawata, Kyoda &

<i>Mine</i>	Nikel ore, %	Nickel <i>upgrading</i> ore, %	<i>Method of upgrading</i>	Referensi
			dilanjutkan ke tahapan <i>leaching</i> .	Tsuchida, 2006

Studi fraksinasi bijih nikel juga telah diteliti oleh Seo *et al.*, 2016. Bijih nikel laterit diklasifikasikan menjadi dua jenis bijih utama: saprolit (bijih silikat) dan limonit (bijih oksida). Bijih jenis saprolit yang dicirikan dengan kadar magnesium dan silika yang tinggi diolah dengan proses pirometalurgi. Di sisi lain, bijih jenis limonit dapat diproses hidrometalurgi untuk menghasilkan produk nikel. Proses hidrometalurgi membutuhkan bahan baku yang memenuhi persyaratan komposisi kimia yaitu kadar Si+Mg dibawah 10% dan kadar Fe diatas 40%. Oleh karena itu diperlukan pemisahan bijih jenis saprolit untuk digunakan sebagai bahan baku proses hidrometalurgi. Pemisahan bijih jenis saprolit dan bijih jenis limonit dari bijih nikel laterit dari New Caledonia telah dicoba dengan metode fraksinasi ukuran butir dengan preparasi kering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fraksi ukuran - 5 mm mengandung bijih jenis limonit dan fraksi ukuran +5 mm dari bijih nikel laterit terutama dari bijih saprolit. Metode pengeringan bijih nikel membuat pemisahan material lebih efisien untuk diolah dengan proses hidrometalurgi.

Metode *upgrading* nikel laterit berdasarkan pada prinsip pemisahan mineral pembawa nikel, seperti gutit dan garnierit, tingkat kekerasannya lebih lunak dengan material yang tidak mengalami proses laterisasi, seperti olivin, dan material lainnya yang tidak mengandung nikel, seperti mineral kuarsa. Alur *upgrading* nikel laterit pada salah tambang nikel (*Ravensthorpe Mine*) seperti pada Gambar 6.

Percobaan lain dalam skala *pilot plant* telah dilakukan oleh Adam *et al.*, 2019 pada proyek *Ravensthorpe Nickel Operations*. Percobaan ini khususnya pada material limonite untuk proses hidrometalurgi. Berdasarkan data yang diuraikan, proses benefisi nikel laterit yang dilakukan telah berhasil meningkatkan kadar nikel dalam *feed* hingga mencapai kisaran 1,4% hingga 2,0%. Proses ini melalui beberapa tahapan yaitu *scrubbing*, *screening*, dan *attrition scrubbing*. Penggunaan *attrition scrubber* terbukti memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan pemulihan nikel, terutama pada fraksi halus (-75 μm) dengan tingkat pemulihan

yang cukup baik, yaitu antara 53% hingga 67%. Khususnya, pemulihan fraksi -75 μm sangat tinggi, rata-rata lebih dari 95%. Distribusi nikel dalam proses pemisahan (*beneficiation*) limonit proyek *Ravensthorpe Nickel Operations* yang khas ditunjukkan pada Tabel 2. Peningkatan kadar nikel pada produk utama fraksi -75 μm terlihat jelas, dan penurunan kadar nikel pada fraksi kasar dengan kadar nikel yang rendah.

Tabel 2. Hasil benefisiassi nikel dalam bijih limonit (Adam *et al.*, 2019)

Fraksi/Produk	Distribusi Ni%	Kadar Ni
<i>Feed</i>	100	1,02
Fraksi kasar/rejek	15,4	0,46
Fraksi sedang/rejek	11,8	0,54
Fraksi halus/rejek	6,1	0,55
Produk sampingan	12,6	1,87
Produk utama	54,1	2,19

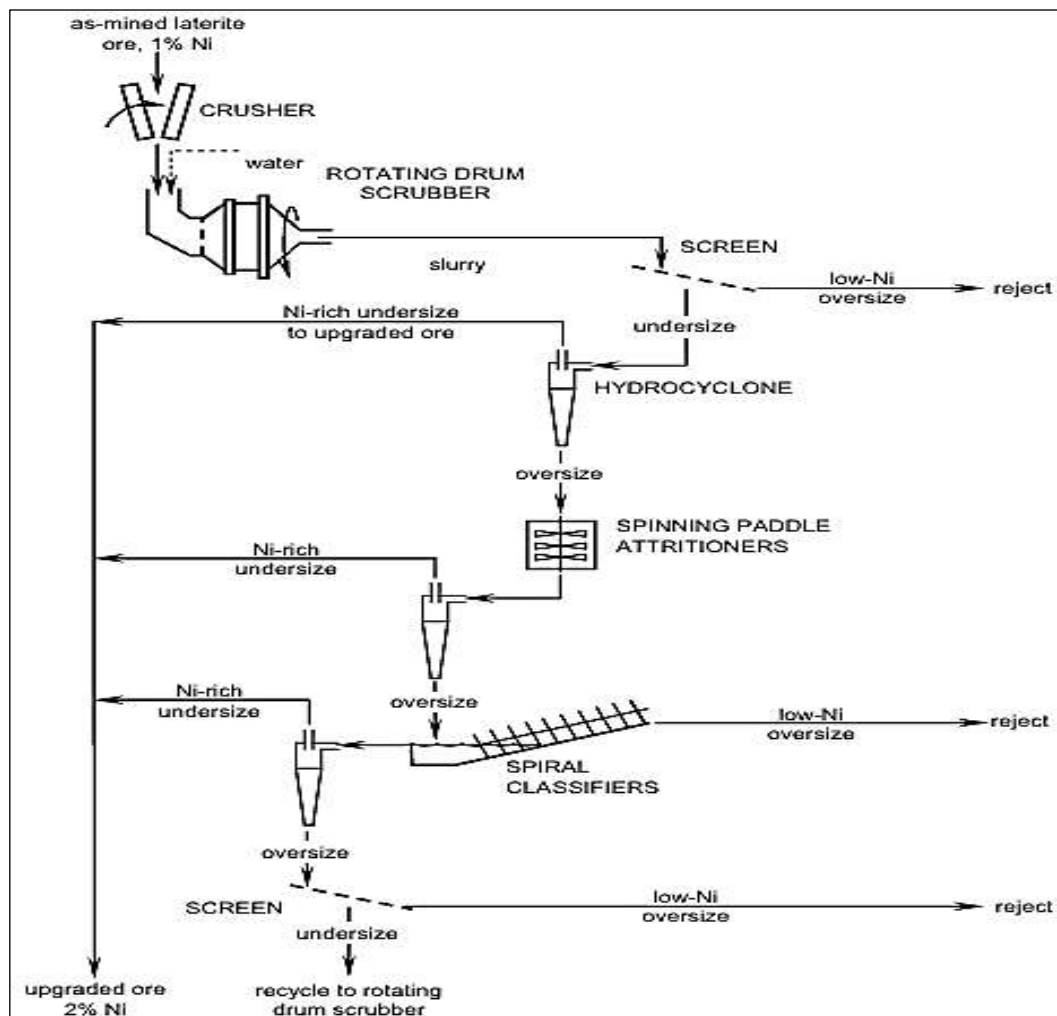
Serpentinisasi juga sangat berpengaruh terhadap karakteristik bijih nikel laterit dan pada gilirannya mempengaruhi proses benefisiassi (pengolahan) yang diterapkan. Serpentinisasi memiliki peran aktif dalam proses hidrotermal yang merupakan injeksi H_2O pada batuan ultrabasa yang akan mempengaruhi keseimbangan mineral.

Proses serpentinisasi merupakan proses alterasi mineral yang mengubah batuan beku ultrabasa, seperti peridotit, menjadi mineral serpentin. Dampak serpentinisasi terhadap prokonsentrasi nikel laterit terutama pada mineralogi, sifat fisik dan kimia bijih. Proses serpentinisasi akan meningkatkan porositas batuan, yang dapat mempengaruhi efisiensi proses flotasi dan proses pemisahan berdasarkan densitas. Serpentinisasi juga meningkatkan komposisi magnesium yang berpengaruh pada reagen flotasi.

Pemisahan bijih laterit yang terserpentinisasi menghadapi tantangan besar akibat kompleksitas matriks mineral, ukuran partikel halus, dan potensi kehilangan mineral utama. Matriks mineral yang kompleks membuat pemisahan lebih sulit, karena berbagai mineral memiliki sifat fisik dan kimia yang mirip. Selain itu, ukuran partikel halus dapat menyebabkan penyumbatan pada peralatan pemrosesan dan kesulitan dalam pemisahan karena kecenderungan partikel untuk tetap berada

dalam suspensi. Efisiensi pemisahan yang rendah berisiko menyebabkan hilangnya mineral berharga seperti nikel atau kobalt ke dalam tailing.

Serpentinisasi memiliki peran aktif dalam proses hidrotermal yang merupakan injeksi H_2O pada batuan ultrabasa yang akan mempengaruhi keseimbangan mineral. Kadar nikel (Ni) dan nilai *Lost On Ignition* (LOI) menunjukkan bahwa tingkat serpentinisasi pada batuan ultrabasa berpengaruh terhadap kadar nikel pada batuan ultrabasa. Semakin tinggi tingkat serpentinisasi, semakin banyak kadar nikel yang akan terlepas ke material laterit.



Gambar 6. Flowsheet upgrading bijih laterit dari 1% Ni menjadi 2% Ni (Crundwell et al., 2011)

Bijih nikel laterit yang telah mengalami serpentinisasi cenderung memiliki kadar LOI yang lebih tinggi. Selain itu, proses serpentinisasi juga mempengaruhi distribusi dan bentuk mineral nikel, karena nikel seringkali terjebak dalam struktur mineral serpentin, yang dapat mempengaruhi kadar nikel dan kompleksitas

ekstraksi. Oleh karena itu, bijih nikel laterit dengan tingkat serpentinisasi yang tinggi mungkin memiliki kadar nikel yang lebih rendah dalam bentuk yang lebih sulit diekstraksi, sehingga pemrosesan bijih tersebut menjadi lebih menantang.

2.4. Teknologi Reduksi Bijih Nikel Laterit

Teknologi proses reduksi selektif (parsial) dikembangkan untuk mengolah bijih nikel laterit menjadi konsentrat logam ferronikel. Teknologi tersebut merupakan gabungan dari metode pirometalurgi dan *benefisiasi* secara fisik, dimana bijih nikel laterit terlebih dahulu direduksi pada temperatur tertentu yang kemudian dilanjutkan dengan proses pemisahan magnetik untuk memisahkan pengotor/*slag* (non-magnetik) dengan konsentrat ferronikel (magnetik). Proses reduksi dilakukan pada temperatur proses yang rendah (1100-1200°C) dengan penambahan material/gas reduktan dan sejumlah aditif (senyawa sulfat, karbonat atau khlorida) pada bijih nikel laterit.

Proses reduksi selektif ditujukan untuk mereduksi keseluruhan senyawa oksida nikel, namun hanya mereduksi sebagian senyawa oksida besi yang terkandung dalam bijih nikel laterit. Proses reduksi diawali dengan menghilangkan senyawa hidroksida, yaitu serpentin $(\text{Mg,Fe,Ni})_3 \text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$ dan gutit (FeOOH). Pada temperatur 500-600°C, serpentin akan berubah menjadi forsterit- $(\text{Mg,Fe,Ni})\text{SiO}_3$ dan enstatit $(\text{Mg,Fe,Ni})_2\text{SiO}_4$, sedangkan gutit akan berubah menjadi hematit (Fe_2O_3). Pemanasan lebih lanjut akan menyebabkan nikel dalam forsterit dan enstatit berubah menjadi nikel oksida (NiO) dan logam Ni, sedangkan hematit akan berubah menjadi magnetit (Fe_3O_4), wustit (FeO), dan logam besi-Fe (Valix and Cheung, 2002; Harris *et al.*, 2009; Solihin, 2015; Nurjaman *et al.*, 2020).

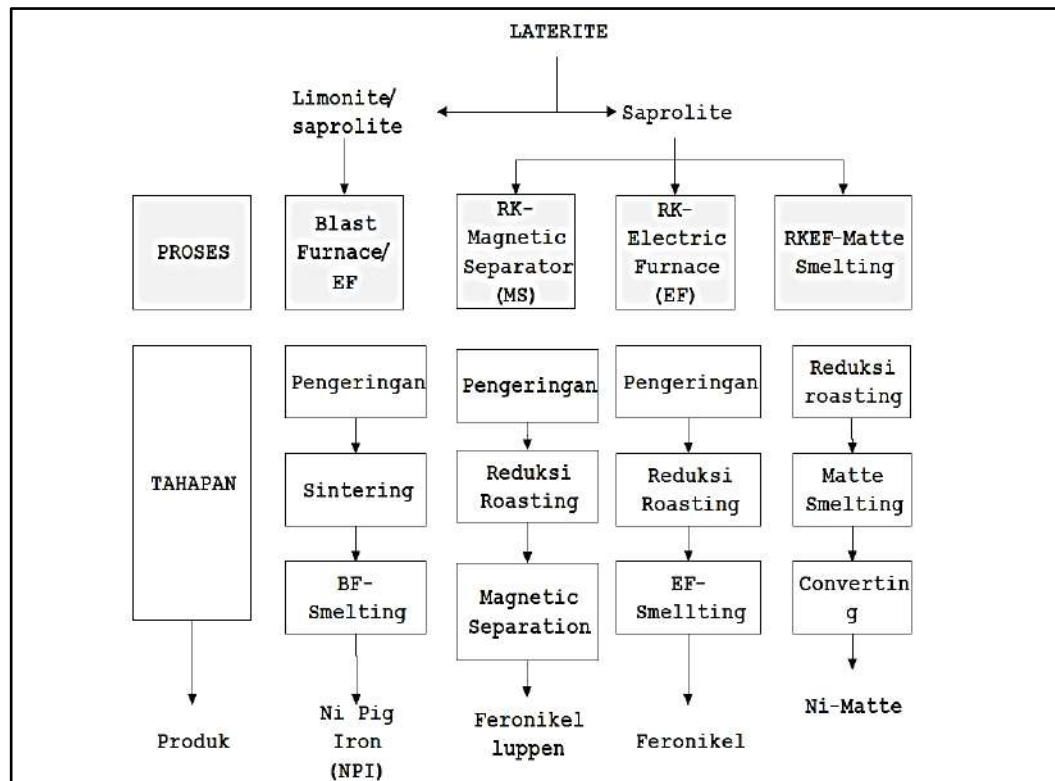
Tambang nikel laterit Wolo dimana terdapat lokasi penambangan PT. Ceria Nugraha Indotama (CNI) berencana akan membangun pabrik peleburan feronikel di lokasi IUP, dengan mengadopsi teknologi produksi *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF) untuk dilebur langsung menjadi feronikel (FeNi), yang memungkinkan penggunaan bijih nikel laterit untuk langsung dilebur menjadi feronikel (*Feasibility Study* PT CNI, 2017). Oleh karena itu, PT. CNI memiliki rencana berinvestasi dalam industri peleburan bijih nikel laterit menjadi feronikel, termasuk rangkaian lengkap unit-unit proses dan manajemen peralatan.

Secara historis, bijih Ni saprolit telah diolah dengan menggunakan proses peleburan (*smelting*) atau metode pirometalurgi. Peleburan bijih saprolit dapat menghasilkan 2 opsi produk akhir yakni Ni-Fe-S *matte* dengan penambahan belerang atau peleburan bijih menjadi feronikel (FeNi). Pada umumnya, peleburan bijih laterit untuk memproduksi FeNi didasarkan atas dua prinsip yakni: (1). Ni dan Fe oksida lebih mudah direduksi menjadi logam Ni dan Fe, sementara yang lain seperti Al_2O_3 dan MgO tidak mudah direduksi karena ikatan dari kedua oksida tersebut lebih kuat, (2) bijih laterit tidak dapat dilebur menjadi Ni murni tanpa Fe karena kadar besi dalam bijih laterit cukup tinggi ($>15\%$) dan Ni lebih rendah ($1,5 - 3,0 \%$).

Hal ini berarti bahwa produk akhir berupa FeNi dengan kadar Fe ($60 - 80 \%$) dan kadar Ni antara $20-40 \%$. Keberadaan Fe dalam produk akhir sebetulnya tidak terlalu merugikan karena Fe adalah komponen utama dalam memproduksi baja tahan karat. Namun demikian, biaya produksi akan meningkat dengan bertambahnya kadar Fe karena akan dibutuhkan lebih banyak energi untuk proses reduksi, pemanasan dan peleburan. Oleh karena itu sangat penting dilakukan proses seleksi bijih, pencampuran (*blending*) dan bahkan *upgrading* untuk memperoleh spesifikasi bijih yang optimal sebagai umpan (*feed*) dalam proses peleburan.

Diagram skematis alur proses peleburan bijih saprolit ditunjukkan pada **Error! Reference source not found..** Secara umum unit-unit proses terdiri dari empat tahapan, yaitu: (a) pengurangan kadar air permukaan (*dewatering*), (b) kalsinasi atau penghilangan kadar air kristal dari bijih kering, (c) reduksi, yakni penghilangan oksigen dari ikatan Ni dan Fe dalam kalsin, dan (d) pemurnian yaitu penghilangan komponen pengotor dari molten FeNi terutama sulfur dan fosfor. Proses RKEF yang diterapkan saat ini merupakan proses yang telah dikembangkan sepenuhnya dan memenuhi standar lingkungan yang tinggi. Walaupun beberapa pendekatan telah diterapkan di berbagai pabrik feronikel, semua alur RKEF mencakup langkah-langkah berikut:

- Preparasi bijih (*ore preparation*): proses peremukan bijih dan pencampuran dengan reduktan padat serta gumpalan-gumpalan debu;



Gambar 7. Diagram alir ekstraksi nikel secara pirometalurgi (Setiawan, 2016)

- Pengeringan (*drying*): pengurangan sebagian besar kelembaban (air bebas) dari bijih;
- Kalsinasi (*calcinating*): pengurangan kelembaban yang masih tersisa serta air kristal, pemanasan awal bijih, pengubahan kondisi padat dari sebagian besar nikel dan besi;
- Peleburan (*smelting*): penyelesaian proses reduksi, peleburan kalsin dan pemisahan produk feronikel dari terak;
- Pemurnian (*refining*): eliminasi pengotor-pengotor sisa dan pengayaan feronikel;
- Pencetakan (*casting*): pendinginan *crude* feronikel dan pencetakan *crude metal* dalam bentuk yang diinginkan.

2.5. Komposisi Kimia Bijih Saprolit untuk Proses RKEF Nikel Laterit

Pengolahan bijih nikel laterit dengan metode pirometalurgi dengan kadar Ni >2% akan menghasilkan feronikel atau Ni matte, bijih dengan kadar Ni > 2,2% cocok untuk produksi feronikel karbon tinggi dan bijih dengan kadar Ni > 1,5%

cocok untuk produksi feronikel rendah karbon (Husain *et al.*, 2021). Pengolahan bijih dengan rasio SiO_2/MgO 1,8-2,2 menggunakan pirometalurgi lebih baik menghasilkan nikel-matte; sedangkan pengolahan bijih dengan rasio $\text{SiO}_2/\text{MgO} < 2$ atau $> 2,5$ lebih baik menghasilkan feronikel. Bijih dengan rasio SiO_2/MgO 2,3-2,5 bersifat korosif dan menyebabkan suhu tinggi di tungku dan lebih banyak energi konsumsi, jadi pencampuran atau penambahan bahan *fluks* harus dilakukan sebelum peleburan (Husain *et al.*, 2021). Rasio FeNi merupakan salah satu parameter yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan pilihan pengolahan.

Bijih dengan perbandingan Fe/Ni 5-6 dapat diproses dengan metode pirometalurgi dan menghasilkan karbon yang tinggi feronikel, bijih dengan rasio Fe/Ni 6-12 dapat diolah dengan metode pirometalurgi dan menghasilkan feronikel yang rendah karbon, sedangkan rasio Fe/Ni yang tinggi mencapai > 6 akan menghasilkan Ni matte (Husain *et al.*, 2021). Bijih dengan Co $\pm 0,04\%$ dapat diproses menggunakan pirometalurgi dan apabila kadar Co mencapai $\pm 0,1\%$ dapat diproses dengan hidrometalurgi. Jika kadar Fe dalam bijih lebih tinggi dari 20%, maka bijih dapat diolah dengan pirometalurgi, namun bila kadar Fe lebih rendah maka dapat diolah dengan cara tersebut metode hidrometalurgi. Bijih dengan kadar SiO_2 tinggi lebih baik diproses secara pirometalurgi. Jika kadar MgO 25%, maka bijih dapat diolah dengan pirometalurgi meskipun demikian, jika kadar MgO yang rendah maka dapat diolah dengan metode hidrometalurgi (Husain *et al.*, 2021). Indikator mineralogi dan geokimia dan hubungannya dengan pilihan pengolahan bijih Ni laterit dari daerah penelitian disajikan pada Tabel 3.

Sedangkan menurut Oxley *et al.*, 2013, pabrik peleburan FeNi, *Nickel Pig Iron* (NPI) dan Ni matte yang ada saat ini beroperasi dengan bijih nikel laterit yang memenuhi persyaratan yang cukup tinggi dengan kriteria khusus dalam hal kadar Ni, rasio Fe/Ni, Ni/Co dan SiO_2/MgO seperti pada Tabel 4.

Tabel 3. Karakteristik kimia dan mineralogi nikel laterit untuk pirometalurgi (Husain *et al.*, 2021)

Karakteristik Kimia	Pirometalurgi
Ni	$> 2,0\%$ FeNi atau Ni Matte $> 2,2\% = \text{HC FeNi}$ $> 1,5\% = \text{LC FeNi}$ $> 20\%$

Karakteristik Kimia	Pirometalurgi
Co	<25%
Fe	<55%
MgO	1,8 – 2,2 = Matte
SiO ₂	<2 atau 2,5 = Ferronikel
Rasio S/M	2,3 – 2,5 = Sangat Korosif 5 – 6 = HC FeNi 6 – 12 = LC Feni
Ratio Fe/Ni	>6 = Matte

Tabel 4. Karakteristik kimia nikel laterit untuk pirometalurgi (Oxley and Barcza, 2013)

Deskripsi	Fe/Ni	Ni/Co	SiO ₂ /MgO	Keterangan
Typical	<12	40	<1.9	Good grade/recovery
Extended	>12<20	20	>3,5<7	Lower grade/recovery
NPI blend	5-30	10 >40	1,5 to 5	High grade/recovery

Pabrik peleburan dengan produk FeNi memerlukan *ore feed* dengan kadar Ni yang biasanya diatas 1,5% dan rasio Fe/Ni <12, Ni/Co >30 dan SiO₂/MgO <1,9 masing-masing. Hal ini untuk memastikan bahwa biaya produksi berpotensi layak, kadar dan *recovery* nikel diatas 20% dan 90% masing-masing. Kadar Co dalam FeNi kurang dari 0,5% dan suhu likuiditas terak tidak terlalu jauh dari suhu logam FeNi (Oxley et al 2013). FeNi *alloy* memiliki suhu cair sekitar 1500°C dan memerlukan pengoperasian tungku setidaknya 50°C lebih tinggi untuk memastikan keberhasilan pemisahan logam dan meminimalkan pembentukan terak pada tungku.

Dari data Minerba tahun 2022 (Grand Strategy Mineral dan Batubara, Dirjen Minerba 2022) menunjukkan terdapat 27 pabrik pirometalurgi (RKEF dan BF) yang telah beroperasi mengolah bijih nikel saprolit untuk meng hasilkan NPI, FeNi, dan nikel *matte*, sementara hanya terdapat 2 pabrik hidrometalurgi (HPAL) yang telah beroperasi mengolah bijih nikel limonite untuk menghasilkan MHP tersebar di Provinsi Maluku Utara, Sulawesi Tengah, Sulawesi Tenggara, Sulawesi Selatan, Kalimantan Selatan, Banten, dan Jawa Timur. Sekitar 35% sudah beroperasi, 42% sedang dibangun, dan 23% masih dalam tahap perencanaan.

Mayoritas pabrik peleburan nikel yang beroperasi berlokasi di Kabupaten Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah, Indonesia. Kawasan yang dikenal sebagai IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park) merupakan pusat operasi peleburan yang penting, menampung *tenant* dan berfungsi sebagai salah satu kawasan industri kegiatan peleburan nikel laterit.

Kebutuhan kimia bijih di setiap smelter berbeda-beda tergantung teknologi pengolahan yang digunakan. Secara umum smelter nikel di Indonesia menggunakan teknologi pirometalurgi dengan spesifikasi nikel ore yang berbeda-beda. Tabel 5 menggambarkan persyaratan umum kimia bijih dalam teknologi Pyro-Metalurgi.

Tabel 5. Persyaratan umum kimia bijih saprolit dalam teknologi pirometalurgi di beberap smelter (Kadarusman *et al*, 2020)

Pirometalurgi						
Teknologi Pengolahan	Produk	Smelter	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	<i>FeNi, Ni Matte</i>	ANTAM, VALE	>1,6-1,8	16-20	1,8-2,5	>10
	NPI	ENFI (CERIA) IMIP, VDNI, IWIP, HARITA (MSP)	>1,6 – 1,8	16 - 20	1,8 – 2,5	>10
BLAST FURNACE	NPI (4-8%Ni)	IMIP, BSI, COR, FAJAR	1,4 – 1,6	20 - 30 / 35	<2,5	>12
			1,3	>35		

Teknologi pirometalurgi memerlukan *ore feed* bijih saprolit (Ni kadar tinggi). Spesifikasi jenis bijih saprolit secara umum dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Tipe Bijih Saprolit (Kadarusman *et al*, 2020)

Saprolit Ore				
Ni	1,6% - %1,8			
S/M Rasio	Rendah (<1,6)	Sedang (1,6-2,2)	Tinggi (2,2-2,6)	Sangat Tinggi (>2,6)
Fe/Ni Rasio	FeNi (6-8)	Ni <i>Matte</i> >10	NPI (>10)	BF (>10)

2.6. Keuntungan dan Kelemahan Teknologi RKEF Nikel Laterit

Teknologi *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF) merupakan salah satu metode pirometalurgi yang paling umum digunakan dalam pengolahan bijih nikel laterit. Teknologi ini memiliki beberapa keuntungan yang signifikan, antara lain:

1. Proses sederhana dan terbukti sehingga dapat diterapkan dan menguntungkan dalam skala industri. Prosesnya relatif sederhana dibandingkan dengan teknologi pirometalurgi lainnya.
2. Teknologi pirometalurgi, terutama metode RKEF, sangat efektif dalam mengolah bijih saprolit dengan kadar nikel rendah hingga sedang.
3. Fleksibilitas *ore feed* teknologi pirometalurgi dapat memproses bijih dengan berbagai ukuran fraksi, termasuk fraksi kasar yang mungkin mengandung lebih banyak *gangue* mineral seperti olivin dan piroksin.
4. *Slag* atau residu yang dihasilkan bersifat granular dan mudah dibuang, sehingga mengurangi masalah lingkungan yang terkait dengan pembuangan limbah.

Namun, teknologi RKEF juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan:

1. Biaya modal tinggi atau biaya modal (*capex*) untuk pembangunan fasilitas RKEF sangat tinggi. Hal ini dapat menjadi hambatan bagi perusahaan yang ingin mengadopsi teknologi ini.
2. Proses RKEF memerlukan konsumsi energi yang tinggi, sehingga biaya operasional sangat sensitif terhadap harga energi. Efisiensi energi menjadi faktor kunci dalam keberhasilan ekonomi proyek.
3. Teknologi ini hanya efektif untuk mengolah bijih dengan kadar magnesium tinggi. Oleh karena itu, diperlukan pencampuran (*blending*) bijih untuk mempertahankan rasio SiO_2/MgO yang optimal.
4. Salah satu kelemahan utama adalah teknologi ini tidak memulihkan kobalt sebagai produk sampingan. Kobalt, yang juga merupakan logam berharga, tetap berada dalam slag dan tidak diekstraksi.
5. Proses pirometalurgi menghasilkan emisi gas rumah kaca dan polutan lainnya, yang memerlukan sistem pengendalian emisi yang tepat untuk meminimalkan dampak lingkungan.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian fraksinasi bijih saprolit merupakan kombinasi antara studi laboratorium dan uji lapangan. Sampling yang representatif dari pit penambangan untuk memastikan bahwa hasil penelitian dapat digeneralisasi. Metode pengambilan sampel yang tepat bertujuan untuk memahami karakteristik bijih, mengevaluasi kinerja metode fraksinasi, dan mengoptimalkan proses pengolahan. Secara garis besar metode pengambilan data terkait penelitian ini terdiri dari:

1. Pengambilan data dengan cara pencatatan data lapangan

Metode ini melibatkan pencatatan seluruh data yang ditemukan di lapangan ke dalam buku catatan. Data ini mencakup hasil pengamatan langsung terhadap kondisi fisik, seperti jenis dan struktur batuan, warna, tekstur, serta elemen visual lainnya. Selain itu, hasil pengukuran koordinat lokasi sampel juga didokumentasikan. Pencatatan dilakukan secara manual untuk memastikan bahwa semua informasi penting tercatat dengan lengkap. Metode ini sangat penting untuk mengumpulkan data kualitatif dan kuantitatif yang akurat serta memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi lapangan.

2. Pengambilan data lapangan dengan alat

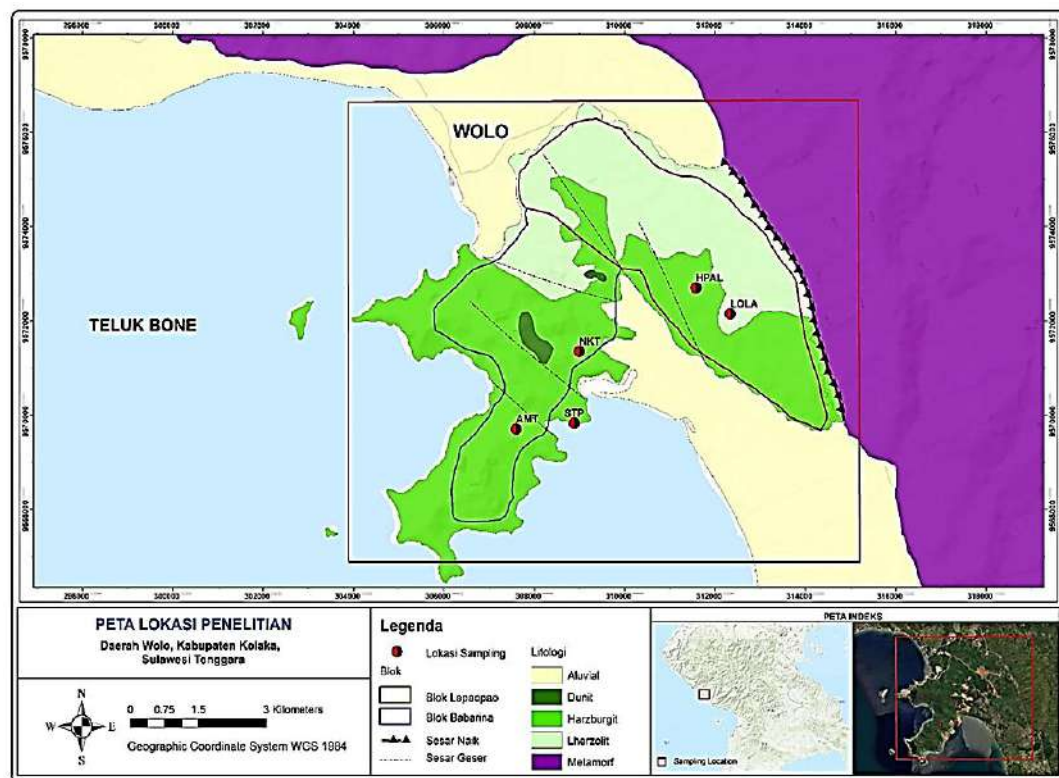
Metode ini melibatkan penggunaan alat-alat khusus untuk memperoleh data yang lebih spesifik dan rinci. Aktivitas ini meliputi pengambilan gambar singkapan batuan dan kondisi morfologi menggunakan kamera, yang sangat berguna untuk analisis lanjutan dan dokumentasi kondisi lapangan. Selain itu, pengambilan sampel dilakukan menggunakan palu geologi atau sekop, yang nantinya dianalisis di laboratorium untuk mengetahui komposisi kimia dan mineralogi, struktur, dan sifat fisik material. Penggunaan alat-alat ini memungkinkan pengumpulan data yang lebih tepat dan membantu memastikan bahwa data yang diperoleh representatif serta dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

3.1. Lokasi Penelitian

PT Ceria Nugraha Indotama (CNI) merupakan salah satu perusahaan

pertambangan nikel di Kabupaten Kolaka yang menggunakan sistem penambangan *open pit mining* (sistem penambangan terbuka) dalam proses penambangannya. PT CNI memiliki IUP (Izin Usaha Pertambangan) Operasi Produksi dengan luas lahan ± 6785 ha dengan dua blok penambangan utama yaitu Blok Lapaopao dan Blok Babarina.

Secara administratif daerah penelitian berada di lokasi penambangan PT. CNI, Desa Samaenre, Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. Pit penambangan PT. Ceria Nugraha Indotama terbagi dalam 22 pit seperti pada Tabel 7. Peta tunjuk lokasi penelitian dan peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Peta lokasi penelitian (modifikasi dari Rusmana *et al.*, 1993; Surono, 2010; PT Ceria Nugraha Indotama, 2023; Dermawan *et al.*; 2023)

Lokasi PT CNI *site* Wolo dapat dijangkau dengan menggunakan pesawat dari Kota Makassar menuju Kota Kendari dengan waktu perjalanan selama 1 jam penerbangan atau bisa juga dari Kota Makassar menuju Kolaka. Perjalanan dilanjutkan dengan menggunakan mobil dari Kota Kendari menuju ke arah utara menuju ke Kolaka dengan perjalanan selama empat jam. Dari bandara Kolaka perjalanan darat ke *site* Wolo bisa ditempuh satu jam perjalanan.

Tabel 7. Pit penambangan PT Ceria Nugraha Indotama

No	Nama_Blok	Nama_Pit	Luas_Area (ha)
1	Blok Lapaopao (Tenggara)	Pit Samaenre	381,1736
2	Blok Lapaopao (Tenggara)	Pit Muara Lapapao	476,5596
3	Blok Lapaopao (Utara)	Pit Arjuna	284,3176
4	Blok Lapaopao (Utara)	Pit Bima	266,4174
5	Blok Babarina (Utara)	Pit Zamrud	270,6207
6	Blok Babarina (Selatan)	Pit Emerald	143,1587
7	Blok Babarina (Selatan)	Pit Sapphire	186,2767
8	Blok Babarina (Selatan)	Pit Amethys	195,2244
9	Blok Babarina (Utara)	Pit Pearl	243,7081
10	Blok Babarina (Selatan)	Pit Bacan	400,285
11	Blok Babarina (Utara)	Pit Diamond	111,1987
12	Blok Lapaopao (Utara)	Pit Nakula	87,1403
13	Blok Babarina (Utara)	Pit Kresna	104,1211
14	Blok Lapaopao (Utara)	Pit Gatot Kaca	65,4517
15	Blok Lapaopao (Tenggara)	Pit Hanoman	62,0984
16	Blok Lapaopao (Tenggara)	Pit Garuda	120,1254
17	Blok Lapaopao (Tenggara)	Pit Junction	16,8936
18	Blok Babarina (Utara)	Pit Jessica Ekstension	39,5988
19	Blok Lapaopao (Tenggara)	Pit Almhira	32,0932
20	Blok Babarina (Utara)	Pit Jessica	69,1582
21	Blok Babarina (Selatan)	Pit Ruby	23,9953
22	Blok Babarina (Selatan)	Pit Nikita	11,626

3.2. Tahapan Penelitian

Adapun tahapan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu terdiri dari beberapa tahapan yaitu tahap persiapan, penelitian lapangan, preparasi sampel, analisa laboratorium, pengolahan data dan penyusunan tesis.

3.2.1. Tahap Persiapan

Dalam tahapan persiapan ini berupa menyiapkan peralatan dan perlengkapan lapangan, pengurusan administrasi dan studi literatur mengenai geologi regional dan lokal, teknik pengambilan dan pengolahan sampel.

Literatur yang diperoleh sebagai bahan pustaka diperoleh dari beberapa sumber antara lain:

1. Jurnal internasional

2. *International geology mining book*
3. *International geology mining magazine*
4. Penelitian tingkat universitas (tesis, desertasi)
5. Penelitian internal perusahaan (laporan eksplorasi, *feasibility study*)
6. Instansi terkait (pemerintah dan konsultan)

Sedangkan survei lapangan meliputi seluruh kegiatan yang berkaitan dengan pemilihan lokasi penelitian, kesesuaian antara lokasi penelitian dengan judul penelitian, serta survei geologi daerah penelitian. Rincian tahapan pelaksanaan survei lapangan meliputi:

- a. Survei geologi lapangan meliputi pengamatan *outcrop* atau *face mining* yang telah dilakukan kegiatan penambangan.
- b. Langkah selanjutnya, berdasarkan pertimbangan kondisi geologi dan situasi tambang dan kenampakan dari *outcrop* atau *face mining* untuk mengidentifikasi material saprolit dari profil nikel laterit daerah penelitian.

3.2.2. Tahap Pengambilan sampel bijih saprolit

Pengambilan sampel bijih saprolit dilakukan pada *outcrop/face* tambang yang telah diidentifikasi sebagai material saprolit. Pengambilan sampel dengan menggunakan alat *excavator*. Sampel diambil pada tiga sisi *bucket* dengan berat total maksimal 200 kg. Pengambilan sampel juga akan dilakukan pada *stockpile* dengan *type ore* saprolit dengan perlakuan yang sama. Tujuan dilakukannya pengambilan data adalah sebagai langkah awal dalam analisis data.

Pengambilan sampel bijih saprolit dilakukan dengan mengambil data-data yang relevan dengan penelitian yang dilakukan. Sebelum dilakukan pengambilan sampel terlebih dahulu dilakukan pengambilan data koordinat. Data koordinat merupakan data yang memuat data koordinat dan data ketinggian dari setiap *outcrop/face mining*. Penentuan data koordinat diperoleh dengan melakukan *stake out* dengan menggunakan alat *GPS (Global Positioning System)*. *Stake out* adalah suatu pengukuran yang digunakan untuk menentukan lokasi koordinat suatu titik dilapangan. Tahap pengambilan sampel bijih saprolit dapat dilihat pada Gambar 9 dimana menggambarkan *outcrop* saprolit, penggunaan alat berat dan perlengkapan sampling.



Gambar 9. Tahapan pengambilan sampel saprolit di area *pit* (a). Kenampakan face mining dengan material saprolit. (b) Pengambilan sampel saprolit dengan bucket excavator. (c) Fraksi kasar dan halus material saprolit. (d) Pengambilan sampel material saprolit di bucket excavator. (e) Perlengkapan sampling scope 120D. (f) Material saprolit yang sudah disampling dan dipacking dikirim ke *sample house*.

3.2.3. Tahap Preparasi Sampel

Preparasi sampel fraksinasi ini terbagi dua tahap yaitu preparasi basah dan preparasi kering sesuai prosedur standar Japan Industrial Standard (JIS) 8109 tahun 1996; *Garnierite Nickel Ores - Methods for Sampling, Sample Preparation, and Determination of Moisture Content*. Tahapan preparasi basah seperti pada Gambar 10 dan Gambar 11 sebagai berikut :

- Preparasi sampel untuk studi fraksinasi ini dimulai dengan pengambilan data berat awal sampel. Dilanjutkan dengan pemisahan fraksi material dengan *screening* dalam ukuran *inch* (2", 4", 6" & 8") menjadi ukuran partikel (-2"), (+2"-4"), (+4"-6"),(+6"-8") dan (+8").
- Ambil semua fraksi sampel (-2"), (+2",-4"), (+4",-6"), (+6",-8") dan (+8") kemudian ditimbang berdasarkan fraksinya dan dicatat.
- Material sample yang berukuran (+10 mm) akan di *crushing* terlebih dahulu menjadi ukuran -10 mm menggunakan alat *jaw crusher* / *double roll crusher*,

kemudian sampel dipreparasi basah (*blending, composite*, dan reduksi dengan matrix 4x5) berdasarkan fraksinya sesuai dengan standar JIS.

- d. Hasil reduksi ditimbang (± 5 kg) kemudian dicatat sebagai berat basah.



Gambar 10. Tahapan preparasi sampel saprolit (a) penimbangan sampel saprolit dari face mining/stockpile, (b) *screening* sampel material saprolit (-2",+2",+4",+6",+8"), (c) pengelompokan masing-masing fraksi, (d) penimbangan kembali masing-masing fraksi.

Setelah preparasi basah dilanjutkan dengan preparasi kering dengan tahapan :

- Sample setiap fraksi dikeringkan menggunakan oven selama 24 jam pada suhu 105°C.
- Sample dikeluarkan dari oven setelah 24 jam dan ditimbang sebagai data berat kering. Sample di *crushing* hingga berukuran -3mm dan selanjutnya direduksi kembali dengan *double roll crushing* lagi menjadi -1 mm.

- c. Hasil *crushing* sample (-1 mm) di mixing kemudian direduksi dengan metode matriks hingga diperoleh sekitar 1 kg untuk proses *pulverizing* dan 1 kg sebagai *sample backup*.



Gambar 11. Tahapan lanjutan preparasi basah (e) *mixing* sampel untuk homogenisasi. (f) sampel kuartir. (g) penimbangan kembali masing-masing fraksi. (h) pengeringan sampel dalam oven.

- d. Sample di *pulverizing* lagi hingga berukuran 200 mesh menggunakan alat pulverizer.
- e. Sample di *blending* dan direduksi lagi dengan metode matrix sesuai dengan standard JIS hingga diperoleh berat sekitar 200 gram (*sample pulp*) untuk proses analisa dan 200 gram sebagai *sample backup*.
- f. Setelah tahap preparasi kering selesai, proses dilanjutkan dengan metode fuse bead. Dalam metode ini, sampel pulp dikeringkan pada suhu 100°C selama sekitar satu jam untuk menghilangkan sisa air. Kemudian, satu gram sampel

dicampur dengan 4,5 gram Li-metaborat dan Li-tetraborat sebagai *flux*. Campuran ini dilebur pada suhu 1500°C selama tujuh menit dalam wadah platinum, dan setelah itu dicetak dalam cetakan untuk membentuk *fused bead*. *Fused bead* tersebut kemudian siap untuk dianalisis kadar menggunakan XRF

3.2.4. Tahap Analisis Laboratorium

Analisis laboratorium terbagi menjadi tiga (3) yaitu :

1. Analisis Mikroskopis (Petrografi)

Analisis petrografi adalah suatu metode analisis yang berfokus pada deskripsi batuan untuk memahami komposisi mineral penyusunnya secara mikroskopis. Melalui analisis mikroskopis ini, fraksi kasar bijih saprolit dapat diidentifikasi dan diberi nama secara rinci. Sampel fraksi kasar bijih saprolit yang digunakan berasal dari lokasi penelitian, dan sampel ini kemudian dibuat menjadi sayatan tipis (*thin section*). Pembuatan sayatan tipis diawali dengan pemotongan sampel menjadi potongan kecil yang dapat dipasang pada slide mikroskop.

Potongan batuan tersebut kemudian diampelas dan dipoles hingga mencapai ketebalan sekitar 30 mikrometer, sehingga dapat ditembus cahaya untuk pengamatan mikroskopik. Sayatan tipis batuan diamati menggunakan mikroskop polarisasi untuk mengidentifikasi mineral dan tekstur batuan. Pengamatan dilakukan dalam cahaya terpolarisasi biasa (PPL) dan cahaya terpolarisasi silang (XPL). Dalam pengamatan *parallel* nikol, yang dapat diidentifikasi meliputi warna, bentuk mineral, belahan, relief, dan indeks bias. Sementara itu, dalam pengamatan *cross* nikol, yang diidentifikasi adalah warna interferensi, kembaran, pemadaman, *birefringence*, dan besar sudut pemadaman suatu mineral. Analisis petrografi ini digunakan untuk mengidentifikasi jenis mineral dalam sampel batuan berdasarkan warna, tekstur, struktur, serta komposisi mineralnya.

Analisis petrografi ini dilakukan di Laboratorium Mineral Optik Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tipe alat yang digunakan mikroskop polarisasi. Merek alat yaitu Microscope Nikon type DS-Fi2 seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Mikroskop polarisasi Nikon type DS-Fi2

2. Analisis *X-ray fluorescence* (XRF)

Assaying yang digunakan dalam penelitian ini memanfaatkan teknik *X-ray fluorescence* (XRF), yang berfungsi untuk menentukan konsentrasi unsur dengan menganalisis panjang gelombang dan jumlah sinar-X yang dipancarkan kembali setelah sinar-X berenergi tinggi ditembakkan. XRF adalah metode analisis yang paling banyak digunakan untuk menentukan unsur mayor dan unsur jejak. Proses teknisnya dimulai dengan pemancaran sinar-X yang mengeluarkan elektron dari kulit K atom. Elektron dari kulit luar kemudian berpindah ke kulit dalam untuk mencapai keadaan seimbang kembali. Perpindahan elektron ini menghasilkan energi *X-ray irradiation* atau *fluorescent X-ray*. Karena setiap elemen memiliki tingkat energi yang berbeda, karakteristik energi X-ray yang dilepaskan dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur kimia sampel nikel laterit.

Analisis kimia sampel fraksinasi bijih saprolit dilakukan di Laboratorium PT CNI. Metode analisis menggunakan *Wave Length Energy X-Ray Fluorescence* (WD-XRF) dengan tipe alat S8 Tiger Bruker seperti pada Gambar 13. *Detection limit* untuk tipe alat ini yaitu 0,005 Ni%; 0,001% Co; 0,010% MgO; 0,010% Al₂O₃; 0,010% SiO₂; 0,010% MnO; 0,010 Fe₂O₃.



Gambar 13. (a) Alat analisis sampel WDXRF tipe S8 Tiger Bruker, (b) contoh sampel dengan preparasi metode *fuse bead*

3. Analisis *Lost on Ignition* (LOI)

Analisis LOI untuk mengetahui derajat serpentinisasi dan kadar mineral olivin dalam batuan. Penentuan LOI dengan cara pemanasan/pembakaran sampel pada suhu dan waktu tertentu. Selisih bobot sebelum dan sesudah pemijaran, dihitung sebagai persentase zat yang hilang akibat pembakaran. Analisis LOI juga dilakukan di Laboratorium PT CNI dengan tipe alat Bruker tipe S2 Tiger seperti pada Gambar 14.



Gambar 14. Alat analisis sampel untuk LOI merek LECO

4. Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD)

Metode X-Ray diffraction (XRD) digunakan untuk menganalisis berbagai material padat, dengan tujuan utama mengidentifikasi fase kristalin dari objek yang

diamati. Prinsip dasar metode XRD didasarkan pada persamaan Bragg: $n\lambda = 2d\sin\theta$ di mana n adalah bilangan bulat (urutan difraksi), λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antara lapisan atom, dan θ adalah sudut antara panjang gelombang sinar-X dan lapisan atom.



Gambar 15. Alat analisis XRD Shimadzu Maxima X 7000

Proses XRD dimulai dengan menempatkan sampel awal pada preparasi kaca, yang kemudian dimasukkan ke dalam perangkat XRD. Sumber sinar-X bergerak dan menyinari sampel, sementara detektor menangkap sinar yang dipantulkan dari sampel tersebut. Perangkat perekam kemudian mencatat intensitas pantulan sinar pada setiap sudut tertentu. Hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik yang menghubungkan sudut penyinaran dengan intensitas pantulan. Hasil pemindaian XRD kemudian dianalisis menggunakan program PDX-2 yang dikeluarkan oleh *Mineral Data Institute* (MDI) yang dikombinasikan dengan perangkat lunak *Impact Match! Version-3*, untuk mengidentifikasi jenis mineral yang terkandung dalam sampel. Identifikasi komposisi mineral fraksi bijih saprolit ini dilakukan di Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Untuk studi ini menggunakan difraktometer Shimadzu Maxima X-7000 seperti pada Gambar 15.

3.2.5. Analisis dan Pengolahan Data

Analisis dan pengolahan data terdiri dari :

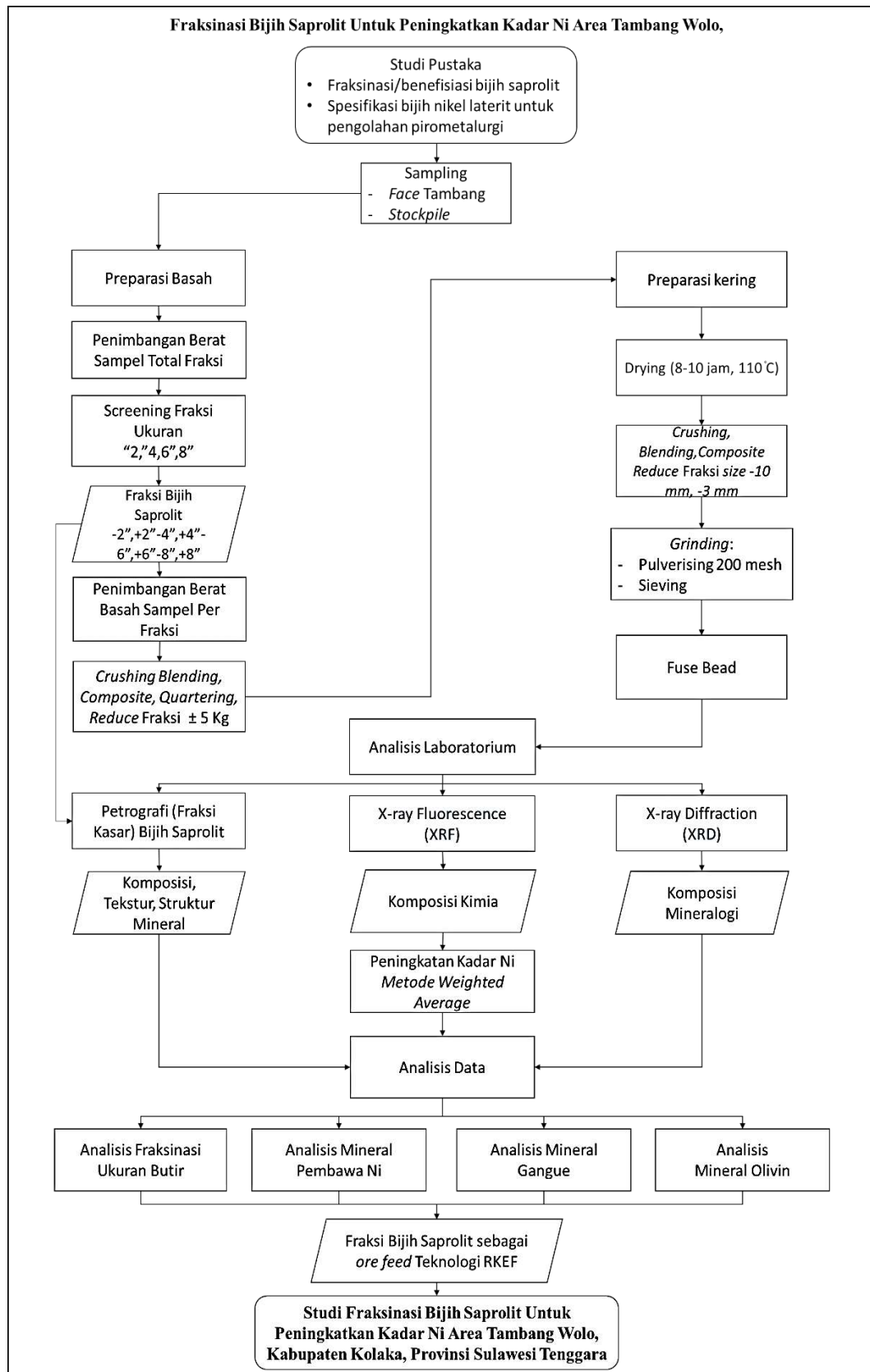
- a. Perhitungan tingkat perolehan (*recovery*) dan kadar Ni didapatkan dari data kumulatif berat basah dan data assay masing-masing fraksi. Perhitungan kadar rata-rata fraksi dengan statistik deskriptif yaitu *weighted average* yaitu nilai rata-rata yang dihitung dengan memperhitungkan timbangan/bobot untuk setiap data. Metode ini sering digunakan dalam berbagai bidang seperti geologi, ekonomi, dan keuangan untuk memperkirakan nilai rata-rata yang lebih akurat dengan mempertimbangkan bobot masing-masing data. Dalam bidang geologi atau pertambangan metode ini dapat digunakan untuk memperkirakan kualitas bijih atau mineral berdasarkan sampel yang diambil dari berbagai lokasi. Bobot dapat diberikan berdasarkan jarak, berat atau kualitas sampel. Komponen utama dalam studi fraksinasi bijih saprolit ini yaitu data *assay* (komposisi kimia) dan data berat awal/basah. Setiap penimbang/bobot merupakan pasangan data yaitu data berat dan data *assay* (kadar Ni).
- b. Analisis komposisi mineral untuk mengetahui tekstur, struktur batuan/mineralisasi, komposisi/prosentase mineral penyusun fraksi bijih saprolit. Metode yang dilakukan adalah pengamatan tekstur/struktur, identifikasi dan penghitungan prosentase mineral dan penamaan litologi penyusun fraksi bijih saprolit dengan mikroskop polarisasi dan . Analisis ini untuk identifikasi mineral pembawa Ni dan mineral *gangue*.
- c. Analisis persentase komposisi mineral olivin dalam fraksi kasar dilakukan mendapatkan data fraksi bijih saprolit untuk diolah dengan proses pirometalurgi. Perhitungan kadar olivin dari data komposisi mineralogi hasil analisis XRD.

Analisis komposisi kimia dan mineralogi fraksi sebagai *ore feed* dalam pengolahan secara pirometalurgi. Dari hasil *upgrading* kadar Ni tiap fraksi bijih saprolit selanjutnya ditentukan fraksi yang sesuai dengan parameter kimia dan mineralogi untuk umpan dalam proses pengolahan.

3.3. Bagan Alir Penelitian

Alur penelitian terkait “*Studi Fraksinasi Ukuran Butir Bijih Saprolit*”

Terhadap Peningkatan Kadar Ni Dan Implikasinya Sebagai Ore Feed Pirometalurgi Area Tambang Wolo, Kabupaten Kolaka Sulawesi Tenggara”, terdiri dari beberapa langkah. Langkah yang dilakukan dalam proses penyusunan penelitian ini dimulai dari studi literatur yang sumber literturnya secara umum diperoleh dari buku dan jurnal nasional maupun internasional yang terdapat di *website* penyedia buku dan penerbit terkait. Setelah melakukan studi literatur dilanjutkan pengambilan data lapangan. Data kemudian diolah dan dianalisis mengenai peningkatan kadar Ni, komposisi mineralogi pembawa Ni dan mineral *gangue*, dan spesifikasi kimia dan mineralogi untuk proses pengolahan fraksi bijih saprolit. Hasil pengambilan data dan pengolahan data akan disusun menjadi sebuah tulisan sesuai dengan format atau aturan penulisan yang sudah ditentukan dan disusun secara sistematis. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Bagan alir penelitian