

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Ceria Nugraha Indotama (PT CNI) merupakan perusahaan pertambangan yang bergerak pada industri pengolahan dan penambangan nikel laterit di Sulawesi. Lokasi penelitian berada di wilayah Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara, yang termasuk ke dalam jalur ofiolit Sulawesi bagian tenggara. Secara geologi regional, daerah ini didominasi oleh batuan ultramafik seperti peridotit dan serpentinit yang mengalami proses pelapukan intensif, sehingga membentuk endapan nikel laterit dengan sebaran yang luas. Litologi penyusun wilayah ini terdiri dari saprolit, limonit, dan batuan induk ultramafik yang menjadi sumber utama mineralisasi nikel. Bentuk lahannya termasuk satuan geomorfologi perbukitan bergelombang hingga terjal yang dikontrol oleh struktur geologi dan ketahanan litologi terhadap pelapukan.

Nikel merupakan salah satu barang tambang penting di dunia. Manfaatnya yang begitu besar bagi kehidupan sehari-hari, seperti pembuatan logam anti karat, campuran pada pembuatan stainless steel, baterai nikel-metal hybride, dan berbagai jenis barang lainnya. Kserbagunaan ini pula yang menjadikan nikel sangat berharga dan memiliki nilai jual tinggi di pasaran dunia. Setidaknya sejak 1950 permintaan akan nikel rata-rata mengalami kenaikan 4% tiap tahun, dan diperkirakan sepuluh tahun mendatang terus mengalami peningkatan (Dalvi, Bacon, dan Osborn, 2004). Endapan nikel laterit terbentuk akibat pelapukan intensif batuan ultramafik yang mengandung mineral olivin dan piroksin (Golightly, 1981). Proses laterisasi tersebut dipengaruhi oleh faktor iklim tropis, topografi, drainase, struktur geologi, serta komposisi batuan induk (Elias, 2001). Hasil dari proses ini umumnya menghasilkan zonasi mineralisasi vertikal mulai dari zona limonit hingga saprolit yang memiliki perbedaan kadar nikel akibat variasi proses geokimia (Rajesh, 2004).

Dalam kegiatan penambangan, variabilitas kadar nikel secara lateral maupun vertikal menjadi tantangan dalam pengendalian kualitas bijih. Ketidakpastian sebaran kadar dapat menyebabkan *ore loss*, *dilution*, dan menurunnya efektivitas perencanaan tambang apabila tidak dianalisis dengan baik. Oleh karena itu, diperlukan pemodelan dan evaluasi zonasi mineralisasi berbasis data geokimia untuk mendukung efisiensi operasi tambang.

Sejauh ini, penelitian terkait endapan nikel laterit masih banyak berfokus pada aspek deskriptif geologi, sementara metode statistik modern seperti *clustering* belum banyak diterapkan dalam pemisahan domain kualitas bijih. Oleh karena itu, penulis memilih judul **“Analisa Zona Laterisasi Berdasarkan Data Geokimia Menggunakan K-Means Clustering Di Pit X, PT. Ceria Nugraha Indotama”** sebagai penelitian tugas akhir.

1.2 Rumusan Masalah

Agar tujuan penelitian dapat tercapai dan terarah secara efektif, maka penulis membuat rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana karakteristik sebaran geokimia endapan nikel laterit pada wilayah penelitian di PT Ceria Nugraha Indotama?
2. Bagaimana hasil pengelompokan zona penciri mineralisasi nikel laterit berdasarkan analisis *K-Means Clustering* pada data assay?
3. Bagaimana hasil analisis klaster dapat digunakan sebagai dasar evaluasi sumber daya dan pengendalian kualitas dalam operasi penambangan?

1.3 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini yaitu untuk menganalisis zonasi laterisasi dan distribusi mineral nikel laterit berdasarkan data geokimia melalui metode *K-Means Clustering* di PT. Ceria Nugraha Indotama, Pit X, Site Kolaka, Sulawesi Tenggara.

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi karakteristik sebaran unsur geokimia nikel laterit pada wilayah PT. Ceria Nugraha Indotama.
2. Menentukan pengelompokan zona mineralisasi berdasarkan analisis *K-Means Clustering terhadap* data assay PT. Ceria Nugraha Indotama.
3. Menginterpretasi perbedaan kualitas bijih dan distribusi mineral pada profil laterit berdasarkan hasil klasterisasi PT. Ceria Nugraha Indotama.

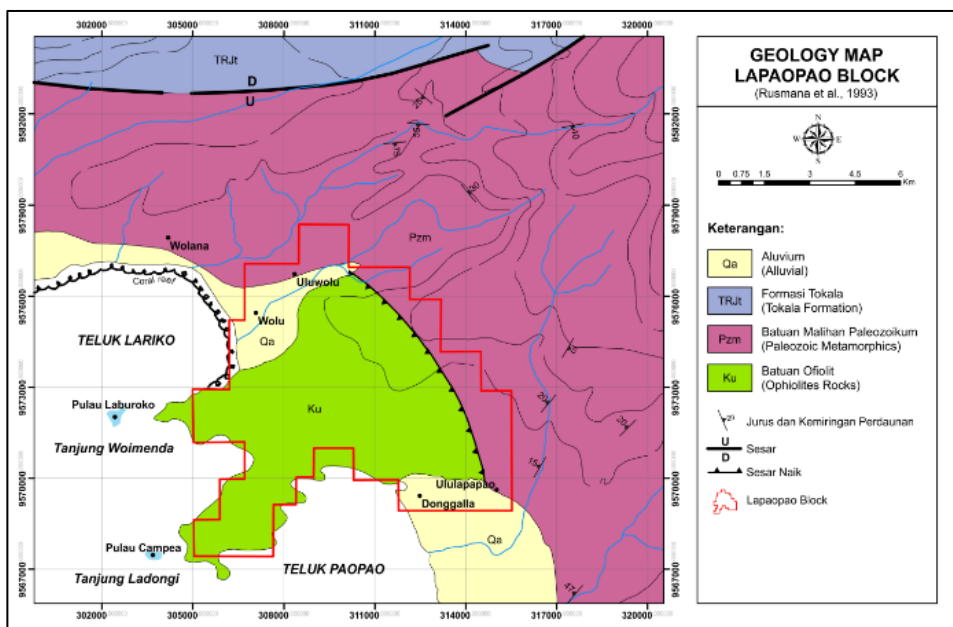
1.4 Batasan Masalah

Dalam melaksanakan penelitian dan pembahasan pada karya ilmiah ini, penulis membatasi pada analisis karakteristik geokimia endapan nikel laterit serta pengelompokan zona mineralisasi menggunakan metode *K-Means Clustering* berdasarkan data assay di Pit X PT Ceria Nugraha Indotama.

1.5 Teori

1.5.1 Geologi Regional

Daerah penelitian berada di Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara, yang termasuk dalam zona ultramafik Lengan Timur Sulawesi sebagai bagian dari Kompleks Ofiolit Sulawesi yang tersusun atas batuan peridotit dan harzburgit teralterasi (Surono, 2013). Batuan ultramafik ini mengalami proses pelapukan intensif pada iklim tropis lembap sehingga berkembang profil laterit nikel dengan zonasi yang jelas dari saprolit hingga limonit (Haryono & Santosa, 2018). Secara tektonik, wilayah ini dipengaruhi oleh aktivitas tumbukan Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik yang mengontrol keberadaan batuan ultramafik serta struktur sesar yang berperan dalam kontrol hidrogeologi pelapukan (Hall, 2002).



Gambar 1 Peta geologi regional daerah IUP (Blok Lapaopao) dan sekitarnya, yang di-crop dari Peta Geologi Lembar Lasusua-Kendari, Sulawesi (Afan, 2021 dalam Rusmana, 1993)

1.5.1.1. Geomorfologi Regional

Daerah penelitian di Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara, berkembang pada lingkungan geomorfologi perbukitan hingga bergelombang yang kompleks, terbentuk di atas batuan dasar ultramafik dari Kompleks Ofiolit Sulawesi (Surono, 2013). Topografi wilayah menunjukkan variasi ketinggian yang ekstrem, mulai dari 80 meter hingga lebih dari 300 meter di atas permukaan laut, dengan kemiringan lereng yang umumnya terjal akibat proses pengangkatan tektonik dan erosi yang berlangsung intensif (Suhartono dkk., 2017). Morfologi wilayah dapat diklasifikasikan menjadi dua satuan utama, yaitu satuan perbukitan bergelombang yang mendominasi lebih dari 75% luas area, serta satuan pedataran sempit yang hanya ditemukan terbatas di kaki lereng dan sepanjang aliran lembah sungai (Sari dkk., 2020).

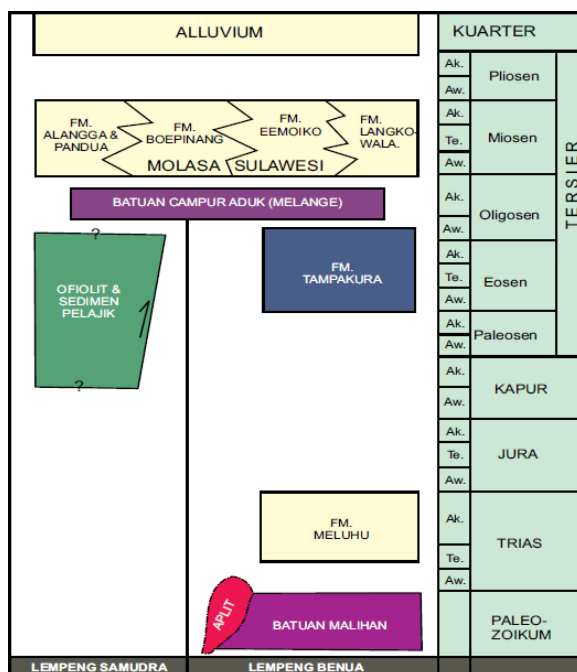
Pola drainase daerah sangat dikendalikan oleh struktur geologi, khususnya sesar, yang membentuk lembah-lembah sempit dengan aliran permukaan yang teratur dan berkontribusi signifikan terhadap proses erosi gravitasi pada zona laterit di bagian puncak dan punggung bukit. Akibat kondisi geomorfologi yang dinamis ini, profil laterit nikel mengalami variasi ketebalan yang nyata secara spasial; zona limonit cenderung terbentuk dan terkonsentrasi pada wilayah berelief datar hingga lereng landai, sementara zona saprolit justru mendominasi dan menebal di daerah puncak bukit serta pada lereng-lereng yang curam.

1.5.1.2. Stratigrafi Regional

Secara umum daerah penelitian termasuk ke dalam lembar Lasusua-Kendari yang terbagi menjadi Satuan Aluvium (Qa) dan Batuan Ofiolit (Ku).

Aluvium (Qa) terdiri atas kerikil, kerakal, pasir lempung dan lumpur. Satuan ini merupakan hasil dari endapan sungai, rawa dan endapan pantai. Umur satuan ini adalah holosen.

Batuan Ofiolit (Ku) terdiri atas peridotit, dunit dan serpentinit. Serpentinit berwarna kelabu tua sampai kehitaman; padu dan pejal. Batuannya bertekstur afanitik dengan susunan mineral antigorit, lempung dan magnetit. Umumnya memperlihatkan struktur kekar dan cermin sesar yang berukuran megaskopis. Dunit, kehitaman; padu dan pejal, bertekstur afanitik. Mineral penyusunnya ialah olivin, piroksin, plagioklas, sedikit serpentinit dan magnetit; berbutir halus sampai sedang. Mineral utama olivin berjumlah sekitar 90%. Tampak adanya penyimpangan dan pelengkungan kembar yang dijumpai pada piroksin, mencirikan adanya gejala deformasi yang dialami oleh batuan ini. Di beberapa tempat dunit terserpentinasi kuat yang ditunjukkan oleh struktur sisa seperti rijang dan barik-barik mineral olivin dan piroksin, serpentinit dan talkum sebagai mineral pengganti. Peridotit terdiri atas jenis harzburgit dan lherzolit. Harzburgit, hijau sampai kehitaman, holokristalin, padu dan pejal. Mineralnya halus sampai kasar, terdiri atas olivin (60%) dan piroksin (40%). Di beberapa tempat menunjukkan struktur perdaunan. Hasil penghabluran ulang pada mineral piroksin dan olivin mencirikan batas masing-masing kristal bergerigi. Lherzolite, hijau kehitaman; holokristalin, padu dan pejal. Mineral penyusunnya ialah olivin (45%), piroksin (25%), dan sisanya epidot, yakut, klorit, dan bijih dengan mineral berukuran halus sampai kasar. Satuan batuan ini diperkirakan berumur Kapur.



Gambar 2 Stratigrafi regional Lengan Tenggara Sulawesi (Rusman, dkk 1993; Simandjuntak, dkk 1993; Coleman, 1977)

1.5.1.3. Struktur Geologi Regional

Secara regional, daerah penelitian termasuk dalam **Lembar Lasusua-Kendari** yang merupakan bagian dari sistem tektonik kompleks hasil tumbukan tepi benua aktif. Berdasarkan perbedaan struktur, himpunan batuan, biostratigrafi, dan umur, kawasan ini terbagi menjadi dua domain tektonostratigrafi yang sangat berbeda (Simandjuntak dkk., 1983):

- 1) **Domain Alochthon:** tersusun atas ofiolit dan batuan malihan.
- 2) **Domain Autochthon:** terdiri dari batuan gunungapi dan pluton Tersier, serta batuan dasar pinggiran Benua Sundaland dan Kelompok Molasa Sulawesi.

Lembar ini, seperti umumnya Sulawesi Bagian Timur, dicirikan oleh struktur geologi yang sangat rumit akibat pengaruh pergerakan tektonik yang berulang dan intensif. Struktur utama yang berkembang mencakup **sesar, lipatan, dan kekar**.

Sistem Sesar memiliki orientasi dominan **Barat Laut – Tenggara**, searah dengan **Sesar Geser Mendatar Mengiri (sinistral) Lasolo**. Sesar Lasolo masih aktif hingga kini, dibuktikan oleh keberadaan mata air panas di Desa Sonai pada batugamping terumbu berumur Holosen. Aktivitas sesar ini diduga terkait dengan reaktivasi **Sesar Sorong** pada Kala Oligosen. Selain sesar geser, berkembang juga struktur **sesar naik**, seperti yang teramati di daerah Wawo dan Tanjung Labuandala, dimana batuan ofiolit menumpang di atas Batuan Malihan Mekongga, Formasi Meluhu, dan Formasi Matano. Sesar utama lainnya adalah **Sesar**

Anggowala, yang merupakan sesar mendatar menganan (dextral) dengan arah Barat Laut-Tenggara.

Kekar berkembang pada semua jenis batuan dengan karakter berbeda. Pada batugamping, kekar umumnya teratur dan membentuk kelurusan yang jelas, sementara pada batuan beku, pola kekar cenderung tidak beraturan (Rusmana dkk., 2010).

1.5.2 Batuan Ultramafik

Batuan ultramafik merupakan kelompok batuan beku yang dicirikan oleh komposisi mineral yang didominasi oleh mineral-mineral **mafik** atau **ferromagnesian** (mengandung besi dan magnesium tinggi). Mineral-mineral penyusun utamanya meliputi **olivin**, **piroksen** (ortopiroksen dan klinopiroksen), **hornblende** (amfibol), dan **biotit** (mika) (Ahmad, 2002). Secara kuantitatif, batuan ini memiliki **indeks warna** (persentase volume mineral mafik) yang sangat tinggi, yaitu **lebih dari 70%**, sehingga penampakkannya gelap.

Penting untuk dibedakan antara istilah "**ultrabasa**" dan "**ultramafik**", karena keduanya tidak selalu identik. Klasifikasi **ultrabasa** didasarkan pada kandungan kimia, khususnya kadar silika ($\text{SiO}_2 < 45\%$ berat). Sementara, klasifikasi **ultramafik** didasarkan pada komposisi mineralogi, yaitu dominasi mineral ferromagnesian (Ahmad, 2002).

Dalam konteks geologi tektonik, tubuh batuan ultramafik masif seringkali merupakan bagian dari **kompleks ofiolit**, yang merepresentasikan kerak samudra dan mantel bagian atas yang tersingkap di daratan akibat proses obduksi atau tabrakan lempeng. Batuan ultramafik, khususnya jenis **harzburgit** dan **dunit**, merupakan **batuan induk (source rock)** primer untuk pembentukan **endapan nikel laterit**. Proses pelapukan kimiawi yang intensif dan berlangsung lama pada batuan ini akan melarutkan unsur-unsur seperti silika dan magnesium, sehingga mengakibatkan pengayaan residual unsur besi, nikel, dan kobalt, membentuk profil laterit yang ekonomis.

1.5.2.1 Peridotit

Peridotit merupakan kelompok batuan ultramafik yang mendominasi komposisi mantel bumi bagian atas dan berperan sebagai **batuan induk primer (protolith)** bagi pembentukan endapan nikel laterit (Golightly, 1981). Dalam konteks geologi tektonik, tubuh peridotit sering ditemukan sebagai bagian dari **kompleks ofiolit** yang tersingkap di permukaan akibat proses obduksi atau deformasi tektonik (Coleman, 1977). Secara genetis, peridotit ofiolit ini diinterpretasikan sebagai fragmen litosfer samudera (lherzolite mantel) atau sebagai sisa dari dapur magma mantel (kumulat) yang termemplatkan pada kerak benua.

Berdasarkan komposisi mineraloginya, peridotit diklasifikasikan menjadi beberapa jenis utama yang memiliki implikasi berbeda terhadap potensi pembentukan laterit nikel:

- 1) **Harzburgit**: Dominan terdiri atas **olivin** (40-90%) dan **ortopiroksen** (enstatit), dengan sedikit atau tanpa klinopiroksin. Jenis ini merupakan

residu mantel setelah ekstraksi magma basaltic yang signifikan (peleburan parsial tinggi), sehingga relatif "terkuras" akan unsur inkompatibel namun tetap kaya akan Mg. Harzburgit sering menjadi batuan induk yang baik untuk laterit karena kandungan MgO-nya yang tinggi (Himmelberg & Loney, 1995).

- 2) **Lherzolite:** Memiliki komposisi mineral yang lebih seimbang antara **olivin**, **ortopiroksin**, dan **klinopiroksin** (diopsid). Lherzolite merepresentasikan komposisi mantel yang kurang mengalami peleburan parsial dibandingkan harzburgit. Kandungan kalsium dari klinopiroksin dapat memengaruhi kimia fluida selama pelapukan
- 3) **Dunit:** Hampir seluruhnya (>90%) tersusun atas mineral **olivin**, sehingga sangat kaya magnesium (MgO). Dunit umumnya terbentuk sebagai tubuh kumulat di dalam saluran magma atau sebagai zona pengayaan olivin di dalam kompleks peridotit. Tingginya kandungan MgO membuat dunit sangat reaktif terhadap pelapukan, sering kali menghasilkan profil laterit dengan zona saprolit yang tebal dan berpotensi memiliki pengayaan nikel sekunder yang baik (Elias, 2002).
- 4) **Wehrlite:** Terdiri dominan dari **olivin** dan **klinopiroksin**, dengan sedikit atau tanpa ortopiroksin. Komposisi ini kurang umum dijumpai.

Secara tekstur, peridotit segar menunjukkan tekstur **holokristalin** (semua komponen berbentuk kristal), dengan ukuran butir **medium hingga kasar**. Mineral-mineral penyusunnya umumnya berbentuk **anhedral** karena saling menginterlock selama proses kristalisasi dan deformasi. **Olivin** ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) dan **piroksin** ($(\text{Ca,Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$) merupakan mineral **primer** utama. Olivin, khususnya, adalah mineral paling reaktif dalam proses lateritisasi karena kandungan magnesiumnya yang tinggi; peluruhannya melepaskan Mg^{2+} dan Ni^{2+} ke dalam sistem pelapukan.

Mineral Asesoris yang hadir dalam jumlah minor namun signifikan meliputi:

- 1) **Plagioklas:** Menunjukkan adanya sisa lelehan basal atau tahapan kristalisasi tertentu.
- 2) **Hornblende dan Biotit:** Mengindikasikan adanya metasomatisme atau alterasi hidrotermal yang memperkenalkan air dan unsur volatil (K, OH) ke dalam batuan, yang dapat menjadi tahap awal serpentinisasi.
- 3) **Garnet** (biasanya pirop atau almandin): Umumnya hadir pada peridotit dari mantel yang lebih dalam (*facies garnet-peridotit*) atau pada batuan yang mengalami metamorfosis tekanan tinggi.
- 4) **Spinel (kromit) dan Magnetit:** Merupakan mineral akseori penting yang sangat resisten terhadap pelapukan dan sering terkonsentrasi sebagai mineral residu di zona limonit

Kandungan **nikel** dalam peridotit segar umumnya berkisar antara **0,2–0,4%**, terikat dalam struktur kristal **olivin** sebagai pengganti ion Mg^{2+} (isomorfik substitution). Komposisi kimiawi awal batuan induk inilah (kadar Mg, Fe, Si, dan Ni) yang menjadi kendali utama (*first-order control*) atas kualitas dan ketebalan

endapan laterit nikel yang akan terbentuk. Peridotit dengan kandungan olivin tinggi (seperti dunit dan harzburgit) cenderung menghasilkan profil laterit yang lebih tebal dan berpotensi lebih tinggi kadar nikel residualnya dibandingkan dengan peridotit yang kaya piroksin (Golightly, 1981; Brand et al., 1998)

1.5.2.2 Piroksinit

Piroksinit, sesuai dengan definisi yang dikemukakan Ahmad (2002), merupakan kelompok batuan ultramafik yang bersifat **monomineralik**, dengan komposisi yang hampir seluruhnya (>90%) tersusun atas mineral **piroksin**. Batuan ini terbentuk melalui proses kristalisasi fraksional di dalam dapur magma ultramafik, di mana kondisi tertentu memungkinkan pengayaan piroksin yang ekstrem sebelum atau selama pemisahan dari sisa *melt*.

Klasifikasi piroksinit dilakukan berdasarkan jenis mineral piroksin dominan yang menyusunnya, yang secara kristalografi dibedakan menjadi dua sistem utama:

- 1) Piroksinit Ortorombik (Orthopyroxenite) :
 - **Mineral Dominan:** Terutama terdiri dari ortopiroksin (seri enstatit-hipersten). Mineral ini memiliki sistem kristal ortorombik
 - **Komposisi Kimia:** Ortopiroksin kaya akan magnesium dan besi dengan formula umum $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$, namun sangat rendah/tanpa kalsium
 - **Asosiasi dan Genesanya:** Umumnya berasosiasi dengan harzburgit dalam kompleks ofiolit, terbentuk sebagai akumulasi kristal ortopiroksin dari magma mantel yang bersifat komatiitik atau sebagai produk kristalisasi fraksional di dalam tubuh intrusif berlapis (layered intrusion). Kehadirannya sering mencerminkan tingkat peleburan parsial yang tinggi pada mantel sumber.
 - **Contoh Batuan: Bronzitik** (dominan enstatite/hipersten dengan warna perunggu)
- 2) Piroksinit Monoklin (Clinopyroxenite) :
 - **Mineral Dominan:** Didominasi oleh **klinopiroksin** (seperti diopsid, augit, hedenbergit). Mineral ini mengkristal dalam sistem **monoklin**
 - **Komposisi Kimia:** Klinopiroksin memiliki variasi kimia lebih luas, mengandung kalsium yang signifikan selain magnesium dan besi, dengan formula umum $\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$.
 - **Asosiasi dan Genesanya:** Sering ditemukan sebagai lapisan atau lensa di dalam kompleks intrusif berlapis, atau berasosiasi dengan wehlite dan hornblendit. Dapat terbentuk dari akumulasi kristal klinopiroksin atau melalui proses metasomatisme yang mengkaya batuan akan kalsium.
 - **Contoh Batuan:** Diopsidit (dominan diopsid), Augitit, atau Jeffersonit

1.5.2.3 Hornblendit

Hornblendit merupakan batuan ultramafik yang tergolong langka dan dicirikan oleh komposisi monomineralik, di mana kandungan mineral **hornblende** menyusun lebih dari 90% volume batuan (Ahmad, 2002). Hornblende sendiri adalah mineral anggota kelompok **amfibol**, yang berbeda secara struktural dan kimiawi dari kelompok piroksin yang lebih umum ditemukan pada batuan ultramafik. Secara fisik, hornblendit berwarna hijau tua hingga hitam kehijauan dengan tekstur holokristalin berbutir kasar, sering menunjukkan kristal hornblende berbentuk prisma yang khas (Winter, 2010).

Batuan ini tidak terbentuk langsung dari kristalisasi magma mantel yang kering, melainkan umumnya merupakan produk **metasomatisme** sekunder (Himmelberg & Loney, 1995). Proses ini terjadi ketika batuan peridotit atau piroksinit awal bereaksi dengan fluida kaya air, volatil (seperti klorin dan fluor), serta komponen alkali dan kalsium, dalam suatu proses yang disebut **amfibolitisasi**, di mana mineral piroksin dan olivin diubah menjadi hornblende (Spandler et al., 2008). Oleh karena itu, hornblendit sering ditemukan sebagai lensa atau tubuh tidak beraturan di dalam kompleks peridotit yang telah terpengaruh oleh sirkulasi fluida hidrotermal, atau di lingkungan tektonik seperti zona subduksi dan sabuk orogen (Coleman, 1977).

Dalam konteks pembentukan nikel laterit, keberadaan hornblendit memiliki implikasi penting. Pertama, ia berfungsi sebagai **indikator alterasi hidrotermal awal** yang intensif pada batuan induk ultramafik, yang berarti batuan dasar telah mengalami proses serpentinisasi dan metasomatisme sebelum pelapukan supergen dimulai (Golightly, 1981). Kedua, sebagai mineral pembawa **aluminium (Al)** utama, pelapukan hornblende dapat berkontribusi terhadap peningkatan kadar Al_2O_3 di zona limonit melalui pembentukan mineral residu seperti **gibbsite** (Elias, 2002). Ketiga, komposisi kimia hornblende yang kaya kalsium dapat mempengaruhi pH dan kimia fluida pelapukan, sehingga berpotensi mengubah pola mobilitas dan pengendapan nikel (Brand et al., 1998). Dengan demikian, identifikasi hornblendit penting untuk memahami sejarah geokimia kompleks batuan dasar yang menjadi kendali tidak langsung terhadap kualitas dan distribusi endapan nikel laterit di atasnya.

1.5.2.4 Serpentin

Serpentin merupakan batuan metamorfik yang terbentuk melalui proses **serpentinisasi**, yaitu alterasi hidrotermal dari batuan ultramafik kaya olivin dan piroksin (seperti dunit dan peridotit) menjadi mineral-mineral serpentin (Evans, 2004). Proses ini merupakan reaksi eksotermik antara batuan ultramafik dengan air, yang mengubah mineral primer seperti olivin ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) dan piroksin menjadi kelompok mineral serpentin—terutama **lizardit**, **antigorit**, dan **krisotil**—disertai dengan pembentukan mineral sekunder seperti **magnetit** (Fe_3O_4) dan **brucit** ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (O'Hanley, 1996).

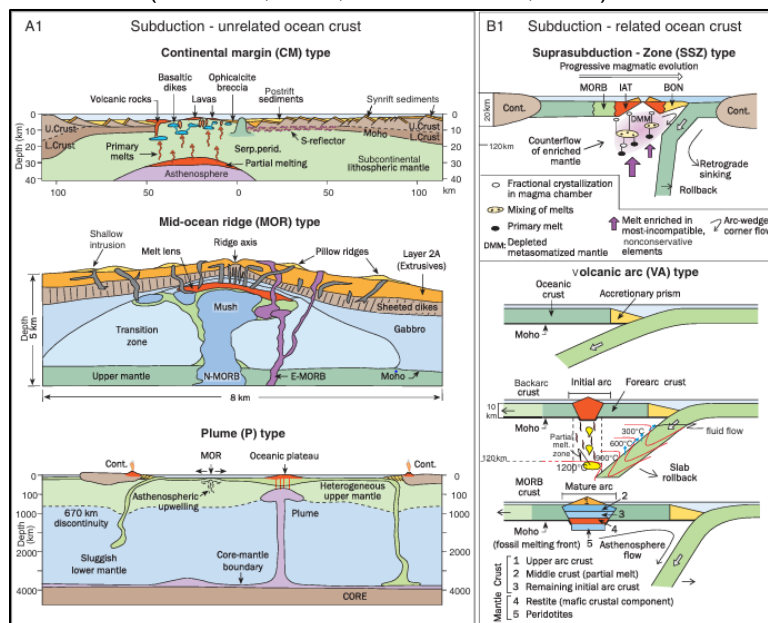
Proses serpentinisasi dapat terjadi pada berbagai lingkungan geologi. Di **Pegunungan Tengah Samudera (Mid-Ocean Ridge/MOR)**, interaksi antara

batuan mantel peridotit dengan air laut yang bersirkulasi pada suhu $<500^{\circ}\text{C}$ menghasilkan serpentinisasi ekstensif, yang mengubah peridotit menjadi serpentin (Klein et al., 2015). Di lingkungan **zona subduksi**, serpentin dapat terbentuk di mantel atas yang terhidrasi oleh fluida yang dilepaskan dari lempeng subduksi, memainkan peran penting dalam siklus air dan geodinamika mantel (Hirth & Guillot, 2013). Di daratan, serpentin dapat terbentuk melalui hidrasi batuan ultramafik selama proses orogenik atau sebagai bagian dari kompleks ofiolit yang tersingkap.

Serpentin umumnya bersifat **monomineralik**, dengan mineral serpentin mendominasi komposisi batuan. Batuan ini memiliki warna hijau tua hingga kehitaman, tekstur masif, dan sering memperlihatkan tekstur **mesh texture** (sisa olivin) atau **blade texture** (sisa piroksin) sebagai bukti alterasi in-situ. Dari segi komposisi kimia, serpentin relatif kaya magnesium (MgO), silika (SiO_2), dan air (H_2O), namun miskin kalsium (CaO) dan aluminium (Al_2O_3) dibandingkan dengan batuan induknya (Ahmad, 2002).

1.5.3 Ofiolit

Ofiolit merupakan asosiasi batuan mafik-ultramafik yang secara klasik diinterpretasikan sebagai fragmen litosfer samudera (kerak samudera dan mantel bagian atas) yang terangkat dan tersingkap di daratan akibat proses tektonik obduksi atau akresi (Coleman, 1977; Dilek & Furnes, 2011).



Gambar 3 Genesa Ofiolite (Coleman, 1977; Dilek & Furnes, 2011).

Secara stratigrafi, suatu urutan ofiolit lengkap (dari bawah ke atas) terdiri dari:

- 1) **kompleks ultramafik tektonit** (terutama harzburgit dan lherzolit terdeformasi yang mewakili mantel litosferik residu);

- 2) **kumulat ultramafik-mafik** (dunit, piroksinit, dan gabro berlapis yang mewakili kristalisasi magmatik di ruang magma);
- 3) **batuan beku masif** (gabro isotopik, dolerit/daun);
- 4) **kompleks dike sheeted** (mewakili ruang pembekuan/konduit magma);
- 5) **batuan vulkanik** (terutama *pillow lava* basaltik); dan
- 6) **batuan sedimen pelagik** (chert, batu lumpur, kapur) yang menutupinya (Anonymous, 1972; Ringwood, 1975).

Ketebalan totalnya dapat mencapai beberapa kilometer.

Keberadaan ofiolit di Sulawesi, khususnya di Lengan Tenggara (termasuk daerah penelitian di Kolaka), merupakan bukti penting dari evolusi tektonik wilayah ini yang melibatkan penutupan basin samudera purba dan tabrakan mikrokontinen (Kadarusman et al., 2004). Ofiolit di wilayah ini, seperti yang dicirikan oleh Kompleks Ofiolit Sulawesi Timur, menjadi **batuan induk (protolith)** utama bagi pembentukan endapan nikel laterit yang luas dan ekonomis (Surono, 2013)

1.5.4 Proses Serpentinisasi

Serpentinisasi menurut Palandri dan Reed (2004) adalah suatu reaksi eksotermis, hidrasi di mana air bereaksi dengan mineral mafik seperti olivin dan piroksen untuk menghasilkan lizardit, antigorit dan / atau krisotil. Menurut Ahmad (2006) ada beberapa hal terjadinya proses serpentinisasi adalah adanya penambahan air, adanya pelarutan magnesita (atau penambahan silika), adanya pelepasan besi dalam olivin (Fe, Mg), konversi besi yang lepas dari ikatan ferro (Fe^{2+}) menjadi ferri (Fe^{3+}) untuk membentuk magnetit berbutir halus.

Akibatnya batuan terserpentinisasi umumnya akan menjadi lebih magnetik. Peran atau kemunculan mineral serpentin pada batuan dasar penghasil laterit terkadang memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap karakterisasi tanah laterit yang ada.

Secara umum batuan dasar penghasil tanah laterit merupakan batuan-batuan ultramafik dimana batuan yang rendah akan unsur Si, namun tinggi akan unsur Fe, Mg dan terdapat unsur Ni yang berasal langsung dari mantle bumi. Kehadiran mineral serpentin pada batuan ultramafik menjadi suatu peranan penting dalam pembentukan karakteristik tanah laterit yang ada terutama pada pengkayaan unsur logam Ni pada tanah laterit. Proses serpentinisasi akan menyebabkan perubahan tekstur mineralogi dan senyawa pada mineral olivin maupun piroksen pengurangan atau perubahan komposisi unsur Mg, Ni dan Fe pada mineralnya

1.5.5 Endapan Laterite

Laterit deposit atau endapan laterit diartikan sebagai hasil dari proses pelapukan yang intensif di daerah humid, warm maupun tropic dan kaya akan mineral lempung yang bersifat kaolinitic serta Fe- dan Al- oxide/hydroxide. Endapan laterit pada umumnya menampilkan bidang perlapisan yang baik sebagai hasil reaksi antara air hujan yang masuk ke dalam formasi dan kelembaban tanah yang naik ke atas permukaan (Maulana, 2017) Laterit menurut

Evans (1993) adalah produk sisa dari pelapukan kimia batuan di permukaan bumi, dimana berbagai mineral asli atau primer mengalami ketidakstabilan karena adanya air kemudian larut atau pecah dan membentuk mineral baru yang lebih stabil. Laterit penting sebagai induk untuk endapan bijih ekonomis. Contoh terkenal dari endapan bijih laterit yaitu bauksit dan endapan bijih besi. Laterit merupakan sumber dari beberapa mineral ekonomis diantaranya bauxite dan nikel (Ni), mangan (Mn), tembaga (Cu), emas (Au) dan Platinum Group Element (PGE). Bagian paling bawah dari profil laterit disebut dengan zona saprolite yang merupakan zona pelapukan tinggi dimana tekstur primer dan fabric dari batuan asalnya masih dapat dilihat. Akibat fluida yang bersifat oxidized dan asam, maka bagian paling bawah dari zona ini dicirikan dengan tidak stabilnya sulfide dan karbonat dengan hasil pencucian atau leaching dari logam-logam chalcophile dan unsur-unsur alkalin. Bagian bawah dari zona saprolit ini dicirikan dengan terurainya mineral-mineral feldspar dan ferromagnesian, sementara Si dan Al akan tetap tinggal pada mineral lempung (kaolinite dan halloysite). (Maulana, 2017).

Perilaku berbagai unsur selama proses lateralisasi pada dasarnya dikendalikan oleh dua faktor, yaitu: (Ahmad, 2009)

- 1) Sifat kimia tertentu dari unsur itu sendiri (geokimia) Unsur
- 2) Kondisi lingkungan yang berlaku (suhu, curah hujan, kondisi batuan, kondisi pH, dll.)

Tabel 1 Peran Beberapa Elemen Selama Pelapukan Laterite (Ahmad,2009)

Unsur	Keterdapatannya dalam ultramafik sebagai	Peran selama pelapukan laterit
Ca	Cpx > Opx > Oliv	Sangat <i>mobile</i> , terlarut
Na	Sangat sedikit	Sangat <i>mobile</i> , terlarut
Mg	Oliv > Opx > Cpx	Sangat <i>mobile</i> , sebagian besar terlarut, sebagian tetap sebagai mineral lempung
K	Sangat sedikit	Sangat <i>mobile</i> , sebagian besar terlarut, sebagian tetap sebagai mineral lempung
Si	Opx > Cpx > Oliv	Sangat <i>mobile</i> , sebagian besar terlarut, sebagian tetap sebagai mineral lempung dan <i>silica boxwork</i> .
Mn	Oliv > Opx > Cpx	<i>Semi-mobile</i> , membentuk oksida (pirolusit) and hidroksida (manganit, pirokroit & psilomelan)
Co	Oliv > Opx > Cpx	<i>Semi-mobile</i> , mengikuti mangan
Ni	Oliv > Opx > Cpx	<i>Semi-mobile</i> , membentuk nikel serpentin, nikel talk, nikel klorit, dan lempung nikel
Al	Cpx > Opx > Oliv	Tidak <i>mobile</i> tetap sebagai boehmit, bauksit, dan gibsit
Cr	Cpx > Opx > Oliv	Tidak <i>mobile</i> tetap sebagai kromit
Fe	Oliv > Opx > Cpx	Tidak <i>mobile</i> tetap sebagai oksida (hematit & maghemit) and hidroksida (turgit, goetit, hidrogoetit, limonit, ferrihidrit, xantosiderit & esmeraldait)

- 1) Ca (Kalsium) memiliki sifat yang sangat larut dalam air tanah di daerah tropis.
- 2) Mg (Magnesium) sangat larut dalam air tanah. Dalam kondisi tropis basah, magnesia dapat dengan cepat keluar dari profil laterit. Namun, di bawah

kondisi iklim basah-kering, beberapa magnesias dalam bentuk lempung dalam profil laterit mungkin terhambat.

- 3) Si (Silika) memiliki kelarutan yang lebih rendah dari magnesias. Silika sering kali dapat diendapkan dalam bentuk zona saprolitik dari profil laterit dimana magnesias secara aktif masuk ke dalam larutan.
- 4) Fe, kelarutan zat besi sangat bervariasi tergantung pada keadaan valensinya, dimana zat besi (Fe^{++}) cukup larut dalam air tanah sedangkan zat besi (Fe^{+++}) sangat tidak larut.
- 5) Al (Aluminium) adalah salah satu unsur yang tidak bergerak yang ada dalam profil laterit selama air tanah berada pada kisaran pH 4,5 hingga 9,5.
- 6) Cr (Kromium) dalam kromit tidak larut dalam air tanah dan sangat stabil, bertahan sebagai kromit di zona limonit.
- 7) Mn dan Co memiliki mobilitas yang agak rendah di perairan asam dan cenderung bergerak ke bawah profil laterit. Namun, mereka mencapai tingkat ketidaksuburan lebih cepat (lebih awal dari nikel) dan diendapkan di bagian bawah zona limonit atau di bagian atas zona saprolit (zona transisi). Konsentrasi kobalt umumnya mengikuti mangan dalam profil laterit.

1.5.5.1 Profil Laterite

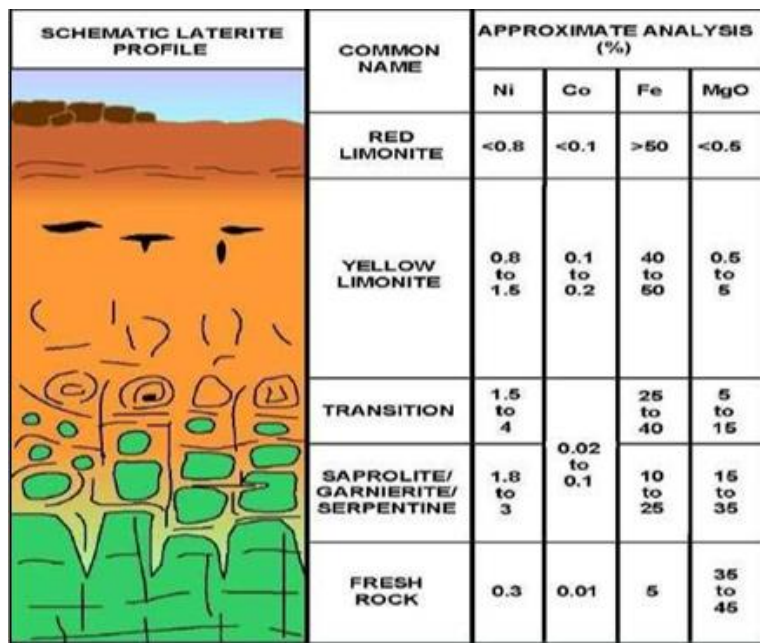
Pelapukan kimia pada batuan ultrabasa biasanya disertai dengan fraksinasi dari elemen-elemen menjadi tipe yang larut dan tidak larut dalam air. Elemen-elemen yang larut dalam air nantinya akan tercuci keluar dari sistem pelapukan sementara elemen-elemen yang tidak larut dalam air akan tertinggal sebagai pengayaan residu. Proses pelapukan kimia pada akhirnya akan menghasilkan pembentukan profil laterit dengan urutan laterit termuda pada bagian bawah dan laterit tertua pada bagian atas.

Adapun menurut Elias (2002) proses yang disebut sebagai “lateritisasi” dasarnya adalah pelapukan kimiawi yang terjadi pada iklim lembab musiman dalam jangka waktu yang lama dalam kondisi stabilitas tektonik yang relatif stabil, yang memungkinkan terbentuknya regolit yang tebal dengan karakteristik yang khas. Menurut Ahmad (2006) profil laterit dibagi menjadi beberapa zona, yaitu :

- 1) **Zona limonit.** Terletak di bagian atas profil laterit, zona limonit mewakili produk akhir dari pelapukan tropis batuan ultramafik dan konsentrasi residu dari elemen-elemen yang dapat larut telah membuat material menjadi lemah dan menyebabkan terjadinya pemisahan antar elemen. Bagian paling atas dari limonit terpapar oleh efek oksidasi dari udara membentuk hematit. Pada hill yang relatif rendah utamanya pada kondisi berawa menyebabkan pelarutan dan pengendapan kembali unsur besi membentuk iron cap dengan karakteristik berwarna merah gelap. Di bawah zona hematit, unsur besi sebagian besar dalam bentuk mineral goetit dan limonit yang merupakan mineral hidroksida besi dengan konsentrasi air kristalisasi yang signifikan. Sesko oksidasi besi, aluminium dan krom kurang lebih

terdistribusi secara merata di dalam zona limonit sementara mangat dan kobalt dilarutkan dan diendapkan di bagian bawah zona limonit.

- 2) **Zona saprolit.** Terletak di atas batuan dasar yang belum terlapukkan, terdiri dari bongkah batuan yang sudah terurai sebagian ataupun seutuhnya. Pada batuan dasar yang relatif sangat terserpentinisasi, proses saprolisasi tidak hanya terbatas pada rekahan tetapi secara aktif berlangsung di seluruh massa batuan. Magnesia, silika dan alkali yang larut dihilangkan dengan cepat meninggalkan konsentrasi sisa sesko oksidasi besi, alumina krom dan mangan. Nikel di zona saprolit sebagian besar berasal dari pengayaan sekunder. Air tanah yang bersifat asam melarutkan nikel di bagian atas profil laterit dan menyimpannya di zona saprolit di mana peningkatan alkalinitas air secara tiba-tiba (akibat pemecahan olivin dan pelepasan magnesia) membuat nikel terlarut menjadi tidak dapat larut. Zona saprolit juga merupakan tempat bagi urat-urat garnierit dan pengendapan silika bebas sebagai urat atau kotak kotak. Meskipun sebagian besar bijih umumnya terbatas pada zona saprolit, namun seluruh zona saprolit bukan merupakan perataan bijih. Bagian bawah zona saprolite secara bertahap menjadi kekurangan pengayaan nikel sekunder dan bukan merupakan bagian dari bijih.
- 3) **Zona batuan dasar (Bedrock).** Terletak di bagian paling bawah dari profil laterit, zona ini ditandai batuan ultramafik asli yang belum terpengaruh oleh proses pelapukan. Komposisi kimiawi batumannya sangat mirip dengan komposisi batuan dasar yang belum berubah. Air tanah yang merembes telah kehilangan hampir semua keasamannya pada saat mencapai zona batuan dasar dan dengan demikian tidak mampu melarutkan komponen mineral sampai tingkat signifikan.



Gambar 4 Generalisasi Profile Laterit (Elias, 2002)

1.5.5.2 Genesa Nikel Laterite

Pelapukan kimia membuat komposisi kimia dan mineralogi suatu batuan dapat berubah. Mineral dalam batuan yang dirusak oleh air kemudian bereaksi dengan udara (O_2 atau CO_2), menyebabkan sebagian dari mineral itu menjadi larutan. Selain itu, bagian unsur mineral yang lain dapat bergabung dengan unsur setempat membentuk kristal mineral baru. (A. Isjudarto, 2013).

Kecepatan pelapukan kimia tergantung dari iklim, komposisi mineral dan ukuran butir dari batuan yang mengalami pelapukan. Pelapukan akan berjalan cepat pada daerah yang lembab (humid) atau panas dari pada di daerah kering atau sangat dingin. Curah hujan rata-rata dapat mencerminkan kecepatan pelapukan, tetapi temperatur sulit dapat diukur. Namun secara umum, kecepatan pelapukan kimia akan meningkat dua kali dengan meningkat temperatur setiap $10^\circ C$. Mineral basa pada umumnya akan lebih cepat lapuk dari pada mineral asam. Itulah sebabnya basal akan lebih cepat lapuk dari pada granit dalam ukuran yang sama besar. Sedangkan pada batuan sedimen, kecepatan pelapukan tergantung dari komposisi mineral dan bahan semennya. (A. Isjudarto, 2013)

Larutan yang mengandung Mg, Ni, dan Si terus menerus kebawah selama larutannya bersifat asam, hingga pada suatu kondisi dimana suasana cukup netral akibat adanya kontak dengan tanah dan batuan, maka ada kecenderungan untuk membentuk endapan hydrosilikat. Nikel yang terkandung dalam rantai silikat atau hydrosilikat dengan komposisi yang mungkin bervariasi tersebut akan mengendap pada celah-celah atau rekahan-rekahan yang dikenal dengan urat-urat garnierit dan krisopras. Sedangkan larutan residunya akan membentuk suatu senyawa yang disebut saprolit yang berwarna coklat kuning kemerahan. Unsur-unsur

lainnya seperti Ca dan Mg yang terlarut sebagai bikarbonat akan terbawa kebawah sampai batas pelapukan dan akan diendapkan sebagai dolomit, magnesit yang biasa mengisi celah-celah atau rekahan-rekahan pada batuan induk. Dilapangan urat-urat ini dikenal sebagai batas petunjuk antara zona pelapukan dengan zona batuan segar yang disebut dengan akar pelapukan (*root of weathering*). (A. Isjudarto, 2013).

1.5.6 K-Means Clustering untuk Analisis Geokimia

K-means clustering merupakan metode *unsupervised learning* yang digunakan untuk mengelompokkan data ke dalam **K kelompok (cluster)** berdasarkan kemiripan karakteristik antar objek. Setiap cluster direpresentasikan oleh **centroid**, yaitu titik rata-rata dari seluruh data dalam cluster tersebut. Algoritma ini bekerja secara iteratif untuk memperoleh pembagian cluster yang paling optimal (MacQueen, 1967).

Tujuan utama K-means adalah meminimalkan total jarak kuadrat (disebut *Within-Cluster Sum of Squares*, WCSS) antara setiap data x_i dengan centroid cluster-nya μ_k :

$$WCSS = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2$$

Dengan :

- C_k = cluster ke-k
- μ_k = centroid cluster ke-k
- $\|x_i - \mu_k\|$ = Jarak Eucliden kuadrat

Dalam praktiknya, K-means bekerja dengan mengelompokkan data multi-unsur—seperti Ni, Fe, Co, Mg, atau unsur jejak lainnya—ke dalam beberapa kelompok sehingga pola geokimia yang berbeda dapat terlihat lebih jelas. Metode ini membantu membedakan antara populasi **background**, **anomali mineralisasi**, dan variasi komposisi yang disebabkan oleh litologi atau proses geologi tertentu. Penelitian oleh Sadeghi et al. (2024) menunjukkan bahwa K-means merupakan teknik yang paling umum digunakan dalam klasifikasi data geokimia eksplorasi dan sangat efektif untuk mengenali **tanda multi-elemen** yang berkaitan dengan mineralisasi, bahkan beberapa kelompok hasil clustering memiliki hubungan spasial langsung dengan zona mineral yang sedang ditargetkan. Kombinasi K-means dengan PCA juga terbukti dapat membantu memisahkan anomali yang signifikan dari anomali palsu, sehingga interpretasi geokimia menjadi lebih akurat dalam konteks eksplorasi mineral. (Sadeghi et al., 2024).

Proses K-Means Clustering Melibatkan Langkah-langkah berikut :

- 1) **Penentuan jumlah klaster (K):** Menggunakan metode seperti *Elbow Method* atau *Silhouette Analysis* untuk menentukan jumlah optimal kluster.
- 2) **Inisialisasi centroid:** Memilih K titik acak sebagai centroid awal.

- 3) **Penugasan data:** Mengelompokkan setiap data ke kluster dengan centroid terdekat berdasarkan jarak Euclidean
- 4) **Pembaruan centroid:** Menghitung ulang centroid sebagai rata-rata dari semua data dalam kluster
- 5) **Iterasi:** Mengulangi langkah 3 dan 4 hingga konvergensi (centroid tidak berubah signifikan)

Dalam eksplorasi geokimia, K-Means clustering memiliki beberapa aplikasi penting:

- 1) **Identifikasi Populasi Geokimia:** Metode ini dapat membedakan antara :
 - **Populasi background** (konsentrasi unsur normal)
 - **Anomali mineralisasi** (konsentrasi tinggi unsur target)
 - **Populasi terpengaruh litologi** (variasi akibat batuan tertentu)
 - **Kontaminasi antropogenik** (pengaruh aktivitas manusia)
- 2) **Pemisahan Zona Alterasi dan Mineralisasi:** Pada sistem hidrotermal, K-Means dapat mengelompokkan sampel berdasarkan tipe alterasi (propilitik, argilik, filik) dan tingkat mineralisasi (Carranza, 2008).
- 3) **Analisis Asosiasi Unsur:** Dengan mengelompokkan sampel berdasarkan kemiripan pola unsur, dapat diidentifikasi asosiasi unsur-unsur yang berkaitan dengan proses geologi tertentu atau tipe mineralisasi (Zuo, 2011).
- 4) **Pemodelan Domain Bijih:** Dalam endapan nikel laterit, K-Means dapat digunakan untuk membedakan zona limonit, saprolit, dan batuan dasar berdasarkan pola unsur Ni, Fe, Co, MgO, dan SiO₂ (Sadeghi et al., 2024)

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu, Letak dan Kesampaian Daerah

Daerah penelitian berada di **PT. Ceria Nugraha Indotama**, yang beroperasi di Pit X, Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara. Secara geografis, lokasi tambang PT. Ceria Nugraha Indotama terletak pada koordinat **121°18'10.28" - 121°18'17.18" Bujur Timur (BT)** dan **3°52'1.14" - 3°51'43.02" Lintang Utara (LU)**. Daerah penelitian dapat diakses melalui jalur udara menggunakan pesawat dari Bandara Sultan Hasanuddin Makassar menuju Bandara Sangia Nibandera Airpor dengan waktu tempuh ± 45 menit. Kemudian dilanjutkan dengan menaiki kendaraan roda empat menuju lokasi tambang selama ± 2 jam.

2.2 Variabel Penelitian

Menurut Sugiyono (2016), variabel independen (bebas) adalah variabel yang memengaruhi atau menjadi penyebab perubahan atau timbulnya variabel lain, yang disebut variabel dependen. Variabel independen ini dimanipulasi atau diatur oleh peneliti untuk mengetahui efeknya terhadap variabel lain. Sementara itu, variabel dependen (terikat) adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat dari variabel independen. Variabel dependen merupakan hasil atau outcome dari penelitian yang diukur oleh peneliti. Selain itu, variabel kontrol adalah variabel yang dijaga tetap sama atau konstan selama penelitian untuk memastikan bahwa hubungan antara variabel independen dan dependen tidak dipengaruhi oleh faktor lain, sehingga validitas hasil penelitian tetap terjaga.

Penelitian ini memiliki beberapa variabel Data Assay dan Data Collar. Pencapaian tujuan penelitian terkait mengetahui karakteristik dari geokimia Nikel Laterite pada PT. Ceria Nugraha Indotama. Variabel independen meliputi kondisi topografi seperti elevasi, kemiringan lereng, struktur, batuan dasar, dan iklim.

2.3 Metode Penelitian

Metode penelitian ini disusun sebagai acuan dalam melaksanakan seluruh rangkaian kegiatan penelitian. Metode penelitian serta tahapan yang dilaksanakan sangat mempengaruhi keberhasilan suatu penelitian, sehingga metode penelitian disusun secara sistematis dan berurut dengan harapan dapat menghasilkan penelitian yang baik.

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis data sekunder, yaitu menggunakan data assay dan data collar yang diperoleh dari PT Ceria Nugraha Indotama. Data tersebut digunakan untuk menganalisis karakteristik geokimia dan distribusi mineral nikel laterit di Pit X. Selanjutnya, data diproses dan dianalisis menggunakan *Python* di *Google Colab* untuk melakukan K-Means Clustering dan analisis statistik, guna mengelompokkan zona laterisasi dan pola distribusi mineral. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk

mengevaluasi karakteristik geokimia dan distribusi mineral secara komprehensif tanpa harus melakukan pengambilan sampel langsung di lapangan.

2.4 Tahapan Penelitian

Dalam melaksanakan suatu penelitian, diperlukan tahapan penelitian yang sistematis dan terperinci yang akan berpengaruh pada tingkat keberhasilan penelitian yang dilakukan dan mempermudah peneliti dalam melaksanakan penelitian. Adapun tahapan penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu:

2.4.1 Tahapan Persiapan

Tahapan persiapan merupakan tahapan yang paling awal dilakukan untuk memulai penelitian ini. Tahapan penelitian terbagi atas 3 tahap yaitu:

2.4.1.1 Administrasi

Pengurusan administrasi dan persuratan, meliputi pembuatan proposal penelitian untuk mendapatkan surat izin legalitas penelitian, terdiri atas pengurusan perizinan kepada pihak Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

2.4.1.2 Studi Literatur

Tahapan studi pendahuluan dilakukan sebagai tahap awal dari kegiatan penelitian ini. Studi pendahuluan difokuskan pada pemahaman geologi regional area Pit X, karakteristik nikel laterite, serta konsep dan aplikasi K-Means Clustering dalam analisis data geokimia. Selain itu, dilakukan kajian literatur terkait distribusi mineral nikel laterite dan metode statistik untuk mengelompokkan zona laterisasi berdasarkan data assay. Studi ini juga mencakup pemahaman tentang variabel-variabel geokimia yang relevan, prosedur analisis data menggunakan Python di Google Colab. Semua kegiatan studi pendahuluan ini dilakukan sebagai bagian dari merancang metode penelitian yang akan digunakan.

2.4.1.3 Perlengkapan Lapangan

Persiapan perlengkapan lapangan, meliputi pengadaan peta dasar, persiapan peralatan lapangan lainnya.

2.4.2 Tahapan Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis untuk memastikan integritas data yang digunakan, mulai dari koordinat titik bor hingga prosedur pengujian laboratorium sebagai berikut :

2.4.2.1 Data Collar

Data ini diperoleh dari database PT. Ceria Nugraha Indotama yang mencakup koordinat (X, Y, Z) dan kedalaman total titik bor di Pit X. Data collar digunakan sebagai dasar pemetaan spasial dan penentuan lokasi pengambilan sampel agar sesuai dengan desain perencanaan tambang.

2.4.2.2 Prosedur Pengambilan Sampel Lapangan

Pengambilan sampel representatif dari berbagai zona profil laterit (limonit dan saprolit) untuk memverifikasi karakteristik litologi secara visual.



Gambar 5 Pengambilan Sampel Check

2.4.2.3 Analisis Laboratorium (Metode XRF)

Untuk memperoleh data kadar unsur yang akurat, sampel yang telah diambil kemudian melalui tahapan analisis laboratorium :

- **Preparasi Sampel:** Meliputi proses *crushing*, *pulverizing*, dan pengeringan untuk mendapatkan serbuk halus yang homogen.



Gambar 6 Pengambilan Sampel Check

- **Analisis X-Ray Fluorescence (XRF):** Sampel diuji menggunakan metode XRF untuk menentukan konsentrasi unsur utama (seperti Ni, Fe, Co, MgO, dan SiO₂). Hasil dari uji XRF ini akan digunakan sebagai untuk menganalisis karakteristik geokimia zonasi laterit secara lebih mendalam.



Gambar 7 Analisis X-Ray Fluorescence (XRF)

2.4.3 Tahapan Analisis Data

Pengolahan data geokimia pada penelitian ini dilakukan menggunakan data assay nikel laterite dari Pit X, PT Ceria Nugraha Indotama. Data assay yang meliputi kadar Ni, Fe, MgO, dan elemen lainnya dianalisis dengan menggunakan statistik deskriptif untuk mengetahui distribusi, nilai maksimum, minimum, rata-rata, dan standar deviasi setiap unsur. Selain itu, dilakukan pemeriksaan korelasi antar unsur geokimia untuk memahami hubungan antar elemen dan karakteristik zonasi lateritis di lokasi penelitian. Pengolahan data ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran awal mengenai karakteristik geokimia dan distribusi mineral nikel sebelum dilakukan analisis lanjutan.

2.4.4 K-Means Clustering untuk Analisis Geokimia

Setelah pengolahan awal data assay, selanjutnya dilakukan **analisis klaster menggunakan metode K-Means Clustering**. Metode ini digunakan untuk mengelompokkan zona laterisasi dan distribusi mineral nikel berdasarkan kemiripan karakteristik geokimia tiap sampel. Data assay yang telah diproses diimpor ke **Python di Google Colab**, kemudian dilakukan normalisasi data untuk memastikan setiap unsur memiliki bobot yang seimbang dalam perhitungan klaster. Proses K-Means Clustering meliputi penentuan jumlah klaster optimal, inisialisasi centroid, pengelompokan sampel berdasarkan jarak terdekat ke centroid, dan iterasi hingga terjadi konvergensi. Hasil clustering ini menghasilkan **pembagian zona laterisasi** yang dapat digunakan untuk memetakan pola distribusi mineral nikel di Pit X dan sebagai dasar analisis lanjutan terhadap karakteristik tiap zona.

2.4.5 Penyusunan Laporan

Tahap terakhir adalah penyusunan laporan yang menyajikan seluruh data yang meliputi hasil pengumpulan data, hasil interpretasi, analisis dan pengujian laboratorium, dan pengolahan data secara sistematis. Selama penyusunan laporan

dilakukan pengoreksian dan pengecekan ulang terhadap semua data dan hasil analisis yang kemudian disatukan menjadi suatu laporan ilmiah.

2.4.6 Diagram Alir

Tahapan dan metode penelitian ini dituangkan dalam diagram alir penelitian di bawah ini:

Tabel 2 Diagram Alir Penelitian