

SKRIPSI

**ANALISIS PERBANDINGAN KADAR BIJIH NIKEL LATERIT
ANTARA SAMPEL *TEST PIT* DAN SAMPEL *RE-CHECK
PIT X PT ANTAM Tbk* UBPN KOLAKA**

Disusun dan diajukan oleh:

**M. ALIM MUHAJID LESTALUHU
D111 19 1026**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS PERBANDINGAN KADAR BIJIH NIKEL LATERIT ANTARA SAMPEL *TEST PIT* DAN SAMPEL *RE-CHECK PIT X PT ANTAM Tbk* UBPN KOLAKA

Disusun dan diajukan oleh

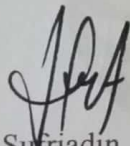
M. ALIM MUHAJID LESTALUHU
NIM. D111191026

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 18 Agustus 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Ir. Sufradin, S.T., M.T.
NIP. 1966081720001210001



Rizki Amalia, S.T., M.T.
NIDK. 8889211019

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Aryanti-Virtanti Anas, S.T., M.T.
NIP. 197010052008012026

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : M. Alim Muhajid Lestaluhu
NIM : D111191026
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisis Perbandingan Kadar Bijih Nikel Laterit Antara Sampel *Test Pit* dan Sampel *Re-Check Pit* X PT Antam Tbk UBPN Kolaka}

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 risiko.

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, Agustus 2023

Yang Menyatakan



M. Alim Muhajid Lestaluhu

ABSTRAK

M. ALIM MUHAJID LESTALUHU. *Analisis Perbandingan Kadar Bijih Nikel Laterit Antara Sampel Test Pit dan Sampel Re-check Pit X PT Antam Tbk UBPN Kolaka* (dibimbing oleh Sufriadin dan Rizki Amalia)

Bijih nikel laterit merupakan pemasok kebutuhan nikel dunia sebagai bagian dari komoditas mineral cadangan strategis. PT Antam Tbk UBPN Kolaka merupakan perusahaan milik negara yang bergerak di bidang industri pertambangan bijih nikel dan pengolahan bijih nikel di Kecamatan Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. Dalam kegiatan penambangan bijih nikel laterit sering terjadi adanya perubahan kadar ketika masih berada di *front* penambangan dan setelah dipindahkan ke *stockyard*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perbandingan kadar bijih nikel laterit antara sampel *test pit* dan sampel *re-check*, hubungan unsur/senyawa, pengaruh kadar unsur Ni terhadap unsur lainnya dan faktor yang menyebabkan perbedaan kadar. Metode yang digunakan adalah analisis deskriptif, analisis korelasi dan analisis regresi. Hasil perbandingan kadar bijih nikel laterit antara sampel *test pit* dan sampel *re-check* menunjukkan bahwa unsur/senyawa yang mengalami penurunan kadar adalah Ni sebesar 0,11%, Fe sebesar 1,54%, CaO sebesar 0,24%, Cr₂O₃ sebesar 0,15%, dan Al₂O₃ sebesar 0,30%, sedangkan yang mengalami peningkatan kadar adalah SiO₂ sebesar 0,89% dan MgO sebesar 3,13%. Hasil analisis korelasi unsur bijih nikel laterit pada sampel *test pit* dan sampel *re-check* menunjukkan unsur Ni-Ni, $r = 0,259$; SiO₂-SiO₂, $r = 0,203$; CaO-CaO, $r = 0,349$; MgO-MgO, $r = 0,248$ memiliki hubungan rendah. Sedangkan unsur Co-Co, $r = -0,048$; Fe-Fe, $r = -0,072$; Cr₂O₃-Cr₂O₃, $r = 0,012$; dan Al₂O₃-Al₂O₃, $r = -0,050$ memiliki hubungan sangat rendah. Hasil analisis regresi menunjukkan pengaruh kadar Ni terhadap Fe adalah sebesar 5,18% dan S/M sebesar 13,82%. Jika kadar Ni yang digunakan antara 1,8-2,4% maka Fe yang dihasilkan <15% sedangkan S/M adalah 1,8-2,20. Dengan demikian kadar Fe dan S/M tersebut telah sesuai dengan spesifikasi umpan pabrik. Adanya perbedaan kadar bijih nikel laterit antara sampel *test pit* dan sampel *re-check* disebabkan oleh ketelitian pengambilan dan preparasi sampel serta kesalahan pada proses *ore blending*.

Kata Kunci: Analisis perbandingan, Kadar bijih, Sampel *test pit*, Sampel *re-check*

ABSTRACT

M. ALIM MUHAJID LESTALUHU. *Comparative Analysis of Lateritic Nickel Ore Grade Between Test Pit Samples and Re-check Samples of the Pit X PT Antam Tbk UBPN Kolaka (supervised by Sufriadin dan Rizki Amalia)*

Laterite nickel ore is a supplier of world nickel needs as part of strategic reserve mineral commodities. PT Antam Tbk UBPN Kolaka is a state-owned company engaged in the nickel ore mining industry and nickel ore processing in Pomalaa District, Kolaka Regency, Southeast Sulawesi Province. In the mining activities of laterite nickel ore, there is often change in grade while still in the mining front and after being transferred to the stockyard. The research aims to determine the comparison of laterite nickel ore grades between test pit sample and re-check sample, element/compound relationships, the effect of Ni element grade on other elements, and the factors contributing to grade differences. This research used descriptive analysis, correlation analysis, and regression analysis methods. The results of the comparison of laterite nickel ore grade between test pit sample and re-check sample indicate a decrease in the grades of the following elements/compounds: Ni by 0.11%, Fe by 1.54%, CaO by 0.24%, Cr₂O₃ by 0.15%, and Al₂O₃ by 0.30%. On the other hand, there was an increase in the grades of SiO₂ by 0.89% and MgO by 3.13%. The results of correlation analysis of laterite nickel ore elements in test pit samples and re-check samples show that the elements Ni-Ni, $r = 0.259$; SiO₂-SiO₂, $r = 0.203$; CaO-CaO, $r = 0.349$; MgO-MgO, $r = 0.248$ have a low relationship. While the elements Co-Co, $r = -0.048$; Fe-Fe, $r = -0.072$; Cr₂O₃-Cr₂O₃, $r = 0.012$; and Al₂O₃-Al₂O₃, $r = -0.050$ have a very low relationship. The regression analysis results show the effect of Ni content on Fe is 5.18% and S/M is 13.82%. If the Ni used is between 1.8-2.4%, the resulting Fe <15% while S/M is 1.8-2.20. Thus, the Fe and S/M levels obtained are in accordance with the factory feed specifications. The difference in nickel laterite ore grade between the test pit sample and the re-check sample is due to the accuracy in sampling and sample preparation and errors in the process ore blending.

Keywords: Comparative analysis, Ore grade, Test pit samples, Re-check samples

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	i
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Nikel.....	5
2.2 Nikel Laterit	7
2.2.1 Pembentukan Endapan Nikel Laterit.....	8
2.2.2 Klasifikasi Endapan Nikel Laterit	10
2.3 Analisis <i>X-Ray Fluorescence</i>	12
2.3.1 Prinsip Kerja <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	15
2.3.2 Jenis-jenis <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	16
2.4 Pengolahan Bijih Nikel Laterit	17
2.4.1 Pirometalurgi.....	19
2.4.2 Hidrometalurgi	23
2.5 Perubahan Kadar Bijih Nikel Laterit	25
2.6 Analisis Korelasi.....	29
2.7 Analisis Regresi	32
2.7.1 Regresi Linear	34
2.7.2 Regresi Non-Linear	35
BAB III METODE PENELITIAN.....	37
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	37
3.2 Variabel Penelitian.....	38
3.2.1 <i>Independent Variable</i>	38
3.2.2 <i>Dependent Variable</i>	39
3.3 Bahan Uji dan Alat.....	39
3.3.1 Bahan Uji.....	39
3.3.2 Alat.....	39
3.4 Teknik Pengumpulan Data.....	41
3.4.1 Pengambilan Sampel	42
3.4.2 Preparasi Sampel	44
3.4.3 Analisis Kimia Bijih Nikel Laterit	48
3.4.4 Data Spesifikasi Umpan Pabrik Pengolahan.....	50

3.5	Pengolahan dan Analisis Data.....	50
3.5.1	Kadar Rata-Rata Sampel <i>Test Pit</i>	50
3.5.2	Kadar Rata-Rata Sampel <i>Re-check</i>	51
3.5.3	Beda Kadar	52
3.5.4	Dilusi Kadar	53
3.5.5	Analisis Korelasi Pearson.....	53
3.5.6	Analisis Regresi.....	54
BAB IV HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN		57
4.1	Perbandingan Kadar Bijih Nikel Laterit	57
4.1.1	Kadar Rata-rata	57
4.1.2	Dilusi Kadar	59
4.2	Korelasi Unsur/Senyawa pada Bijih Nikel Laterit.....	59
4.2.1	Hubungan Antara Ni (Sampel <i>Test Pit</i>) dengan Ni (Sampel <i>Re-check</i>).....	60
4.2.2	Hubungan Antara Co (Sampel <i>Test Pit</i>) dengan Co (Sampel <i>Re-check</i>).....	61
4.2.3	Hubungan Antara Fe (Sampel <i>Test Pit</i>) dengan Fe (Sampel <i>Re-check</i>).....	61
4.2.4	Hubungan Antara SiO ₂ (Sampel <i>Test Pit</i>) dengan SiO ₂ (Sampel <i>Re-check</i>).....	62
4.2.5	Hubungan Antara CaO (Sampel <i>Test Pit</i>) dengan CaO (Sampel <i>Re-check</i>).....	63
4.2.6	Hubungan Antara MgO (Sampel <i>Test Pit</i>) dengan MgO (Sampel <i>Re-check</i>).....	64
4.2.7	Hubungan Antara Cr ₂ O ₃ (Sampel <i>Test Pit</i>) dengan Cr ₂ O ₃ (Sampel <i>Re-check</i>).....	65
4.2.8	Hubungan Antara Al ₂ O ₃ (Sampel <i>Test Pit</i>) dengan Al ₂ O ₃ (Sampel <i>Re-check</i>).....	66
4.3	Pengaruh Kadar Unsur Ni Terhadap Unsur/Senyawa Lainnya	68
4.3.1	Pengaruh Kadar Ni Terhadap Kadar Fe	68
4.3.2	Pengaruh Kadar Ni Terhadap S/M.....	70
4.4	Faktor Penyebab Perbedaan Kadar Bijih Nikel Laterit.....	71
4.4.1	Ketelitian dalam Pengambilan sampel	71
4.4.2	Preparasi Sampel	72
4.4.3	Kesalahan pada Proses <i>Ore Blending</i>	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		75
5.1	Kesimpulan	75
5.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN		82

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Persebaran endapan nikel di dunia	6
Gambar 2 Profil endapan nikel laterit	12
Gambar 3 (1) Elektron tereksitasi keluar, (2) Pengisian kekosongan elektron, (3) Pelepasan energi, (4) Proses analisis data.....	15
Gambar 4 Piranti spektrometri XRF	16
Gambar 5 Diagram alir sederhana ekstraksi nikel laterit dengan metode pirometalurgi	22
Gambar 6 (1) Korelasi positif antara x dan y; (2) korelasi positif yang kuat antara x dan y; (3) korelasi positif sempurna antara x dan y.....	30
Gambar 7 (1) Korelasi negatif antara x dan y; (2) korelasi negatif yang kuat antara x dan y; (3) korelasi negatif sempurna antara x dan y.....	31
Gambar 8 (1) Tidak ada korelasi antara x dan y; (2) hubungan non-linear antara x dan y.....	31
Gambar 9 Lokasi penelitian	38
Gambar 10 Pengambilan sampel <i>test pit</i> di <i>pit X</i>	42
Gambar 11 Pengambilan sampel <i>re-check</i> di <i>stockyard</i> Pos 5	43
Gambar 12 (a) Memasukkan sampel ke dalam <i>screening</i> -30 mm; (b) Mereduksi material <i>oversize</i> menggunakan <i>jaw crusher</i> -20 mm	44
Gambar 13 (a) Mencampur material (<i>mixing</i>); (b) Membentuk matriks 4x5 dan mengambil sampel menggunakan sendok sampel 30D.....	45
Gambar 14 Memasukkan sampel ke dalam oven.....	46
Gambar 15 Bentuk matriks 4x5	46
Gambar 16 (a) <i>Screening</i> sampel menggunakan <i>screen</i> -3 mm; (b) Material <i>oversize</i> direduksi menggunakan <i>roll crusher</i> -3 mm	47
Gambar 17 (a) <i>Mixing</i> ; (b) Mengambil sampel menggunakan sendok sampel 10D	47
Gambar 18 (a) Menghaluskan sampel menggunakan <i>pulverizer</i> hingga 200 <i>mesh</i> ; (b) <i>Mixing</i> split 4 sisi	48
Gambar 19 (a) Mengambil sampel menggunakan sendok sampel 1D; (b) Ketentuan pengambilan sampel.....	48
Gambar 20 (a) Memasukkan sampel ke dalam <i>aluminium cup pellet</i> ; (b) Sampel di- <i>press</i> menggunakan <i>press machine pellet</i>	49
Gambar 21(a) Memasukkan sampel ke dalam XRF spektrometer; (b) Melakukan analisis kadar dengan aplikasi Nioras Pellet	49
Gambar 22 Bagan alir penelitian.....	56
Gambar 23 Grafik perbandingan kadar bijih nikel laterit antara sampel <i>test pit</i> dan sampel <i>re-check</i>	58
Gambar 24 Hubungan antara Ni (sampel <i>test pit</i>) dengan Ni (sampel <i>re-check</i>) .	60
Gambar 25 Hubungan antara Co (sampel <i>test pit</i>) dengan Co (sampel <i>re-check</i>)	61
Gambar 26 Hubungan antara Fe (sampel <i>test pit</i>) dengan Fe (sampel <i>re-check</i>) .	62
Gambar 27 Hubungan antara SiO ₂ (sampel <i>test pit</i>) dengan SiO ₂ (sampel <i>re-check</i>).....	63
Gambar 28 Hubungan antara CaO (sampel <i>test pit</i>) dengan CaO (sampel <i>re-check</i>).....	64

Gambar 29 Hubungan antara MgO (sampel <i>test pit</i>) dengan MgO (sampel <i>re-check</i>).....	65
Gambar 30 Hubungan antara Cr ₂ O ₃ (sampel <i>test pit</i>) dengan Cr ₂ O ₃ (sampel <i>re-check</i>).....	66
Gambar 31 Hubungan antara Al ₂ O ₃ (sampel <i>test pit</i>) dengan Al ₂ O ₃ (sampel <i>re-check</i>).....	67
Gambar 32 Pengaruh kadar Ni terhadap kadar Fe	69
Gambar 33 Pengaruh kadar Ni terhadap S/M	70
Gambar 34 Kesalahan dalam pengambilan sampel	72
Gambar 35 Kontaminasi sampel pada tahapan preparasi sampel	73

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Data spesifikasi umpan pabrik pengolahan.....	50
Tabel 2 Kadar rata-rata sampel <i>test pit</i>	51
Tabel 3 Kadar rata-rata sampel <i>re-check</i>	52
Tabel 4 Klasifikasi korelasi Pearson	54
Tabel 5 Perbandingan kadar bijih nikel laterit antara sampel <i>test pit</i> dan sampel <i>re-check</i>	57
Tabel 6 Dilusi kadar bijih nikel laterit antara sampel <i>test pit</i> dan sampel <i>re-check</i>	59
Tabel 7 Tingkat hubungan unsur/senyawa sampel <i>test pit</i> dengan sampel <i>re-check</i>	67

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
MNP	Material Non-Produksi
LGSO	<i>Low Grade Saprolite Ore</i>
HGSO	<i>High Grade Saprolite Ore</i>
pH	<i>Potential Hydrogen</i>
XRF	<i>X-Ray Flourescence</i>
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
WDXRF	<i>Wavelength Dispersive X-Ray Flourescence</i>
EDXRF	<i>Energy Dispersive X-Ray Flourescence</i>
RKEF	<i>Rotary Kiln Electric Furnace</i>
NPI	<i>Nickel Pig Iron</i>
HPAL	<i>High Pressure Acid Leaching</i>
AL	<i>Acid Leaching</i>
EPAL	<i>Enhaced Pressure Acid Leaching</i>
CoG	<i>Cut off Grade</i>
SOP	Standar Operasional Prosedur
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>
r	Koefisien korelasi
R ²	Koefisien determinasi
\bar{x}	Kadar rata-rata
x _i	Kadar ke-i
n	Jumlah data
Q	Persentase perubahan kadar
q1	Kadar sampel <i>test pit</i>
q2	Kadar sampel <i>re-check</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta Lokasi Pengambilan Sampel <i>Test Pit</i>	83
Lampiran 2 Peta Lokasi Pengambilan Sampel <i>Re-Check</i>	84
Lampiran 3 Kadar Sampel <i>Test Pit</i>	85
Lampiran 4 Kadar Sampel <i>Re-check</i>	88
Lampiran 5 Perhitungan Kadar Rata-Rata Sampel <i>Test Pit</i>	91
Lampiran 6 Perhitungan Kadar Rata-Rata Sampel <i>Re-check</i>	93
Lampiran 7 Perhitungan Beda Kadar	95
Lampiran 8 Perhitungan Dilusi Kadar	97
Lampiran 9 Perhitungan Koefisien Korelasi.....	99
Lampiran 10 Perhitungan Contoh Regresi.....	120

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat, karunia dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Perbandingan Kadar Bijih Nikel Laterit Antara Sampel *Test Pit* dan Sampel *Re-check Pit* X PT Antam Tbk UBPN Kolaka”. Skripsi ini disusun sebagai syarat mendapatkan gelar sarjana di Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa dalam proses penulisan banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sehingga penulis dapat melalui dan mengatasi kendala-kendalanya.

Penyusunan skripsi ini tidak akan selesai tanpa adanya bantuan dari orang-orang hebat yang telah memfasilitasi penulis mulai dari tahap pengumpulan data hingga selesai. Oleh sebab itu, pada kesempatan kali ini penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada manajemen PT Antam Tbk UBPN Kolaka yang telah memberikan kesempatan kepada penulis dalam pengambilan data penelitian, kepada Ibu Dr. Ir. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. selaku ketua Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin dan segenap dosen serta staf administrasi yang telah banyak membantu dalam pengurusan administrasi penulis.

Terima kasih pula penulis ucapkan kepada dosen pembimbing Bapak Dr. Ir. Sufriadin, S.T., M.T. dan Ibu Rizki Amalia, S.T., M.T. yang telah membimbing dan memberi banyak masukan dalam penelitian ini serta telah banyak meluangkan waktunya dalam proses penyusunan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M.T. dan Bapak Akmal Saputno, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya untuk mengoreksi skripsi ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua penulis yaitu Bapak Abdul Said Lestaluhu, S.E., dan Ibu Halima Samual, saudara penulis yaitu Firda Juwita Lestaluhu, M. Achba Lestaluhu, Fazria Sayeqty Lestaluhu, Siddiqiyah Lestaluhu (Almh.), Fauzil Adhiem Lestaluhu dan Khalifah Al-Ardh Lestaluhu serta keluarga besar yang tidak henti-hentinya memberi dukungan

mental, motivasi dan dukungan material sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan tepat waktu.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada teman-teman mahasiswa Teknik Pertambangan IGNEOUZ 2019 serta anggota Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian yang telah memberikan dukungan mental dan banyak menghibur ketika mengalami jenuh dalam penyusunan skripsi ini.

Last but not least, I wanna thank me, I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doing all this hard work, I wanna thank me for having no days off, I wanna thank me for... for never quitting, I wanna thank me for always being a giver and tryna give more than I receive, I wanna thank me for tryna do more right than wrong, I wanna thank me for just being me at all times.

Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam pengembangan wawasan dalam bidang pengolahan bahan galian. Penulis juga menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih banyak kekurangan di dalamnya. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan skripsi yang berkaitan dengan peningkatan bijih nikel laterit ini kedepannya.

Gowa, Agustus 2023

M. Alim Muhajid Lestaluhu

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia Timur merupakan bagian wilayah Indonesia dengan potensi sumber daya mineral logam yang sangat banyak keterdapatannya. Sulawesi Tenggara adalah salah satu daerah penghasil nikel laterit terbesar. Keterdapatannya endapan nikel laterit yang ada di Sulawesi Tenggara khususnya di daerah Pomalaa dan sekitarnya. Bijih nikel laterit merupakan pemasok kebutuhan nikel dunia sebagai bagian dari komoditas mineral cadangan strategis. Hal ini juga mewakili ketersediaan endapan nikel laterit yang saat ini dikelola oleh perusahaan PT Antam Tbk UBPN Kolaka (Fitrian dkk., 2011).

PT Antam Tbk UBPN Kolaka merupakan perusahaan milik negara (BUMN) yang bergerak di bidang industri pertambangan nikel dan pengolahan bijih nikel. Metode pengolahan bijih nikel yang digunakan oleh PT Antam Tbk UBPN Kolaka adalah pirometalurgi dengan teknologi *Rotary Kiln-Electric Furnace* (RKEF). Produk yang dihasilkan oleh perusahaan dari pengolahan bijih nikel laterit adalah feronikel, yang mengandung sekitar 80% besi dan 20% nikel (PT Antam Tbk, 2023). Untuk mencapai produk olahan tersebut maka umpan yang digunakan oleh pabrik pengolahan yaitu kadar $Ni \geq 1,8\%$, $Fe \leq 15\%$, $SiO_2 \leq 40\%$, $MgO \leq 20\%$ dan $S/M \leq 2,2$. PT Antam Tbk UBPN Kolaka membagi bijih nikel laterit menjadi tiga golongan, yaitu kadar $Ni \leq 1,69\%$ digolongkan sebagai Material Non-Produksi (MNP), kadar $Ni 1,70\% - 1,79\%$ digolongkan sebagai *Low Grade Saprolite Ore* (LGSO) untuk pemenuhan permintaan konsumen, dan kadar $Ni \geq 1,8\%$ digolongkan sebagai *High Grade Saprolite Ore* (HGSO) untuk umpan pabrik (Yurnia H, 2018).

Adapun kegiatan pengendalian kualitas bijih nikel yang dilakukan oleh PT Antam Tbk UBPN Kolaka adalah pengambilan sampel, preparasi sampel dan analisis sampel. Sampel yang dijadikan sebagai bahan analisis adalah sampel *test pit*, sampel *re-check* dan sampel domestik. Sampel *test pit* merupakan sampel yang diambil di *front* penambangan (sampel *test pit*) untuk menganalisis kadar unsur sampel tersebut sebagai pertimbangan untuk melakukan kegiatan produksi. Sampel

re-check merupakan sampel yang diambil di *stockyard (Exportable Transito Ore)* untuk mengecek kembali kadar hasil penambangan dari *pit* tersebut. Sedangkan sampel domestik merupakan sampel yang diambil sebelum melakukan proses *barging*. Sampel yang dijadikan sebagai bahan analisis dalam penelitian adalah sampel *test pit* dan sampel *re-check*. Dalam kegiatan produksinya PT Antam Tbk UBPN Kolaka senantiasa melakukan pengawasan terhadap kadar bijih nikel itu sendiri. Hal ini dimaksudkan untuk memenuhi persyaratan spesifikasi umpan pabrik. Namun untuk memenuhi standar tersebut pihak perusahaan dihadapkan dengan suatu kenyataan dimana hasil analisis menunjukkan adanya perbedaan kadar bijih nikel laterit pada sampel yang diambil di *front* penambangan (sampel *test pit*) dan sampel yang diambil di *stockyard* (sampel *re-check*).

Kondisi ini disebabkan oleh beberapa kesalahan yang dilakukan pada serangkaian kegiatan pengambilan sampel dan juga proses pemindahan bijih dari *front* penambangan ke *stockpile*. Perubahan kadar tersebut perlu diidentifikasi berbagai kemungkinan penyebabnya dan upaya yang dapat dilakukan untuk meminimalisir terjadinya perubahan kadar tersebut. Karena jika tidak dilakukan maka hal ini akan terus berlanjut sehingga dapat membuat kualitas dari bahan galian menurun hingga tidak memenuhi spesifikasi kadar permintaan untuk kebutuhan umpan pabrik dan pengapalan yang akan berpotensi menyebabkan kerugian bagi perusahaan (Akhmad dkk., 2022). Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perbandingan antara kadar bijih nikel laterit sampel *test pit* dan sampel *re-check* sehingga dapat mengetahui faktor penyebab terjadinya perbedaan kadar.

1.2 Rumusan Masalah

Perubahan kadar bijih nikel laterit pada sampel *test pit* dan sampel *re-check* menjadi sebuah masalah bagi perusahaan, sebab apabila hal tersebut terjadi sehingga kadar bijih nikel yang diproduksi tidak sesuai dengan spesifikasi umpan pabrik pengolahan maka akan terjadi kerugian bagi perusahaan. Oleh karena itu, perubahan kadar bijih nikel laterit perlu dianalisis dengan menggunakan metode statistik. Metode statistik yang digunakan yaitu analisis korelasi dan analisis regresi. Analisis korelasi digunakan untuk menganalisis kuat atau lemahnya

hubungan antara unsur/senyawa yang ada pada sampel *test pit* dengan sampel *re-check*. Kuat atau lemahnya hubungan tersebut menunjukkan signifikan atau tidaknya perubahan kadar yang terjadi. Sedangkan analisis regresi digunakan untuk menganalisis pengaruh yang datang dari suatu unsur/senyawa terhadap variansi (naik turunnya) unsur/senyawa lainnya.

Permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah:

1. Perbandingan kadar rata-rata bijih nikel laterit pada sampel *test pit* dan sampel *re-check*.
2. Hubungan unsur/senyawa pada bijih nikel laterit sampel *test pit* dengan sampel *re-check* menggunakan analisis korelasi Pearson.
3. Pengaruh kadar unsur Ni terhadap unsur lainnya pada bijih nikel laterit hasil penambangan yang berperan terhadap kinerja pengolahan.
4. Faktor yang menyebabkan terjadinya perbedaan kadar bijih nikel laterit pada sampel *test pit* dan sampel *re-check*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui perbandingan kadar rata-rata bijih nikel laterit pada sampel *test pit* dan sampel *re-check*.
2. Untuk menganalisis hubungan unsur/senyawa pada bijih nikel laterit sampel *test pit* dengan sampel *re-check* menggunakan analisis korelasi Pearson.
3. Untuk menganalisis pengaruh kadar unsur Ni terhadap unsur lainnya pada bijih nikel laterit hasil penambangan yang berperan terhadap kinerja pengolahan.
4. Untuk menganalisis faktor yang menyebabkan terjadinya perbedaan kadar bijih nikel laterit pada sampel *test pit* dan sampel *re-check*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Bagi perusahaan
Hasil dari penelitian yang dilakukan dapat dijadikan referensi dan masukan positif bagi PT Antam Tbk UBPN Kolaka dalam melakukan pengendalian

terhadap kualitas bijih nikel laterit sehingga kadar bijih nikel laterit tidak mengalami perubahan kadar saat masih berada di *front* penambangan dan saat dipindahkan ke *stockyard*.

2. Bagi akademi

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi bahan bacaan, khususnya mahasiswa Teknik Pertambangan dalam mengangkat judul penelitian.

3. Bagi penulis

Penulis dapat menganalisis perbandingan kadar bijih nikel laterit pada sampel *test pit* dan sampel *re-check*, mengetahui hubungan unsur/senyawa bijih nikel laterit, mengetahui pengaruh kadar unsur Ni terhadap unsur lainnya pada bijih nikel laterit hasil penambangan yang berperan terhadap kinerja pengolahan, menganalisis faktor penyebab terjadinya perubahan kadar, serta menjadi nilai tambah pada saat memasuki dunia kerja.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka penelitian ini dibatasi pada penyelesaian masalah agar penelitian lebih terarah dan terfokus yaitu rata-rata kadar sampel *test pit*, rata-rata kadar sampel *re-check*, beda kadar, dilusi kadar, analisis hubungan unsur/senyawa pada bijih nikel laterit menggunakan korelasi Pearson dan pengaruh kadar unsur Ni terhadap unsur lainnya pada bijih nikel laterit hasil penambangan yang berperan terhadap kinerja pengolahan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nikel

Nikel merupakan salah satu logam yang memiliki nilai ekonomis di bumi yang perlu ditemukan keberadaannya untuk memenuhi kebutuhan sektor industri. Dalam keadaan murni, nikel bersifat lunak tetapi akan menjadi baja keras yang tahan karat jika dipadukan dengan besi, krom, dan logam lainnya. Gabungan (paduan) antara nikel, krom, besi dan logam lainnya dapat membentuk baja tahan karat (*stainless steel*) yang banyak diimplementasikan pada peralatan dapur seperti sendok dan peralatan masak, ornamen-ornamen rumah dan gedung, serta komponen industri (Arifin dkk., 2015).

Nikel adalah logam yang memiliki nomor atom 28 dan berat atom 58,6934 Da. Nikel adalah logam fase padat dengan densitas (massa jenis) sekitar 8,902 g/cm³ pada suhu 19,85°C dan konduktivitas elektrik sebesar 22%. Titik leleh nikel berada pada suhu 1.453°C dan setelah meleleh akan berubah menjadi fase cair dengan titik didih sebesar 2.732°C. Struktur kristal dari mineral nikel berbentuk kubus berpusat muka dengan kekerasan 3,8 dalam skala Mohs (McRae, 2018).

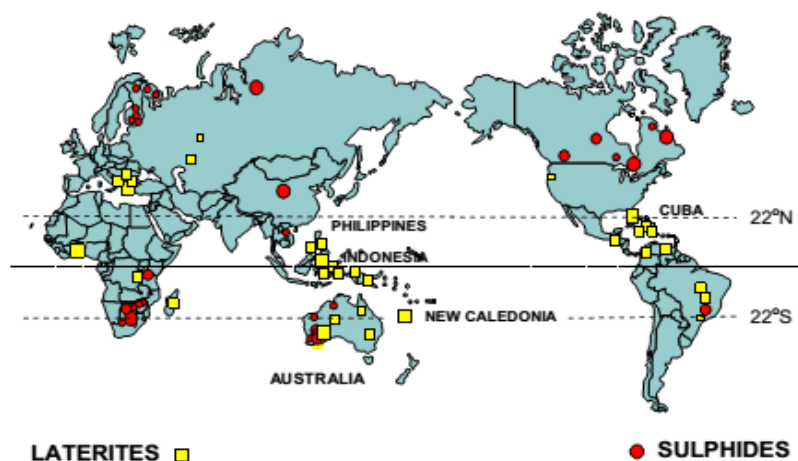
Nikel merupakan salah satu unsur kimia yang termasuk dalam logam transisi, memiliki warna putih keperakan dengan sedikit keemasan, memiliki sifat kuat dan mudah dibentuk. Dalam keadaan murni, nikel bersifat lunak, tetapi akan menjadi baja keras yang tahan karat jika dipadukan dengan besi, krom, dan logam lainnya. Dalam dunia industri, nikel merupakan logam yang sangat penting dengan kegunaan yang sangat luas, dimana 62% dari logam nikel digunakan untuk membuat baja tahan karat, 13% logam nikel digunakan sebagai paduan superalloy dan paduan *non-ferrous* karena sifatnya yang tahan korosi dan suhu tinggi (Astuti dkk., 2015).

Umumnya nikel digunakan dalam berbagai produk untuk konsumen, industri, militer, kedirgantaraan, kelautan dan konstruksi. Karena sifat fisik dan kimianya, nikel sangat penting dalam banyak produk akhir. Sifat fisik dan kimia ini memiliki titik leleh yang tinggi, tahan korosi dan tahan oksidasi, sifat dalam mineral (*tenacity*) sangat elastis, bersifat magnetis di suhu ruangan, dapat disimpan dengan

electroplating, dapat bertindak sebagai katalis dalam reaksi kimia, dan dapat didaur ulang (Nickel Institute, 2016).

Diperkirakan bahwa sekitar 70% dari sumber daya nikel dunia terkandung dalam bijih laterit, tetapi laterit hanya menyumbang sekitar 50% dari produksi nikel tahunan dunia pada tahun 2009. Nikel umumnya akan dianggap sebagai sumber daya alam yang terbatas sehingga diperkirakan sumber daya ini akan habis karena kegiatan penambangan. Dengan menggunakan teknologi, kebijakan dan program pengelolaan sumber daya yang tepat, nikel dapat dengan mudah didaur ulang sehingga sumber daya dapat digunakan secara efisien. Isu-isu utama dalam proses daur ulang adalah kebutuhan energi, dampak lingkungan dan biaya keuangan (Mudd, 2010).

Bijih nikel dibagi menjadi dua kategori, yaitu nikel sulfida berada di belahan bumi subtropis seperti di Rusia dan Kanada, dan nikel oksida yang umumnya sebagai laterit berada di belahan bumi khatulistiwa seperti Indonesia, Filipina, Kaledonia Baru, dan Cuba. Sumber daya ekonomi nikel ada dalam bijih sulfida maupun laterit. Sebagian besar produksi nikel berasal bijih sulfida, dan sebagian besar sumber daya nikel diketahui terkandung dalam bijih laterit (Mudd, 2010). Nikel sulfida dan nikel laterit telah banyak digunakan sebagai bahan baku pembuatan logam nikel. Namun seiring berjalannya waktu, cadangan bijih nikel sulfida mulai berkurang sehingga industri yang memproduksi nikel mengalihkan perhatiannya untuk mengolah bijih nikel laterit sebagai bahan baku nikel (Subagja dkk., 2016). Peta persebaran bijih nikel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Persebaran endapan nikel di dunia (Elias, 2002)

Endapan nikel sulfida masuk ke dalam kelas endapan magma mafik dengan 4 sub tipe endapan yaitu *sudbury*, *flood basalt association*, *ultramafic volcanic association*, dan *other mafic and ultramafic intrusive associations*. Endapan nikel laterit masuk ke dalam kelas bijih terkait pelapukan dengan tipe laterit serta sub tipe nikel (kobalt) laterit (Darling, 2011). Persebaran endapan nikel dunia di dominasi oleh negara-negara di sekitar equator. Persebaran endapan nikel di benua eropa didominasi oleh endapan nikel sulfida. Persebaran endapan nikel di benua Afrika didominasi oleh endapan nikel sulfida. Persebaran endapan nikel di benua Asia didominasi oleh endapan nikel laterit tepatnya di negara Indonesia dan Filipina. Persebaran endapan nikel di benua Amerika didominasi oleh endapan nikel laterit. Persebaran endapan nikel di benua Australia dan Oceania didominasi oleh endapan nikel laterit (Elias, 2002).

2.2 Nikel Laterit

Laterit adalah produk sisa pelapukan kimia batuan di permukaan bumi yang didalamnya berbagai mineral asli atau primer tidak stabil dengan adanya air, sehingga memungkinkan mineral tersebut larut atau hancur dan membentuk mineral baru yang lebih stabil di lingkungan (Evans, 1993). Nikel laterit adalah produk laterisasi batuan yang kaya Mg atau ultramafik yang memiliki kandungan Ni primer 0,2–0,4% (Golightly, 1981). Batuan seperti ini umumnya dunit, harzburgit dan peridotit yang berada di kompleks ofiolit, dan lapisan batuan intrusi mafik-ultramafik dalam pengaturan platform kratonik (Brand *et al.*, 1998). Proses lateritisasi menghasilkan konsentrasi 3-30 kali kandungan nikel dan kobalt dari batuan induk. Proses dan karakter laterit yang dihasilkan dikendalikan pada skala regional dan lokal oleh faktor-faktor dinamis seperti iklim, topografi, tektonik, tipe dan struktur batuan primer (Elias, 2002).

Bijih nikel laterit banyak ditemukan di belahan bumi dengan iklim tropis atau subtropis, terdiri dari batuan ultramafik yang mengalami pelapukan kimiawi yang kemudian membentuk lapisan-lapisan seperti limonit, saprolit, dan batuan dasar (*bedrock*). Dari ketiga lapisan tersebut, lapisan limonit hanya dianggap sebagai *waste* atau lebih dikenal dengan lapisan tanah penutup (*overburden*) sedangkan saprolit merupakan lapisan yang paling banyak ditambang untuk diolah

menjadi bijih nikel ekonomis (Solar dan Mostaghel, 2015). Nikel laterit merupakan hasil laterisasi batuan ultramafik dengan kandungan besi dan magnesium yang tinggi, yang ditemukan pada permukaan tanah yang relatif dangkal, pada kedalaman sekitar 6-15 m, namun dapat mencapai 60 m di bawah permukaan tanah. Pembentukan bijih nikel laterit dapat berlangsung lebih dari satu juta tahun (Kose, 2010).

2.2.1 Pembentukan Endapan Nikel Laterit

Proses laterisasi berawal dari infiltrasi air hujan yang bersifat asam masuk ke zona retakan, kemudian melarutkan mineral yang mudah larut pada batuan dasar. Mineral dengan densitas tinggi akan tetap berada di permukaan membentuk pengkayaan residual, sedangkan mineral yang mudah larut akan turun ke bawah membentuk zona akumulasi dengan pengayaan supergen (Asy'ari dkk., 2013).

Menurut Prijono (1977), endapan nikel laterit terbentuk dari batuan peridotit yang mengalami pelapukan kemudian tersingkap ke permukaan, pada iklim tropis dengan musim panas dan hujan silih berganti kemudian mengalami pelapukan secara terus menerus yang mengakibatkan batuan menjadi rentan terhadap proses leaching. Sirkulasi air permukaan yang mengabsorpsi CO₂ dari atmosfer mempercepat proses pelapukan dan pencucian yang lebih intensif. Alkali tanah, Mg dan Ca berubah menjadi bikarbonat oleh air permukaan yang asam, sedangkan silika (SiO₂) akan larut dan diangkut dalam larutan koloid karena perpindahan logam alkali tanah dan silika, logam-logam primer seperti Fe, Al, Cr, Ni, dan Co larut dalam batuan peridotit dan mengalami pengayaan *in situ*, zona ini disebut zona limonit. Proses pelapukan lebih lanjut Ni akan larut dan terangkut air tanah kemudian mengalami proses presipitasi (pertukaran unsur Mg dengan unsur Ni diantara air tanah dan mineral serpentin). Kemudian membentuk mineral Ni-magnesium hidrosilikat yang disebut garnierit dan mengisi kekar atau retakan pada batuan dasar peridotit oleh pengayaan sekunder atau supergen, pengayaan zona bijih silikat (bijih saprolit) akan terbentuk diantara zona saprolit dan batuan peridotit segar.

Terbentuknya bijih nikel laterit diawali dengan proses pelapukan batuan peridotit (batuan induk) yang intensif. Batuan induk ini berubah menjadi serpentin

akibat pengaruh larutan hidrotermal atau larutan residual pada waktu proses pembekuan magma (proses serpentinisasi) dan batuan peridotit menjadi batuan serpentin. Pelapukan (fisika dan kimia) kemudian terjadi lagi, menyebabkan disintegrasi dan dekomposisi pada batuan induk. Menurut Golightly (1981), beberapa unsur Ca, Mg, dan Si akan mengalami dekomposisi, dan beberapa terkayakan secara supergen seperti unsur Ni, Mn, Co, Zn, atau terkayakan secara relatif seperti unsur Fe, Cr, Al, Ti, S, dan Cu.

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi pembentukan nikel laterit adalah sebagai berikut (Kusuma, 2012):

1. Batuan asal

Syarat utama terbentuknya endapan nikel laterit adalah keberadaan batuan asal, jenis batuan asal adalah batuan ultrabasa. Dalam hal ini pada batuan ultrabasa mengandung unsur Ni yang paling banyak diantara batuan lainnya, memiliki mineral yang paling mudah lapuk atau tidak stabil seperti olivin dan piroksen, mempunyai komponen yang mudah larut dan memberikan lingkungan pengendapan yang baik untuk nikel.

2. Iklim

Adanya pergantian musim kemarau dan hujan, ketika permukaan air tanah naik dan turun juga dapat menyebabkan terjadinya proses pemisahan dan akumulasi unsur. Perbedaan suhu yang cukup besar akan mendorong terjadinya pelapukan mekanis, menyebabkan retakan pada batuan yang mempermudah proses proses atau reaksi kimia pada batuan.

3. Reagen kimia dan vegetasi

Reagen kimia yang dimaksud adalah unsur dan senyawa yang membantu mempercepat proses pelapukan. Air tanah yang mengandung CO₂ berperan dalam proses pelapukan kimia. Asam humus menyebabkan batuan terurai (dekomposisi) dan dapat mengubah pH larutan. Asam humus ini erat hubungannya dengan vegetasi daerah.

4. Struktur

Batuan beku memiliki porositas dan permeabilitas yang sangat rendah sehingga sulit ditembus oleh air, sehingga dengan adanya rekahan ini memudahkan masuknya air dan berarti proses pelapukan semakin intensif.

5. Topografi

Bentuk topografi daerah sangat mempengaruhi sirkulasi air dan reagen lainnya. Untuk daerah yang landai, air bergerak perlahan sehingga dapat menembus lebih dalam melalui retakan atau pori-pori pada batuan. Akumulasi endapan biasanya terdapat pada daerah yang landai sampai kemiringan sedang, hal ini karena ketebalan pelapukan mengikuti bentuk topografi. Secara teori, daerah curam memiliki lebih banyak air untuk meluncur (*run off*) daripada air yang meresap yang dapat menyebabkan pelapukan kurang intensif.

6. Waktu

Waktu juga mempengaruhi pembentukan nikel laterit. Waktu yang lama akan mengakibatkan pelapukan yang cukup intensif karena akumulasi unsur nikel cukup tinggi.

2.2.2 Klasifikasi Endapan Nikel Laterit

Secara umum endapan nikel laterit dibedakan menjadi beberapa zona yaitu:

1. Zona tanah penutup (*top soil*)

Zona tanah penutup merupakan bagian atas dari bagian laterit. Zona ini memiliki kadar nikel yang sangat rendah sehingga tidak digunakan untuk penambangan. Ketebalan zona tanah penutup rata-rata 0,3–6 m. Zona ini terdiri dari akar tumbuhan, humus, oksida besi dan residu organik lainnya. Warna khasnya adalah coklat tua kehitaman dan bersifat gembur (Elias, 2002). Lapisan ini memiliki kandungan besi yang cukup tinggi sekitar >50% dan kandungan nikel yang rendah <0,6% atau merupakan nikel residu yang dapat terbentuk di bagian atas dari profil dan melindungi lapisan nikel laterit di bawahnya. Pada lapisan ini terkandung hematit dan kromiferus (Kadariusman dkk., 2004).

2. Zona limonit

Zona Limonit berada di bagian bawah dari zona tanah penutup. Limonit adalah hasil pelapukan lanjut dari batuan beku ultrabasa. Komposisinya mengandung oksida besi yang dominan, goetit, dan magnetit. Akar tumbuhan banyak terdapat pada limonit, meskipun dalam persentase yang

sangat kecil. Ketebalan rata-rata zona ini adalah 8-15 m. Keberadaan fragmen batuan beku ultrabasa tidak dominan atau hampir tidak ada pada zona tersebut, umumnya mineral-mineral batuan beku basa sampai ultrabasa telah berubah menjadi serpentin akibat hasil dari pelapukan yang belum sempurna (Elias, 2002). Zona limonit merupakan lapisan kaya besi sekitar 40-50% Fe, berukuran halus dan berwarna coklat kemerahan atau kekuningan. Dalam limonit, sebagian besar nikel berada dalam gutit sebagai larutan padat, sebagian lagi berada dalam oksida mangan dan litioforit, kadang-kadang ditemukan talk, tremolit, kromiferus, kuarsa, gipsit dan maghemit (Kadariusman dkk., 2004).

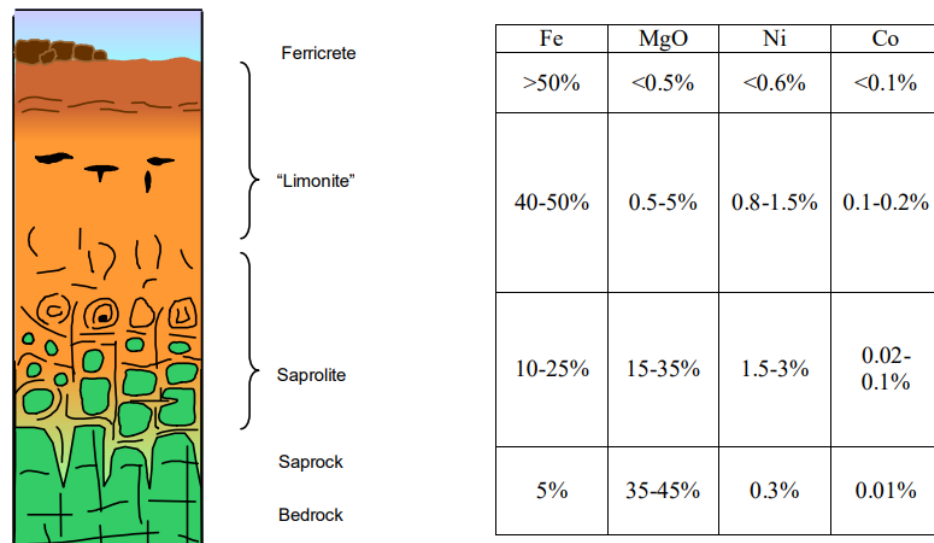
3. Zona saprolit

Zona saprolit berada di bagian bawah zona limonit. Zona saprolit merupakan zona pengayaan unsur nikel (Ni), ketebalan zona ini sekitar 5-18 m. Komposisinya berupa oksida besi, serpentin, magnetit dan tekstur batuan asal yang masih terlihat. Kemunculan bongkah-bongkah sangat sering dan pada rekahan-rekahan batuan asal dijumpai magnesit, serpentin, krisopras dan garnierit. Bongkah batuan asal yang muncul pada umumnya memiliki kadar SiO_2 dan MgO yang tinggi serta Ni dan Fe yang rendah (Elias, 2002). Mineral utama pada zona ini adalah serpentin ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) nikel mensubstitusi Mg. Kandungan nikel pada saprolit lebih tinggi dibandingkan dengan limonit, yaitu sekitar 1,5-3% Ni. Kandungan magnesia dan silikanya juga lebih tinggi, namun kadar besinya rendah (Kadariusman dkk., 2004).

4. Zona batuan dasar (*bedrock*)

Zona batuan dasar atau *bedrock* berada di bagian paling bawah dari profil laterit. Batuan dasar dari nikel laterit adalah batuan beku ultrabasa yaitu peridotit yang pada rekahannya telah terisi oleh oksida besi 5-10%, garnierit minor dan silika >35%. Permeabilitas batuan dasar meningkat sebanding dengan intensitas serpentinisasi (Elias, 2002). Bagian ini berbentuk bongkah berukuran >75 cm. Secara umum kadar nikelnya rendah yaitu sekitar 0,2-0,4%. Zona ini mengalami rekahan yang kuat dan terbuka dan terisi oleh garnierit dan silika. Rekahan ini diperkirakan menjadi *root zone* yaitu zona

dengan kandungan nikel tinggi berupa urat dalam batuan dasar (Kadarusman dkk., 2004). Profil endapan nikel laterit secara detail diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Profil endapan nikel laterit (Elias, 2002)

Kenampakan setiap zona dapat dilihat dari kenampakan fisiknya yaitu dari lapisan bawah ke atas yaitu batuan dasar diikuti lapisan tengah saprolit dan lapisan atas yaitu lapisan limonit. Kenampakan dari setiap lapisan terlihat jelas namun dengan batas yang tidak beraturan. Adapun lapisan batuan dasar dapat dicirikan dengan tekstur halus-sedang, warna abu-abu terang-gelap atau hijau kekuningan, tergantung derajat serpentinisasi dan tipe mineral serpentin. Lapisan saprolit tampak menutupi lapisan batuan dasar dengan tekstur halus, warna coklat kekuningan-kehijauan, berongga dan lunak, sangat sedikit mengandung bongkahan dan massanya yang relatif homogen. Pelapukan kimia menyebabkan saprolit berubah menjadi materi yang berwarna coklat kekuningan membentuk zona limonit di bagian atas lapisan ini. Ketebalan lapisan limonit umumnya bervariasi namun cenderung lebih tipis dibandingkan dengan zona saprolit. Zona limonit pada bagian atas berwarna coklat sedang hingga gelap, material lunak namun terdapat material yang keras (Sufriadin, 2013).

2.3 Analisis X-Ray Fluorescence

X-Ray Fluorescence (XRF) adalah teknik analisis non-destruktif yang digunakan untuk mendeteksi dan menentukan konsentrasi unsur sampel padat, bubuk atau

sampel cair. Unsur yang dapat dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) seperti berilium hingga uranium pada *level trace element*, bahkan di bawah tingkat ppm. Secara umum, *X-Ray Fluorescence* (XRF) spektrometer mengukur panjang gelombang masing-masing komponen dari emisi fluoresensi yang dihasilkan oleh sampel ketika disinari dengan sinar-X (Panalytical, 2009).

Metode analisis menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan berdasarkan pengidentifikasian dan pencacahan karakteristik sinar-X dari peristiwa efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi ketika elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar energi tinggi (sinar gamma, sinar-X). Jika energi sinar tersebut lebih besar daripada energi ikat elektron dalam orbit K, L, atau M atom target, maka elektron atom target akan terpelempar (tereksitasi) keluar dari orbitnya. Dengan demikian akan terjadi kekosongan elektron pada atom target. Kekosongan elektron pada orbit tersebut kemudian akan diisi dengan elektron terluar yang diikuti dengan pelepasan energi yang berupa sinar-X.

Hasil radiasi sinar-X merupakan gabungan dari spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu (*discreet*) yang berasal dari bahan target yang tertumbuk elektron. Hasil dari jenis spektrum *discreet* bergantung pada perpindahan elektron yang ada pada atom bahan. Spektrum ini dikenal sebagai spektrum sinar-X karakteristik. Penggunaan sinar-X yang dipancarkan oleh bahan dan ditangkap oleh detektor untuk menganalisis kandungan unsur pada bahan tersebut. Bahan yang akan dianalisis dapat berupa padat masif, pelet, ataupun serbuk. Analisis unsur dapat dilakukan secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif menganalisis jenis unsur yang ada dalam suatu bahan dan analisis kuantitatif menentukan konsentrasi unsur dalam bahan tersebut. Hasil dari sinar-X terhadap peristiwa di atas ditangkap oleh detektor semikonduktor Silikon Litium (SiLi) (Munasir dkk., 2012).

Spektrometer XRF adalah instrumen pengujian yang digunakan untuk analisis kualitatif maupun kuantitatif unsur-unsur dalam suatu bahan. Analisis kualitatif memberikan informasi tentang jenis unsur yang terkandung dalam bahan yang dianalisis, yang ditunjukkan dengan adanya spektrum unsur pada energi sinar-X karakteristiknya. Sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi tentang

jumlah unsur yang terkandung dalam bahan pada puncak-puncak spektrum (Jamaluddin & Adiantoro, 2012).

Metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) adalah suatu metode untuk menganalisis kandungan unsur pada permukaan bahan, dimana sinar-X yang dipancarkan ke dalam bahan yang dianalisis menyebabkan atom-atom pada permukaan tersebut berinteraksi dengan ketebalan maksimum bidang cahaya. Sinar-X yang digunakan untuk transmisi berasal dari bahan radioaktif atau tabung sinar-X. Sinar-X dari tabung sinar-X menghasilkan pola spektrum kontinu sesuai dengan tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan sinar-X, semakin tinggi tegangan listrik yang diberikan akan menyebabkan peningkatan intensitas spektrum kontinu tersebut dan terjadinya pergeseran intensitas sinar-X maksimum ke energi yang lebih tinggi dan sedangkan kuat arus listrik yang kuat akan meningkatkan pola spektrum tersebut. Ketika bahan tersebut disinari, atom atom dalam berinteraksi di daerah jangkauan sinar/radiasi sampel. Interaksi sinar dengan atom ini diantaranya dapat menghasilkan efekfotolistrik, diikuti dengan transisi elektron ini dapat berlangsung dari kulit L ke kulit K, dari kulit M ke kulit L dan seterusnya. Transisi elektron ini diikuti dengan pelepasan sejumlah energi yang tergantung pada jenis atom yang terlibat. Pelepasan energi ini terbentuk sebagai bentuk sinar-X karakteristik (Nampira, 2006).

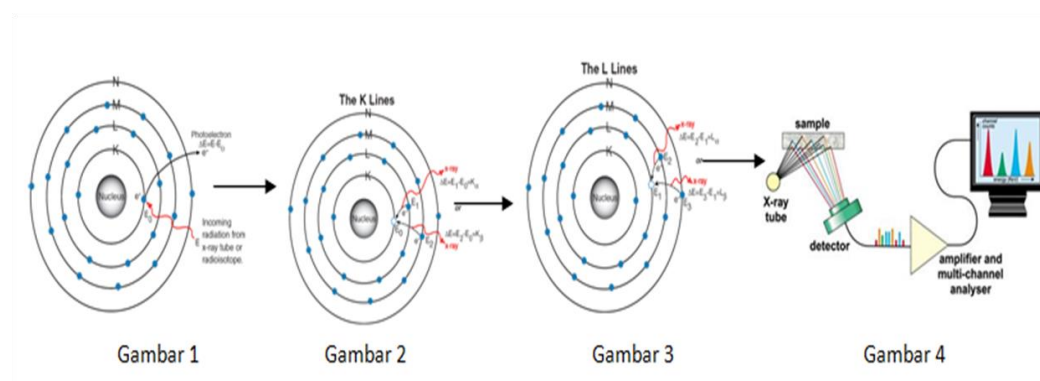
Metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) tergantung pada prinsip-prinsip dasar yang umum untuk beberapa metode instrumen lain yang melibatkan interaksi antara berkas elektron dan sinar-X dengan sampel, termasuk *X-Ray Fluorescence* (XRF) misalnya, SEM-EDS, difraksi sinar-X (XRD), dan panjang gelombang dispersif spektroskopi mikropobe WDS. Analisis unsur-unsur utama dan jejak dalam bahan geologi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dimungkinkan karena perilaku atom ketika berinteraksi dengan radiasi. Ketika bahan dieksitasi oleh radiasi gelombang pendek energi tinggi (misalnya sinar-X), bahan tersebut dapat terionisasi. Ketika cukup energi radiasi dihasilkan untuk menggantikan elektron dalam kerapatan, atom menjadi tidak stabil dan elektron terluar menggantikan elektron dalam yang hilang. Ketika ini terjadi, energi dilepaskan karena energi ikat orbital elektron dalam berkurang dibandingkan dengan elektron terluar. Radiasi yang dipancarkan memiliki energi yang lebih rendah dari insiden

utama sinar-X yang masuk dan disebut radiasi neon. Karena energi dari foton yang dipancarkan adalah karakteristik transisi antara orbital elektron yang spesifik dalam elemen tertentu, neon dihasilkan sinar-X dapat digunakan untuk mendeteksi kelimpahan unsur-unsur dalam suatu sampel (Fitton, 1997).

2.3.1 Prinsip Kerja *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Analisis XRF merupakan contoh analisis berdasarkan perilaku atom yang terkena radiasi. Ketika suatu bahan berinteraksi dengan cahaya berenergi tinggi, maka dapat menyebabkan elektron yang berada pada tingkat energi paling rendah terpental ke tingkat lebih rendah. Akibatnya atom berada dalam kondisi tidak stabil sehingga elektron pada tingkat orbital lebih tinggi akan mengisi kekosongan yang ditinggalkan oleh elektron yang terpental. Proses pengisian posisi elektron pada tingkat yang lebih rendah dinamakan deeksitasi. Proses deeksitasi ini akan disertai dengan pemancaran cahaya dengan energi yang lebih rendah yang menyebabkan elektron menjadi tereksitasi. Energi yang dilepaskan ini dinamakan radiasi flouresensi. Radiasi flouresensi ini memiliki energi yang khas bergantung pada elektron atom yang tereksitasi dan terdeeksitasi yang membentuk sebuah material. Kekhasan karakteristik dari radiasi flouresensi setiap unsur ini memungkinkan untuk dilakukan analisis kualitatif untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang berbeda. Sementara itu, analisis kuantitatif dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur yang dianalisis berdasarkan intensitas dari radiasi flouresensi yang dipancarkan (Setiabudi dkk., 2012).

Berikut merupakan penjelasan prinsip kerja *X-Ray Fluorescence* (XRF) berdasarkan efek fotolistrik yang dapat dilihat pada Gambar 3 (Viklund, 2008):



Gambar 3 (1) Elektron tereksitasi keluar, (2) Pengisian kekosongan elektron, (3) Pelepasan energi, (4) Proses analisis data (Viklund, 2008)

1. Sinar-X ditembakkan pada sampel, jika selama proses penembakan sinar-X memiliki energi yang cukup maka elektron akan terpelantik (tereksitasi) dari kulitnya yang lebih dalam ke kulit yang luar yaitu kulit K dan menciptakan kekosongan pada kulitnya, ditunjukkan pada Gambar 3 (1).
2. Kekosongan tersebut mengakibatkan kondisi atom tidak stabil. Untuk menstabilkan kondisi tersebut, maka elektron berpindah dari tingkat energi yang lebih tinggi seperti kulit L dan M untuk mengisi kekosongan tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (2). Dalam proses perpindahan tersebut, energi dilepaskan karena adanya perpindahan dari kulit berenergi lebih tinggi (L/M) ke kulit berenergi lebih rendah (K). Emisi yang dikeluarkan oleh setiap bahan memiliki karakteristik khusus.
3. Proses tersebut memberikan karakteristik dari sinar-X, yang energinya berasal dari perbedaan energi ikatan antar kulit yang saling berhubungan. Sinar-X yang dihasilkan oleh proses ini disebut *X-Ray Fluorescence* atau XRF (Gambar 3 (3)).
4. Proses pendeteksian dan menganalisis sinar-X yang dihasilkan disebut analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF).

2.3.2 Jenis-jenis *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Umumnya XRF digunakan untuk menganalisis unsur dalam mineral atau batuan. Analisis unsur dilakukan baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif digunakan untuk menganalisis jenis unsur yang terkandung dalam bahan dan analisis kuantitatif digunakan untuk mengetahui konsentrasi unsur dalam bahan. Jenis spektrometri XRF ada 2 yang dapat dilihat pada Gambar 4 yaitu WDXRF (*Wavelength Dispersive XRF*) dan EDXRF (*Energy Dispersive XRF*) (Gosseau, 2009).



Gambar 4 Piranti spektrometri XRF (Gosseau, 2009)

1. WDXRF (*Wavelength Dispersive XRF*) dispersi sinar-X diperoleh dengan cara difraksi menggunakan *analyzer* yang berupa kristal yang berfungsi sebagai *grid*. XRF jenis ini sampel yang terpapar radiasi sinar-X akan mengemisikan radiasi ke segala arah. Radiasi dengan arah spesifik yang dapat mencapai kolimator, sehingga refleksi sinar radiasi dari kristal ke detektor akan menghasilkan sudut θ . Sudut ini terjadi ketika panjang gelombang yang diradiasikan sesuai dengan sudut θ dan sudut 2θ dari kisi kristal. Dalam hal ini detektor hanya mengukur panjang gelombang yang sesuai karena sudut refleksi spesifik bergantung pada panjang gelombang, maka untuk pengukuran elemen yang berbeda perlu dilakukan pengaturan posisi kolimator, kristal serta detektor. Kisi kristal yang spesifik memilih panjang gelombang yang sesuai dengan hukum Bragg.
2. EDXRF (*Energy Dispersive XRF*) bekerja tanpa kristal, tetapi menggunakan perangkat lunak untuk mengontrol semua radiasi dari sampel ke detektor. Detektor langsung menangkap radiasi dari sampel yang terkena radiasi sinar-X. Detektor menangkap foton-foton tersebut dan mengubahnya menjadi impuls elektrik. Amplitudo dari impuls elektrik tersebut bersesuaian dengan energi dari foton-foton yang diterima detektor. Impuls kemudian menuju sebuah perangkat yang disebut MCA (*Multi Channel Analyzer*) yang memproses impuls tersebut. Sehingga akan terbaca dalam memori komputer sebagai *channel*. *Channel* tersebut yang akan memberikan nilai spesifik terhadap sampel yang dianalisis. XRF jenis ini membutuhkan biaya yang relatif rendah, tetapi akurasinya berkurang.

2.4 Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Pengolahan bijih nikel laterit untuk mendapatkan logam nikel dapat dilakukan dengan dua proses ekstraksi yaitu proses hidrometalurgi dan pirometalurgi. Proses hidrometalurgi cocok untuk pengolahan bijih limonit sedangkan proses pirometalurgi cocok untuk pengolahan bijih saprolit karena komposisi mineral dan kimia zona saprolit lebih heterogen dibandingkan dengan zona limonit sehingga memerlukan pengolahan yang fleksibel. Selain itu, pada zona saprolit kandungan

Mg tinggi mengakibatkan tingginya konsumsi asam jika menggunakan proses hidrometalurgi (Pournaderi, 2014).

Pengolahan komersial nikel laterit didasarkan pada kandungan magnesium (Mg) dan rasio nikel terhadap besi (Ni/Fe). Saat ini metode pengolahan bijih nikel yang ekonomis untuk digunakan yaitu metode pirometalurgi dan metode hidrometalurgi. Metode pirometalurgi digunakan untuk mengolah nikel dari endapan nikel laterit zona saprolit dengan kadar Ni dan MgO yang tinggi. Metode hidrometalurgi digunakan untuk mengolah nikel dari endapan nikel 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 & Nasoetion, 2011).

Perlakuan awal yang dilakukan dalam pengolahan bijih nikel laterit yaitu pemisahan bijih dengan tujuan untuk memisahkan mineral dari pengotor untuk mendapatkan bijih yang berkualitas tinggi. Pemisahan dapat dilakukan dengan dua metode pemisahan, yaitu pemisahan fisik dan pemisahan kimia. Pemisahan fisik meliputi pemisahan pengapungan (*flotation separation*), pemisahan gaya berat (*gravity separation*), pemisahan magnetik (*magnetic separation*), pemisahan pencairan (*liquidation separation*), dan pemisahan amalgam (*amalgams separation*) sedangkan pemisahan kimia terdiri dari proses pelindian (*leaching*) dan proses pemanggangan (*roasting*) (Brand *et al.*, 1998).

Pemisahan bijih dari pengotor dilakukan dengan beberapa perlakuan awal untuk mengoptimalkan proses pemisahan selanjutnya dikarenakan terdapat kandungan air maupun pengotor lain yang ada dalam endapan. Perlakuan awal yang akan dilakukan yaitu (Wills, 2006):

1. Kominusi

Kata kominusi berasal dari Bahasa Latin yaitu *comminuere* yang berarti mereduksi. Kominusi merupakan proses memperkecil (mereduksi) ukuran partikel suatu bahan galian sehingga memenuhi persyaratan penggunaannya ataupun sebagai prasyarat untuk diproses lebih lanjut. Kominusi bertujuan untuk menghasilkan partikel yang memenuhi prasyarat (ukuran dan bentuk), membebaskan mineral berharga dari pengotor, memperbesar luas

permukaan, sehingga kecepatan reaksi pelarutan dapat berlangsung dengan lebih baik. Ada dua jenis kominusi, yaitu:

a. Peremukan (*crushing*)

Peremukan (*crushing*) adalah proses mengecilkan (mereduksi) ukuran bijih yang semula berukuran kasar (sekitar 1 m) menjadi ukuran lebih kecil sampai kira-kira 25 mm. Peralatan *crushing* (*crusher*) yang sering dipakai antara lain: *jaw crusher*, *gyratory crusher*, *cone crusher*, *roll crusher*, *rotary breaker*, *impact crusher*, *hammer mill*.

b. Penggerusan (*grinding*)

Penggerusan (*grinding*) adalah proses mengecilkan (mereduksi) ukuran bijih yang berukuran halus (sekitar 25 mm). Dalam *grinding* juga dikenal tahap-tahap *primary*, *secondary*, dan *tertiary* sama halnya dengan *crushing*. Proses ini sangat berpengaruh pada proses *leaching* karena semakin luas area permukaan maka lebih mudah sampel bercampur dengan reagen atau pelarut yang digunakan.

2. Pengayakan (*screening and sieving*)

Pengayakan adalah proses pemisahan mekanik berdasarkan ukuran partikel. Pada skala laboratorium digunakan istilah *sieving* dan pada skala industri digunakan istilah *screening*. Hasil yang diperoleh dari proses pengayakan ada dua, yaitu material yang berukuran lebih besar dari ukuran lubang pengayak yang disebut material *oversize* dan material yang lebih kecil dari ukuran lubang pengayak yang disebut material *undersize*.

3. Pengeringan (*drying*)

Tujuan dari proses ini adalah untuk menghilangkan uap air yang terdapat pada bijih karena tidak semua unsur yang tersedia di alam berbentuk sebagai senyawa murni, dalam beberapa bentuk dengan air kristal. Selain itu, mineral menjadi lebih reaktif pada keadaan kadar air rendah sehingga dapat mengoptimalkan proses *leaching*.

2.4.1 Pirometalurgi

Metode ekstraksi pirometalurgi melibatkan beberapa proses seperti *roasting*, pengurangan karbotermik, reduksi bijih sulfida, dan reduksi metalotermik.

Pemilihan proses yang akan digunakan bergantung pada komposisi bijih atau konsentrat dan termodinamika, kinetik, dan kendala lingkungan yang terkait dengan setiap proses. Proses pirometalurgi merupakan bagian integral dari proses produksi nikel dengan persentase 90% dari produksi tahunan nikel di dunia dengan produk akhir feronikel atau nikel *matte* (Diaz *et al.*, 1988). Produksi feronikel dari bijih laterit memerlukan energi tinggi, karena bijih laterit atau bijih prereduksi biasanya langsung dilebur untuk menghasilkan produk feronikel dalam jumlah kecil dan terak (*slag*) dalam jumlah besar. Selain itu akses ke area deposit yang sulit terjangkau, sehingga pasokan listrik untuk proses tersebut menjadi tantangan tersendiri. Tidak seperti bijih nikel sulfida, bijih nikel laterit tidak dapat di-*upgrade* dengan penghalusan (*grinding*) dan metode lain yang bersifat fisik benefisiari (Norgate). Oleh karena itu, hampir semua proses pengolahan nikel laterit menggunakan proses pirometalurgi untuk kandungan Ni diatas 1,5%. Meskipun lebih dari 50% cadangan dunia mempunyai kandungan Ni <1,45%. sehingga kurang menguntungkan untuk mengolah dengan proses pirometalurgi yang umum. Proses pirometalurgi untuk bijih nikel laterit saat ini secara komersial terdiri atas (Setiawan, 2016):

1. *Rotary Kiln-Electric Furnace* (RKEF)

Proses *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF) banyak digunakan untuk produksi feronikel dan nikel-*matte*. Proses ini dimulai dengan pengeringan kandungan air hingga 45% melalui proses *pretreatment*. Pada proses ini bijih laterit dikeringkan dalam *rotary dryer* dengan temperatur 250°C hingga kandungan air mencapai 15-20%. Selanjutnya produk dari *rotary dryer* masuk ke tahap kalsinasi (prereduksi) dengan menggunakan *rotary kiln* pada suhu 800-900°C. Reaksi yang terjadi di dalam *rotary kiln* adalah evaporasi dari air, disosiasi mineral menjadi oksida dan uap air pada suhu 700°C, reduksi nikel oksida dan besi oksida sebagai zat pereduksi pada suhu sekitar 800°C. Hasil proses kalsinasi kemudian dilebur di dalam *electric furnace* pada suhu 1500-1600°C untuk mendapatkan feronikel. Pada *electric furnace*, feronikel dipisahkan dari terak silika-magnesia, terjadi reduksi nikel oksida dan besi oksida kalsin menjadi nikel logam, dan pelelehan dan pelarutan nikel dalam feronikel. Proses ini paling sering digunakan dalam

industri pirometalurgi nikel karena tahapan prosesnya dianggap lebih sederhana dan dapat diterapkan pada bijih dari berbagai lokasi. Walaupun pada kenyataannya konsumsi energinya sangat tinggi dan hanya lebih rendah dari proses Caron.

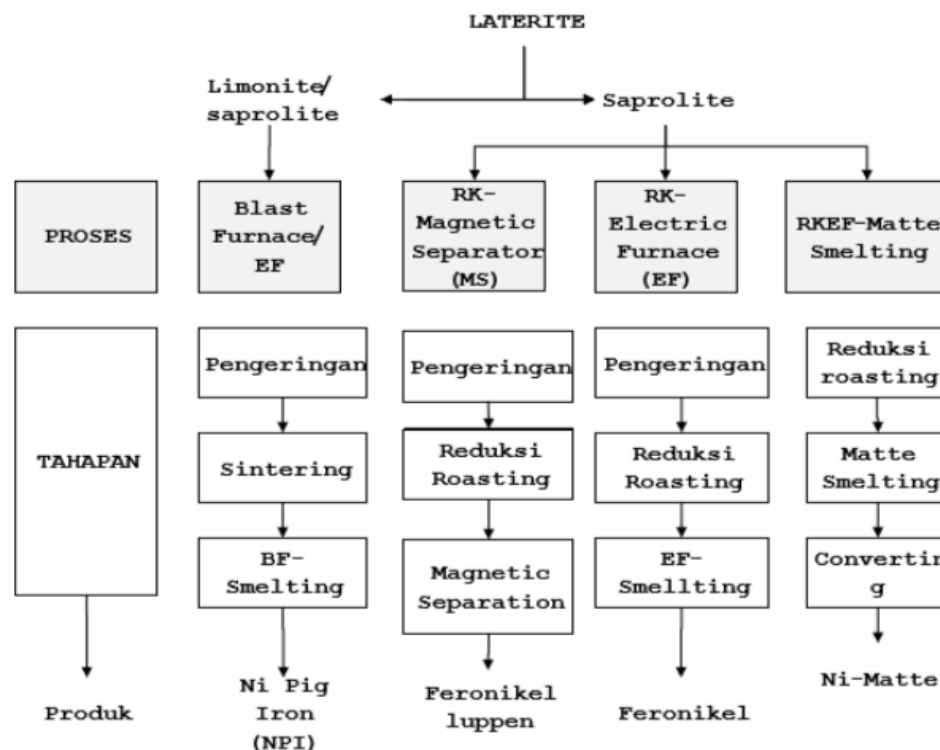
2. *Nippon Yakin Oheyama Process*

Nippon Yakin Oheyama Process adalah proses reduksi langsung untuk garnierit yang menghasilkan feronikel dalam suatu *rotary kiln*. Bijih silikat (2,3-2,6% Ni, 12-15% Fe) bersama antrasit, *coke breeze*, dan batu kapur dicampur dan dibuat menjadi briket. Briket kemudian diumpankan ke dalam *rotary kiln* yang menggunakan pembakaran batubara dengan gradien temperatur 700–1300°C. Dalam *rotary kiln* tersebut, briket akan melalui proses pengeringan, dehidratasi, reduksi, dan peleburan untuk membentuk feronikel yang disebut luppen. Hasil proses tersebut kemudian didinginkan cepat dalam air (*quenching*), dan luppen yang berukuran 2-3 mm yang mengandung 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% karena tingginya kandungan pengotor dalam bijih yang sulit dipisahkan dengan *rotary kiln*. Proses ini relatif rendah energi dibandingkan dengan produksi feronikel menggunakan proses ELKEM karena tidak membutuhkan banyak energi untuk memisahkan feronikel dari pengotornya. Beberapa aspek penting dari proses ini yaitu masalah kontrol *moisture* briket yang sangat ketat karena menentukan reduksibilitas dan penggunaan antrasit yang relatif mahal dan kemungkinan ketersediaannya semakin menurun.

3. *Nickel Pig Iron (NPI)*

Nickel Pig Iron telah diproduksi di China sejak tahun 2006 untuk memenuhi tingginya harga dan permintaan nikel. *Nickel Pig Iron (NPI)* adalah feronikel dengan kandungan nikel rendah (1,5-8%). Pembuatan NPI diproduksi menggunakan *mini blast furnace* dan *electric arc furnace (EF)*. Dalam proses produksi NPI, kokas digunakan sebagai bahan pereduksi dan sumber energi. Karbon mereduksi besi sehingga kandungan FeO dalam terak sangat rendah. Bahan tambahan berupa batu kapur juga ditambahkan

selama proses ini untuk mengatasi titik leleh terak yang tinggi karena kandungan FeO yang rendah dan kandungan silikon dan magnesium oksida yang tinggi dari terak. NPI ini disebut sebagai *dirty nickel* karena menghasilkan banyak *slag*, konsumsi energi yang tinggi, pencemaran lingkungan dan menghasilkan produk dengan kualitas rendah. Namun, produksi NPI akan tetap ekonomis selama harga nikel relatif tinggi. Proses produksi NPI lainnya yaitu menggunakan *electric furnace*. Dengan peningkatan kualitas EF maka proses ini cenderung mempunyai efisiensi energi yang lebih tinggi dari proses *blast furnace*. Sehingga pada praktiknya dalam 10 tahun terakhir pembuatan NPI meningkat signifikan terutama di China dan Indonesia. Kelebihan utama dari proses ini adalah dapat mengolah bijih kadar rendah yang sulit dilakukan dengan proses pirometalurgi lainnya. Tahapan proses utama yang dilakukan untuk ekstraksi nikel secara pirometalurgi dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Diagram alir sederhana ekstraksi nikel laterit dengan metode pirometalurgi (Setiawan, 2016)

Proses di atas dapat diringkas sebagai tahapan proses utama ekstraksi nikel secara pirometalurgi, yaitu (Zhu, *et al.*, 2012):

1. Pengeringan (*drying*) yaitu menghilangkan sebagian besar air bebas yang terkandung dalam bijih.
2. Kalsinasi-reduksi yaitu penghilangan sisa air bebas dan air kristal, pemanasan awal bijih dan reduksi sebagian besar unsur nikel dan pengendalian terhadap reduksi besi.
3. *Electric furnace smelting* yaitu pengurangan residu nikel dan pemisahan feronikel dari produk sampingnya yaitu *slag* besi magnesium silikat.
4. *Refining* yaitu menghilangkan unsur minor yang tidak diinginkan dari produk feronikel untuk memenuhi kebutuhan pasar.

2.4.2 Hidrometalurgi

Hidrometalurgi adalah proses pemurnian logam dengan menggunakan pelarut kimia untuk melarutkan bahan logam tertentu sehingga kemurnian logam yang diinginkan meningkat (*leaching*). Hidrometalurgi merupakan metode yang cukup menjanjikan karena dapat menghasilkan nikel dengan kemurnian yang tinggi. Selain itu, pelarut dapat diregenerasi dan digunakan kembali untuk mengurangi biaya produksi (Kyle, 2010).

Jenis-jenis proses hidrometalurgi antara lain:

1. Proses *caron*

Dalam proses ini, bijih direduksi terlebih dahulu sebelum proses *roasting* dengan menggunakan amonium karbonat pada tekanan atmosfer. Kemudian diperoleh laju pelindian nikel dari larutan *leaching* dengan cara penguapan larutan sehingga terbentuk endapan nikel karbonat. Reaksi *roasting* berlangsung pada suhu 850°C. Bijih tereduksi kemudian didinginkan dengan cara *quenching* dalam larutan amonium karbonat pada suhu 150-200°C. Ni dan Co yang terkandung dalam bijih akan larut dan membentuk amonia kompleks, sedangkan Fe teroksidasi dan mengendap sebagai Fe(OH)₃. Proses ini didapatkan larutan yang tidak mengandung Fe, sehingga didapatkan Ni dan Co yang lebih murni. Proses *caron* bisa digunakan untuk bijih limonit dan beberapa jenis bijih saprolit (Kyle, 2010).

2. *High Pressure Acid Leaching (HPAL)*

Teknologi ini telah menjadi metode utama dalam proses hidrometalurgi. Proses ini cocok untuk bijih limonit. Bijih dilarutkan dalam larutan asam sulfat pada suhu 240-270°C selama 60-90 menit. Pada akhirnya Fe akan mengendap sebagai hematit (Fe_2O_3) dan jarosit $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, sedangkan Al mengendap sebagai alunit $(\text{H}_3\text{O})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$. Hampir semua Fe, Al, Si, dan Cr akan mengendap. Lebih dari 95% Ni dan 90% Mg akan larut dalam larutan (Kyle, 2010).

3. *Atmospheric Leaching*

Atmospheric leaching (AL) adalah proses dimana bahan terlarut diekstraksi dari suatu padatan menggunakan pelarut pada tekanan atmosfer. Diperkirakan dimasa depan, proses kimia dari AL akan dikembangkan dengan pencucian asam pada suhu rendah, biasanya dibawah 100°C dan tekanan rendah. *Atmospheric leaching* pada suhu yang lebih rendah dan kondisinya pada tekanan atmosfer menghindari kebutuhan *autoclave* pada HPAL yang mahal. Namun, ada dua masalah utama dalam penggunaan *atmospheric leaching* yaitu kinetika ekstraksi nikel yang lambat dan kemudahan pemisahan logam dalam proses selanjutnya. Misalnya ekstraksi nikel dengan metode *atmospheric leaching* cenderung mengandung konsentrasi besi terlarut yang signifikan dan aluminium. Perlu dikembangkan suatu metode dimana *atmospheric leaching* agar lebih selektif dan tidak menggunakan logam seperti besi dan aluminium pada proses ekstraksi nikel (McDonald & Whittington, 2008).

4. *Enhanced Pressure Acid Leaching (EPAL)*

Atmospheric leaching (AL) dipasang disisi HPAL untuk menghasilkan *Enhanced pressure acid leaching (EPAL)*. Pada proses *atmospheric leaching*, Ni dan Co diekstraksi. Proses ini menggunakan bijih saprolit untuk menetralkan asam sisa proses HPAL, sehingga meningkatkan kandungan nikel dalam larutan. Dalam larutan asam sulfat, saprolit larut kembali dan peningkatan pH untuk membantu mengendapkan besi (Fe) dari larutan sebagai goetit (Liu & Xuewei 2014).

2.5 Perubahan Kadar Bijih Nikel Laterit

Kadar ialah kandungan atau konsentrasi dan umumnya dinyatakan dalam satuan kuantitas per satuan volume atau bobot. Kadar bijih nikel laterit mengacu pada kandungan nikel yang terkandung dalam bijih nikel laterit. Bijih nikel laterit banyak ditemukan di daerah tropis dan subtropis seperti Indonesia, Filipina dan Australia. Kadar bijih nikel laterit bervariasi tergantung dengan lokasi dan kondisi geologis. Kadar nikel laterit biasanya sekitar 1,3% tetapi dapat mencapai 5%. Kadar nikel minimum yang diperlukan untuk mendapatkan nikel berkualitas baik biasanya sekitar 1,8-2%. Konsentrasi unsur atau kadar bijih nikel laterit area penambangan bersifat heterogen. Artinya kadar bijih nikel laterit memiliki persebaran yang berbeda-beda. Oleh karena itu, penambangan nikel laterit banyak menerapkan sistem penambangan *selective mining*. Sistem penambangan *selective mining* merupakan suatu sistem penambangan dimana dilakukan pemisahan antara *waste* dan *ore* secara langsung di *pit* penambangan.

Penentuan kadar bijih nikel laterit merupakan bagian yang terpenting dalam menentukan jumlah cadangan yang tersedia. Penentuan kadar bijih nikel yang harus diketahui terlebih dahulu adalah *Cut off Grade* (CoG) yang telah ditetapkan sehingga dari data kadar rata-rata tiap meter kedalaman lubang bor dapat ditentukan kadar dari titik bor tersebut. *Cut off Grade* (CoG) menurut definisi memiliki dua pengertian, yaitu sebagai berikut (Tahalele, 2018):

1. Kadar terendah dari suatu endapan bijih nikel yang masih dapat memberikan keuntungan apabila ditambang.
2. Kadar rata-rata terendah dari endapan bijih nikel yang masih menguntungkan apabila ditambang sesuai dengan teknologi dan nilai ekonomis saat ini. Penentuan kadar cadangan eksplorasi suatu daerah yaitu dari hasil pemboran pada kegiatan eksplorasi yang dianalisis di laboratorium kimia. Kemudian hasil analisis kadar tersebut dirata-ratakan mulai dari kadar di bawah sampai di atas *Cut off Grade*.

Analisis perubahan kadar bijih nikel laterit merupakan kegiatan untuk mengidentifikasi dan memahami perubahan yang terjadi pada kualitas bijih nikel laterit selama proses pengolahan. Analisis ini penting dilakukan untuk mengoptimalkan pengolahan bijih nikel laterit dan meningkatkan kualitas produk

akhir. Pada umumnya kadar dari hasil kegiatan eksplorasi dengan kegiatan penambangan selalu mengalami perubahan. Dalam menentukan adanya perubahan kadar pada bijih nikel laterit maka dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan beda kadar (Notosiswoyo, 2005).

1. Kadar Rata-Rata

Perhitungan kadar rata-rata merupakan perhitungan kadar secara keseluruhan yang kemudian dirata-ratakan berdasarkan data eksplorasi dan realisasi penambangan dalam jangka waktu kerja satu bulan.

2. Beda Kadar

Nilai beda kadar diperoleh dari pengurangan data kadar rata-rata eskplorasi dengan data realisasi penambangan yang dihasilkan dari analisis laboratorium. Nilai beda kadar digunakan untuk menganalisis besarnya perbedaan kadar relatif tiap parameter antara hasil eksplorasi dan realisasi penambangan. Nilai beda kadar diperoleh dengan membandingkan kadar eskplorasi dan kadar realisasi penambangan dari tiap titik kode sampel.

Proses penambangan dan penanganan bijih nikel laterit memerlukan serangkaian tahapan, yang dapat mempengaruhi kadar bijih tersebut. Ketika bijih nikel laterit pertama kali ditambang di *front* penambangan, kadar nikel biasanya berbeda-beda. *Front* penambangan adalah area penambangan aktif dimana bijih dikeluarkan dari tanah menggunakan alat berat. Kadar nikel yang bervariasi karena komposisi geologis yang tidak merata. Variasi ini mungkin disebabkan oleh perbedaan kekayaan mineral nikel dan kualitas laterit di wilayah pertambangan. Setelah ditambang, bijih nikel laterit dipindahkan ke *stockpile* yang merupakan tempat penyimpanan sementara sebelum diproses lebih lanjut. Di *stockpile* bijih nikel laterit dikelompokkan berdasarkan kadar dan kandungan nikelnya. Pemisahan penting dilakukan untuk memastikan kandungan nikel pada bijih nikel laterit yang diolah sesuai dengan kebutuhan pabrik pengolahan. Selama penyimpanan, kualitas bijih nikel laterit dapat mengalami perubahan kadar karena kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban.

Beberapa faktor yang mempengaruhi perubahan kadar bijih nikel laterit meliputi pengoksidasi mineral nikel, perubahan kimia yang terjadi akibat interaksi dengan udara dan air. Oleh karena itu, pengelolaan tempat penyimpanan bijih nikel

sangat diperlukan dengan efektif agar dapat meminimalkan terjadinya perubahan kadar bijih nikel laterit. Selain itu, faktor operasional juga dapat mempengaruhi perubahan kadar bijih nikel laterit dari *front* penambangan ke *stockpile*. Faktor operasional tersebut diantaranya adalah metode penambangan yang digunakan. metode penambangan yang tidak sesuai dengan SOP dapat menyebabkan tercampurnya material pengotor atau dengan kadar nikel rendah dengan kadar nikel tinggi sehingga dapat menurunkan nikel dengan kadar tinggi. Selain itu, keberhasilan dalam proses pemisahan bijih nikel di *stockpile* sangat berperan penting dalam menjaga konsistensi kadar nikel. Sistem pemisahan berdasarkan ukuran dapat membantu meminimalkan perubahan kadar yang tidak diinginkan.

Dilusi adalah hasil pencampuran dari material lain bukan biji (*waste*) ke dalam material bijih dalam rangka kegiatan pertambangan yang akan menaikkan tonase namun menurunkan secara relatif rata-rata kadar. Dilusi tidak hanya terjadi pada tahapan eksplorasi saja melainkan terjadi sampai pada proses pengolahan mineral. Dilusi meningkatkan tonase bijih sekaligus mengurangi kadar. Ini biasanya dinyatakan dalam satuan persen (Notosiswoyo, 2005).

Dilusi dapat terjadi dalam berbagai tahapan proses, mulai dari penambangan sampai pengolahan. Dilusi pada bijih nikel laterit akan berdampak negatif pada kualitas produk nikel dan efisiensi operasional. Dilusi yang terjadi diantaranya bijih nikel dengan kadar yang berbeda tercampur dan dikumpulkan Bersama, penggunaan alat yang tidak tepat dapat menyebabkan tercampurnya bijih dengan kadar nikel yang berbeda. Dilusi kadar pun dapat terjadi selama proses pengolahan. Tahap pengolahan bijih nikel meliputi penghancuran, penggilingan, pemisahan dan pemurnian. Dalam setiap tahapan ini, ada kemungkinan bijih tercampur dengan kadar atau kandungan nikel yang berbeda atau kesalahan operasional. Pengaruh dilusi kadar bisa sangat signifikan terhadap kerugian perusahaan. Dalam industri pengolahan nikel, dilusi kadar dapat menurunkan kualitas produk akhir, menurunkan nilai jual dan mempengaruhi kinerja pabrik pengolahan, juga dapat mempengaruhi perhitungan cadangan bijih dan perencanaan tambang. Dalam industri nikel, pengendalian dilusi kadar nikel merupakan hal yang penting. Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak dilusi tersebut seperti pemisahan

berdasarkan kadar nikel, pemantauan dan pengendalian operasional yang tepat dan cermat serta penggunaan teknologi yang tepat (Gautama & Kurnia, 2018).

Dilusi dapat dibedakan menjadi dua yaitu (Notosiswoyo, 2005):

1. Dilusi internal

Dilusi internal adalah apabila material kadar rendah terletak di dalam material kadar tinggi. Dilusi internal dapat dibagi menjadi dua yaitu material kadar rendah mempunyai batas yang jelas dengan material kadar tinggi (dilusi geometri) dan material kadar rendah tidak mempunyai batas yang jelas dengan material kadar tinggi (dilusi inheren). Dilusi internal geometri hadir sebagai *waste* yang dibedakan dengan jenis di dalam endapan bijih, misalnya *barren dike* yang menerobos zona bijih. Dilusi internal inheren dapat terjadi karena bertambahnya ukuran blok yang digunakan untuk memisahkan bijih terhadap *waste*.

2. Dilusi eksternal

Dilusi eksternal adalah apabila material kadar rendah terpisah dari material kadar tinggi. Dilusi eksternal terjadi karena reruntuhan dinding, kesulitan teknis mengambil batas bijih dalam *open pit*, atau kurang hati-hatinya pemisahan batas bijih dan *waste*. Dilusi eksternal akan semakin kurang berarti pada endapan bijih dan *waste* yang bergradasi karena jumlah dilusi akan menjadi bagian kecil dari tonase penambangan.

Dilusi pada kegiatan penambangan biasanya dipicu oleh beberapa faktor. Berikut ini adalah faktor-faktor yang dapat mempengaruhi dilusi bijih yaitu sebagai berikut (Notosiswoyo, 2005):

1. Posisi *waste*, badan bijih dan cuaca

Daerah penggalian bijih yang lebih rendah dari lokasi pengupasan tanah penutup akan lebih rawan terhadap pengotoran, sebab jika ada aliran air/hujan dari atas ke bawah, maka daerah penggalian bijih akan mengalami dilusi dari material yang terbawa bersama air. Selain itu banyak dijumpai material *waste* yang berada diantara badan bijih yang berbentuk masif atau tidak beraturan.

2. Keadaan bijih

Biasanya bijih yang berbentuk *boulder* maupun yang berada didekat *boulder* merupakan bijih yang berkadar tinggi. Permasalahannya adalah sangat sukar bagi alat untuk melakukan *selective* terhadap bijih dengan *boulder*.

Untuk mengetahui seberapa besar persentase perubahan kadar akibat dilusi atau masuknya material pengotor ke dalam bijih tersebut dilakukan dengan cara kadar eksplorasi dikurangi dengan kadar realisasi penambangan dibagi dengan kadar eksplorasi dikali 100%.

2.6 Analisis Korelasi

Analisis korelasi berasal dari kata *correlation analysis*, yang digunakan untuk mengetahui arah hubungan, kuat hubungan dan signifikansi kuat hubungan antara dua variabel atau lebih. Dua variabel dikatakan berkorelasi jika perubahan pada salah satu variabel disertai dengan perubahan pada variabel lainnya secara linear, baik searah maupun berlawanan arah. Kuatnya hubungan antara variabel dinyatakan dengan ukuran statistik yang dinamakan koefisien korelasi (Roflin dkk., 2022).

Analisis korelasi merupakan alat statistik yang dapat digunakan untuk mengetahui derajat hubungan linear antara satu variabel dengan variabel lainnya. Adanya perbedaan dan hubungan yang mendasar antara analisis korelasi dan analisis regresi dari segi kegunaan. Analisis korelasi digunakan dalam mencari arah dan kuatnya hubungan antara dua variabel (Purba & Purba, 2022).

Jenis koefisien korelasi yang digunakan untuk mengukur kuatnya hubungan dua variabel, antara lain bergantung pada skala ukur variabel (Roflin dkk, 2022).

1. Apabila kedua variabel berskala numerik maka dapat digunakan koefisien korelasi Pearson.
2. Apabila kedua variabel berskala kategorik ordinal maka dapat digunakan koefisien korelasi Spearman, Gamma, Somers'd, Kendalls Tau-B atau Kendall's Tau-C.

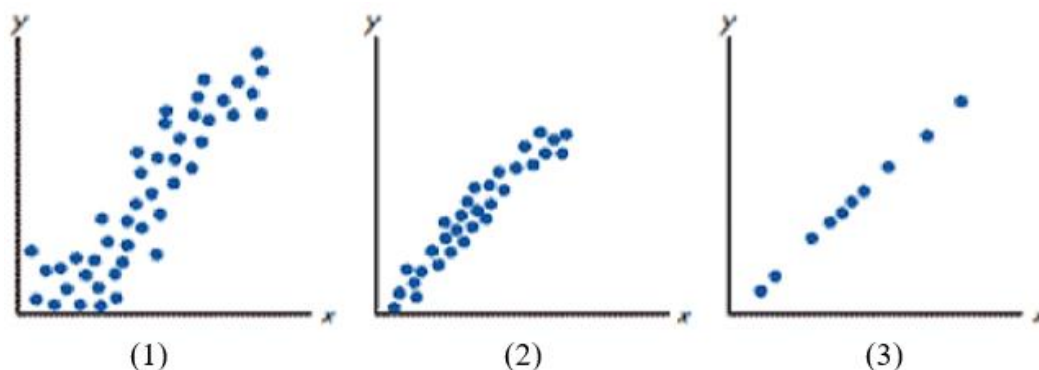
3. Apabila kedua variabel berskala kategorik nominal maka dapat digunakan koefisien korelasi *Contingency Coefficient*, *Phi and Cramer's V*, *Lambda* atau *Uncertainty Coefficient*.
4. Apabila salah satu variabel berskala nominal dan variabel yang lain berskala numerik maka dapat digunakan koefisien korelasi Eta.

Analisis korelasi Pearson adalah analisis yang digunakan untuk mengetahui seberapa kuat hubungan antara variabel independen dan dependen. Korelasi *Pearson Product Moment* (r) adalah korelasi yang sangat populer dan sering digunakan oleh mahasiswa dan para peneliti. Korelasi ini ditemukan oleh Karl Pearson tahun 1990 (Purba & Purba, 2022).

Korelasi Pearson digunakan untuk mengetahui arah hubungan, kuat hubungan dan signifikansi kuatnya hubungan antara dua variabel dengan syarat kedua variabel berdistribusi normal. Syarat lain yang dianjurkan adalah sebagai berikut (Roflin dkk., 2022):

1. Kedudukan kedua variabel simetris (setara).
2. Kedua variabel memiliki variansi yang homogen.
3. Kedua variabel memiliki jumlah unit sampel besar (disarankan lebih dari 30 unit sampel).
4. Disarankan kedua variabel memiliki jumlah unit sampel sama banyak.

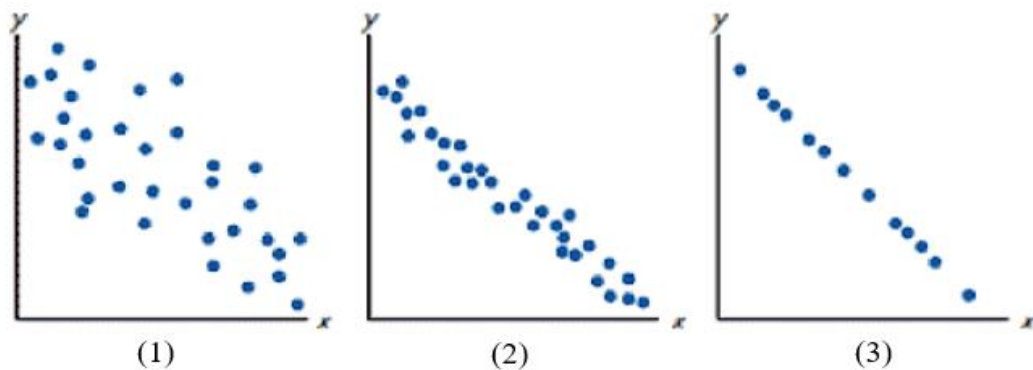
Misalkan x dan y adalah dua variabel numerik yang datanya terdistribusi normal. Hasil pengukuran dari variabel x adalah $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ dan hasil pengukuran dari y adalah $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$. Secara visual hubungan antara variabel x dan y dapat dilihat pada Gambar 6 (Roflin & Zulvia, 2021).



Gambar 6 (1) Korelasi positif antara x dan y ; (2) korelasi positif yang kuat antara x dan y ; (3) korelasi positif sempurna antara x dan y (Roflin & Zulvia, 2021)

Gambar 6 (1), (2) dan (3) menunjukkan bahwa variabel x dan y berkorelasi positif. Artinya ketika nilai x meningkat maka nilai y juga meningkat. Distribusi titik-titik semakin mendekati garis lurus yang menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x dan y semakin kuat. Kuatnya hubungan antara variabel x dan y berkisar antara 0 dan 1 ditulis $0 \leq r_{xy} \leq 1$ (Roflin & Zulvia, 2021).

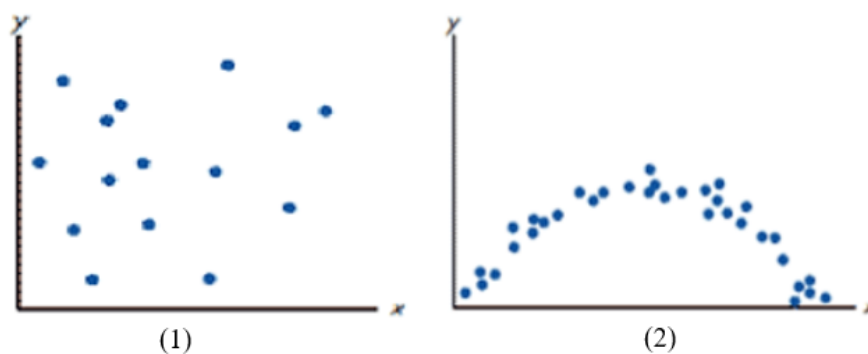
Secara visual hubungan antara variabel x dan y yang berkorelasi negatif dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 (1) Korelasi negatif antara x dan y; (2) korelasi negatif yang kuat antara x dan y; (3) korelasi negatif sempurna antara x dan y (Roflin & Zulvia, 2021)

Gambar 7 (1), (2) dan (3) menunjukkan bahwa variabel x dan y berkorelasi negatif. Artinya ketika nilai x meningkat maka nilai y juga menurun. Distribusi titik-titik semakin mendekati garis lurus yang menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x dan y semakin kuat. Kuatnya hubungan antara variabel x dan y berkisar antara -1 dan 1 ditulis $-1 \leq r_{xy} \leq 1$ (Roflin & Zulvia, 2021).

Secara visual pola distribusi data yang menyatakan tidak adanya hubungan linear antara variabel x dan y dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 (1) Tidak ada korelasi antara x dan y; (2) hubungan non-linear antara x dan y (Roflin & Zulvia, 2021)

Gambar 8 (1) Tidak menunjukkan adanya pola hubungan linear antara variabel x dan y . Hal ini menandakan bahwa tidak ada korelasi atau korelasinya sangat kecil diantara kedua variabel tersebut. Sedangkan (2) menunjukkan adanya pola hubungan yang tidak linear. Variabel x dan y cenderung memiliki pola hubungan kuadratik (Roflin & Zulvia, 2021).

Sifat korelasi Pearson r_{xy} adalah sebagai berikut.

1. Nilai r_{xy} berkisar antara $-1 \leq r_{xy} \leq 1$.
2. Korelasi dikatakan memiliki arah negatif apabila nilai r_{xy} berkisar antara $-1 \leq r_{xy} \leq 0$.
3. Korelasi dikatakan memiliki arah positif apabila nilai r_{xy} berkisar antara $0 \leq r_{xy} \leq 1$.
4. Nilai r_{xy} tidak berubah apabila seluruh data baik pada variabel x maupun variabel y ataupun keduanya dikalikan dengan suatu nilai konstanta tertentu $k \neq 0$.
5. Nilai r_{xy} tidak berubah apabila seluruh data baik pada variabel x maupun variabel y ataupun keduanya ditambahkan dengan suatu nilai konstanta tertentu $k \neq 0$.
6. Nilai r_{xy} hanya untuk mengukur kekuatan hubungan linear dan tidak dirancang untuk mengukur hubungan non-linear.
7. Nilai r_{xy} menyatakan hubungan variabel yang sama-sama bebas (setara) tanpa memperhatikan hubungan kausalitas.

2.7 Analisis Regresi

Regresi merupakan pengukur hubungan dua variabel atau lebih yang dinyatakan dengan bentuk hubungan/fungsi. Diperlukan pemisahan yang tegas antara variabel bebas dan variabel terikat, biasanya disimbolkan dengan x dan y . Pada regresi harus ada variabel yang ditentukan dan variabel yang menentukan atau dengan kata lain adanya ketergantungan antara variabel yang satu dengan variabel lainnya. Kedua variabel dalam regresi biasanya bersifat kausal atau sebab akibat yaitu saling berpengaruh. Dengan demikian, regresi merupakan bentuk fungsi tertentu antara variabel terikat y dan variabel bebas x atau dapat dinyatakan bahwa regresi adalah

sebagai suatu fungsi $y = f(x)$. Bentuk regresi tergantung pada fungsi atau persamaan yang dimilikinya (Kurniawan & Yuniarto, 2016).

Analisis regresi merupakan analisis ketergantungan dari satu atau lebih variabel bebas terhadap satu variabel terikat, dengan tujuan untuk menduga atau memprediksi nilai rata-rata populasi berdasarkan nilai-nilai variabel bebasnya. Analisis regresi yang digunakan untuk memprediksi satu variabel terikat berdasarkan pada satu variabel bebas disebut dengan analisis regresi sederhana, sedangkan analisis regresi yang digunakan untuk memprediksi satu variabel terikat berdasarkan satu atau lebih variabel bebas disebut dengan analisis regresi berganda. Selain itu, regresi juga dapat untuk mengukur kekuatan hubungan antar dua variabel atau lebih, analisis regresi juga digunakan untuk menunjukkan arah hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat (Gurajati, 2006).

Tujuan utama regresi adalah untuk membuat perkiraan nilai suatu variabel terikat (y) jika nilai variabel yang lain yakni variabel bebas (x) sudah ditentukan. Selain itu, manfaat dari hasil analisis regresi adalah untuk membuat keputusan apakah naik dan turunnya variabel terikat dapat dilakukan melalui peningkatan variabel bebas atau tidak (Sugiyono, 2007). Regresi itu sendiri dibagi dalam dua persamaan matematis yang bentuknya dapat linear atau non-linear. Regresi linear adalah alat statistik yang dipergunakan untuk mengetahui pengaruh antara satu atau beberapa variabel terhadap satu buah variabel. Variabel yang mempengaruhi sering disebut variabel bebas, atau variabel independen sedangkan variabel yang dipengaruhi sering disebut dengan variabel terikat atau variabel dependen. Regresi linear pun membentuk hubungan antara variabel bebas terhadap variabel terikat yang bentuk fungsinya linear. Regresi linear hanya dapat digunakan pada skala interval dan rasio (Supratno, 2000).

Menurut Nawari (2010), regresi non-linear ialah bentuk hubungan atau fungsi di mana variabel bebas x dan atau variabel terikat y dapat berfungsi sebagai faktor atau variabel dengan pangkat tertentu. Selain itu, variabel bebas x dan atau variabel terikat y dapat berfungsi sebagai penyebut (fungsi pecahan), maupun variabel x dan atau variabel terikat y dapat berfungsi sebagai pangkat fungsi eksponen. Macam-macam regresi non-linear adalah model kuadratik, model

parabola, model eksponensial, model parabola kubik, model hiperbola, model geometrik, dan model logistik.

Dalam suatu peramalan kita mengetahui nilai peubah tak bebas y berdasarkan peubah bebas x yang kemudian dianalisis dalam bentuk kurva regresi. Analisis regresi adalah suatu alat ukur yang juga digunakan untuk mengukur ada atau tidaknya korelasi antar variabel (Hasan, 2003). Analisis regresi lebih akurat dalam melakukan analisis korelasi karena pada analisis itu kesulitan dalam menunjukkan slop (tingkat perubahan suatu variabel terhadap variabel lainnya dapat ditentukan). Jadi dengan analisis regresi, peramalan atau perkiraan nilai variabel terikat pada nilai variabel bebas lebih akurat pula.

2.7.1 Regresi Linear

Menurut Gujarati (2006) dalam Sofita dkk., (2015) analisis regresi linear adalah suatu analisis yang mempelajari hubungan ketergantungan antara satu variabel yang disebut variabel terikat terhadap variabel lain yang disebut variabel bebas. Dengan analisis regresi dapat diperhitungkan besarnya pengaruh dari perubahan satu variabel terhadap lain. Regresi linear pun dapat membentuk hubungan antara variabel bebas terhadap variabel terikat secara linear. Regresi linear adalah regresi yang variabel bebasnya (variabel x) berpangkat paling tinggi satu. Terdapat dua jenis regresi linear yang biasanya digunakan dalam penelitian, yakni:

1. Regresi linear sederhana

Analisis regresi sederhana bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari suatu variabel terhadap variabel lainnya. Pada analisis regresi suatu variabel yang mempengaruhi disebut variabel bebas atau *independent variable*, sedangkan variabel yang dipengaruhi disebut variabel terkait atau *dependent variable*. Jika persamaan regresi hanya terdapat satu variabel bebas dengan satu variabel terkait, maka disebut dengan persamaan regresi sederhana. Pada regresi sederhana kita dapat mengetahui berapa besar perubahan dari variabel bebas dapat mempengaruhi suatu variabel terkait.

Prinsip dasar pada persamaan regresi sederhana adalah bahwa antara variabel dependen (y) dengan variabel independennya (x) harus memiliki sifat hubungan sebab akibat atau hubungan kausalitas, berdasarkan teori,

dari hasil penelitian sebelumnya, atau juga yang didasarkan dari penjelasan logis tertentu. Analisis regresi linear sederhana adalah hubungan secara linear antara satu variabel independen (x) dengan variabel dependen (y). Analisis regresi sederhana dapat digunakan untuk mengetahui arah dari hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat, apakah memiliki hubungan positif atau negatif serta untuk memprediksi nilai dari variabel terikat apabila nilai variabel bebas mengalami kenaikan ataupun penurunan. Pada regresi sederhana biasanya data yang digunakan memiliki skala interval atau rasio (Binus University Business School, 2019).

2. Regresi linear berganda

Regresi linear berganda merupakan model persamaan yang menjelaskan hubungan satu variabel tak bebas/respon (y) dengan dua atau lebih variabel bebas/prediktor (x_1, x_2, \dots, x_n). Tujuan dari uji regresi linear berganda adalah untuk memprediksi nilai variabel tak bebas/respon (y) apabila nilai-nilai variabel bebasnya prediktor (x_1, x_2, \dots, x_n) diketahui. Disamping itu juga untuk dapat mengetahui bagaimanakah arah hubungan variabel tak bebas dengan variabel-variabel bebasnya (Yuliara, 2016).

2.7.2 Regresi Non-Linear

Analisis regresi non-linear adalah suatu metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel dependen dan satu atau lebih variabel independen yang non-linear. Tujuan utama dari analisis regresi non-linear adalah untuk mengestimasi parameter-parameter dalam fungsi non-linear tersebut sehingga dapat digunakan untuk memprediksi nilai variabel dependen berdasarkan nilai-nilai variabel independen. Melakukan penaksiran garis regresi untuk memprediksi pola hubungan antara variabel dependen dan variabel independen. Hal ini dapat dilakukan dengan melihat diagram pencar antara x dan y . Model linear memiliki kurva yang membentuk garis lurus sedangkan untuk model non-linear memiliki kurva yang membentuk garis lengkung. Ada beberapa model dalam regresi non-linear yaitu sebagai berikut:

1. Regresi kuadratis atau regresi parabola

Regresi kuadratis adalah regresi dengan variabel x ada yang berpangkat dua.

2. Regresi Eksponensial

Regresi eksponensial adalah regresi dengan variabel x berpangkat konstanta b atau konstanta b berpangkat x .

3. Regresi Polinomial

Persamaan regresi polinomial adalah persamaan regresi yang terdiri dari persamaan regresi sederhana dan regresi kuadratik. Menurut Draper dan Smith (1981), model regresi polinomial terdiri dari beberapa pangkat yang dinotasikan dalam x_j . Model pangkat pertama sederhana hanya dengan satu variabel penduga. Model pangkat kedua biasa digunakan dalam studi hasil awal dimana diharapkan nilai y diperoleh lebih tinggi. Model pangkat tiga juga digunakan dalam menentukan hasil kerja suatu variabel dengan lebih banyak frekuensi daripada model pangkat dua. Model ini digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien yang lebih tinggi dibandingkan dengan dua model di atas.