

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bijih Nikel merupakan bahan alam yang banyak digunakan dalam bidang perindustrian. Nikel mempunyai sifat tahan karat, dalam keadaan murni nikel bersifat lunak, tetapi jika dipadukan dengan besi, krom, dan logam lainnya dapat membentuk baja tahan karat yang padat. Perpaduan nikel, krom dan besi menghasilkan baja tahan karat (*stainless steel*) yang banyak diaplikasikan pada peralatan dapur, ornamen-ornamen rumah dan gedung, serta komponen industri. Selain itu banyak bahan paduan lainnya yang dibuat berbasis bahan nikel karena memiliki kekuatan struktur terhadap proses *creep*, *fatigue* dan kestabilan permukaan (oksidasi dan korosi) pada suhu tinggi seperti digunakan pada mesin pesawat dan turbin gas pembangkit listrik (Mabruri *et al.*, 2008).

Nikel laterit pada umumnya memiliki empat zona lapisan yaitu lapisan *red* limonit, lapisan limonit, lapisan saprolit, dan lapisan *bedrock*. Kadar nikel terendah terdapat pada lapisan limonit, namun pada lapisan limonit mengandung unsur kobalt yang tinggi. Kurangnya teknologi dalam pengolahan nikel kadar rendah, sehingga lapisan limonit sering dijadikan sebagai *overburden* dan juga dianggap sebagai pengotor. Potensi dari nikel kadar rendah dan kobalt yang dimiliki, seharusnya dapat diolah dengan baik salah satunya dengan cara pemilihan metode dalam pengolahannya sehingga dapat meningkatkan *recovery* (Fan *and* Gerson, 2013).

PT. Riota Jaya Lestari adalah perusahaan tambang nikel yang beroperasi di wilayah Kolaka Utara. Operasi penambangan pada PT. Riota Jaya Lestari menggunakan metode *open Pit mining*. Namun pada prosesnya terdapat permasalahan seperti perbedaan kadar nikel laterit dari data hasil pengeboran dengan data hasil produksi penambangan. Ketidaksesuaian ini harus segera ditemukan dan diperbaiki karena jika dibiarkan, akan berulang dan Perbedaan ini harus segera diidentifikasi dan dicarikan solusi, karena apabila hal ini dibiarkan maka ketidaksesuaian ini dapat terjadi berulang akan menyebabkan kerugian terhadap perusahaan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka rumusan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa kadar rata-rata kadar nikel pada blok X antara data eksplorasi dan hasil produksi di PT Riota Jaya Lestari?
2. Bagaimana korelasi unsur pada zona endapan nikel laterit dilokasi penelitian?
3. Faktor-faktor apa yang mempengaruhi perbedaan kadar nikel antara data eksplorasi dan hasil produksi di PT Riota Jaya Lestari?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian tugas akhir ini yaitu:

1. Mengetahui kadar rata-rata nikel antara data eksplorasi dan hasil produksi di PT Riota Jaya Lestari.
2. Mengetahui korelasi unsur pada zona endapan dilokasi penelitian.
3. Menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi perbedaan kadar nikel antara data eksplorasi dan hasil produksi tersebut di PT Riota Jaya Lestari.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan memberikan wawasan dalam mengoptimalkan proses pertambangan nikel mereka dengan cara yang lebih efisien. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang perbedaan kadar nikel antara data hasil eksplorasi dan hasil produksi, perusahaan dapat membuat keputusan yang lebih tepat dalam perencanaan dan manajemen sumberdaya tambang. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap peningkatan pengetahuan dalam industri pertambangan nikel, yang dapat berguna bagi perusahaan-perusahaan tambang nikel lainnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nikel Laterit

Nikel telah digunakan sejak dari awal peradaban manusia. Analisa kimia dari artefak-artefak menunjukkan bahwa senjata, peralatan-peralatan, dan juga koin mengandung nikel dengan kadar tertentu. Kemungkinan besar, penggunaan paling awal dari nikel adalah Pai-Thong atau tembaga putih. Material yang dibuat di Cina ini ditambahi dengan seng terhadap bijih nikel-tembaga. Banyak ornamen-ornamen dekoratif seperti wadah lilin diproduksi dan pada akhirnya dibawa ke Eropa oleh East India Company pada abad ketujuh belas (Salinita *et al.*, 2014).

Pada awal abad kedelapan belas, penambang di regional Saxony di Jerman mencoba untuk meleburkan beberapa mineral/bijih menyerupai tembaga yang baru ditemukan. Mereka menemukan bahwa logam putih yang mereka produksi terlalukeras untuk digunakan dan dibentuk menjadi barang-barang yang berguna. Para penambang mengira bahwa material tersebut terkena kutukan dan menyebutnya sebagai Old Nick's Copper atau "Kupfer-Nickel". Bijih yang sama ditemukan di tempat yang berbeda beberapa tahun kemudian, dan material ini juga disebut dengan nikel karena logam putih yang keras tersebut sangat sulit untuk dibentuk (Salinita *et al.*, 2014).

Seorang ilmuwan bernama A. F. Cronstedt, yang bekerja untuk Swedish department of Mines, melakukan penelitian selama lima tahun terhadap material mencurigakan tersebut dan akhirnya dapat memisahkan dan mengidentifikasi unsur baru yang dia namakan nikel. Lima tahun kemudian setelah identifikasinya pada tahun 1751, ilmuwan Swedia lainnya bernama Von Engestrom, menemukan bahwa nikel merupakan penyusun utama dari Pai Tong dan memicu dalam ditemukannya German silver atau nikel-perak. Deposit nikel di bumi dapat diklasifikasikan dalam dua kelompok, yaitu bijih sulfida dan bijih laterit (oksida dan silikat). 72% cadangan nikel dunia merupakan 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

pelapukan batuan ultramafik yang mengandung zat besi dan magnesium kadar tinggi. Deposit sulfida nikel biasanya lebih kecil dari deposit laterit. Deposit laterit berkadar antara 1,0 - 1,5% Ni dengan rata-rata kadar nikel 0,6 - 1,5% dengan tonase yang jauh lebih besar (Salinita *et al.*, 2014).

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki endapan bijih nikel laterit dalam jumlah yang cukup besar. Endapan nikel laterit Indonesia tersebar di beberapa daerah seperti di Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara, Maluku, dan Papua. Indonesia merupakan penghasil nikel terbesar ke lima di dunia, sebesar 12% cadangan di dunia. Laterit merupakan hasil proses pelapukan dan pengkayaan batuan *mafic/ultramafic* di daerah tropis. Oleh karena itu komposisi kimia dan mineraloginya berbeda antara satu endapan dengan endapan lainnya. Nikel dalam bijih nikel laterit berasosiasi dengan besi oksida dan mineral silikat sebagai hasil substitusi isomorphous unsur besi dan magnesium dalam struktur kristalnya, sehingga secara kimia dan fisik, bijih nikel laterit dapat digolongkan menjadi dua jenis yaitu bijih jenis saprolit (silikat/hidro silikat) dan jenis limonit (oksida/hidroksida). Bijih nikel laterit sulit untuk dibuat menjadi konsentrat nikel karena terbentuknya struktur kristal *isomorphic* dari *goethite* atau *serpentine*. Kemudian mineralogi yang berbeda membutuhkan pendekatan proses yang berbeda. Dalam bijih limonit, nikel membentuk ikatan yang lemah dengan *goethite* akan tetapi dalam bijih saprolit, nikel masuk ke dalam struktur mineral. Akibatnya bijih limonit lebih cocok untuk diolah dengan cara hidrometalurgi dan bijih saprolit cocok untuk diolah dengan cara pirometalurgi (Subagja *et al.*, 2016).

Terdapat dua golongan bijih nikel laterit, yaitu nikel zona limonit yang berkadar nikel rendah dan nikel zona saprolit yang berkadar nikel tinggi. Ketidaksamaan yang ada pada dua jenis zona bijih ini yaitu bijih pada zona saprolit memiliki kandungan Fe yang rendah dan Mg tinggi sedangkan pada zona limonit mempunyai kandungan Fe yang tinggi dan Mg yang rendah (Jafar, 2017).

Nikel laterit merupakan bahan galian yang mempunyai nilai ekonomis tinggi, karena pada masa sekarang dan masa yang akan datang, kebutuhan nikel semakin meningkat. Nikel memiliki banyak kegunaan, antara lain dalam pembuatan baja tahan karat, sebagai bahan pembuatan alat-alat laboratorium (fisika dan kimia), katalis, bahkan ratusan penggunaan lainnya, sehingga menarik sekali untuk diolah.

Nikel diperoleh dari endapan yang terbentuk akibat proses oksida dan pelapukan batuan ultramafik yang mengandung nikel 0,2-0,4%. Jenis-jenis mineral tersebut antara olivin, piroksin dan amfibol. Bahan galian ini banyak ditemukan pada daerah tropis, dikarenakan curah hujan yang mendukung terjadinya pelapukan, selain topografi, drainase, tenaga tektonik dan struktur geologi. Endapan ini merupakan bijih yang dihasilkan dari proses oksidasi dan pelapukan batuan ultrabasa yang ada diatas permukaan bumi. Pelapukan yang ekstrim akan melarutkan semua elemen dalam batuan tersebut. Pelapukan yang ekstrim akan melarutkan semua elemen dalam bantuan tersebut. Material pelapukan tersebut hanya menyisakan rata rata 5% Ni dan 0,06% Co (Elias, 2001).

Menurut Hasanudin (1992) air permukaan yang mengandung CO₂ dari atmosfer dan ditambah oleh material-material organis di permukaan meresap ke bawah permukaan tanah sampai pada zona pelindian Dimana fluktuasi air tanah berlangsung. Akibat fluktuasi ini air tanah yang kaya CO₂ akan kontak dengan zona saprolit yang masih mengandung batuan asal dan melarutkan mineral-mineral yang tidak stabil seperti olivin / serpentin dan piroksen. Mg, Si dan Ni akan larut dan terbawa sesuai dengan aliran air tanah dan akan memberikan mineral-mineral baru pada proses pengendapan kembali. Endapan besi yang bersenyawa dengan oksida akan terakumulasi dekat dengan permukaan tanah. Sedangkan Magnesium, Nikel dan Silika akan tetap tertinggal di dalam larutan dan bergerak turun selama suplai air yang masuk ke dalam tanah terus berlangsung. Rangkaian proses ini merupakan proses pelapukan dan pelindian atau *leaching*. Pada proses pelapukan lebih lanjut Magnesium (Mg), Silika (SiO₂), dan Nikel (Ni) akan tertinggal di dalam larutan selama air masih bersifat asam. Tetapi jika dinetralisasi karena adanya reaksi dengan batuan dan tanah, maka zat-zat tersebut akan cenderung mengendap sebagai mineral hidrosilikat (Nimagnesium hidrosilicate) yang disebut mineral garnierit [(Ni,Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₈] atau mineral pembawa Ni. Ikatan dari Ni yang berasosiasi dengan Mg, SiO dan H akan membentuk mineral garnierit dengan rumus kimia [(Ni,Mg)₆Si₄O₁₀(OH)₈]. Apabila proses ini berlangsung terus menerus, maka yang akan terjadi adalah proses pengkayaan *supergen/supergen enrichment*. Zona pengkayaan supergen ini terbentuk di zona Saprolit. Dalam satu penampang vertikal profil laterit dapat juga terbentuk zona pengkayaan yang lebih dari satu.

Hal tersebut dapat terjadi karena muka air tanah yang selalu berubah-ubah, terutama tergantung dari perubahan musim (*Dumpruck*, 1967).

2.2 Genesis Endapan Nikel Laterit

Nikel adalah unsur logam yang terbentuk secara alami dan memiliki ciri mengkilap serta berwarna putih keperak-perakan. Unsur ini jarang ditemukan dengan keadaan murni logam di alam. Nikel merupakan salah satu dari lima unsur logam yang paling umum dijumpai di bumi dan ditemui secara luas terutama di kerak bumi (Arif, 2018).

Di alam ada dua jenis bijih nikel, yaitu nikel sulfida dan nikel oksida yang biasa disebut laterit. Umumnya nikel sulfida berada dibelahan bumi subtropis sedangkan laterit berada di khatulistiwa, dan jumlah sumber daya alam laterit lebih besar dibandingkan nikel sulfida. Berdasarkan data yang dipublikasi 1988, Indonesia menempati posisi nomor dua di dunia untuk sumber daya nikel seperti pada Tabel 1 dibawah ini (Prasetyo, 2016).

Tabel 1 Negara penghasil nikel (sulfida dan laterit)

Negara dengan sumber daya nikel (Sulfida/Laterit)	%Total Ni
New Caledonia (Laterit)	27
Indonesia (Laterit)	13
Canada (Sulfida)	11
Cuba (Laterit)	8
Rusia (Sulfida)	7
Total	66

Laterit berasal dari Bahasa latin yaitu *later*, yang artinya bata (membentuk bongkah-bongkah yang tersusun seperti bata yang berwarna merah bata). Laterit merupakan hasil proses pelapukan dan pengkayaan batuan *mafic/ultramafic* di daerah tropis. Oleh karena itu komposisi kimia dan mineraloginya berbeda antara satu endapan dengan endapan lainnya. Nikel dalam bijih nikel laterit berasosiasi dengan besi oksida dan mineral silikat sebagai hasil substitusi isomorphous unsur besi dan magnesium dalam struktur kristalnya, sehingga secara kimia dan fisik,

bijih nikel laterit dapat digolongkan menjadi dua jenis yaitu bijih jenis saprolit (silika/hidrosilikat) dan jenis limonit (oksida/hidroksida) (Puspita *et al.*, 2022).

Laterit dapat dijumpai terutama pada daerah yang beriklim tropis sampai subtropis yang memiliki suhu tinggi dan curah hujan yang cukup. Akibatnya laterit banyak ditemukan di daerah Indonesia (daerah Sulawesi), serta beberapa wilayah lain. Bijih nikel laterit biasanya ditemukan pada daerah yang relatif dangkal yaitu berkisar di kedalaman 15-20 m di bawah permukaan tanah. Bijih nikel laterit berkontribusi hingga 60-70% dari cadangan nikel dunia dan sebagian besar berada di negara-negara tropis dan subtropis seperti Indonesia, New Caledonia, Australia, Kuba, Brazil, Filipina dan Papua Nugini (Puspita *et al.*, 2022).

Di tubuh bijih, air tanah bersifat asam melarutkan banyak mineral terlarut sehingga menghasilkan larutan yang mengandung nikel, besi, magnesium, silika, dan unsur lain seperti kromium. Ketika air tanah mengalir ke dalam batuan induk, terjadi perubahan pH dengan batuan induk yang menghasilkan pengendapan mineral besi dan nikel. Pengayaan nikel dan besi juga terjadi melalui proses pertukaran ion dimana nikel dan besi masuk larutan akan bertukar dengan magnesium dalam batuan induk. Mineral yang berada dekat permukaan diperkaya dengan besi dan membentuk besi terhidrasi oksida seperti goetit dimana bagian bijih ini umumnya disebut sebagai limonit. Zona limonit sebagian besar mengandung goetit dan amorf besi hidroksida dan merupakan hasil pelapukan lebih lanjut (Farrokhpay & Filippov., 2016).

Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam pembentukan endapan nikel laterit adalah sebagai berikut (Ahmad, 2005):

a) Batuan Asal, batuan asal dalam pembentukan endapan nikel laterit adalah batuan ultrabasa. Batuan ultrabasa memiliki kandungan nikel (Ni) paling tinggi dibandingkan batuan lainnya karena berasal dari mantel bumi yang kaya akan logam berat. Batuan ini, dengan komposisi silika rendah dan dominasi mineral seperti olivin dan piroksen, mengandung elemen-elemen logam seperti magnesium, besi, dan nikel. Proses pelapukan kimia pada batuan ultrabasa menghasilkan laterit, terutama pada lapisan limonit dan saprolit, yang menjadi tempat terkonsentrasinya nikel. Mineral pembawa nikel seperti garnierit dan serpentin juga sering ditemukan

dalam batuan ultrabasa, menjadikannya sumber utama nikel dalam eksplorasi dan penambangan.

b) Iklim, adanya pergantian musim hujan dan musim kemarau dimana terjadi kenaikan dan penurunan permukaan air tanah juga dapat menyebabkan terjadinya proses akumulasi dan pemisahan unsur-unsur. Perbedaan temperatur yang cukup besar akan membantu terjadinya pelapukan mekanis, dimana akan timbul rekahan-rekahan dalam batuan yang akan mempermudah proses atau reaksi kimia terutama dekomposisi batuan.

c) Reagen-reagen kimia dan vegetasi, yang dimaksud dengan reagen-reagen kimia adalah unsur-unsur dan senyawa-senyawa yang membantu mempercepat proses pelapukan. Air tanah yang mengandung CO_2 memegang peranan penting dalam proses pelapukan kimia. Asam-asam humus dapat menyebabkan dekomposisi batuan dan merubah PH larutan. Asam-asam humus ini erat hubungannya dengan vegetasi, dimana vegetasi akan mengakibatkan penetrasi air dapat lebih dalam dan lebih mudah dengan mengikuti akar-akar pepohonan, akumulasi air hujan akan lebih banyak, humus akan lebih tebal. Keadaan ini merupakan suatu petunjuk dimana pada hutan yang lebat akan terdapat endapan bijih nikel yang lebih tebal dan kadar yang lebih tinggi. Selain itu vegetasi dapat menjaga hasil pelapukan terhadap erosi mekanis.

d) Struktur geologi, struktur menyebabkan deformasi pada batuan yang paling dominan dalam pembentukan endapan nikel adalah struktur rekahan dibandingkan dengan struktur patahan. Batuan ultrabasa memiliki permeabilitas dan porositas yang kecil sehingga penetrasi air menjadi sulit. Akan tetapi dengan adanya rekahan rekahan tersebut akan lebih memudahkan air masuk dan berarti proses pelapukan akan lebih intensif.

e) Topografi, untuk daerah landai air akan bergerak perlahan-lahan sehingga mempunyai kesempatan untuk mengadakan penetrasi yang lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan. Akumulasi endapan biasanya terdapat pada daerah landai sampai kemiringan sedang. Hal ini menggambarkan bahwa ketebalan pelapukan mengikuti bentuk topografi. Pada daerah yang curam jumlah air yang meluncur lebih banyak dari pada air yang meresap, ini dapat menyebabkan pelapukan kurang intensif.

f) Waktu, Waktu yang cukup lama akan menghasilkan pelapukan yang intensif karena akumulasi unsur nikel cukup tinggi.

Terdapat beberapa zona endapan nikel laterit yang meliputi (Sianturi, 2008):

1. Zona Tanah Penutup, merupakan zona top soil hasil pelapukan zona-zona di bawahnya yang memiliki kandungan Ni sangat rendah. Pada zona ini didominasi oleh humus yang bersifat gembur dan kadang-kadang terdapat lempeng silika. Kadar Fe pada zona ini sangat tinggi dan sering dijumpai konkresi-konkresi besi.
2. Zona limonit, merupakan zona di bawah tanah penutup yang kaya akan oksida besi. Limonit memiliki kandungan unsur Ni yang lebih tinggi dibandingkan dengan zona tanah penutup tetapi kandungan unsur Fe semakin berkurang. Zona ini didominasi oleh mineral *goethite* [$\text{FeO}(\text{OH})$] dan mineral lain seperti magnetit [Fe_3O_4], hematit [Fe_2O_3], kromit [Cr_2O_4] serta kuarsa sekunder.
3. Zona pelindian, merupakan zona transisi dari zona saprolit ke zona limonit. Pada zona ini akan terjadi perubahan geokimia unsur dimana kadar Fe_2O_3 dan Al_2O_3 akan naik, sedangkan kadar SiO_2 dan MgO akan turun.
4. Zona saprolit, merupakan zona yang terbentuk pada tahap awal proses pelapukan. Batuan asal (ultramafik) pada zona ini akan berubah menjadi saprolit akibat pengaruh air tanah. Mineral-mineral utamanya adalah serpentinit, kuarsa sekunder dan garnierit. Mineral garnierit tidak dijumpai sebagai mineral murni tetapi bercampur dengan serpentinit kadar rendah lainnya sehingga kadar nikel dalam bijih menjadi menurun. Pada zona ini pergantian magnesium oleh nikel mengakibatkan kadar nikel dalam serpentinit akan bertambah.
5. Batuan dasar (*Bedrock*), merupakan batuan asal berupa batuan ultramafik, seperti *harzburgite* (peridotit yang kaya akan orthopiroksen), peridotit atau dunit. Endapan nikel laterit dapat dilihat pada gambar 1.

SCHEMATIC LATERITE PROFILE	COMMON NAME	APPROXIMATE ANALYSIS (%)			
		Ni	Co	Fe	MgO
	RED LIMONITE	<0.8	<0.1	>50	<0.5
	YELLOW LIMONITE	0.8 to 1.5	0.1 to 0.2	40 to 50	0.5 to 5
	TRANSITION	1.5 to 4	0.02 to 0.1	25 to 40	5 to 15
	SAPROLITE/ GARNIERITE/ SERPENTINE	1.8 to 3		10 to 25	15 to 35
	FRESH ROCK	0.3	0.01	5	35 to 45

Gambar 1 Endapan nikel laterit (Elias, 2002).

2.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kualitas Nikel

Peningkatan permintaan pasar global akan kebutuhan logam nikel, maka saat ini banyak perusahaan yang tersebar di seluruh dunia terutama di Indonesia melakukan kegiatan eksplorasi pemboran yang tujuannya untuk mendapatkan nilai kadar suatu bahan galian. Namun pada saat kegiatan penambangan banyak terjadi permasalahan yang salah satunya adalah ketidaksesuaian antara nilai kadar nikel dari hasil database pengeboran eksplorasi dengan nilai kadar nikel pada saat mengeksploitasinya yaitu yang berada di front penambangan di setiap *Pit* (Smith *et al.*, 1992).

Bijih limonit perlu dilakukan proses untuk meningkatkan kadar nikel, salah satunya yaitu reduksi selektif. Reduksi selektif adalah proses reduksi logam oksida menjadi logam menggunakan reduktor tertentu yang dilakukan pada temperatur dibawah titik lebur oksida tersebut. Reduksi selektif dipilih karena proses peningkatan kadar nikel jauh lebih mudah dan lebih cepat. Menurut Man Jiang, proses reduksi selektif dapat meningkatkan kadar nikel (Jiang, 2013).

Dalam kegiatan penambangan sering terjadi adanya ketidaksesuaian antara rencana dengan kondisi aktual di lapangan, ketidaksesuaian ini ditemukan setelah dilakukan rapat kerja mengenai analisis perbandingan kadar Ni antara *mine plan* dan realisasi penambangan. Ketidaksesuaian yang sering terjadi mencakup

pencampuran antara *ore* dan *waste* yang dapat menurunkan kadar Ni (Heriawan 2009).

Komposisi mineral dalam bijih nikel, terutama kandungan silika, oksida besi, dan sulfur, memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas nikel yang dapat diperoleh. Silika (SiO_2) dalam bijih nikel dapat mempengaruhi proses ekstraksi karena dapat membentuk slag atau terak yang mengandung pengotor, sehingga menurunkan efisiensi pemulihan nikel selama proses pemanggangan atau peleburan. Selain itu, kandungan oksida besi (Fe_2O_3) dalam bijih nikel juga dapat menyebabkan pembentukan senyawa besi yang tidak diinginkan selama proses peleburan, yang akhirnya menurunkan kadar nikel murni yang dihasilkan. Sementara itu, kandungan sulfur dalam bijih nikel sering kali membentuk senyawa sulfat atau sulfur, yang dapat menghambat proses pemurnian nikel dan menghasilkan produk akhir yang terkontaminasi oleh sulfur. Oleh karena itu, bijih nikel dengan komposisi mineral yang lebih sederhana dan kadar nikel yang lebih tinggi lebih mudah diproses dan menghasilkan nikel dengan kualitas yang lebih baik. Bijih yang kaya nikel dan rendah pengotor (seperti silika, oksida besi, dan sulfur) akan menghasilkan ekstraksi yang lebih efisien, memungkinkan pemulihan nikel yang lebih tinggi, dan mengurangi kebutuhan untuk proses pemurnian yang kompleks. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai komposisi mineral bijih nikel sangat penting untuk menentukan metode ekstraksi yang tepat dan memastikan kualitas nikel yang optimal (Hollingsworth, 2017).

Kondisi operasional yang optimal dan penggunaan teknologi canggih selama proses ekstraksi dan pemurnian nikel memiliki peranan yang sangat penting dalam menentukan kualitas akhir produk nikel. Dalam proses ekstraksi nikel, pengendalian suhu dan tekanan yang tepat sangat diperlukan untuk memaksimalkan efisiensi pemulihan nikel dari bijih. Sebagai contoh, dalam metode pirometallurgi, suhu tinggi diperlukan untuk melebur bijih nikel, namun suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat mempengaruhi kualitas hasil peleburan, menyebabkan pengotor tidak terpisah dengan baik, dan menurunkan kadar nikel dalam produk akhir. Demikian pula, dalam proses hidrometallurgi, pengendalian tekanan dan suhu dalam reaktor *leaching* sangat mempengaruhi kelarutan nikel dan kemampuan untuk menghilangkan pengotor. Selain itu, teknologi pemurnian yang lebih efisien,

seperti penggunaan teknologi pemurnian elektrolitik, memungkinkan penghilangan pengotor dengan lebih baik dan menghasilkan nikel dengan tingkat kemurnian yang lebih tinggi. Teknologi canggih lainnya, seperti pemrosesan menggunakan teknik *solvent extraction* atau *ion exchange*, juga dapat meningkatkan selektivitas dalam pemisahan nikel dari pengotor, mengurangi konsumsi energi, dan meningkatkan efisiensi operasional. Dengan penerapan teknologi yang tepat dan pengelolaan kondisi operasional yang optimal, kualitas nikel yang dihasilkan dapat lebih terjaga, pengotor yang terkontaminasi dapat diminimalkan, dan biaya produksi dapat ditekan. Oleh karena itu, kombinasi antara teknologi yang efisien dan pengaturan kondisi operasional yang optimal merupakan kunci utama dalam menghasilkan nikel berkualitas tinggi (Cui dkk., 2020).

2.4 Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Logam Nikel diperoleh dari endapan nikel laterit yang telah diambil dan melalui proses pengolahan. Ada beberapa jalur proses pengolahan yang dapat digunakan untuk mendapatkan logam nikel tersebut. Pemilihan jalur proses yang akan digunakan untuk proses pengolahan dipengaruhi oleh karakteristik ataupun komposisi dari endapan nikel laterit tersebut. Proses hidrometalurgi dapat mengolah bijih nikel laterit dari zona limonit dengan kadar Ni dibawah 1,5%, Co dibawah 0.2%, Fe diatas 40%, dan MgO dibawah 5%. Proses pirometalurgi dapat mengolah bijih nikel laterit dari zona transisi dengan kadar Ni 1,5%-2%, Co 0,02%-0.1%, Fe 25%-40%, dan MgO dibawah 5%-15% dan zona saprolit dengan kadar Ni 1,8%-3%, Co 0,02%- 0.1%, Fe 15%-35%, dan MgO 15%-35%. Gabungan proses antara pirometalurgi dan hidrometalurgi dapat mengolah bijih nikel laterit dari zona limonit dan saprolit.

Proses pengolahan nikel laterit yang diterapkan secara komersial didasarkan pada kandungan magnesium (Mg) dan rasio nikel dengan besi (Ni/Fe). Saat ini metode yang ekonomis untuk digunakan dalam pengolahan bijih nikel yaitu metode pirometalurgi dan metode hidrometalurgi. Metode pirometalurgi digunakan untuk mengolah nikel dari nikel endapan laterit zona saprolit yang memiliki kadar Ni dan MgO yang tinggi. Metode pirometalurgi digunakan untuk mengolah nikel dari nikel endapan laterit zona limonit yang memiliki kadar Ni dan MgO yang rendah. Nikel

dengan kadar MgO yang tinggi kurang cocok diolah dengan menggunakan metode hidrometalurgi karena dapat meningkatkan konsumsi asam yang diperlukan saat melakukan proses ekstraksi (Prasetyo & Ronald, 2011).

2.4.1 Pirometalurgi

Proses pirometalurgi (*smelting*) merupakan proses pengolahan mineral dengan menggunakan suhu tinggi, panas yang diperoleh berasal dari tanur berbahan bakar batubara (kokas). Selain sebagai bahan bakar, batubara juga berfungsi sebagai reduktor pada proses *smelting*. Nikel laterit jenis saprolit yang memiliki kandungan nikel yang tinggi (>2%) lebih sesuai untuk diolah dengan menggunakan proses ini. Proses ini digunakan untuk memproduksi *ferronickel*, *nickel matte*, atau *nickel pig iron* (Kyle, 2010).

Proses pirometalurgi bijih laterit secara komersial saat ini secara garis besar terdiri atas (Dalvi *et al.*, 2004):

1. *Rotary kiln electric furnace* (RKEF)

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

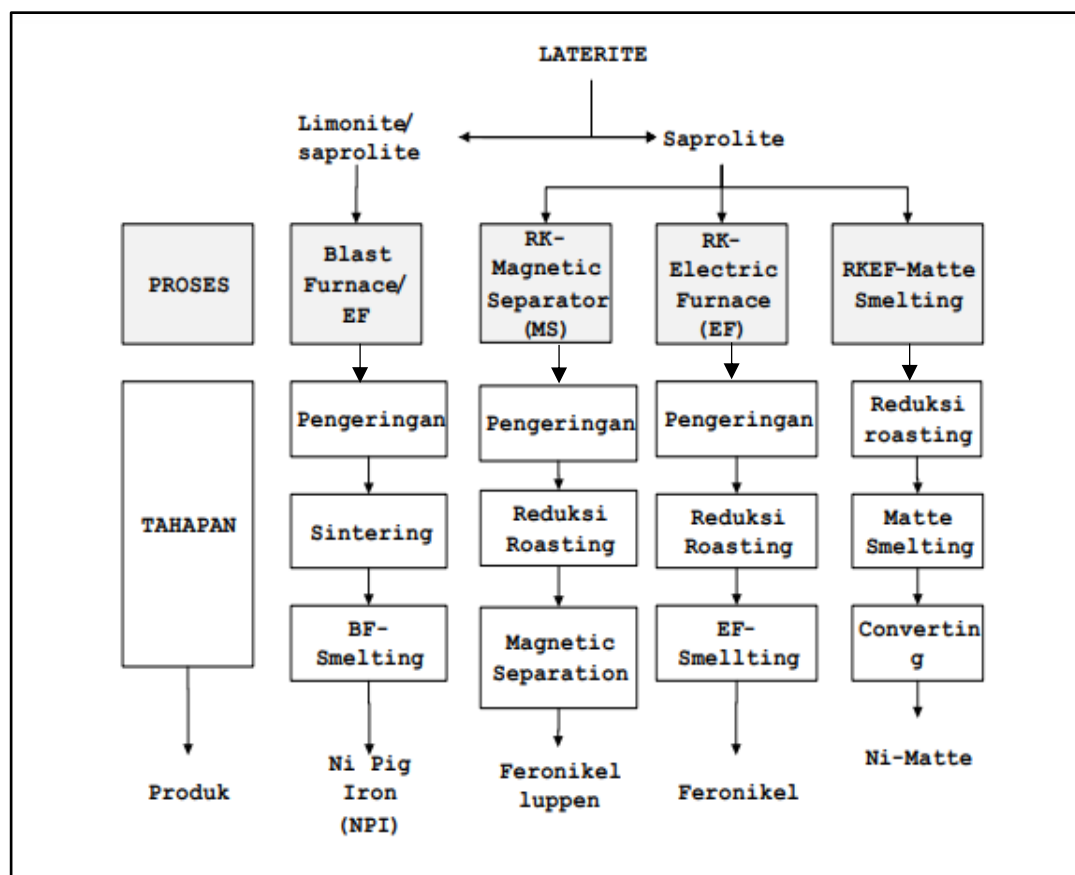
2. *Nippon Yakin Oheyama Process*

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

3. *Nickel Pig Iron (NPI)*

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

menghasilkan produk dengan kualitas rendah. Tetapi bagaimanapun produksi NPI akan tetap menjadi sesuatu yang ekonomis selama harga nikel relatif tinggi. Proses produksi NPI yang lain yaitu menggunakan *electric furnace*. Dengan peningkatan kualitas EF maka proses ini diyakini mempunyai efisiensi energi yang lebih tinggi dari proses *blast furnace*. Sehingga pada prakteknya dalam 10 tahun terakhir pembuatan NPI meningkat signifikan terutama di China dan Indonesia. Kelebihan utama dalam proses ini yaitu dapat mengolah bijih kadar rendah yang sulit dilakukan dengan proses pirometalurgi lain. Diagram alir sederhana ekstraksi nikel secara komersil dari bijih nikel laterit dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram alir sederhana ekstraksi nikel secara komersil (Dalvi *et al.*, 2004)

Keuntungan dengan menggunakan proses ini adalah proses ini sudah teruji (*well proven*), hasil *recovery* nikel tinggi, dan reagen yang digunakan pada umumnya murah dan dapat diperoleh dengan mudah. Akan tetapi, proses pirometalurgi menyebabkan permasalahan lingkungan, seperti polusi udara akibat

menggunakan suhu tinggi. Di samping itu, proses ini juga membutuhkan energi yang tinggi (Kyle, 2010).

2.4.2 Hidrometalurgi

Metalurgi didefinisikan sebagai ilmu dan teknologi untuk memperoleh sampai pengolahan logam yang mencakup tahapan dari pengolahan bijih mineral, pemerolehan (ekstraksi) logam, sampai ke pengolahannya untuk menyesuaikan sifat-sifat dan perilakunya sesuai dengan yang dipersyaratkan dalam pemakaian untuk pembuatan produk rekayasa tertentu.

Salah satu proses dari ekstraksi metalurgi/ekstraksi logam itu sendiri adalah, *hydrometallurgy* (proses ekstraksi yang dilakukan pada temperatur yang relatif rendah dengan cara pelindian dengan media cairan). Proses hidrometalurgi merupakan proses pengolahan mineral yang dilakukan pada temperatur yang relatif rendah dengan cara pelindihan menggunakan larutan kimia. Saat ini, proses hidrometalurgi yang diterapkan pada skala industri adalah proses caron dan proses ini sudah teruji (*well proven*), kedua proses ini mempunyai permasalahan utama yang sama seperti proses pirometalurgi, yaitu permasalahan lingkungan dimana kedua proses ini akan menghasilkan limbah cair berbahaya dan membutuhkan modal dan biaya operasional yang besar (Simate *et al.*, 2010).

Hidrometalurgi merupakan cabang tersendiri dari metalurgi. Secara harfiah hidrometalurgi dapat diartikan sebagai cara pengolahan logam dari batuan atau bijihnya dengan menggunakan pelarut berair (*aqueous solution*). Atau secara detailnya proses Hidrometalurgi adalah suatu proses atau suatu pekerjaan dalam metalurgi, dimana dilakukan pemakaian suatu zat kimia yang cair untuk dapat melarutkan suatu partikel tertentu. Hidrometalurgi dapat juga diartikan sebagai proses ekstraksi metal dengan larutan reagen encer (< 1 gram/mol) dan pada suhu $< 100^{\circ}\text{C}$. Reaksi kimia yang dipilih biasanya yang sangat selektif. Proses hidrometalurgi terdiri dari tiga tahapan yaitu (Simate *et al.*, 2010):

1. *Leaching* atau pengikisan logam dari batuan dengan bantuan reduktan organik.
2. Pemekatan larutan hasil *leaching* dan pemurniannya.
3. *Recovery* yaitu pengambilan logam dari larutan hasil *leaching*.

2.5 Nikel dan Kegunaannya

Beberapa kegunaan nikel adalah sebagai berikut (Bide *et al.*, 2008, Davis, 2000):

2.5.1 *Stainless steel*

Konsumsi nikel negara Amerika Serikat untuk stainless steel adalah sebesar 41,89 % (Mcrae, 2018). Nikel digunakan dalam baja untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan dan kemampuan untuk mengeras. Struktur baja karbon berubah pada proses pendinginan dari austenitic (larutan besi dan paduan yang padat elemen) ke campuran ferit dan sementit. Dalam jumlah yang cukup nikel dapat menstabilkan struktur austenitic. Meningkatkan kandungan nikel dalam baja kromium 18 % menjadi sekitar 8 % hingga 10 % mengurangi resistensi terhadap retak korosi tegang (*StressCorrosion Creck*) dan menghasilkan kelas yang sangat penting dari baja yang tahan korosi dan panas. Baja tersebut memiliki keelastisan yang tinggi, menurunkan tegangan hasil, dan memiliki kekuatan yang lebih tinggi pada suhu rendah maupun tinggi daripada baja karbon biasa sehingga cocok digunakan di lingkungan yang kurang bersahabat seperti pada industri laut, kimia, dan hidrokarbon (Davis, 2000).

Penggunaan terbesar nikel adalah baja tahan karat yang digunakan untuk berbagai macam tujuan. Karena mudah dibersihkan dan tahan korosi, ini biasa digunakan dalam peralatan makan, persiapan makanan, wastafel dan peralatan medis. Ini juga sering digunakan untuk aplikasi mekanis, seperti kelongsong untuk pipa dan katup, dan juga untuk transportasi, pemrosesan kimia dan industri konstruksi (Bide *et al.*, 2008).

2.5.2 *Other Steel Alloys*

Konsumsi nikel negara Amerika Serikat untuk *other steel alloys* adalah sebesar 15,07 % (Mcrae, 2018). Nikel merupakan tambahan penting untuk besi cor yang meningkatkan kekerasan, kelenturan dan keerasan bijinya. Paduan nikel-besi juga memiliki karakteristik pemuaian rendah yang sangat berguna yang membuat mereka cocok untuk penyimpanan gas cair di mana suhu rendah diperlukan. Ini adalah aplikasi yang berkembang pesat karena ketergantungan Inggris yang meningkat pada impor gas alam (Bide *et al.*, 2008).

2.5.3 *Non-Ferrous Alloys*

Konsumsi nikel negara Amerika Serikat untuk *non-ferrous alloys* adalah sebesar 11,02 % (Mcrae, 2018). Paduan yang paling umum dari *non-ferrous alloys* adalah *cupronickels*, sebuah paduan antara nikel dan tembaga yang digunakan secara luas dalam koin karena tahan terhadap korosi. *Cupronickels* dengan kandungan nikel 10 – 30 % telah lama dikenal akan ketahanannya terhadap air laut dan potensial elektrodanya juga dapat disesuaikan sehingga stabil di air laut sehingga dapat digunakan untuk aplikasi laut, khususnya di bidang tabung penukar panas, kondensor, pipa air asin, dan lain sebagainya (Davis, 2000).

Paduan memori nikel-titanium adalah contoh dari *non-ferrous alloys* modern yang berguna dalam aplikasi khusus. Paduan ini dapat kembali ke bentuk aslinya tanpa mengalami deformasi plastik di bawah tekanan. Salah satu kegunaannya yang paling terkenal adalah dalam bingkai kacamata. Area pengembangan lain yang digunakan untuk *non-ferrous alloys* adalah baterai. Baterai isi ulang *Nickelcadmium* sudah dikenal luas, tetapi baterai hidrida logam-nikel modern, menggunakan paduan tanah langka nikel, telah dikembangkan dengan kapasitas untuk menyimpan hidrogen. Ini digunakan dalam berbagai perangkat seperti komputer portabel dan alat-alat listrik tanpa kabel (Bide *et al.*, 2008).

2.5.4 *Super Alloys*

Konsumsi nikel negara Amerika Serikat untuk *super alloys* adalah sebesar 23,33 % (Mcrae, 2018). Superalloys adalah paduan nikel, besi-nikel, dan kobalt-base yang umumnya digunakan pada suhu di atas sekitar 540 °C. Mereka memiliki struktur Kristal kubik berpusat wajah (fcc, austenitic). Besi, kobalt, dan nikel adalah logam transisi dengan posisi berturut-turut dalam tabel periodik elemen. *Superalloy* dasar besi nikel adalah perpanjangan dari teknologi *stainless steel* dan umumnya tempa, sedangkan *superalloy* kobalt dan nikel dapat ditempa atau dicampur, tergantung pada aplikasi atau komposisi yang dibutuhkan (Davis, 2000). Konsumsi nikel negara Amerika Serikat dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Penggunaan nikel Amerika Serikat tahun 2015 (Mcrae, 2018).

Superalloy telah digunakan dalam berbagai bentuk. Lembaran, batangan, plat, pipa, tiang, airfoil, Piringan, dan bejana tekan adalah beberapa bentuk yang telah diproduksi. *Superalloy* merupakan paduan khusus vital untuk aplikasi pembangkit listrik, kedirgantaraan dan militer, dan terutama untuk produksi turbin. Logam ini telah digunakan dalam turbin pesawat terbang, industri, dan gas laut, reaktor nuklir, kulit pesawat terbang, struktur pesawat ruang angkasa, produksi petrokimia, protesa ortopedi dan gigi, dan aplikasi perlindungan lingkungan. Meski dikembangkan untuk penggunaan pada suhu tinggi, beberapa digunakan pada suhu *cryogenic* dan lainnya pada suhu tubuh. Aplikasi penggunaannya terus berkembang, tetapi pada tingkat yang lebih rendah daripada di dekade sebelumnya. Berdasarkan volume penggunaannya maka sektor kedirgantaraan tetap menjadi aplikasi utama penggunaan *superalloy* ini (Davis, 2000).

2.5.5 Plating

Konsumsi nikel negara Amerika Serikat untuk *plating* adalah sebesar 6,88 % (Mcrae, 2018). Dalam plating, nikel diaplikasikan dalam lapisan tipis menggunakan elektrolisis atau dari suatu larutan tanpa menggunakan arus listrik (tanpa aliran listrik). Ini memiliki aplikasi luas dalam ketahanan korosi (penting untuk peralatan medis dan bahan konstruksi). *Hard disk* komputer bergantung pada pelapisan nikel tanpa listrik sebagai pelapis memberikan basis *non-magnetik* seragam yang stabil untuk lapisan perekaman magnetik. Penggunaan penting lainnya adalah

pemasangan *electroplating* nikel dari master CD dan DVD. CD dibuat menggunakan cetakan nikel *electroformed*. *Electroforming* adalah proses pelapisan nikel untuk replikasi akurat dari bentuk dan permukaan yang kompleks (Bide *et al.*, 2008).

2.6 *X-Ray Fluorescence*

X-Ray Fluorescence (XRF) merupakan teknik analisis *non-destruktif* yang digunakan untuk identifikasi serta penentuan konsentrasi elemen yang ada pada padatan, bubuk ataupun sample cair. XRF mampu mengukur elemen dari berilium (Be) hingga uranium (U) pada *level trace element*, bahkan di bawah level ppm. Secara umum, XRF spektrometer mengukur panjang gelombang komponen material secara individu dari emisi fluoresensi yang dihasilkan sampel saat diradiasi dengan sinar-X (Panalytical, 2009).

Dasar analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) adalah pencacahan sinar-X yang dipancarkan oleh suatu unsur akibat pengisian kembali kekosongan elektron pada kulit yang lebih dekat inti karena terjadinya eksitasi elektron oleh elektron yang terletak pada kulit lebih luar. Ketika sinar-X yang berasal dari radioisotop sumber eksitasi menabrak elektron dan akan mengeluarkan elektron kulit dalam, maka akan terjadi kekosongan pada kulit itu. Perbedaan energi dari dua kulit itu akan tampil sebagai sinar-X yang dipancarkan oleh atom. Analisis *X-Ray Fluorescence* bertujuan untuk mengetahui dan mengukur kandungan unsur-unsur yang terdapat dalam suatu senyawa atau mineral (Iswani, 1983).

Spektrometer XRF didasarkan pada lepasnya elektron bagian dalam dari atom akibat dikenai sumber radiasi dan pengukuran intensitas pendar sinar-X yang dipancarkan oleh atom unsur dalam sampel. Metode ini tidak merusak bahan yang dianalisis baik dari segi fisik maupun kimiawi sehingga sampel dapat digunakan untuk analisis berikutnya. Mekanisme kerja XRF secara umum adalah sinar-X dari sumber pengeksitasi akan mengenai cuplikan dan menyebabkan interaksi antara sinar-X yang karakteristik untuk setiap unsur. Sinar-X tersebut selanjutnya mengenai detektor Si (Li) yang akan menimbulkan pulsa listrik yang lemah kemudian diperkuat dengan *preamplifier* dan *amplifier* lalu disalurkan pada penganalisis saluran ganda atau *Multi Chanel Analyzer* (MCA). Tenaga sinar-X

karakteristik yang muncul tersebut dapat dilihat dan disesuaikan dengan tabel tenaga sehingga dapat diketahui unsur yang ada di dalam cuplikan yang dianalisis (Iswani, 1983).

Metode XRF secara luas digunakan untuk menentukan komposisi unsur suatu material. Tergantung pada penggunaannya, XRF dapat dihasilkan tidak hanya oleh sinar-X tetapi juga sumber eksitasi primer yang lain seperti partikel alfa, proton atau sumber elektron dengan energi yang tinggi. Analisis secara kualitatif dan kuantitatif dapat dilakukan dengan XRF. Analisis kualitatif dilakukan dengan mengidentifikasi panjang gelombang spesifik atau energi sinar X dan nomor atom elemen yang dianalisis. Analisis kuantitatif dilakukan dengan metode kurva kalibrasi dan parameter fundamental (Jamaluddin, 2016).

Energi pada XRF adalah karakteristik level energi dari lintasan elektron tiap elemen. Level energi berbeda untuk setiap elemen. Dengan analisis 40 energi pada spektrum XRF yang diemisikan oleh sebuah zat, dapat ditentukan elemen yang ada pada unsur dan konsentrasi tiap zat. Informasi ini dibutuhkan untuk mengidentifikasi suatu unsur. Berdasarkan karakteristik sinar yang dipancarkan, elemen kimia dapat diidentifikasi dengan menggunakan WDXRF (*Wavelength Dispersive XRF*) dan EDXRF (*Energy Dispersive XRF*). WDXRF (*Wavelength Dispersive XRF*) dispersi sinar-X didapat dari difraksi dengan menggunakan *analyzer* yang berupa kristal yang berperan sebagai grid. Sedangkan EDXRF (*Energy Dispersive XRF*) bekerja tanpa menggunakan kristal, namun menggunakan software yang mengatur seluruh radiasi dari sampel ke detektor. Radiasi emisi dari sampel yang dikenai sinar-X akan langsung ditangkap oleh detektor. Detektor menangkap foton - foton tersebut dan dikonversikan menjadi impuls elektrik. Amplitudo dari impuls elektrik tersebut bersesuaian dengan energi dari foton - foton yang diterima detektor. Impuls kemudian menuju sebuah perangkat yang dinamakan MCA (*Multi Channel Analyzer*) yang akan memproses impuls tersebut. Sehingga akan terbaca dalam memori komputer sebagai *channel*. *Channel* tersebut yang akan memberikan nilai spesifik terhadap sampel yang dianalisis. Pada XRF jenis ini, membutuhkan biaya yang relatif rendah, namun keakuratan berkurang (Gosseau, 2009). XRF tipe epsilon 4 dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 XRF Tipe Epsilon 4

Penggunaan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dalam analisis nikel menjadi sangat penting, terutama di industri pertambangan dan pengolahan logam. Teknik ini digunakan untuk menentukan kadar nikel dalam bijih, konsentrat, dan produk akhir seperti baja tahan karat. XRF memungkinkan analisis cepat dan akurat terhadap elemen-elemen utama serta pengotor dalam sampel nikel tanpa merusaknya, sehingga efisiensi proses produksi dapat ditingkatkan. Dalam pengolahan nikel laterit, misalnya, XRF digunakan untuk mengukur kandungan logam seperti Fe, Ni, Mg, dan Si, yang penting untuk menentukan metode ekstraksi yang paling sesuai. Selain itu, kemampuan XRF dalam menganalisis material dengan presisi tinggi membuatnya ideal untuk kontrol kualitas dan pemantauan keberlanjutan di industri nikel (Jackson *et al.*, 2022).