

SKRIPSI

STUDI TRANSFORMASI MINERALOGI DAN KOMPOSISI KIMIA BIJIH SAPROLIT DENGAN METODE PEMANGGANGAN TEREDUKSI MENGGUNAKAN ARANG TONGKOL JAGUNG

Disusun dan diajukan oleh:

**ANUGRAH SAPUTRA TANDI SAU'
D111 20 1031**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI TRANSFORMASI MINERALOGI DAN KOMPOSISI KIMIA BIJIH SAPROLIT DENGAN METODE PEMANGGANGAN TEREDUKSI MENGGUNAKAN ARANG TONGKOL JAGUNG

Disusun dan diajukan oleh

ANUGRAH SAPUTRA TANDI SAU'
D111 20 1031

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 15 Juli 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



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

Ketua Program Studi,



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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Anugrah Saputra Tandi Sau'

NIM : D111201031

Program Studi : Teknik Pertambangan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

(Studi Transformasi Mineralogi dan Komposisi Kimia Bijih Saproilit dengan Metode Pemanggangan Tereduksi Menggunakan Arang Tongkol Jagung)

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 Juli 2024

Yang Menyatakan



Anugrah Saputra Tandi Sau'



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRAK

ANUGRAH SAPUTRA TANDI SAU’. *Studi Transformasi Mineralogi dan Komposisi Kimia Bijih Saprolit dengan Metode Pemanggangan Tereduksi Menggunakan Arang Tongkol Jagung* (dibimbing oleh Sufriadin)

Kandungan magnesium-silikon oksida dan nikel pada saprolit lebih tinggi dibandingkan limonit sehingga saprolit diolah secara pirometalurgi, namun karena biaya tinggi pada pirometalurgi sehingga dikembangkannya proses pemanggangan tereduksi untuk benefisasi saprolit. Sampel penelitian diambil dari Wolo, Kabupaten Kolaka. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis transformasi mineral bijih saprolit setelah pemanggangan tereduksi dan menganalisis pengaruh waktu reduksi dan jumlah reduktor terhadap perubahan komposisi kimia bijih saprolit menggunakan reduktor arang tongkol jagung. Proses pra-olah dimulai dengan mereduksi ukuran sampel hingga lolos 100 mesh. Pemanggangan tereduksi dilakukan pada suhu 1000 °C dengan variasi waktu reduksi (30, 60, 90, dan 120 menit) dan jumlah reduktor (5%, 10%, 15%, dan 20%). Hasil pemanggangan tersebut dianalisis untuk mengetahui komposisi mineral dan kimia bijih menggunakan mikroskopis, XRD dan XRF. Hasil XRD awal mengindikasikan sampel saprolit tersusun dari mineral *goethite* [(Fe,Ni)O(OH)], *lizardite* [Mg₃Si₂O₅(OH)₄], *quartz low* [SiO₂], *talca* [H₂Mg₃(SiO₃)₄], dan *montmorillonite* [(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)₂(Si₄O₁₀)(OH)₂ · nH₂O]. Setelah pemanggangan transformasi mineral yang terjadi pada saprolit dengan variabel reduktor 10% yaitu *lizardite*, *talca* dan *montmorillonite* bertransformasi menjadi *forsterite* [Mg₂SiO₄] dan *enstatite* [Mg₂SiO₃]. *Goethite* bertransformasi menjadi *magnetite* [Fe₃O₄]. Transformasi lebih lanjut dari *forsterite* dan *enstatite* menjadi nikel oksida [NiO] dan membentuk Ni sedangkan *magnetite* bertransformasi menjadi *wustite* [FeO] dan kemudian menjadi Fe, selanjutnya Ni dan Fe akan saling berikatan membentuk mineral *tetrateneite* [FeNi]. *Quartz low* menjadi *quartz* yang merupakan mineral yang stabil pada suhu 1000 °C. Hasil analisis XRF awal menunjukkan sampel bijih saprolit mengandung Fe₂O₃ (35,7%), SiO₂ (32,58%), Fe (23,91%), MgO (6,84%), Al₂O₃ (4,87%) dan Ni (1,9%). Hasil XRF setelah pemanggangan tereduksi mengindikasikan bahwa waktu dan jumlah reduktor yang paling optimum dalam melakukan pemanggangan tereduksi saprolit pada suhu 1000 °C adalah waktu 60 menit dengan jumlah reduktor 10% dapat menaikkan kadar Ni dari 1,9% menjadi 1,95% dengan kenaikan sebesar 2,63%.

Kata Kunci: Pemanggangan tereduksi, Saprolit, Waktu Reduksi, Reduktor, Arang Tongkol Jagung



ABSTRACT

ANUGRAH SAPUTRA TANDI SAU'. Study on Mineralogical Transformation and Chemical Composition of Saprolite Ore by Reduction Roasting Method Using Corn Cob Charcoal (supervised by Sufriadin)

The magnesium-silicon oxide and nickel content of saprolite is higher than that of limonite so saprolite is pyrometallurgically processed, but due to the high cost of pyrometallurgy, a reduced roasting process was developed for saprolite beneficiation. Samples were taken from Wolo, Kolaka Regency. This study aims to analyze the mineral transformation of saprolite ore after reduced roasting and analyze the effect of reduction time and the amount of reductant on changes in the chemical composition of saprolite ore using corn cob charcoal reductant. The pre-processing process begins by reducing the sample size until it passes 100 mesh. Reduction roasting was carried out at 1000°C with variations in reduction time (30, 60, 90, and 120 minutes) and amount of reductant (5%, 10%, 15%, and 20%). The roasting results were analyzed to determine the mineral and chemical composition of the ore using microscopy, XRD and XRF. Initial XRD results indicated the saprolite samples were composed of the minerals goethite $[(Fe,Ni)O(OH)]$, lizardite $[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]$, quartz low $[SiO_2]$, talc $[H_2Mg_3(SiO_3)_4]$, dan montmorillonite $[(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O]$. After roasting the mineral transformations that occur in saprolite with variabel reductant 10% are lizardite, talc and montmorillonite transformed into forsterite $[Mg_2SiO_4]$ and enstatite $[Mg_2SiO_3]$. Goethite transforms into magnetite $[Fe_3O_4]$. Further transformation of forsterite and enstatite into nickel oxide $[NiO]$ and form Ni while magnetite transforms into wustite $[FeO]$ and then into Fe, then Ni and Fe will bind together to form the mineral tetratenite $[FeNi]$. Quartz low becomes quartz which is a stable mineral at 1000°C. The initial XRF analysis showed that the saprolite ore sample contained Fe_2O_3 (35.7%), SiO_2 (32.58%), Fe (23.91%), MgO (6.84%), Al_2O_3 (4.87%) and Ni (1.9%). XRF results after reduction roasting indicate that the most optimum time and amount of reductant in conducting reduction roasting of saprolite at 1000 °C is 60 minutes with 10% reductant which can increase the Ni content from 1.9% to 1.95% with an increase of 2.63%.

Keywords: Selective Reduction, Saprolite, Reduction Time, Reductant, Corn Cob Charcoal



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
KATA PENGANTAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Nikel.....	6
2.2 Nikel Laterit	9
2.3 Bijih Saprolit	14
2.4 Teknologi Pengolahan Nikel Laterit	16
2.5 Jenis Teknik Inovasi Upgrading Bijih Nikel Laterit	21
2.6 Pemanggang Tereduksi Bijih Nikel Laterit.....	22
2.7 Arang Tongkol Jagung Sebagai Reduktor	26
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Lokasi Penelitian.....	29
3.2 Variabel Penelitian.....	29
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.4 Teknik Pengumpulan Data Penelitian.....	29
3.5 Teknik Analisis	43
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1 Karakterisasi Bijih Saprolit.....	44
4.2 Karakterisasi Reduktor Arang Tongkol Jagung.....	48
4.3 Transformasi Mineralogi Setelah Pemanggang tereduksi Saprolit	48
4.4 Pengaruh Waktu Reduksi Terhadap Komposisi Kimia Bijih Saprolit.....	53
4.5 Pengaruh Jumlah Reduktor Terhadap Komposisi Kimia Bijih Saprolit	64
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	79



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Penggunaan utama nikel.....	7
Gambar 2 Profil endapan nikel laterit	12
Gambar 3 Lapisan ideal laterit daerah tropis di alam dan pengolahannya	17
Gambar 4 Lokasi pengambilan sampel bijih saprolit di Wolo.....	29
Gambar 5 Percampuran dan kuartering sampel saprolit	33
Gambar 6 Proses reduksi ukuran sampel dan reduktor menggunakan mortar.....	34
Gambar 7 Proses pengayakan sampel.....	35
Gambar 8 Proses penimbangan sampel.....	35
Gambar 9 Proses <i>mixing</i> sampel dan reduktor	36
Gambar 10 Proses pemanggangan tereduksi.....	37
Gambar 11 Analisis proksimat menggunakan <i>muffle furnace</i> Yamato FO 310 ...	38
Gambar 12 Analisis XRD sampel menggunakan Instrument difraktometer tipe Shimadzu Maxima X-7000	39
Gambar 13 Analisis mikroskopis sampel menggunakan mikroskop polarisasi tipe Nikol Eclipse LV100N POL	40
Gambar 14 <i>X-Ray Fluorescences Spectrometry</i> tipe EDX-720.....	41
Gambar 15 Diagram alir penelitian.....	42
Gambar 16 Kenampakan mineral hasil mikroskopis sampel bijih saprolit.....	44
Gambar 17 Hasil analisis XRD sampel awal bijih saprolit.....	45
Gambar 18 Hasil analisis XRD sampel bijih saprolit pada suhu 1000 °C dengan variabel 10% jumlah reduktor setelah pemanggangan.....	49
Gambar 19 Kenampakan mineral hasil analisis mikroskopis sampel setelah pemanggangan tereduksi pada variabel 10% jumlah reduktor dengan waktu reduksi 60 menit	52
Gambar 20 Grafik kadar Ni dan Fe pada penambahan reduktor 5%	54
Gambar 21 Grafik kadar SiO ₂ , MgO dan Al ₂ O ₃ pada penambahan reduktor 5%.	55
Gambar 22 Grafik Rasio SiO ₂ /MgO pada penambahan reduktor 5%.....	56
Gambar 23 Grafik kadar Ni dan Fe pada penambahan reduktor 10%	57
Gambar 24 Grafik kadar SiO ₂ , MgO dan Al ₂ O ₃ penambahan reduktor 10%.....	58
Gambar 25 Grafik Rasio SiO ₂ /MgO pada penambahan reduktor 10%.....	58
Gambar 26 Grafik kadar Ni dan Fe pada penambahan reduktor 15%	59
Gambar 27 Grafik kadar SiO ₂ , MgO dan Al ₂ O ₃ penambahan reduktor 15%.....	60
Gambar 28 Grafik Rasio SiO ₂ /MgO pada penambahan reduktor 15%.....	61
Gambar 29 Grafik kadar Ni dan Fe pada penambahan reduktor 20%	62
Gambar 30 Grafik kadar SiO ₂ , MgO dan Al ₂ O ₃ penambahan reduktor 20%.....	63
Gambar 31 Grafik Rasio SiO ₂ /MgO pada penambahan reduktor 20%.....	63
Gambar 32 Grafik kadar Ni dan Fe pada waktu reduksi 30 menit.....	66
Gambar 33 Grafik kadar SiO ₂ , MgO dan Al ₂ O ₃ pada waktu reduksi 30 menit....	66
Gambar 34 Grafik Rasio SiO ₂ /MgO pada waktu reduksi 30 menit	67
Gambar 35 Grafik kadar Ni dan Fe pada waktu reduksi 60 menit.....	68
Gambar 36 Grafik kadar SiO ₂ , MgO dan Al ₂ O ₃ pada waktu reduksi 60 menit....	69
Gambar 37 Grafik Rasio SiO ₂ /MgO pada waktu reduksi 60 menit	69
Gambar 38 Grafik kadar Ni dan Fe pada waktu reduksi 90 menit.....	71
Gambar 39 Grafik kadar SiO ₂ , MgO dan Al ₂ O ₃ pada waktu reduksi 90 menit....	71
Gambar 40 Grafik Rasio SiO ₂ /MgO pada waktu reduksi 90 menit	72



Gambar 41 Grafik kadar Ni dan Fe pada waktu reduksi 120 menit.....	73
Gambar 42 Grafik kadar SiO ₂ , MgO dan Al ₂ O ₃ pada waktu reduksi 120 menit..	74
Gambar 43 Grafik Rasio SiO ₂ /MgO pada waktu reduksi 120 menit	74



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Fasa Mineral Sampel Saprolit	46
Tabel 2. Hasil Analisis XRF Sampel Awal Saprolit	47
Tabel 3. Hasil Analisis Proksimat Arang Tongkol Jagung	48
Tabel 4. Fasa mineral sampel saprolit pada suhu 1000 °C dengan variabel 10% jumlah reduktor setelah pemanggangan	49
Tabel 5. Komposisi kimia setelah pemanggangan tereduksi dengan penambahan 5% reduktor	54
Tabel 6. Komposisi kimia setelah pemanggangan tereduksi dengan penambahan 10% reduktor	56
Tabel 7. Komposisi kimia setelah pemanggangan tereduksi dengan penambahan 15% reduktor	59
Tabel 8. Komposisi kimia setelah pemanggangan tereduksi dengan penambahan 20% reduktor	61
Tabel 9. Komposisi kimia setelah pemanggangan tereduksi dengan waktu reduksi 30 menit.....	65
Tabel 10. Komposisi kimia setelah pemanggangan tereduksi dengan waktu reduksi 60 menit.....	67
Tabel 11. Komposisi kimia setelah pemanggangan tereduksi dengan waktu reduksi 90 menit.....	70
Tabel 12. Komposisi kimia setelah pemanggangan tereduksi dengan waktu reduksi 120 menit.....	72



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan analisis proksimat reduktor	85
Lampiran 2 Hasil analisis XRD	87
Lampiran 3 Hasil analisis XRF	110



KATA PENGANTAR

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

Tugas akhir dengan judul “Studi Transformasi Mineralogi dan Komposisi Kimia Bijih Saprolit dengan Metode Pemangangan Tereduksi Menggunakan Arang Tongkol Jagung” diharapkan mampu memberikan referensi pengolahan nikel laterit yang ekonomis untuk menjadi solusi pemanfaatan nikel laterit yang melimpah di tanah air.

Penulis menyadari telah menerima banyak bantuan dari berbagai pihak baik selama melaksanakan penelitian ini maupun dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada: Ibu Dr Aryanti Virtanti Anas, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak/Ibu Dosen yang telah memberikan ilmunya serta staff administrasi departemen yang telah membantu segala bentuk administrasi yang diperlukan untuk mendukung jalannya penyusunan tugas akhir ini. Bapak Dr. Ir. Sufriadin, ST., MT selaku dosen pembimbing yang membantu memberikan solusi dan saran bagi penulis dalam menyelesaikan masalah yang dihadapi selama melaksanakan eksperimen dan penyusunan laporan tugas akhir ini, Bapak Dr. Eng. Purwanto, ST., M.T., dan Ibu Dr. Eng. Rini Novrianti Sutardjo Tui, ST., MBA, MT selaku dosen penguji atas kesediaannya dan saran yang telah diberikan kepada penulis dalam rangka penulisan karya tugas akhir yang lebih baik. Kak Muhammad Zahran Mubarak, ST., yang juga telah membantu memberikan saran, mengajarkan metode dan ilmu yang diperlukan selama melaksanakan eksperimen. Teman angkatan Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin 2020 (DRILLING 2020) terima kasih atas waktu luang yang diberikan untuk berbagi cerita, berkeluh kesah, serta motivasi yang diberikan. Seluruh penghuni PARIS, ucapan terima kasih untuk semua waktu yang dilalui bersama, terima kasih telah membantu penulis dalam kehidupan perkuliahan. Kedua orang tua, mendiang ayah dan mendiang ibu yaitu Frederik Ganti Kalong dan Nyoman Sunarti, kakak-kakak dan adik yaitu Ekarianti Tandi Sau’, Yunus Matana, Megalisa Siampa’, Markus Palallo, Inggrit Srijayanti, Wulan Tandilolo dan Paskal Aprianto atas dukungan, doa, dan kasih sayang kepada penulis.

Gowa, Mei 2024
Penulis,

Anugrah Saputra Tandi Sau’



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel adalah logam strategis yang dimanfaatkan untuk produksi baja tahan karat seperti *stainless steel* karena memiliki sifat dimana kekuatan impak yang tinggi, ketahanan terhadap korosi yang tinggi, dan juga sifat lainnya yang diinginkan seperti sifat listrik, termal, dan magnetik (Permana dkk., 2020). Pada tahun 2025 kebutuhan nikel untuk baterai diperkirakan akan meningkat sekitar 15% dari produksi nikel dunia (König, 2021), dimana pemanfaatan dari nikel sebagai logam strategis ini menyebabkan kebutuhan logam nikel akan terus meningkat, hingga mencapai 140-175% (Elskaki *et al.*, 2017). Bijih nikel terbagi atas dua jenis, yaitu nikel sulfida dan nikel laterit, yang masing-masing menyumbang sekitar 30% dan 70% dari cadangan nikel dunia (Bahfiel dkk., 2021; Mudd, 2009), tetapi lebih dari 60% dari pengolahan nikel saat ini menggunakan bijih nikel sulfida sebagai bahan bakunya. Hal ini dikarenakan biaya ekstraksi yang lebih murah. Peningkatan permintaan secara global dan fluktuasi harga logam nikel di pasar komersial, serta berkurangnya cadangan bijih nikel sulfida, maka industri metalurgi mulai beralih untuk menggunakan bijih nikel laterit sebagai bahan bakunya (Permana dkk., 2020).

Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai cadangan nikel dalam bentuk bijih laterit terbesar di dunia. Cadangan bijih nikel laterit di tanah air mencapai lebih dari 1,5 milyar ton berada di Kawasan Timur Indonesia (KTI) terutama di Sulawesi Tenggara dan Halmahera. Bagian terbesar dari cadangan tersebut adalah nikel kadar rendah dengan kandungan $Ni < 1,8\%$ yang belum diolah di dalam negeri (Prasetyo dkk., 2011). Nikel laterit adalah hasil laterisasi batuan ultramafik yang memiliki kandungan besi dan magnesium yang tinggi, dapat ditemukan pada tanah yang relatif dangkal yaitu sekitar 6-15 m, tetapi bisa juga mencapai 60 meter (Budiyanto dkk., 2021). Secara umum nikel laterit yang diolah



menjadi dua yaitu limonit dan Saprolit. Lapisan atas limonit dicirikan oleh goethit ($FeOOH$) dan terkadang hematit (Fe_2O_3), sedangkan lapisan bawah mengandung magnesium silikat, disebut sebagai lapisan saprolit, yang memiliki

kandungan nikel serta silika dan magnesita yang lebih tinggi. Selain itu, biasanya terdapat lapisan transisi antara lapisan atas limonit dan lapisan bawah saprolit. Bijih laterit tidak dapat dikonsentrasikan dengan metode benefisiasi fisik karena mineraloginya yang kompleks. Karena ketidakmampuan untuk memproduksi merupakan konsentrat bermutu tinggi, sehingga memerlukan proses yang rumit dan padat modal untuk mengkonsentrasikan nikel dari bijih laterit. Oleh karena itu, dalam pengolahan bijih laterit, sangat penting untuk menerapkan metode kimia (pirometalurgi dan hidrometalurgi) untuk mengubah mineralogi asli bijih laterit (Rao *et al.*, 2013).

Hidrometalurgi merupakan proses pemurnian logam dengan menggunakan pelarut kimia untuk melarutkan bahan logam tertentu sehingga kemurnian logam yang diinginkan meningkat (*leaching*). Selain itu, pengolahan melalui pirometalurgi yaitu smelting merupakan teknologi yang sudah sangat banyak digunakan untuk memproduksi feronikel atau *nickel matte*. Proses ini cocok untuk mengolah bijih saprolit atau limonit dengan kadar Ni yang tinggi ($>2\%$), Mg yang tinggi (10%-15%) dan Fe yang rendah (13-20%) (Budiyanto, dkk., 2021).

Saprolit, yang terletak di lapisan tanah yang lebih dalam, memiliki kandungan magnesium-silikon oksida dan nikel lebih tinggi dibandingkan limonit sehingga biasanya diproses dengan metode pirometalurgi. Saat ini, hampir 80% pengolahan nikel menggunakan pirometalurgi karena tingkat perolehan kembali yang tinggi dan teknologi yang telah terbukti baik. Namun demikian, prosesnya yang bersuhu tinggi, yang berarti konsumsi energi yang tinggi, membuatnya mahal. Oleh karena itu, pirometalurgi dengan proses suhu rendah perlu dikembangkan agar bersifat ekonomis sehingga dikembangkan metode pemanggangan tereduksi pada proses suhu rendah yang dilanjutkan dengan proses pemisahan magnetik bijih nikel laterit (Nurjaman *et al.*, 2021).

Pemanggangan tereduksi adalah proses reduksi logam oksida menjadi logam menggunakan reduktor tertentu yang dilakukan pada temperatur kalsinasi dibawah titik lebur logam oksida tersebut. Pemanggangan tereduksi dipilih karena peningkatan kadar nikel jauh lebih mudah dan cepat (Jiang *et al.*, 2013). Proses pengolahan bijih nikel laterit secara pemanggangan tereduksi, kokas dan reduktor lain diperlukan sebagai bahan utama sumber karbon untuk



mengurangi oksida pada besi dan nikel dalam laterit. Salah satu alternatif untuk mengganti ketergantungan reduktor konvensional yang banyak mengandung sulfur maka diperlukan jenis bahan lain yang rendah sulfur. Biomassa memiliki potensi untuk dijadikan sumber reduktor yang berkelanjutan dan rendah sulfur (Nurjaman dkk., 2020).

Sumber biomassa yang berpotensi sebagai agen pereduksi berupa arang padat berasal dari limbah tanaman pertanian limbah pertanian dan limbah hutan. Limbah pertanian dapat berasal dari tanaman berikut: kelapa sawit (tandan kosong kelapa sawit (tandan kosong dan cangkang), kelapa (tempurung dan sabut), karet, ampas tebu, padi (sekam) dan tongkol jagung (Abidin dkk., 2021).

Salah satu biomassa yang berpotensi sebagai pengganti kokas dan bahan reduktor konvensional, sebagai penghasil karbon yaitu arang tongkol jagung. Tongkol jagung memiliki kandungan senyawa karbon yang cukup tinggi, yaitu selulosa (41%) dan hemiselulosa (36%) yang cukup tinggi yang mengindikasikan bahwa tongkol jagung berpotensi sebagai bahan pembuatan arang aktif. Arang aktif dari tongkol ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya mempunyai potensi yang baik sebagai reduktor karena kandungan karbonnya lebih besar dari pada kadar abunya, mudah dibuat, murah, bahan bakunya mudah didapat dan melimpah, mudah digunakan, aman, dan tahan lama (Meilianti, 2020).

Berdasarkan penjelasan di atas, maka penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan kadar nikel pada bijih saprolit dengan menggunakan reduktor biomassa yaitu arang tongkol jagung, dengan variasi jumlah reduktor yang digunakan dan waktu pemanasan yang dilakukan. Diharapkan penelitian ini dapat menjadi referensi baru dalam melakukan benefisi bijih saprolit menggunakan metode pemanggangan tereduksi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana komposisi mineralogi dan kimia sampel bijih saprolit dari Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara dimana transformasi mineralogi sampel saprolit setelah pemanggangan tereduksi menggunakan arang tongkol jagung



3. Bagaimana pengaruh waktu reduksi dan jumlah reduktor arang tongkol jagung terhadap komposisi kimia bijih saprolit

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui komposisi mineral dan kimia sampel bijih saprolit dari Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara.
2. Menganalisis transformasi mineralogi sampel saprolit setelah pemanggangan tereduksi menggunakan arang tongkol jagung
3. Menganalisis pengaruh waktu reduksi dan jumlah reduktor arang tongkol jagung terhadap komposisi kimia bijih saprolit

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Meningkatkan pengetahuan mengenai proses pemanggangan tereduksi nikel saprolit menggunakan reduktor arang tongkol jagung.
2. Memberikan referensi mengenai pengaruh proses pemanggangan tereduksi terhadap komposisi kimia nikel saprolit menggunakan reduktor arang tongkol jagung.
3. Memberikan referensi baru mengenai pemanggangan tereduksi dalam pengolahan nikel saprolit menggunakan arang tongkol jagung

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan di *Laboratory Based Education (LBE)* Analisis dan Pengolahan Bahan Galian Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan komposisi kimia saprolit yang berasal dari Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara menggunakan metode pemanggangan tereduksi. Penelitian ini melibatkan reduktor karbon padat yaitu arang tongkol jagung dengan tujuan untuk menghilangkan oksida pada bijih saprolit sehingga terbentuk metal, dengan hilangnya oksida pada bijih saprolit diharapkan dapat meningkatkan kadar nikelandung di dalam bijih tersebut. Dimana kondisi pemanggangan tereduksi



pada penelitian ini, dilakukan pada suhu 1000°C, ukuran sampel eksperimen 100 mesh, dan berat sampel nikel saprolit 20 gram. Penelitian ini dilakukan beberapa variasi kondisi pemanggangan untuk mengetahui pengaruh dari kondisi-kondisi yang berbeda pada saat proses pemanggangan. Untuk mengetahui pengaruh waktu pemanggangan dilakukan variasi waktu pemanggangan selama 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit sedangkan untuk mengetahui jumlah reduktor arang tongkol jagung yang digunakan dilakukan variasi jumlah reduktor yaitu dengan rasio 5%,10%,15%, dan 20% dari berat sampel bijih saprolit (20 gram), sehingga masing-masing berat reduktor yang digunakan yaitu 1 gram, 2 gram, 3 gram, dan 4 gram. Instrumen yang digunakan dalam mengkarakterisasi sampel penelitian ini yaitu mikroskop polarisasi tipe Nikon Eclipse LV100N POL untuk analisis mikroskopis, Shimadzu Maxima X-7000 untuk analisis XRD, dan instrument *X-Ray Fluorescence Spectrometry* menggunakan alat tipe EDX-720 untuk analisis XRF.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nikel

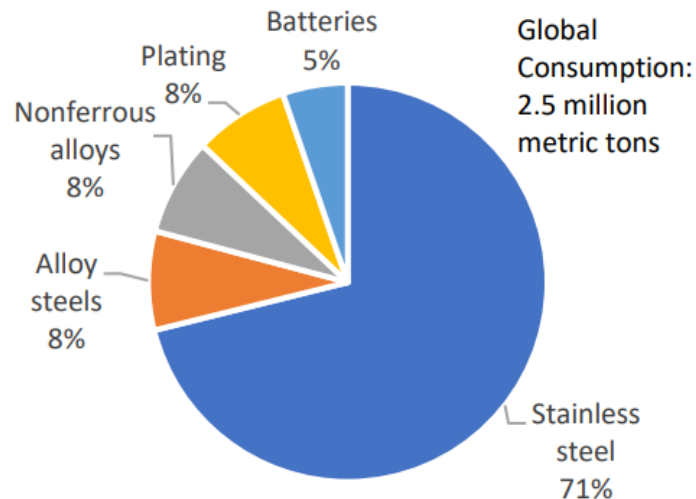
Nikel adalah salah satu logam yang penting dalam industri, dikenal karena berbagai sifat-sifatnya yang unik. Logam ini memiliki kekerasan 3,8 skala Mohs, dengan warna putih keperakan yang menarik. Selain itu, nikel juga memiliki sifat-sifat seperti kemampuan untuk ditarik menjadi kawat (*ductile*) dan dipukul menjadi lembaran (*malleable*). Dengan nomor atom 28 dan berat atom 58,6934, nikel dapat dipoles dan memiliki massa jenis sekitar 8,902 kg/m³ pada suhu 293 K (20°C). Selain itu, nikel memiliki konduktivitas elektrik yang relatif rendah, hanya sekitar 22%, namun dapat dimagnetisasi. Titik leburnya adalah sekitar 1.453°C, yang kemudian akan berubah menjadi fasa cair dengan titik didih sekitar 2.732°C. Struktur kristal mineral nikel dikenal sebagai *face centred cubic*. Sifat paling menonjol dari nikel adalah ketahanannya terhadap oksidasi dan korosi oleh alkali, serta kemampuannya untuk bertahan pada suhu yang tinggi. Selain itu, nikel juga dapat membentuk paduan dengan berbagai jenis logam lainnya, yang membuatnya sangat berharga dalam industri (Bide, *et al.*, 2018).

Keberadaan nikel yang melimpah dengan urutan kelima di dunia, memiliki sifat yang membuatnya berguna dalam sejumlah penerapan berbeda. Nikel memiliki titik leleh yang tinggi, tahan terhadap korosi dan oksidasi, sangat ulet, dan mudah bergabung dengan unsur lain untuk membentuk paduan. Sifat-sifat ini diinginkan pada baja tahan karat dan paduan lainnya yang biasanya digunakan di lingkungan yang keras. Secara global, penggunaan utama nikel adalah dalam produksi baja tahan karat, diikuti oleh baja khusus lainnya dan paduan nonferrous, pelapisan, dan baterai (lihat Gambar 1). Proses produksi nikel rumit dan berbeda-beda tergantung pada jenis deposit mineral yang menampung nikel. Di Indonesia, nikel terutama ditemukan di deposit laterit dekat permukaan, dimana nikel diperoleh melalui metode penambangan terbuka (berbeda dengan deposit bawah

negara-negara produsen terkemuka lainnya seperti Kanada dan Rusia).
 ig dapat dipasarkan yang diproduksi di Indonesia berupa: bijih nikel (nikel
 im diolah); *nickel pig iron* dan feronikel (zat antara tingkat rendah yang



digunakan dalam baja tahan karat); dan nikel matte (zat antara bermutu lebih tinggi yang digunakan untuk membuat logam nikel murni atau bahan kimia) (Guberman, 2021).



Gambar 1. Penggunaan utama nikel (Guberman, 2021)

Saat ini, sumber daya nikel global diperkirakan mencapai hampir 300 juta ton, dengan sebagian besar terdiri dari jenis laterit sebesar 178 juta ton dan jenis sulfida sebesar 118 juta ton. Lebih dari 50% dari sumber daya nikel ini dikuasai oleh beberapa negara seperti Australia, Indonesia, Afrika Selatan, Rusia, dan Kanada. Konsentrasi nikel yang ekonomis terutama ditemukan dalam sulfida dan deposit bijih laterit. Meskipun penambangan nikel telah meningkat secara signifikan, cadangan dan sumber daya nikel yang diketahui terus bertambah. Faktor-faktor seperti pengetahuan yang lebih baik, peningkatan aktivitas eksplorasi di daerah terpencil, dan kemajuan teknologi dalam penambangan, peleburan, dan pemurnian bijih nikel dengan kadar rendah, telah memainkan peran penting dalam pertumbuhan ini. Lebih dari 25 negara di seluruh dunia saat ini menambang bijih nikel, dengan Kawasan Asia Pasifik menyumbang lebih dari 70% dari produksi tambang nikel global. Produsen terbesar termasuk Indonesia, Filipina, Rusia, Australia, dan Kanada, dengan masing-masing negara memiliki fokus produksi pada jenis bijih tertentu (Nickel Institute, 2016).



Posit nikel di dunia dapat diklasifikasikan dalam dua kelompok, yaitu bijih an bijih laterit (oksida dan silikat). Sebanyak 72% cadangan nikel dunia an nikel laterit dan baru 42% dari cadangan tersebut yang diproduksi.

Meskipun 72% dari tambang nikel berbasis bijih laterit, 60% dari produksi primer nikel berasal dari bijih sulfida. Bijih nikel laterit banyak ditemukan di belahan bumi yang memiliki iklim tropis atau subtropis yang terdiri dari hasil pelapukan pada batuan ultramafik yang mengakibatkan pengkayaan unsur Ni, Fe, Co, dan Mn secara residual dan sekunder (Yildirim *et al.*, 2012).

Pembentukan nikel di alam biasanya bersama-sama dengan kromium dan platina di dalam batuan ultrabasa. Hanya ada dua jenis endapan nikel yang bersifat komersial, yaitu endapan nikel sebagai hasil konsentrasi residual silikat pada proses pelapukan batuan beku ultrabasa dan endapan nikel-tembaga sulfida. Batuan ultrabasa dimana terdapat unsur nikel umumnya adalah gabro, basalt, peridotit, dan norit, baik bermetamorfosa maupun tidak.

Endapan nikel-tembaga sulfida terjadi sebagai akibat pemisahan lelehan sulfida-oksida dari lelehan silikat bersulfur sebelum, selama, atau segera sesudah proses alihan pada suhu $>900^{\circ}\text{C}$. Lelehan sulfida-oksida mungkin membeku melalui fasa kristal sebagian magma silikat atau jika proses segregasi terjadi lebih cepat bisa langsung diintrusikan secara terpisah. Bijih yang terbentuk bisa langsung diintrusikan secara terpisah. Bijih yang terbentuk bisa masif atau tersebar bahkan terbresiksikan. Nikel digunakan untuk paduan logam karena sifatnya yang liat, kuat, ringan, anti karat serta mempunyai daya hantar listrik dan panas yang baik. Mineral utama endapan nikel - tembaga sulfida adalah pentlandit dengan rumus kimia $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$. Mineral lainnya adalah nikolit (NiAs) , skuterudit $(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Ni})\text{As}_3$, nikeliferus kobaltit $(\text{Co}, \text{Ni})\text{AsS}$, breithauptit (NiSb) , gerzdofit (Ni As S) , ramelsbergit (NiAs_2) , pararamelsbergit (Ni AS_2) ulmanit $(\text{Ni}, \text{Co})\text{Sb S}$, bravoit NiFeS_2 , milerit (NiS) , dan violurit $(\text{FeNi}_2 \text{ S}_4)$. Mineral-mineral nikel tersebut biasanya berasosiasi dengan mineral sulfida seperti pirotit, pirit, dan kalkopirit (Mariana dkk., 2018).

Bijih laterit terbentuk di dekat permukaan setelah pelapukan ekstensif, dan banyak terdapat di iklim tropis di sekitar khatulistiwa atau daerah kering di Australia Barat bagian tengah atau Afrika bagian selatan (Mudd, 2009). Endapan



laterit sebagai hasil konsentrasi residual pada umumnya tidak mempunyai nilai yang tepat. Dari pelapukan batuan ultrabasa, mineral-mineral nikel yang dihasilkan adalah gautit $(\text{H}_4 \text{ Ni}_2 \text{ Mg}_2 (\text{SiO}_4)_3 \cdot 4\text{H}_2 \text{ O})$, konarit $(\text{H}_2 \text{ Ni}_2$

Si_3O_{10}) dan garnirit (Mg, Ni) $\text{SiO}_3 + n \text{H}_2\text{O}$. Dari ketiga mineral tersebut, garnirit mengandung nikel oksida sampai 32,52% (Mariana dkk., 2018).

Secara historis, sebagian besar produksi nikel berasal dari bijih sulfida dan sumber bijih laterit hanya sedikit. Dari segi sumber daya nikel yang diketahui, sekitar 60% ditemukan dalam bijih nikel dan 40% terkandung dalam sulfida kebalikan dari produksi nikel. Alasan utama terjadinya hal ini adalah sulitnya pengolahan nikel laterit dibandingkan dengan sulfida – bijih laterit memerlukan pengolahan yang ekstensif dan kompleks untuk mengekstraksi nikel, dan secara historis harganya lebih mahal dibandingkan bijih sulfida (Mudd, 2009). Bijih jenis sulfida masih banyak digunakan untuk produksi Ni banyak alasan yaitu seringkali hanya deposit tersebut yang terdapat di negara-negara industri di luar kawasan tropis, komoditas tersebut dapat diberi nilai, asalkan dapat dikonsentrasikan dengan teknik fisik yang tidak mahal, dan sering kali mengandung produk sampingan, seperti Cu dan Pt, yang lebih jarang ditemukan pada bijih laterit, dan perolehannya yang memberi nilai tambah pada bijih jenis sulfida. Sebaliknya, bijih laterit (silika atau teroksidasi) seringkali membutuhkan pengolahan yang lebih mahal dengan konsumsi yang tinggi energi (Trescases, 1997).

2.2 Nikel Laterit

Proses laterisasi adalah proses pelapukan pada mineral yang mudah larut dan silika pada profil laterit pada lingkungan yang bersifat asam dan lembab. Proses ini berlangsung dalam waktu relatif lama dan condong kepada pelapukan yang bercirikan adanya suatu horizon tanah yang kaya dengan mineral-mineral seperti nikel, besi, dan aluminium. Endapan laterit cenderung berkadar rendah dengan jumlah yang melimpah. Proses laterisasi terjadi pada daerah tropis. Proses laterisasi terjadi pada batuan dasar yang mengandung nikel, seperti peridotit, yang telah mengalami pelapukan dan terbentuklah endapan nikel laterit. Proses laterisasi dipengaruhi oleh morfologi dan batuan dasar. Pada daerah yang datar atau landai memiliki ketebalan laterit yang tebal sedangkan pada daerah yang curam memiliki laterit yang tipis. Batuan dasar yang berkembang pada daerah penelitian dari batuan beku ultrabasa yaitu peridotit dengan jenis lhezorlit, websterit,



dan klinopiroksenit. Pengaruh Batuan Dasar terhadap proses laterisasi adalah pada aspek persentase kadar nikel (Elias, 2002).

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

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

Secara global, sumber daya nikel laterit terbesar berada di Kaledonia Baru (21%), Australia (20%), Filipina (17%) dan Indonesia (12%) (Van der Ent, *et al.*, 2013). Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi nikel laterit terbesar di dunia yang potensinya paling besar di jantung pulau Sulawesi dan pulau-pulau kecil di kepulauan Maluku Utara dan Sulawesi Tenggara. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Indonesia memiliki sedikitnya 72 juta cadangan nikel (Ni) termasuk limonit, atau 52% dari total cadangan nikel laterit dunia sebesar 139.419.000 Ton Ni. Sebab, sebagian besar penambangan nikel hanya sebatas itu saja tersebar di 4 provinsi yang 90% dari seluruh cadangan nikel laterit di Indonesia. Ada 3 provinsi di



Sulawesi yaitu Tengah Sulawesi, Sulawesi Selatan dan Sulawesi Tenggara, serta 1 provinsi di Maluku yaitu Maluku Utara (Naryono, 2021).

Genesa pembentukan endapan nikel laterit, proses pembentukan nikel laterit diawali dari proses oksidasi dan pelapukan batuan ultrabasa, dalam hal ini adalah batuan harzburgit. Batuan ini banyak mengandung olivin, piroksen, magnesium silikat dan besi, mineral-mineral tersebut tidak stabil dan mudah mengalami proses pelapukan. Proses pelapukan dimulai pada batuan ultramafik (peridotit, dunit, serpentinit), dimana batuan ini banyak mengandung mineral olivin, piroksen, magnesium silikat dan besi silikat, yang pada umumnya mengandung 0,30 % nikel. Batuan tersebut sangat mudah dipengaruhi oleh pelapukan lateritik. Proses laterisasi adalah proses pencucian pada mineral yang mudah larut dan silika dari profil laterit pada lingkungan yang bersifat asam, hangat dan lembab serta membentuk konsentrasi endapan hasil pengkayaan proses laterisasi pada unsur Fe, Cr, Al, Ni dan Co. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan bijih nikel laterit ini adalah (Sundari, 2012):

1. Batuan asal, adanya batuan asal merupakan syarat utama untuk terbentuknya endapan nikel laterit, batuan asalnya adalah batuan ultrabasa. Dalam hal ini pada batuan ultrabasa terdapat elemen Ni yang paling banyak di antara batuan lainnya dan mempunyai mineral-mineral yang paling mudah lapuk atau tidak stabil (seperti olivin dan piroksin), mempunyai komponen-komponen yang mudah larut dan memberikan lingkungan pengendapan yang baik untuk nikel.
2. Iklim, adanya siklus musim kemarau dan musim penghujan dimana terjadi kenaikan dan penurunan permukaan air tanah juga dapat menyebabkan terjadinya proses pemisahan dan sekaligus akumulasi unsur-unsur. Perbedaan temperatur yang cukup besar akan membantu terjadinya pelapukan mekanis, dimana akan terjadi rekahan-rekahan dalam batuan yang akan mempermudah proses atau reaksi kimia pada batuan.
3. Reagen-reagen kimia dan vegetasi, maksud dari reagen-reagen kimia adalah unsur-unsur dan senyawa-senyawa yang membantu mempercepat proses

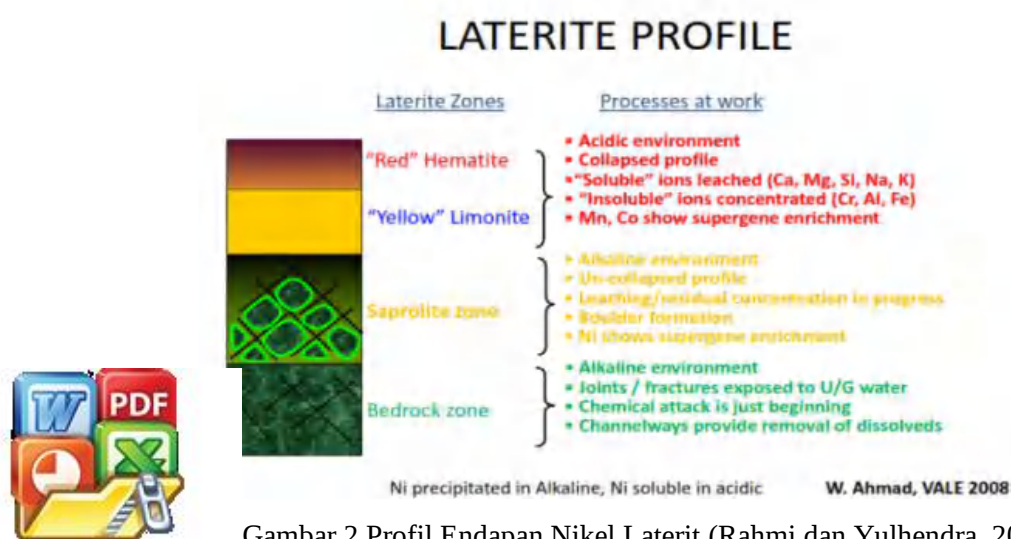


apukan. Air tanah yang mengandung CO₂ memegang peranan penting dalam proses pelapukan kimia. Asam-asam humus menyebabkan komposisi batuan dan dapat mengubah pH larutan. Dalam hal ini, vegetasi

akan mengakibatkan: Penetrasi air dapat lebih dalam dan lebih mudah dengan mengikuti jalur akar pohon-pohonan, akumulasi air hujan akan lebih banyak, humus akan lebih tebal keadaan ini merupakan suatu petunjuk, dimana hutannya lebat pada lingkungan yang baik akan terdapat endapan nikel yang lebih tebal dengan kadar yang lebih tinggi.

4. Topografi, keadaan topografi setempat akan sangat mempengaruhi sirkulasi air beserta reagen-reagen lain. Untuk daerah yang landai, maka air akan bergerak perlahan-lahan sehingga akan mempunyai kesempatan untuk mengadakan penetrasi lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan. Akumulasi endapan umumnya terdapat pada daerah-daerah yang landai sampai kemiringan sedang, hal ini menerangkan bahwa ketebalan pelapukan mengikuti bentuk topografi.
5. Struktur yang sangat dominan adalah struktur kekar (*joint*) dibandingkan terhadap struktur patahannya. Seperti diketahui, batuan beku mempunyai porositas (kemampuan batuan untuk meloloskan air) dan permeabilitas (kemampuan batuan untuk menahan air) yang kecil sekali sehingga penetrasi air sangat sulit, maka dengan adanya rekahan-rekahan tersebut akan lebih memudahkan masuknya air dan berarti proses pelapukan akan lebih intensif.

Pembentukan nikel laterit melalui proses laterisasi membentuk beberapa zona atau profil endapan nikel laterit. Profil endapan Nikel Laterit ini terbentuk dari hasil pelapukan batuan ultrabasa yang dapat dilihat pada Gambar 2 dan penjelasan berikut (Rahmi dan Yulhendra, 2018):



Gambar 2 Profil Endapan Nikel Laterit (Rahmi dan Yulhendra, 2018)



1. Lapisan Tanah Penutup (Top Soil)

Lapisan ini biasa disebut iron capping. Material lapisan berukuran lempung, berwarna coklat kemerahan, biasanya terdapat juga sisa-sisa tumbuhan. Pengayaan Fe terjadi pada zona ini karena terdiri dari konkresi Fe-oksida mineral hematit (Fe_2O) dan chromiferous (FeCr_2O_4) dengan kandungan Nikel relatif rendah. Tebal lapisan bervariasi antara 0 - 2 m. Tekstur batuan asal tidak dapat dikenali lagi. Kandungan unsur Ni pada zona ini $< 1\%$ dan Fe $> 30\%$.

2. Zona Limonit

Merupakan lapisan berwarna coklat muda, ukuran butir lempung sampai pasir, tekstur batuan asal mulai dapat diamati walaupun masih sangat sulit, dengan tebal lapisan berkisar antara 1- 10 m. Lapisan ini tipis pada daerah yang terjal, dan sempat hilang karena erosi. Pada zona limonit hampir seluruh unsur yang mudah larut hilang terlindi, kadar MgO hanya tinggal kurang dari 2% berat dan kadar SiO_2 berkisar 2 - 5% berat. Sebaliknya kadar *hematite* menjadi sekitar 60 - 80% berat dan kadar Al_2O_3 maksimum 7% berat. Kandungan Ni pada zona ini berada pada selang antara 1% sampai 1,4%. Zona ini didominasi oleh mineral goetite, disamping juga terdapat *magnetite*, *hematite*, chromite, serta kuarsa sekunder.

3. Zona Saprolit

Merupakan lapisan dari batuan dasar yang sudah lapuk, berupa bongkah-bongkah lunak berwarna coklat kekuningan sampai kehijauan. Struktur dan tekstur batuan asal masih terlihat. Perubahan geokimia zona saprolit yang terletak di atas batuan asal ini tidak banyak, H_2O dan Nikel bertambah, dengan kadar Ni keseluruhan lapisan antara 2 - 4%, sedangkan magnesium dan silikon hanya sedikit yang hilang terlindi. Zona ini terdiri dari garnierit yang menyerupai bentuk vein, mangan, serpentin, kuarsa sekunder bertekstur *boxwork* (tekstur seperti jaring laba-laba), krisopras, dan di beberapa tempat sudah terbentuk limonit yang mengandung Fe-hidroksida. Pada Unit Geomin,

sa saprolit dapat dibagi menjadi dua bagian yakni *Low Saprolit Ore Zone* (LOZ) dengan kandungan unsur Ni berkisar antara 1,4% sampai 1,8% dan



kandungan unsur Fe < 40% serta *High Saprolit Ore Zone* (HSOZ) dengan kandungan Ni >1,8% dan unsur Fe < 30%.

4. Bedrock

Merupakan bagian terbawah dari profil Nikel Laterit, berwarna hitam kehijauan, terdiri dari bongkah-bongka batuan dasar dengan ukuran > 75 cm, dan secara umum sudah tidak mengandung mineral ekonomis. Kadar mineral mendekati atau sama dengan batuan asal, yaitu Fe $\pm$ 5% serta Ni dan Co antara 0,01 – 0,30%.

2.3 Bijih Saprolit

Saprolit yaitu lapisan yang kaya magnesium dan elemen basal. Antara lapisan saprolit dan limonit biasanya ada lapisan transisi yang kaya magnesium (10-20% Mg) dengan besi yang disebut *serpentine* [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$]. Untuk deposit laterit yang ideal, lapisan limonit sangat tidak cocok untuk ditingkatkan kadarnya, sedangkan peningkatan kadar untuk saprolit juga terbatas untuk peningkatan konsentrasi nikel. Kedalaman profil bijih laterit biasanya berada pada kedalaman 6 sampai 15 meter dari permukaan. Di beberapa tempat, kedalaman profilnya bisa mencapai kedalaman hingga 60 meter di bawah permukaan. Kebutuhan bijih laterit semakin meningkat dengan adanya kenaikan harga nikel dan penurunan cadangan bijih sulfida (Astuti dkk., 2012).

Terletak di atas batuan dasar, zona saprolit terdiri dari batu-batu yang sebagian telah benar-benar terurai di bawah pengaruh pelapukan tropis. Proses pelapukan mulai sepanjang permukaan lipatan dan rekah mengakibatkan pembentukan bongkah atau *boulder* dalam zona saprolit. Dalam batuan dasar yang relatif sangat terserpentinisasi, batas zona saprolit tidak terbatas hanya untuk rekahan dan lipatan saja, tetapi secara aktif berlanjut keseluruhan massa batuan yang memungkinkan terjadinya akses air tanah. Dalam zona saprolit, pelapukan batu-batu semakin meningkat ke arah atas. Magnesia larut, silika dan alkali terpindahkan dengan cepat meninggalkan konsentrasi sisa oksida besi, alumina, krom dan

Nikel di zona saprolit sebagian tersisa tapi kebanyakan dari pengayaan . Air tanah yang asam melarutkan nikel di bagian atas profil laterit dan annya di zona saprolit dimana peningkatan mendadak dalam alkalinitas



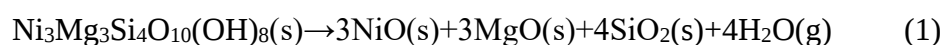
air (karena kerusakan olivin dan pelepasan magnesium) membuat nikel terlarut (Pintowantoro et al., 2021).

Pembentukan lapisan saprolit terjadi akibat dari proses pelapukan pada kontak antara mineral dan pada batas rekahan dan terdapat banyak batuan segar dan sedikit produk alterasi. Lebih jauh ke atas profil, proporsi mineral primer yang bertahan berkurang, dan zona rekahan yang lebih kuat sepenuhnya diubah akhirnya meninggalkan batu-batu terpisah dari batuan dasar utuh mengambang dalam campuran mineral primer dan alterasi di mana struktur batuan primer dipertahankan. Lapisan ini mengandung 10-25% Fe, 15-35% MgO, 1,5-3% Ni, dan 0,02-0,1% Co (Elias, 2002).

Bijih saprolit terdapat sebagai lapisan di bawah limonit, dipisahkan oleh lapisan perantara lempung smektit. Lapisan bawah ini dicirikan oleh kadar nikel yang lebih tinggi (1,5% hingga 3%), kandungan besi yang lebih rendah (<30%) dan kandungan magnesium silikat yang jauh lebih tinggi. Dalam limonit, nikel menggantikan besi dalam kisi kristal besi hidroksida ((Fe, Ni)O·OH), sedangkan dalam saprolit, nikel dan besi menggantikan magnesium sebagai bagian dari berbagai mineral magnesium silikat, seperti garnierit (Elliott *et al.*, 2016).

Hidroksida silikat (*lizardite*) ditemukan dalam saprolit, sedangkan hidroksida logam (*goethite*) ditemukan dalam limonit yang memiliki rasio MgO/SiO₂ yang lebih rendah daripada saprolit. Rasio MgO/SiO₂ yang lebih tinggi pada bijih nikel laterit mendorong pembentukan fasa silikat, di mana atom besi dan nikel dapat terperangkap dalam struktur silikat ini. Silikat memiliki kemampuan reduksi yang lebih rendah daripada oksida. Akibat dari reduksi silikat tersebut menghasilkan *recovery* besi dan nikel yang sangat rendah. Partikel kecil feronikel dalam bijih tereduksi saprolit juga berkontribusi terhadap rendahnya perolehan logam. Dekomposisi silikat atau forsterit harus dipertimbangkan dalam proses reduksi untuk melepaskan nikel dan besi untuk mendapatkan perolehan besi yang lebih tinggi (Nurjaman *et al.*, 2021).

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 dekomposisi garnierit ditunjukkan pada persamaan (1).



Selain garnierit, mineral yang terkandung pada bijih laterit saprolit adalah goetit, serpentin, dan kuarsa. Ketika suhu dinaikkan hingga 400°C, fase bijih berubah. Semua fase akan berubah menjadi *serpentine*. Ada dua jenis proses dehidroksilasi yang terjadi ketika bijih laterit saprolit dipanaskan. Dehidroksilasi pertama serpentin selesai ketika suhu proses di atas 650°C. Proses dehidroksilasi kedua selesai pada suhu 750°C. Studi rinci perlakuan termal bijih nikel garnierit dilakukan oleh Yang *et al.* 2013 dimana Fase awal bijih adalah klorit ((Mg, Fe, Ni)₆(Si,Al)₄O₁₀(OH)₈), talk ((Mg, Fe, Ni)₃(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂), kuarsa (SiO₂), dan hematit (Fe₂O₃). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanggangan pada suhu rendah yaitu 400°C dan 500°C tidak menyebabkan perubahan fasa mineral. Namun ketika suhu mencapai 600°C, mineralnya didominasi oleh klorit dan klorit dehidrasi sebagian. Ketika suhu dinaikkan hingga 700°C, sejumlah serpentin terurai menjadi forsterit (Mg₂SiO₄). Di atas 800°C, klorit berubah menjadi forsterit dan enstatit (MgSiO₃). Pada suhu 1000°C, mineral talk berubah menjadi forsterit dan juga enstatit. Jadi, setelah 1000°C, fase bijih adalah forsterit, enstatit, hematit, dan kuarsa. Ketika suhu dinaikkan hingga 1300°C, fase bijih nikel saprolit berubah menjadi mineral kompleks. Mineralnya didominasi oleh olivin (Mg_{0.5}Fe_{0.5})₂SiO₄ (Pintowantoro and Abdul, 2019).

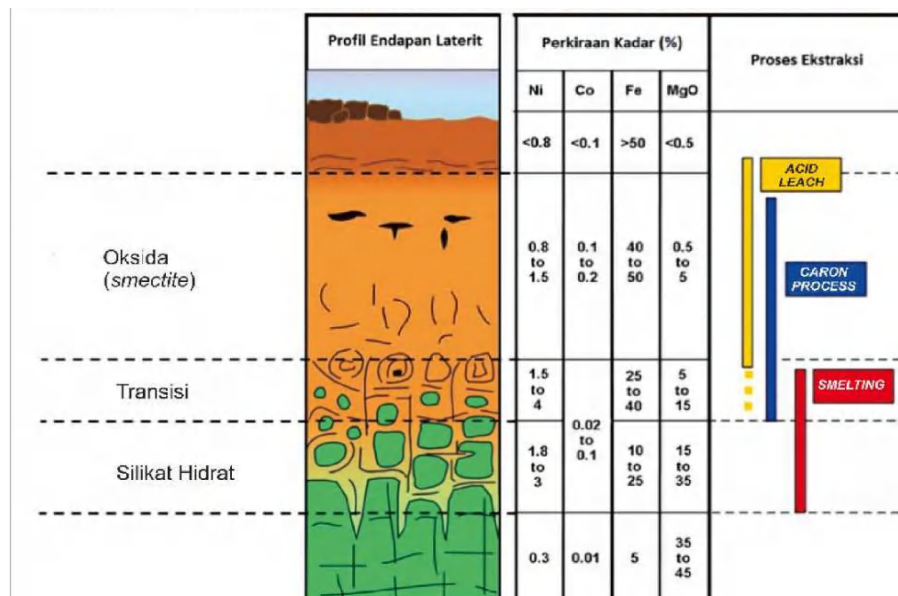
2.4 Teknologi Pengolahan Nikel Laterit

Sekitar 70% cadangan nikel merupakan nikel laterit, namun hanya 40% nikel laterit yang diolah. Sedikitnya jumlah bijih nikel laterit yang diolah disebabkan oleh sulitnya pengolahan bijih nikel jika dibandingkan dengan pengolahan nikel sulfida. Nikel laterit memerlukan pengolahan yang kompleks untuk mengekstraksi logam Ni yang menyebabkan pengolahan bijih nikel laterit lebih mahal dibandingkan pengolahan nikel sulfida. Dalam beberapa tahun terakhir, peningkatan produksi nikel laterit masih terjadi karena tingginya permintaan akan baja tahan karat karena berkurangnya cadangan nikel sulfida. Fakta ini menyebabkan nikel laterit menjadi sumber utama produksi logam nikel (Pintowantoro and Abdul, 2019).



bedaan dalam komposisi kimia dan komposisi mineralogi pada setiap zona menyebabkan pengolahan bijih nikel laterit pada masing-masing profil akan

berbeda (Elias, 2002). Secara ideal endapan laterit di alam dari daerah tropis dan proses pengolahannya, dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Lapisan ideal laterit daerah tropis di alam dan pengolahannya (Prasetyo, 2016)

Terdapat dua metode utama yang telah digunakan secara komersial untuk mengolah nikel laterit, yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi, yang masing-masing cocok untuk jenis nikel spesifik. Pengolahan pirometalurgi umumnya digunakan untuk nikel saprolit dan telah diterapkan melalui metode *Blast Furnace* dan *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF) dengan proses seperti pengeringan, kalsinasi, reduksi dan smelting. Di sisi lain, pengolahan bijih nikel limonit dilakukan melalui metode hidrometalurgi, meliputi leaching pada kondisi atmosfer maupun leaching dengan asam pada tekanan tinggi, khususnya *High Pressure Acid Leaching* (HPAL). Metode campuran antara pirometalurgi dan hidrometalurgi disebut dengan metode Caron (Pintowantoro and Abdul, 2019; Prasetyo dkk., 2016). Proses hidrometalurgi sangat kompleks dan panjang, tetapi energinya rendah. Sebaliknya, proses pirometalurgi sederhana tetapi padat energi, dan memiliki persyaratan pada bijih nikel laterit mentah yang mengandung nikel tinggi (Bahfie dkk., 2021).



Proses Pirometalurgi

Pirometalurgi menggunakan suhu tinggi untuk melakukan peleburan dan reduksi untuk mengekstrak logam dari mineral. Metode pirometalurgi umumnya

digunakan untuk memproses bijih kadar tinggi. Ekstraksi pirometalurgi melibatkan beberapa proses seperti pemanggangan, reduksi karbotermik, reduksi bijih sulfida, dan reduksi metalotermik. Proses pirometalurgi bijih laterit secara komersial saat ini secara garis besar terdiri atas (Setiawan, 2016; Rao *et al.*, 2013):

1. *Rotary kiln electric furnace* (RKEF)

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

2. *Nippon Yakin Oheyama Process*

Nippon Yakin Oheyama Process merupakan proses reduksi langsung *irrierite ore* yang menghasilkan feronikel dalam suatu *rotary kiln*. *Silicate* *re* (2,3-2,6% Ni, 12-15% Fe) bersama antrasit, *coke breeze*, dan batu kapur campur dan dibuat menjadi briket. Briket tersebut kemudian diumpankan



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

3. Nickel Pig Iron (NPI)

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



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

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

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

2.4.2 Proses Hidrometalurgi

Hidrometalurgi merupakan proses pemurnian logam dengan menggunakan pelarut kimia untuk melarutkan bahan logam tertentu sehingga kemurnian logam yang diinginkan meningkat (*leaching*). Hidrometalurgi sebagai metode yang cukup menjanjikan karena mampu menghasilkan Nikel dengan kemurnian tinggi. Selain itu, pelarut dapat di daur ulang dan digunakan kembali sehingga dapat mengurangi biaya produksi. Akan tetapi pada proses ini masih meninggalkan residu dari pelarut kimia tersebut yang dapat membahayakan lingkungan dan kesehatan (Budiyanto dkk., 2021). Untuk proses Hidrometalurgi bijih laterit terbagi terdiri atas:

1. Proses Caron

Proses Caron dapat digunakan untuk bijih limonit atau campuran limonit dan saprolit. Bijih dikeringkan dan nikel direduksi secara selektif (bersama dengan kobalt dan sebagian besi) menjadi logam nikel pada $\sim 700^{\circ}\text{C}$. Logam ekstraksi dengan pelindian dalam larutan amoniak. Perolehan nikel dan kobalt menurun dengan meningkatnya jumlah saprolit karena nikel dan



kobalt terkunci dalam silikat matriks dan sulit untuk dikurangi pada suhu ini. Namun, proses tersebut dapat mentolerir jumlah Mg yang lebih tinggi daripada proses PAL. Contoh: Nicaro, Punta-Gorda, Yabulu, Nonoc (sekarang ditutup). Proses Caron memiliki beberapa kelemahan diantaranya *Front-end* dari proses Caron adalah pirometalurgi yang melibatkan pengeringan, kalsinasi dan reduksi. Langkah-langkah ini memerlukan energi yang intensif. Sedangkan *back-end* adalah hidrometalurgi yang membutuhkan berbagai reagen. Perolehan nikel dan kobalt lebih rendah dibandingkan dengan proses peleburan atau proses HPAL (Dalvi, *et al.*, 2004).

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

Proses komersial lainnya yang telah dikembangkan untuk ekstraksi nikel dari bijih nikel laterit adalah proses *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) dengan cara hidrometalurgi. Pada proses ini, bijih nikel laterit direaksikan dengan asam pekat pada temperatur 255°C dan tekanan 40 atmosfer dalam *autoclave*, sehingga terbentuk larutan nikel sulfat. Kobalt yang ikut terlarut diendapkan dari larutan nikel sulfat dengan gas H_2S . Proses ini mampu mengekstrak 98% nikel dari bijih nikel laterit, tetapi proses ini masih mempunyai kelemahan, yaitu harus menggunakan alat yang tahan korosi dan masalah terbentuknya kerak (*scale*) pada sistem perpipaan yang digunakan (Subagja, 2021).

3. *Atmospheric Leaching* (AL)

Atmospheric pressure acid leaching (pelindian asam pada tekanan atmosfer) adalah salah satu dari tiga hidrometalurgi yang umum proses yang digunakan untuk mengekstraksi nikel dan kobalt dari bijih nikel laterit pada skala industri. *High pressure acid leaching* (HPAL) dan *heap leaching* (HL) menawarkan beberapa keuntungan dalam hal proses pelindian, tetapi juga memiliki beberapa kelemahan, seperti biaya modal yang besar untuk pembangunan peralatan pelindian, diperlukan asam sulfat bebas yang lebih, pemeliharaan permeabilitas *bed* di bawah kondisi pelindian asam, kontrol konsumsi asam, persediaan dan manajemen waktu siklus, dan pengelolaan air (Kursunoglu and Kaya, 2016).



2.5 Jenis Teknik Inovasi *Upgrading* Bijih Nikel Laterit

Proses hidrometalurgi sangat kompleks dan panjang, tetapi energinya rendah. Sebaliknya, proses pirometalurgi sederhana tetapi padat energi, dan memiliki persyaratan pada bijih nikel laterit mentah yang mengandung nikel tinggi. Untuk mengatasi keterbatasan proses pirometalurgi, para ahli telah mengusulkan mengganti tahap peleburan dengan pemisahan magnetik untuk recovery partikel feronikel yang dihasilkan selama tahap *roasting* (Bahfie dkk., 2021).

Nikel laterit mempunyai keterbatasan untuk diproses prekonsentrasi secara konvensional, seperti *dense media separation*, *gravity separation*, *magnetic separation*, *electrostatic separation*, *roasting*, maupun flotasi. Tidak satupun di antara proses tersebut yang dinilai mampu memberikan nilai tambah yang potensial jika dihitung dan dibandingkan terhadap modal yang harus dikeluarkan untuk *operating* dan *investment cost*. Proses *recovery* pada bijih nikel laterit sangat sulit dikarenakan sifat mineraloginya yang kompleks serta keterbatasan teknologi yang telah ada saat ini. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengolah nikel laterit menjadi logamnya dengan menggunakan beberapa variasi proses yaitu: variasi jenis reduktor, aditif, temperatur reduksi (Setiawan, 2016). Proses prekonsentrasi secara pirometalurgi atau lebih umum dikenal sebagai *upgrading process* dilakukan untuk memperoleh nikel dan atau feronikel dari bijih nikel laterit, seperti *roasting* dan *smelting*. Beberapa jenis teknik inovasi yang terkait dengan proses ini antara lain *thermal upgrading process*, sulfidasi selektif dan proses segregasi.

Pemanasan dua tahap adalah teknik yang ditujukan untuk memperlakukan bijih Nikel kadar rendah agar supaya lebih memberikan nilai lebih ketika dilakukan proses benefisiasi fisik. Teknik ini mengacu pada adanya proses reduksi dari Nikel dan kobalt yang terkandung dalam bijih limonit untuk menjadi logam yang dapat dipisahkan dari mineral-mineral pengganggu. Berbagai kondisi operasi seperti temperatur, waktu tahan, suasana reduksi, dan penambahan reagen/bahan aditif bertujuan untuk meningkatkan pertumbuhan ukuran partikel logam yang menguntungkan jika dilakukan pemisahan secara magnetik atau flotasi. Inovasi lain diantaranya dengan *thermal upgrading* telah dilakukan dimana bijih yang n berupa Nikel kadar rendah yang dicampur dengan 6% batubara dan 4% n menerapkan metode dua tahap *thermal upgrading* dan di akhiri dengan



pemisahan magnet. Tujuan dari metode dua tahap *thermal upgrading* adalah untuk men-*treatment* bijih Nikel kadar rendah agar didapatkan feroNikel yang memiliki kadar dan perolehan kembali logam Nikel yang tinggi dengan penggunaan panas yang tidak terlalu tinggi ($\leq 1000^{\circ}\text{C}$) dan penambahan sulfur yang relatif sedikit ($\leq 10\%$). Tahap pertama pemanasan dilakukan pada bijih yang dicampur batubara dan sulfur di temperatur 600°C selama satu jam untuk mereduksi Nikel oksida dengan sempurna dan mendapatkan fasa Fe-Ni-S yang kaya Nikel. Hal ini didukung oleh penelitian yang menyatakan bahwa pada kondisi standar dengan tekanan atmosfer, temperatur minimum untuk terjadinya reduksi Nikel oksida dengan pereduksi karbon adalah 440°C , dan optimal pada temperatur 600°C . Tahap kedua atau disebut pemanasan lanjut dilakukan dengan melakukan treatment panas pada temperatur 1000°C dan ditahan satu jam untuk membentuk fasa Fe-Ni-S semi-liquid yang mempermudah berkumpulnya partikel feronikel, selain itu dalam proses pemanasan lanjut juga terjadi pertumbuhan partikel feronikel (Budiyanto dkk., 2021).

2.6 Pemanggangan Tereduksi Bijih Nikel Laterit

Pemanggangan tereduksi merupakan salah satu teknologi dalam pengolahan bijih nikel laterit menjadi konsentrat logam ferronikel dengan menggunakan temperatur proses yang lebih rendah dibandingkan dengan teknologi peleburan konvensional (*blast furnace* dan *rotary kiln electric arc furnace*). Optimalisasi proses reduksi bijih nikel laterit ini diharapkan mampu menjawab permasalahan dunia terkait tingginya biaya produksi dalam pengolahan bijih nikel laterit menggunakan teknologi pirometalurgi konvensional (*blast furnace* dan *rotary kiln electric arc furnace*), dimana konsumsi energi pada proses pemanggangan tereduksi bijih nikel laterit jauh lebih rendah dikarenakan penggunaan temperatur proses reduksi yang rendah. Selain itu, tingginya konsumsi energi juga akan berdampak terhadap tingginya polusi yang dihasilkan. Teknologi ini juga diharapkan mampu menjadi solusi untuk pemanfaatan bijih nikel laterit kadar rendah ($< 1,7\% \text{ Ni}$), dimana

aannya sangat melimpah di dunia, khususnya di Indonesia. itannya menggunakan teknologi pirometalurgi konvensional menjadi



tidak ekonomis dikarenakan membutuhkan konsumsi energi yang jauh lebih tinggi (Nurjaman, 2020).

Selain, nikel dapat diekstraksi melalui berbagai pengolahan salah satunya yaitu proses pemanggangan tereduksi yang bertujuan untuk menghambat terbentuknya besi oksida. Pemanggangan tereduksi akan menghasilkan nikel sebesar 9% dalam bentuk konsentrat. Proses-proses metode pengolahan nikel laterit ini memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing, seperti hidrometalurgi dapat menangkap unsur kobalt dan nikel dalam waktu relatif lama sedangkan pirometalurgi secara langsung mereduksi nikel laterit dalam waktu cepat akan tetapi membutuhkan energi yang besar. Adapun proses pemanggangan tereduksi memiliki kekurangan yaitu merupakan proses yang tidak langsung untuk mereduksi bijih nikel laterit akan tetapi energi yang dibutuhkan sedikit dan waktu yang singkat. Oleh karena itu, pemanggangan tereduksi merupakan proses alternatif dalam ekstraksi nikel dari bijih laterit untuk menghasilkan konsentrat dengan kadar nikel di atas 5% yang dapat dikembangkan melalui metode hidrometalurgi untuk mencapai bahan baku baterai berbasis nikel (Bahfiel dkk., 2021).

Pemanggangan tereduksi nikel bertujuan untuk mereduksi secara besar-besaran oksida nikel menjadi nikel metalik dan mempertahankan oksida besi yang tidak tereduksi atau meminimalkan reduksi oksida besi menjadi besi metalik. Dengan proses pemanggangan tereduksi ini, produk hasil reduksi akan memiliki kandungan Ni yang tinggi dan kandungan Fe yang sedang. Pemanggangan tereduksi nikel sangat dipengaruhi oleh termodinamika reaksi reduksi senyawa nikel dan besi pada nikel laterit (Pintowantoro and Abdul, 2019).

Proses pemanggangan tereduksi 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 *serpentine* $(\text{Mg,Fe,Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ dan *goethite* (FeOOH) . Pada temperatur 500-600°C, *Serpentine* akan berubah menjadi *forsterite* $(\text{Mg,Fe,Ni})\text{SiO}_3$ dan *enstatite* $(\text{Mg, Fe,Ni})_2\text{SiO}_4$, sedangkan *goethite* akan berubah menjadi *hematite* (Fe_2O_3) . Pemanasan lebih lanjut akan menyebabkan nikel dalam *enstatite* berubah menjadi nikel oksida (NiO) dan logam nikel-Ni,



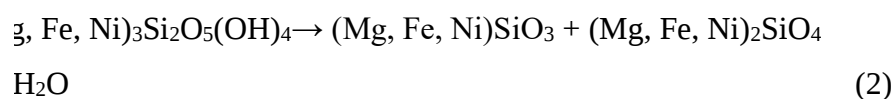
sedangkan *hematite* akan berubah menjadi *magnetite* (Fe_3O_4), *wustite* (FeO), dan logam besi (Fe) (Nurjaman, 2020).

Proses pemanggangan tereduksi dilakukan dengan penambahan reduktor berkaitan dengan reaksi karbotermik yang bertujuan untuk menghilangkan oksida pada bijih sehingga terbentuk metal (Mayangsari dan Prasetyo, 2016). Reduktor yang biasa digunakan yaitu reduktor tipe gas dan reduktor tipe padat. Reduktor tipe padat menggunakan bahan yang mengandung karbon sebagai reduktornya. Proses reduksinya berlangsung dengan mencampur bijih dan reduktor didalam reaktor. Reaksi yang berlangsung menciptakan produk gas karbon monoksida (CO) yang mereduksi oksida bijih nikel dan menghasilkan logam padat. Contoh reduktor padat yang paling banyak digunakan adalah batubara. Keuntungan menggunakan reduktor tipe padat adalah tidak membutuhkan batu bara kokas serta memungkinkan digunakan dalam skala kecil tetapi memiliki konsumsi energi yang lebih tinggi.

Reduktor dengan karbon merupakan jenis reduktor yang paling banyak digunakan untuk reduksi bijih nikel karena kelimpahannya yang sangat besar. Karbon ini termasuk reduktor yang paling sering digunakan karena memiliki harga yang murah dan merupakan reduktor yang efektif. Kemampuan karbon untuk berfungsi sebagai reduktor yang efektif didasarkan pada sifat unik dari karbon yang membentuk dua gas oksida yaitu karbonmonoksida (CO) dan karbondioksida (CO_2) yang memiliki stabilitas termodinamika yang sangat baik. Dengan adanya kandungan air pada bijih maupun udara yang kemudian bereaksi dengan karbon, dapat terjadi reaksi yang menghasilkan gas karbon monoksida dan gas hidrogen (Setiawan, 2016).

Proses pemanggangan tereduksi sebagai metode yang saat ini sedang banyak dikembangkan, dimana bijih nikel laterit direduksi dengan penambahan sejumlah reduktor dan aditif untuk membatasi reduksi besi oksida menjadi logam besi, sehingga akan diperoleh konsentrat feronikel yang lebih kaya akan nikel. Reaksi yang terjadi saat menggunakan pemanggangan tereduksi untuk nikel laterit adalah

erikut (Hakim dkk., 2022):



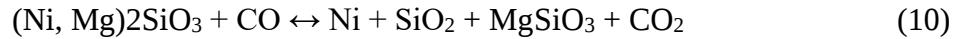


Senyawa laterit yang memiliki formasi yang kompleks mengakibatkan dibutuhkan perlakuan khusus sebelum proses reduksi laterit dapat dilangsungkan. Proses ini adalah dehidroksilasi, sebuah proses untuk memecah gugus hidroksil dari laterit sehingga menghasilkan senyawa spinel yang mengandung nikel oksida dalam bentuk larutan padat (Subagja, *et al.*, 2016). Proses dehidroksilasi untuk limonit dan saprolit memiliki perlakuan yang berbeda karena formasi senyawa keduanya yang tak sama. Untuk bijih limonit, proses dehidroksilasi mulai terjadi pada temperatur $\pm 300^\circ\text{C}$ (Elliot, *et al.*, 2016). Prosesnya terus berlangsung hingga temperatur $\pm 700^\circ\text{C}$. Dehidroksilasi limonit diketahui cukup kompleks prosesnya, di mana terjadi beberapa perubahan fasa dari mineral *goethite* hingga menjadi akhirnya menjadi *hematite*. Transformasinya dimulai dari *goethite* ($\alpha\text{-FeOOH}$) menjadi *protohematite* ($\text{Fe}_{5/3}(\text{OH})\text{O}_2$) lalu *hydrohematite* ($\text{Fe}_{11/6}(\text{OH})_{1/2}\text{O}_{5/2}$) dan transformasinya berakhir setelah menjadi *hematite* ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Air yang mengontaminasi limonit diklasifikasikan menjadi air bebas, air kristalin dan gugus hidroksil. Proses penghilangnya dari bijih berbeda untuk setiap temperatur. Air bebas dihilangkan ketika pemanasan berada pada temperatur $25\text{-}140^\circ\text{C}$. Air kristalin hilang pada temperatur pemanasan $200\text{-}480^\circ\text{C}$. Gugus hidroksil akan hilang ketika pemanasan mencapai temperatur $500\text{-}800^\circ\text{C}$. Disisi lain, dehidroksilasi pada saprolit terjadi dalam 2 tahapan. Mineral *goethite*, *serpentine* dan *quartz* yang terkandung dalam saprolit akan sepenuhnya menjadi *serpentine* ketika dilakukan pemanasan pada temperatur 400°C . *Serpentine* yang terbentuk akan terdehidroksilasi pada temperatur diatas 650°C dan proses dehidroksilasi akan kembali terjadi dan selesai pada temperatur 750°C (Pintowantoro & Abdul, 2019).



gugus hidroksil telah terlepas dari bijih, proses reduksi laterit pun dapat laksanakan. Terdapat beberapa reduktor yang dapat digunakan, seperti karbon,

hidrogen dan metana. Untuk jenis saprolit, reaksi reduksi yang terjadi ketika digunakan reduktor karbon yaitu:



Menurut Pan *et al.* (2013), selain melalui penggunaan aditif, proses pemanggangan tereduksi juga dapat dilakukan dengan membatasi jumlah besi tereduksi melalui pembatasan jumlah reduktan, dimana dari hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa kandungan nikel akan semakin berkurang dengan meningkatnya jumlah reduktan. Penambahan reduktor padat, seperti batubara yang mampu menghasilkan gas reduktor (CO) memiliki laju reaksi reduksi yang lebih cepat (Pan *et al.*, 2013). Semakin banyak jumlah pemakaian arang atau reduktor karbon pada reduksi pelet komposit bijih nikel saprolit, akan menurunkan recovery Fe-Ni yang dikonfirmasi dengan lebih banyak fasa non logam (carbon) (Abidin dkk., 2018)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Mayangsari dan Prasetyo (2016) yaitu penelitian mengenai pemanggangan tereduksi bijih limonit menyimpulkan bahwa semakin lama waktu reduksi, peningkatan kadar Ni semakin tinggi, namun reduksi selama lebih dari 2 jam dengan suhu reduksi 1000 °C akan menyebabkan magnetit terurai menjadi logam Fe sehingga dapat meningkatkan kadar Fe. Semakin banyak penambahan reduktor pada campuran reduksi, peningkatan kadar Ni semakin kecil. Penambahan CaSO₄ pada proses pemanggangan tereduksi dapat meningkatkan kadar Ni dan menurunkan kadar Fe, namun belum memberikan kecenderungan hasil yang baik. Peningkatan kadar Ni tertinggi yang didapatkan adalah pada suhu reduksi 1000°C.

Penelitian dari Setiawan dkk. melakukan reduksi bijih nikel laterit menggunakan batubara jenis sub-bituminus pada temperatur reduksi karbotermik (800-1000°C) dalam *muffle furnace* dengan laju pemanasan 10°C/menit selama satu jam waktu penahanan, dan pendinginan sampai pada temperatur kamar dengan menggunakan *quenching air*. Peningkatan temperatur reduksi meningkatkan



reduksi Fe dan Ni. Pada temperatur reduksi karbothermik rendah (<1000°C) dengan batubara sub bituminus meningkatkan grade Ni dari 1,7% menjadi 5% (Setiawan dkk., 2017).

2.7 Arang Tongkol Jagung Sebagai Reduktor

Biomassa dapat digunakan melalui proses pengolahan, salah satunya adalah menjadi briket arang. Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat briket arang adalah berat jenis bahan bakar atau berat jenis serbuk arang, kehalusan serbuk, suhu karbonisasi dan tekanan pada saat dilakukan pencetakan. Akan tetapi, untuk memaksimalkan pemanfaatannya, biomassa ini masih harus melalui sedikit proses pengolahan sehingga menjadi briket biomassa. Briket biomassa adalah gumpalan-gumpalan atau batangan-batangan arang yang terbuat dari biomassa (bahan lunak). Biomassa yang sebenarnya termasuk bahan lunak yang dengan proses tertentu diolah menjadi bahan arang keras. Kualitas dari biomassa ini tidak kalah dengan batubara atau bahan bakar jenis arang lainnya. Limbah pertanian seperti sekam padi, ampas tebu, kulit singkong, tongkol jagung, dan batok kelapa adalah biomassa yang dapat dijadikan sebagai bahan pembuatan briket. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS), produksi jagung tahun 2015 diperkirakan sebanyak 20,67 juta ton pipilan kering. Buah jagung terdiri dari 30% limbah yang berupa tongkol jagung. Dengan angka tersebut, produksi yang semakin meningkat setiap tahunnya akan menghasilkan limbah jagung yang semakin banyak, sehingga jika tidak dimanfaatkan dengan baik maka hanya akan menjadi sampah. Sebagai salah satu pemanfaatan tongkol jagung ini dijadikan sebagai bahan penghasil karbon (C). Dalam penelitian analisis proksimat yang dilakukan oleh Rumiyantri dkk., (2018) didapatkan hasil analisis proksimat dari arang tongkol jagung dengan nilai kadar air lembab 2,41%, Kadar abu 1,23%, kadar zat terbang 24,91%, dan kadar karbon tertambat 71,44% (Rumiyantri dkk., 2018).

Tongkol jagung memiliki kandungan senyawa karbon yang cukup tinggi, yaitu selulosa (41%) dan hemiselulosa (36%) yang cukup tinggi yang mengindikasikan bahwa tongkol jagung berpotensi sebagai bahan pembuat arang aktif. Selain itu juga tongkol jagung memiliki kandungan kadar abu yang rendah yaitu 0,91%. Arang aktif dari tongkol ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya mempunyai potensi yang baik sebagai reduktor karena kandungan karbonnya lebih

di pada kadar abunya, mudah dibuat, murah, bahan bakunya mudah didapatkan, mudah digunakan, aman, dan tahan lama (Meiliani, 2020).

