

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Endapan Nikel laterit adalah tanah sisa yang telah berkembang di atas batuan ultramafik melalui proses pelapukan kimia dan proses pengayaan (*supergene enrichment*). Menurut laporan Badan Survei Geologi Amerika Serikat (USGS), Indonesia menjadi penghasil nikel terbesar nomor satu. Total produksinya diperkirakan mencapai 1,6 juta metrik ton atau menyumbang 48,48% dari total produksi nikel global sepanjang tahun 2022. Selain unggul sebagai produsen, Indonesia tercatat sebagai pemilik cadangan nikel terbesar di dunia pada 2022 yakni mencapai 21 juta metrik ton. Salah satu daerah penghasil nikel terbesar di Indonesia berada pada daerah Sorowako, Sulawesi Selatan (Oetomo, 2023). Endapan laterit Sorowako di Sulawesi Selatan merupakan sumber utama logam nikel di Indonesia yang telah di tambang dan diolah dengan menggunakan teknik peleburan konvensional oleh PT.Vale Indonesia (Fitrian dkk., 2020).

Indonesia, sebagai produsen nikel terbesar di dunia, memiliki wilayah-wilayah pertambangan endapan nikel laterit yang tersebar di berbagai pulau seperti Sulawesi, Halmahera, dan Papua. Pemanfaatan sumber daya nikel laterit ini telah menjadi tulang punggung bagi industri pertambangan nasional, yang tidak hanya memasok kebutuhan dalam negeri tetapi juga ekspor ke pasar global. Namun, untuk memastikan keberlanjutan dan efisiensi dalam eksploitasi sumber daya ini, diperlukan metode eksplorasi yang tepat dan akurat, terutama dalam menentukan zonasi dan tonase dari kedua jenis endapan, yakni limonit dan saprolit.

Perhitungan tonase dari endapan limonit dan saprolit menjadi aspek krusial dalam industri pertambangan nikel laterit. Hal ini disebabkan oleh perbedaan nilai ekonomi antara kedua jenis endapan tersebut. Limonit, dengan kandungan besinya yang tinggi, biasanya digunakan sebagai bahan baku untuk produksi baja, sedangkan saprolit yang kaya akan nikel lebih diminati untuk produksi nikel murni melalui proses pirometalurgi atau hidrometalurgi. Oleh karena itu, analisis yang akurat terhadap tonase limonit dan saprolit sangat penting dalam menentukan kelayakan ekonomis dari sebuah tambang nikel laterit. Estimasi yang salah dapat

berakibat pada kerugian finansial yang signifikan serta kegagalan dalam perencanaan tambang.

Dalam konteks ini, metode eksplorasi geofisika seperti *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) 3D menjadi sangat relevan. ERT 3D merupakan teknologi yang mampu memetakan variasi resistivitas bawah permukaan dengan resolusi tinggi. Metode ini bekerja dengan cara mengukur resistivitas listrik dari batuan, yang kemudian diolah menjadi model 3D yang menggambarkan struktur bawah permukaan. Penggunaan ERT 3D dalam eksplorasi nikel laterit memungkinkan identifikasi yang lebih jelas antara zona limonit dan saprolit berdasarkan perbedaan resistivitasnya. ERT 3D juga dapat digunakan untuk melengkapi data dari pengeboran (*drillhole*), sehingga menghasilkan model geologi yang lebih akurat dan komprehensif.

Penelitian yang menggabungkan data *drillhole* dengan ERT 3D telah menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan di berbagai daerah di Indonesia. Sebagai contoh, studi yang dilakukan oleh Santoso *et al.* (2019) di Sulawesi Tengah menunjukkan bahwa kombinasi kedua metode ini efektif dalam memisahkan zona limonit dan saprolit serta dalam memperkirakan tonase dari masing-masing zona dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional yang hanya mengandalkan data *drillhole*. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Kurniawan (2020) di Halmahera, di mana ERT 3D digunakan untuk mengidentifikasi variasi resistivitas yang berkorelasi dengan perubahan komposisi mineralogi antara limonit dan saprolit. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa ERT 3D dapat memetakan batas antara kedua zona dengan lebih detail, sehingga memudahkan dalam estimasi volume dan tonase.

Industri pertambangan nikel laterit, tantangan utama adalah bagaimana mengoptimalkan ekstraksi sumberdaya dengan mempertimbangkan faktor teknis dan ekonomi. Penggunaan teknologi canggih seperti ERT 3D dalam eksplorasi dan pemodelan geologi nikel laterit diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi operasional. Selain itu, dengan menggabungkan data dari metode geofisika dan pengeboran, kita dapat mengurangi ketidakpastian dalam estimasi sumberdaya, yang pada akhirnya akan mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam pengelolaan sumber daya nikel laterit.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini berfokus pada upaya untuk meningkatkan akurasi perhitungan tonase sumberdaya lapisan limonit dan saprolit pada endapan nikel laterit dengan menggunakan kombinasi data *drillhole* dan *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) 3D. Metode konvensional yang hanya mengandalkan data *drillhole* sering kali menghadapi tantangan dalam memberikan estimasi perhitungan setiap lapisan yang akurat, terutama ketika menghadapi variasi resistivitas di zona bawah permukaan yang kompleks. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengkaji bagaimana variasi resistivitas yang teridentifikasi melalui ERT 3D dapat mempengaruhi estimasi tonase sumberdaya endapan nikel laterit dan sejauh mana penggunaan teknologi ini dapat mengurangi ketidakpastian dalam perhitungan tonase dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi korelasi antara hasil pemodelan tonase yang diperoleh dari kombinasi kedua metode tersebut dengan data produksi aktual di lapangan, sehingga dapat diketahui keandalan dan efektivitas metode ini dalam meningkatkan akurasi perhitungan tonase pada industri pertambangan nikel laterit di Indonesia.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengestimasi tonase lapisan limonit dan saprolit menggunakan data *drillhole*.
2. Mengestimasi tonase lapisan limonit dan saprolit menggunakan kombinasi data *drillhole* dan ERT.
3. Menganalisis perbandingan tonase lapisan limonit dan saprolit menggunakan data *drillhole* dan ERT

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan memberikan informasi yang dapat diandalkan mengenai estimasi tonase lapisan limonit dan saprolit, yang penting bagi perencanaan operasional dan strategi pengolahan di PT Vale Indonesia. Penelitian ini akan menunjukkan bagaimana metode geolistrik dapat dikombinasikan dengan data titik

bor untuk memberikan hasil yang lebih komprehensif, sehingga eksplorasi mineral dapat dilakukan dengan lebih efisien dan efektif. Dengan menggabungkan metode geolistrik dan titik bor, penelitian ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan metodologi eksplorasi mineral yang lebih akurat, khususnya untuk endapan nikel laterit. Data dan hasil penelitian ini dapat digunakan oleh manajemen PT Vale Indonesia Tbk untuk membuat keputusan yang lebih tepat terkait eksploitasi dan pengelolaan sumberdaya mineral, yang pada akhirnya dapat meningkatkan produktivitas dan profitabilitas perusahaan. Penelitian ini dapat menjadi landasan bagi studi lanjutan yang ingin mengeksplorasi lebih jauh metode kombinasi geolistrik dan titik bor, serta aplikasinya di berbagai jenis endapan mineral lainnya.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian Penelitian ini dilakukan di wilayah operasi PT Vale Indonesia Tbk, yang terletak di Sorowako, Sulawesi Selatan. Lokasi ini dipilih karena merupakan salah satu area dengan sumberdaya nikel laterit yang signifikan. Objek penelitian ini meliputi lapisan limonit dan saprolit yang terbentuk dari pelapukan batuan ultramafik. Fokus penelitian adalah pada pengukuran sebaran, ketebalan, dan perhitungan volume kedua lapisan tersebut. Penelitian ini menggunakan dua metode utama, yaitu: Metode Geolistrik yang Digunakan untuk mengidentifikasi dan mengestimasi sebaran serta ketebalan lapisan limonit dan saprolit di bawah permukaan. Metode Pemboran (Titik Bor): Digunakan untuk memperoleh data langsung mengenai ketebalan lapisan dan karakteristik fisik serta kimia dari lapisan limonit dan saprolit. Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini mencakup data geolistrik berupa resistivitas batuan, data dari titik bor berupa kedalaman dan ketebalan lapisan, serta data fisik dan kimia dari sampel batuan yang diambil. Penelitian ini hanya mencakup area tertentu di wilayah operasi PT Vale Indonesia dan tidak mewakili seluruh wilayah tambang. Hasil perhitungan volume yang diperoleh dari metode geolistrik dan titik bor hanya berlaku untuk area penelitian yang telah ditentukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Endapan Nikel laterit

Endapan nikel laterit adalah jenis endapan nikel yang terbentuk melalui proses pelapukan kimiawi batuan ultrabasa seperti peridotit dan dunite di daerah dengan iklim tropis. Proses ini melibatkan pelapukan intensif yang menghasilkan mineral-mineral laterit seperti limonit dan saprolit. Menurut penelitian oleh Batchelor & Lawrance (1997), proses pelapukan ini menyebabkan pembentukan profil mineral yang khas dengan zona limonit yang kaya besi di bagian atas dan saprolit yang kaya nikel di bagian bawah. Di Indonesia, endapan nikel laterit terutama ditemukan di daerah-daerah dengan kondisi geologis yang sesuai, seperti Sulawesi dan Halmahera, di mana batuan ultrabasa sering terpapar kepada cuaca tropis yang intens.

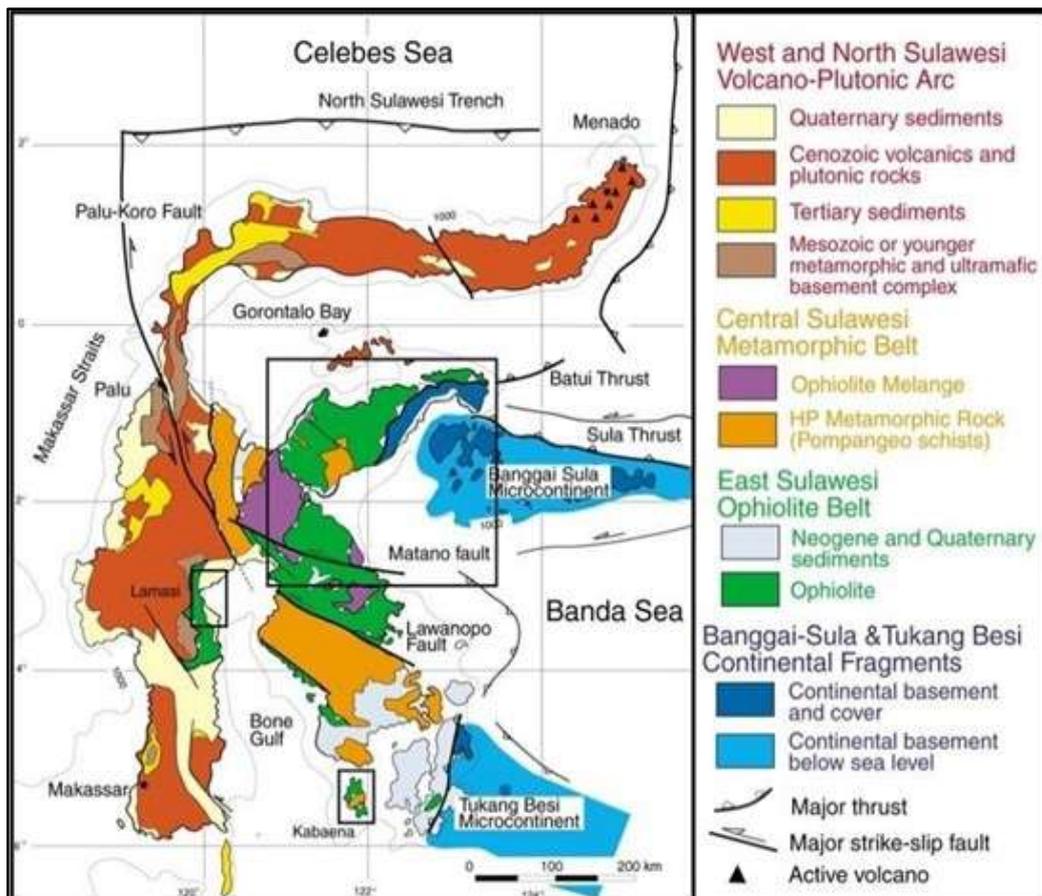


Gambar 1 Kenampakan lapisan endapan nikel laterit

Endapan nikel laterit di Indonesia telah menjadi objek penelitian yang intensif, mengingat negara ini memiliki salah satu cadangan nikel laterit terbesar di dunia. Penelitian di Pulau Sulawesi, khususnya di wilayah Sulawesi Tenggara, menunjukkan bahwa formasi nikel laterit di daerah ini sangat bervariasi tergantung pada kondisi topografi dan geologi setempat (Susanto, 2017). Studi yang dilakukan oleh Harjanto (2018) menemukan bahwa variasi ketebalan lapisan limonit dan saprolit di wilayah ini dipengaruhi oleh tingkat pelapukan dan komposisi

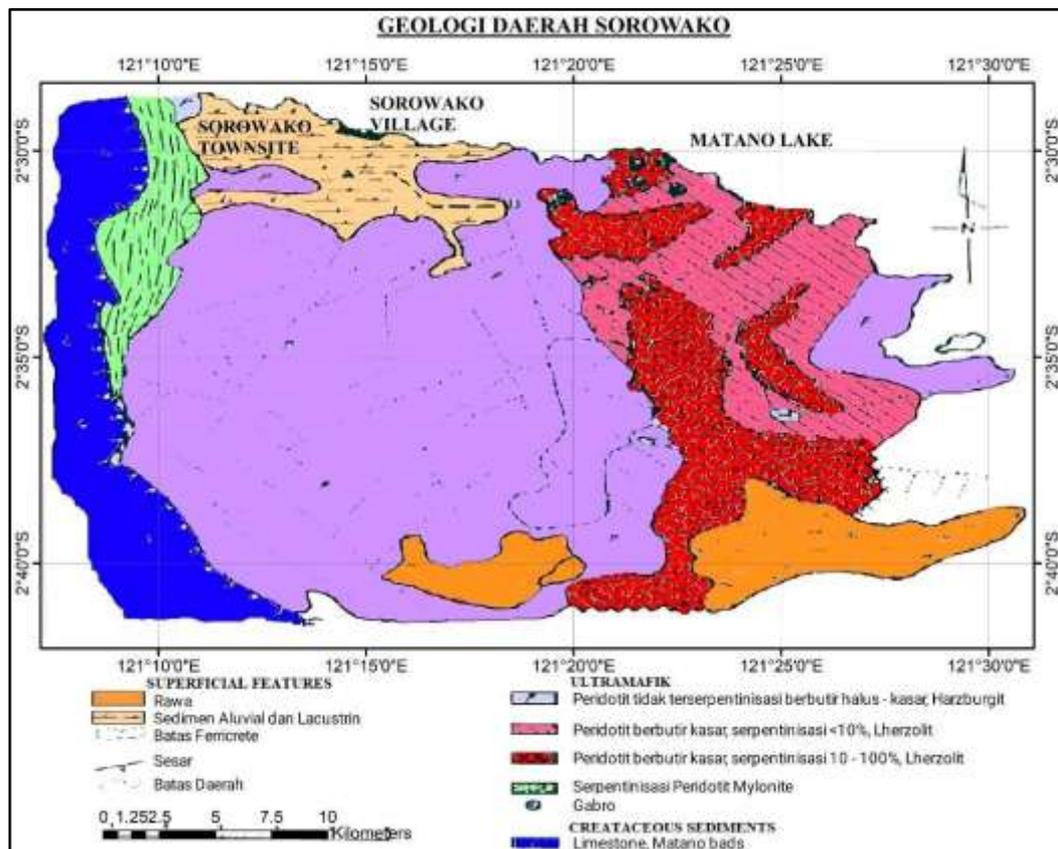
mineralogi batuan induk. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa kadar nikel tertinggi biasanya ditemukan di lapisan saprolit dengan nilai mencapai lebih dari 2%.

Wilayah Maluku, penelitian oleh Utomo (2019) menyatakan bahwa endapan nikel laterit di Pulau Obi memiliki karakteristik yang unik dibandingkan dengan daerah lain di Indonesia. Lapisan limonit di Pulau Obi cenderung lebih tebal dan mengandung kadar besi yang lebih tinggi, sementara lapisan saprolit memiliki kadar nikel yang lebih stabil. Nikel laterit memiliki peran yang sangat penting dalam industri pertambangan global. Dengan perkiraan 70% dari cadangan nikel dunia berada dalam bentuk laterit, bijih ini menjadi sumber utama untuk produksi nikel, terutama untuk industri baja tahan karat dan baterai kendaraan Listrik (Chmielowski, 2022). Namun, pengolahan nikel laterit lebih rumit dibandingkan dengan nikel sulfida, karena kandungan nikel yang lebih rendah dan adanya elemen pengotor yang lebih tinggi, seperti besi dan aluminium, yang memerlukan teknologi ekstraksi yang lebih canggih dan biaya energi yang lebih tinggi (Scott, 2021).



Gambar 2 Peta geologi regional Pulau Sulawesi (Kadarusman dkk, 2004)

Pengolahan nikel laterit di Indonesia umumnya menggunakan dua metode utama, yaitu hidrometalurgi dan pirometalurgi. Penelitian oleh Wijaya (2017) menunjukkan bahwa metode hidrometalurgi lebih efektif digunakan pada lapisan limonit yang kaya akan besi, sementara metode pirometalurgi lebih sesuai untuk lapisan saprolit yang memiliki kandungan nikel lebih tinggi. Selain itu, penelitian ini juga menyoroti tantangan lingkungan yang dihadapi dalam pengolahan nikel laterit, termasuk masalah emisi gas rumah kaca dan pengelolaan limbah tailing (Yudistira, 2018).



Gambar 3 Geologi regional Sorowako (Golightly, 1979)

Pada tingkat global, studi tentang nikel laterit juga banyak dilakukan di negara-negara seperti Australia dan Filipina. Penelitian oleh Brand *et al.* (2014) di Australia menunjukkan bahwa endapan nikel laterit di negara tersebut terutama ditemukan di wilayah Kalgoorlie dan Murrin Murrin, dengan karakteristik mineralogi yang mirip dengan endapan di Indonesia. Studi tersebut juga mengembangkan teknologi pengolahan yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem, yang dapat diadopsi dalam industri pengolahan nikel di Indonesia (Mahardika, 2020).

2.1.1. Proses Pembentukan Nikel Laterit

Nikel laterit terbentuk melalui proses pelapukan kimiawi yang terjadi pada batuan ultramafik, khususnya peridotit dan serpentin, yang memiliki kandungan magnesium silikat tinggi. Proses pelapukan ini umumnya terjadi di daerah tropis yang memiliki suhu tinggi dan curah hujan yang intens, sehingga memungkinkan terjadinya pelindian (*leaching*) dan pengayaan unsur-unsur tertentu, termasuk nikel (Yulianto, 2017). Dalam proses ini, mineral-mineral primer seperti olivin, piroksen, dan serpentin mengalami dekomposisi, yang kemudian melepaskan unsur nikel dan besi ke dalam larutan tanah. Unsur-unsur ini kemudian terakumulasi di lapisan tanah atas sebagai hasil dari proses pelindian selektif (Handoko, 2018).

Proses pembentukan nikel laterit umumnya terbagi menjadi tiga tahap utama: (1) pelapukan batuan ultramafik, (2) pengayaan unsur nikel, dan (3) pembentukan lapisan limonit dan saprolit. Pada tahap pertama, pelapukan batuan induk menyebabkan lepasnya magnesium dan silika dari mineral-mineral yang ada, sementara nikel dan besi cenderung tertinggal dalam residu pelapukan (Setiawan, 2016). Pada tahap kedua, unsur nikel yang terlarut dapat bergerak ke bawah bersama dengan air infiltrasi dan mengalami pengendapan di lapisan bawah tanah, yang pada akhirnya mengarah pada pembentukan zona saprolit yang kaya akan nikel (Handoko, 2018).

Lapisan limonit, yang terbentuk di atas lapisan saprolit, adalah hasil dari pengayaan besi (Fe) yang terjadi akibat oksidasi mineral-mineral besi selama proses pelapukan (Kusuma, 2020). Penelitian oleh Surono (2018) menunjukkan bahwa lapisan limonit di daerah tropis dapat mencapai ketebalan hingga 10 meter, tergantung pada tingkat pelapukan dan kondisi iklim setempat. Sementara itu, lapisan saprolit, yang berada di bawah limonit, memiliki tekstur yang lebih lempung dan mengandung konsentrasi nikel yang lebih tinggi. Lapisan ini terbentuk akibat proses konsentrasi nikel yang terjadi ketika air hujan melarutkan nikel dari lapisan atas dan mengendapkannya di lapisan bawah (Munandar, 2019).

Di Indonesia, proses pembentukan nikel laterit banyak dipengaruhi oleh faktor-faktor geologi dan klimatologi, termasuk tipe batuan induk, intensitas curah hujan, dan suhu. Penelitian yang dilakukan oleh Supriyanto (2017) menunjukkan bahwa di wilayah Sulawesi, batuan ultramafik yang kaya akan olivin dan serpentin

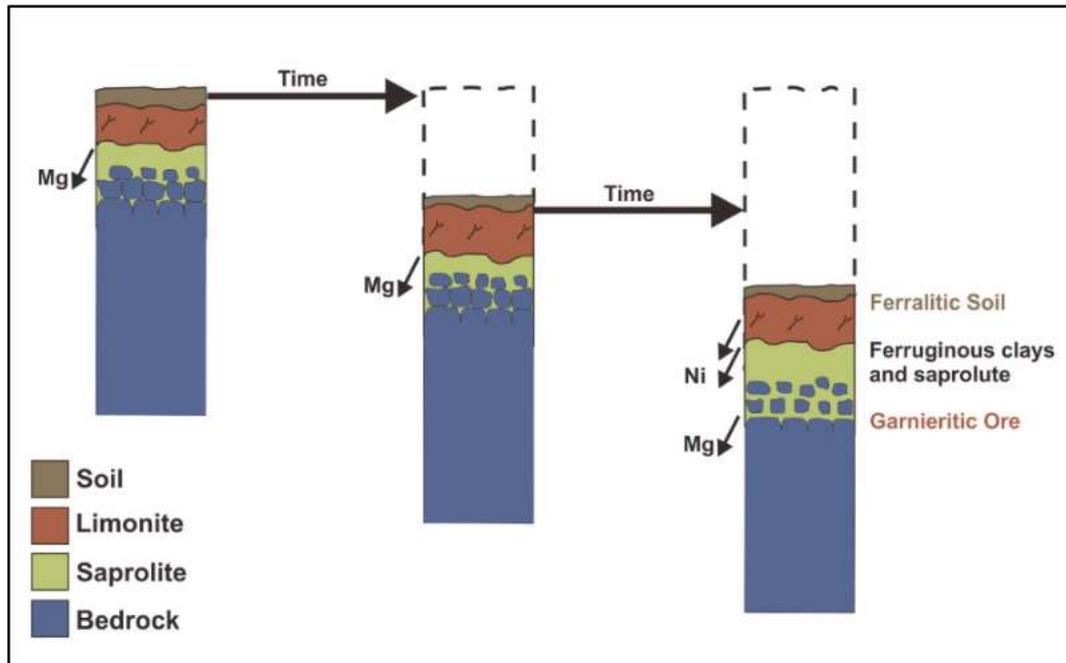
menjadi batuan induk utama bagi pembentukan nikel laterit, dengan kondisi iklim yang mendukung terjadinya pelapukan yang intens. Selain itu, penelitian tersebut juga mengungkapkan bahwa keberadaan patahan geologis dan topografi yang bervariasi turut memengaruhi pola pelapukan dan pembentukan endapan nikel laterit di wilayah tersebut (Arifin, 2018).

Proses pembentukan nikel laterit juga sangat bergantung pada stabilitas kimia mineral-mineral yang ada dalam batuan induk. Studi oleh Hermawan (2019) mengindikasikan bahwa mineral olivin, yang umum ditemukan dalam batuan peridotit, memiliki ketahanan yang lebih rendah terhadap pelapukan dibandingkan dengan mineral lain seperti piroksen, sehingga menghasilkan pelapukan yang lebih cepat dan pengayaan nikel yang lebih efektif. Proses ini pada akhirnya menghasilkan zona pelapukan yang kompleks, di mana nikel dapat terkonsentrasi dalam jumlah yang signifikan (Ismail, 2020).

Pelapukan batuan ultramafik adalah proses kimiawi dan fisik yang menguraikan mineral-mineral utama dalam batuan tersebut, seperti olivin, piroksen, dan serpentinit, menjadi material yang lebih stabil di permukaan bumi. Batuan ultramafik, yang memiliki kandungan magnesium dan besi yang tinggi, terutama ditemukan dalam bentuk peridotit, harzburgit, dan dunite. Proses pelapukan ini sangat penting dalam pembentukan endapan nikel laterit, di mana unsur nikel yang terkandung dalam mineral-mineral batuan ultramafik terlepas dan terakumulasi di dalam tanah (Suryana, 2016). Proses pelapukan dimulai dengan reaksi antara air hujan, yang mengandung asam karbonat dan oksigen, dengan mineral-mineral yang ada dalam batuan ultramafik. Reaksi ini menyebabkan dekomposisi mineral-mineral primer seperti olivin dan serpentinit. Olivin, sebagai salah satu mineral utama dalam peridotit, mengalami pelapukan lebih cepat dibandingkan dengan mineral lainnya karena kandungan besi dan magnesium yang tinggi. Reaksi pelapukan ini menghasilkan larutan yang mengandung ion magnesium dan silika, sementara nikel dan besi cenderung tertinggal dalam residu pelapukan (Iskandar, 2017).

Konteks pembentukan nikel laterit, pelapukan batuan ultramafik di daerah tropis memiliki peran yang sangat signifikan. Penelitian oleh Suwandi (2017) menunjukkan bahwa curah hujan yang tinggi dan suhu yang hangat mempercepat

proses pelapukan, sehingga mempercepat pelepasan ion nikel dari mineral-mineral ultramafik. Di Indonesia, khususnya di wilayah Sulawesi, batuan ultramafik seperti peridotit dan serpentinit merupakan batuan induk utama dalam pembentukan endapan nikel laterit. Proses pelapukan intensif yang terjadi di wilayah ini mengarah pada pembentukan lapisan tanah yang kaya akan nikel dan besi (Sutrisno, 2018).

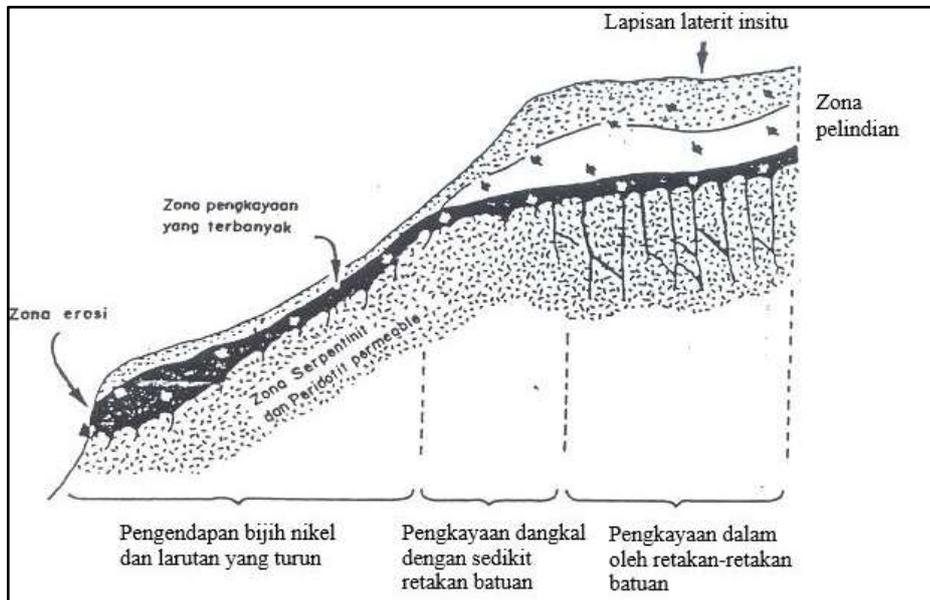


Gambar 4 Proses pelapukan endapan nikel laterit

Faktor-faktor geokimia seperti pH tanah, konsentrasi ion, dan ketersediaan air juga memengaruhi laju pelapukan batuan ultramafik. Studi oleh Setiawan (2018) menemukan bahwa lingkungan tanah dengan pH rendah cenderung meningkatkan laju pelapukan olivin, menghasilkan pelindian yang lebih efektif dan pengayaan nikel di zona pelapukan. Selain itu, oksidasi besi selama pelapukan juga memainkan peran penting dalam pembentukan lapisan limonit, yang merupakan salah satu lapisan utama dalam endapan nikel laterit (Yuliani, 2019).

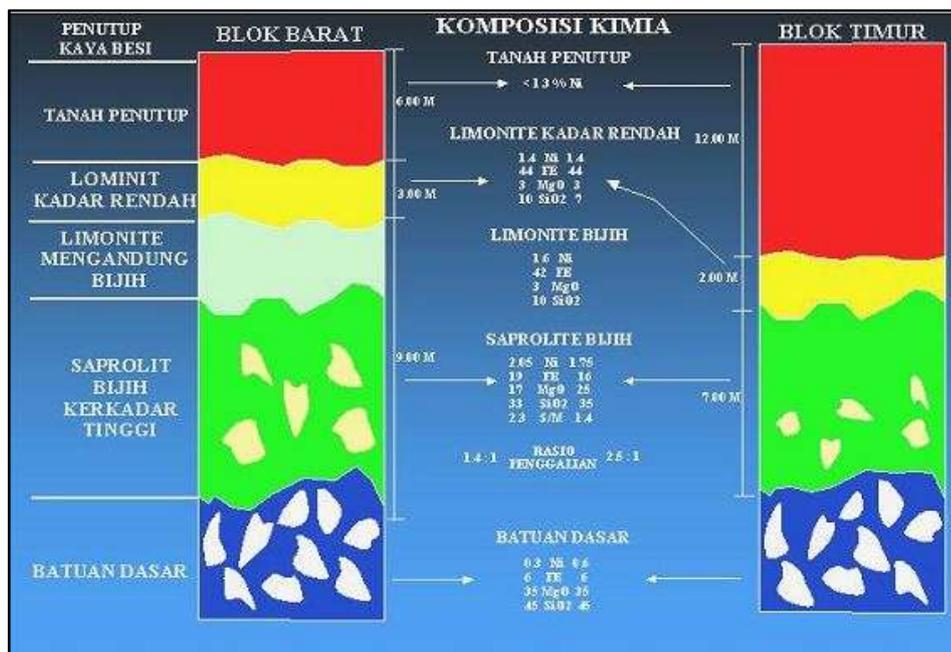
Di daerah dengan iklim tropis, pelapukan batuan ultramafik dapat menghasilkan profil tanah yang sangat tebal, terdiri dari lapisan-lapisan tanah dengan karakteristik kimia dan mineralogi yang berbeda. Penelitian oleh Haris (2019) menunjukkan bahwa di wilayah Papua, pelapukan batuan ultramafik dapat menghasilkan profil pelapukan dengan ketebalan lebih dari 30 meter, di mana nikel terkonsentrasi dalam lapisan saprolit di bagian bawah profil tersebut. Proses

pelapukan yang berlangsung selama ribuan hingga jutaan tahun ini juga berperan penting dalam menentukan kualitas dan kuantitas endapan nikel laterit yang terbentuk (Wahyudi, 2020).



Gambar 5 Penampang tegak endapan nikel laterit (Golightly, 1979)

Secara umum, pelapukan batuan ultramafik adalah proses yang kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor geologi dan iklim. Pemahaman yang mendalam tentang proses ini sangat penting untuk eksplorasi dan eksploitasi endapan nikel laterit, terutama dalam konteks pengembangan industri nikel di Indonesia yang memiliki cadangan nikel laterit yang melimpah (Nugraha, 2021).



Gambar 6 Penampang umum nikel laterit Sorowako (osborne & waraspati, 1986)

2.1.2. Pembentukan Profil Endapan Laterit : Limonit dan Saprolit

Pembentukan profil endapan nikel laterit, khususnya lapisan limonit dan saprolit, merupakan hasil dari proses pelapukan intensif yang terjadi pada batuan ultramafik di lingkungan tropis. Profil laterit adalah struktur tanah yang terbentuk melalui pelapukan kimiawi, di mana unsur-unsur seperti silika, magnesia, dan alkali terlepas dari batuan induk, sementara oksida besi, alumina, dan nikel terkonsentrasi. Proses ini menghasilkan dua lapisan utama: limonit di bagian atas dan saprolit di bagian bawah (Suryana, 2016).

1. Lapisan Limonit: Lapisan limonit merupakan bagian atas dari profil laterit yang kaya akan oksida besi dan rendah akan silika. Pembentukan lapisan ini dimulai ketika batuan ultramafik mengalami pelapukan kimiawi di lingkungan yang memiliki pH rendah dan kaya akan oksigen. Unsur-unsur seperti besi, yang merupakan salah satu komponen utama dalam mineral olivin dan piroksen, teroksidasi dan mengendap sebagai oksida besi, seperti goetit dan hematit (Putra, 2017). Penelitian oleh Hartanto (2018) menunjukkan bahwa lapisan limonit di daerah Sulawesi memiliki ketebalan bervariasi, tergantung pada intensitas pelapukan dan sifat geokimia lingkungan setempat, dengan ketebalan mencapai hingga 10 meter di beberapa lokasi. Lapisan limonit biasanya memiliki warna coklat hingga merah karena tingginya kandungan oksida besi. Kandungan nikel dalam lapisan ini umumnya lebih rendah dibandingkan dengan lapisan saprolit, namun tetap memiliki nilai ekonomi, terutama untuk proses hidrometalurgi. Selain besi, lapisan ini juga dapat mengandung aluminium, mangan, dan kobalt, yang terkonsentrasi selama proses pelapukan (Riyadi, 2019). Penelitian oleh Suwito (2019) mengungkapkan bahwa variasi ketebalan dan komposisi lapisan limonit dapat digunakan sebagai indikator untuk menentukan kondisi paleoklimat selama pembentukan profil laterit.

2. Lapisan Saprolit

Lapisan saprolit berada di bawah lapisan limonit dan merupakan hasil pelapukan yang lebih lanjut dari batuan ultramafik. Saprolit terdiri dari mineral-mineral sisa yang relatif kaya akan silika dan magnesium, dengan tekstur yang lebih lunak dibandingkan dengan batuan induk aslinya.

Lapisan ini terbentuk ketika air infiltrasi yang mengandung nikel bergerak ke bawah dari lapisan limonit dan mengalami pengendapan di zona saprolit (Kusnadi, 2020). Kandungan nikel dalam lapisan saprolit umumnya lebih tinggi daripada di limonit, yang membuatnya lebih berharga secara ekonomis untuk ekstraksi nikel (Rahman, 2020). Lapisan saprolit memiliki warna yang bervariasi dari hijau hingga abu-abu, tergantung pada komposisi mineralogi dan tingkat pelapukan. Penelitian oleh Yuliani (2017) menunjukkan bahwa lapisan saprolit di Pulau Halmahera memiliki kandungan nikel rata-rata lebih dari 1,8%, dengan ketebalan mencapai 20 meter di beberapa area. Variasi ketebalan dan kandungan nikel dalam lapisan saprolit seringkali dipengaruhi oleh faktor-faktor geologis seperti topografi, drainase, dan jenis batuan induk (Wijaya, 2018).

3. Pembentukan Profil Laterit

Proses pembentukan profil laterit dimulai dengan pelapukan batuan ultramafik di permukaan bumi, yang menghasilkan pelepasan unsur-unsur seperti magnesium dan silika, sementara besi dan nikel tertinggal dalam residu. Seiring waktu, proses pelapukan ini menghasilkan dua zona utama: limonit di bagian atas, di mana oksida besi mendominasi, dan saprolit di bawahnya, di mana nikel terkonsentrasi lebih banyak (Mahendra, 2020). Proses pelapukan yang terus-menerus ini berlangsung selama ribuan hingga jutaan tahun, membentuk profil tanah yang tebal dan kaya akan unsur-unsur logam.

Kondisi iklim tropis dengan curah hujan tinggi dan suhu yang konstan sepanjang tahun merupakan faktor kunci dalam pembentukan profil laterit. Penelitian oleh Rahmawati (2020) menekankan pentingnya curah hujan dalam proses pelindian nikel dari lapisan limonit ke saprolit, serta pengaruh topografi yang memengaruhi distribusi ketebalan profil endapan nikel laterit. Profil endapan nikel laterit yang terbentuk di daerah-daerah ini sering kali memiliki potensi besar sebagai sumber daya mineral, terutama untuk ekstraksi bijih nikel, yang merupakan salah satu logam penting dalam industri modern (Sutarto, 2021).

2.1.3. Variasi Regional dalam Pembentukan Nikel Laterit

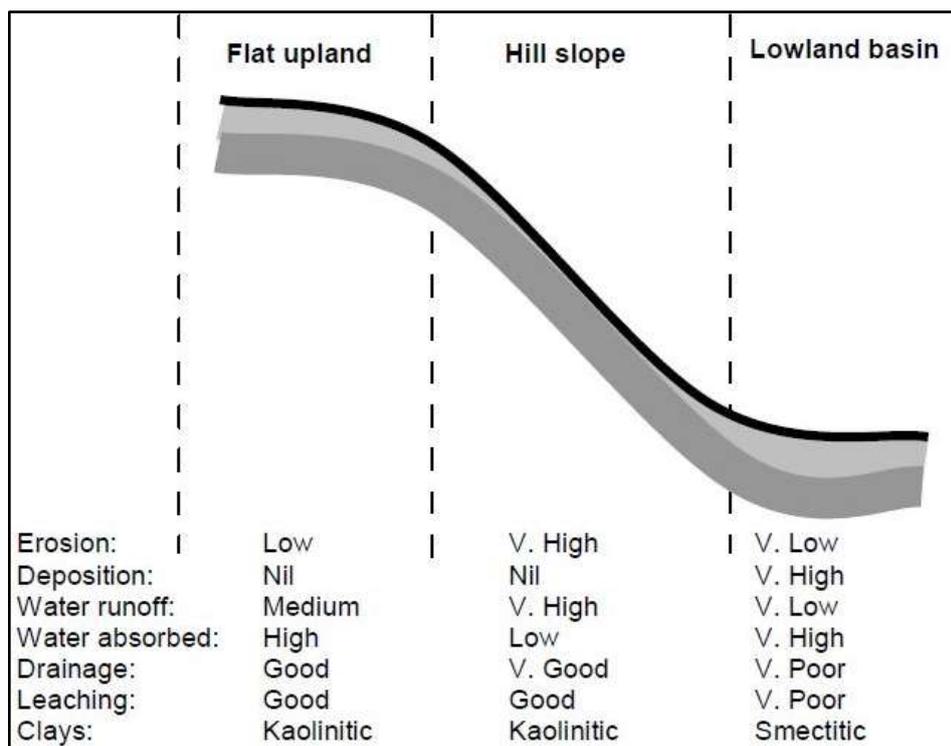
Pembentukan Pembentukan nikel laterit sangat dipengaruhi oleh variasi regional yang mencakup kondisi geologi, iklim, topografi, dan waktu pelapukan. Setiap faktor tersebut berperan dalam menentukan karakteristik endapan nikel laterit di berbagai wilayah. Di Indonesia, yang merupakan salah satu negara dengan cadangan nikel laterit terbesar di dunia, variasi ini sangat signifikan karena kondisi geografis dan iklim yang berbeda-beda di setiap pulau (Widiatmoko, 2018).

1. Faktor Geologi

Geologi regional memainkan peran penting dalam pembentukan nikel laterit. Batuan ultramafik, terutama peridotit dan serpentinit, menjadi batuan induk utama dalam pembentukan nikel laterit. Komposisi mineral dari batuan induk ini menentukan kandungan nikel awal yang tersedia untuk pelapukan. Penelitian oleh Supriyadi (2018) menunjukkan bahwa di Sulawesi, peridotit yang kaya akan olivin merupakan batuan induk utama yang mendukung pembentukan endapan nikel laterit dengan kandungan nikel yang tinggi. Di Halmahera, batuan serpentinit yang lebih dominan menghasilkan profil laterit dengan karakteristik yang berbeda, terutama dalam hal ketebalan dan kandungan nikel di lapisan saprolite (Putra, 2019).

2. Variasi Iklim

Iklim merupakan faktor kunci yang mempengaruhi laju dan intensitas pelapukan, yang pada akhirnya menentukan seberapa cepat nikel dapat dilepaskan dari batuan induk dan terkonsentrasi di dalam profil laterit. Wilayah tropis dengan curah hujan tinggi dan suhu yang stabil sepanjang tahun seperti di Sulawesi, Papua, dan Halmahera memiliki kondisi ideal untuk pembentukan nikel laterit. Penelitian oleh Wijaya (2018) menunjukkan bahwa wilayah dengan curah hujan lebih tinggi cenderung memiliki lapisan limonit yang lebih tebal, karena proses pelapukan yang lebih intensif. Di sisi lain, di daerah dengan curah hujan yang lebih rendah, seperti beberapa bagian Papua Barat, lapisan saprolit mungkin lebih dominan karena pelindian yang kurang intensif, memungkinkan nikel untuk tetap terkonsentrasi di lapisan bawah (Santoso, 2020).



Gambar 7 Hubungan topografi terhadap proses lateritisasi (Waheed, 2006)

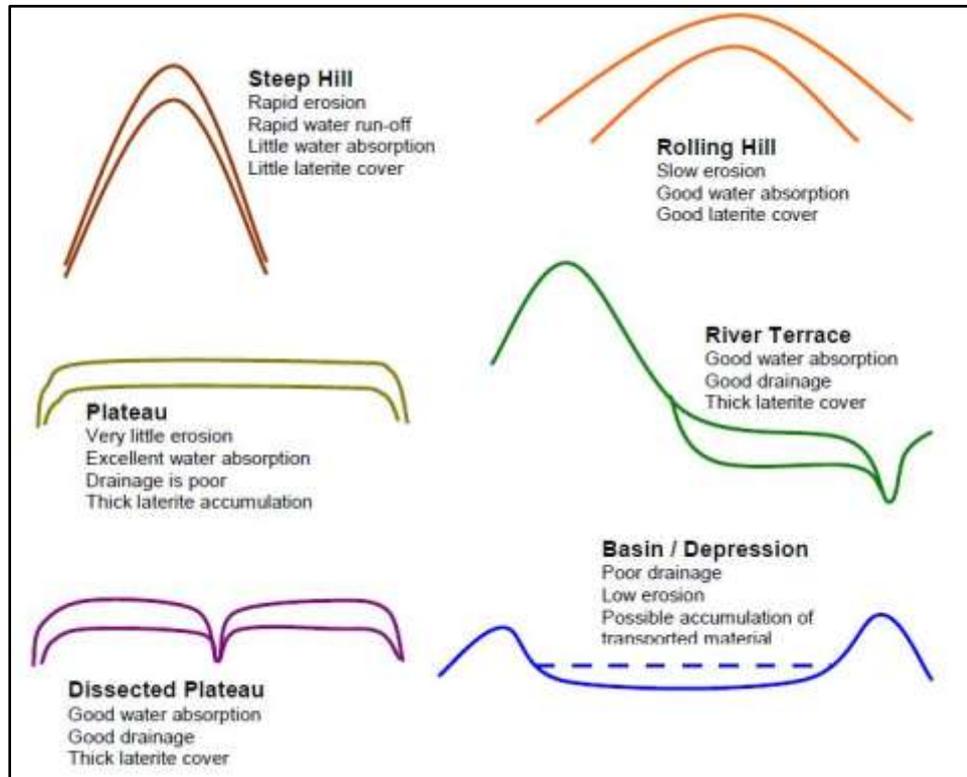
3. Topografi dan Drainase

Topografi dan pola drainase juga mempengaruhi distribusi dan ketebalan profil laterit. Daerah dengan topografi yang curam cenderung mengalami erosi yang lebih cepat, yang dapat mengurangi ketebalan profil laterit dan memengaruhi distribusi nikel di dalam tanah. Penelitian oleh Ismail (2020) mengungkapkan bahwa di daerah dengan topografi bergelombang, seperti di Sulawesi Tenggara, profil laterit sering kali terfragmentasi, menghasilkan variasi dalam ketebalan lapisan limonit dan saprolit dalam jarak yang relatif dekat. Sebaliknya, di dataran rendah dengan drainase yang buruk, air yang tergenang dapat memperlambat proses pelapukan dan menyebabkan akumulasi nikel di zona saprolit yang lebih dalam (Suryani, 2021).

4. Waktu Pelapukan

Durasi pelapukan juga menjadi faktor yang signifikan dalam pembentukan nikel laterit. Semakin lama batuan ultramafik terpapar pada kondisi pelapukan, semakin tebal profil laterit yang terbentuk. Penelitian oleh Suwandi (2021) menunjukkan bahwa di Papua, profil laterit yang terbentuk selama periode geologis yang lebih panjang memiliki kandungan nikel yang lebih tinggi dan lapisan saprolit yang lebih tebal, dibandingkan dengan

wilayah-wilayah lain yang mengalami pelapukan dalam waktu yang lebih singkat. Variasi waktu ini juga dapat menyebabkan perbedaan dalam tingkat pengayaan nikel antara lapisan limonit dan saprolit di berbagai wilayah (Arifin, 2020)



Gambar 8 Klasifikasi sederhana antara bentuk lahan dan proses lateritisasi (Waheed, 2006)

5. Variasi di Indonesia

Indonesia memiliki variasi regional yang mencolok dalam pembentukan nikel laterit. Misalnya, di Sulawesi, peridotit yang melimpah dan kondisi iklim tropis yang basah mendukung pembentukan profil laterit yang kaya nikel dengan ketebalan yang signifikan (Haris, 2019). Di Halmahera, meskipun juga berada di zona tropis, perbedaan dalam komposisi batuan induk dan pengaruh aktivitas tektonik menyebabkan variasi dalam distribusi dan kualitas endapan nikel laterit (Nugraha, 2021). Di Papua, topografi yang bervariasi dari dataran tinggi hingga rendah, serta pengaruh iklim yang berbeda, menghasilkan profil laterit yang kompleks dengan variasi ketebalan dan kandungan nikel yang berbeda di berbagai Lokasi (Kusuma, 2020).

Tabel 1 Modifikasi klasifikasi kelas lereng

Kelas Lereng	Kondisi Alamiah
0°-2°	Datar -Hampir Datar
2°-4°	Landai
4°-8°	Miring
8°-16°	Agak Curam
16°-35°	Curam
35°-55°	Sangat Curam
>55 °	Curam Sekali

Sumber:(Van Zuidam, 1979)

2.1.4. Karakteristik Limonit dan Saprolit

Limonit dan saprolit adalah dua lapisan utama dalam profil laterit yang memiliki karakteristik mineralogi, kimia, dan fisik yang berbeda. Kedua lapisan ini terbentuk melalui proses pelapukan batuan ultramafik dan memiliki peran penting dalam pembentukan endapan nikel laterit. Pemahaman tentang karakteristik limonit dan saprolit sangat penting dalam konteks eksplorasi dan penambangan nikel, karena kedua lapisan ini memiliki nilai ekonomi yang berbeda.

1. Karakteristik Limonit

Ada beberapa karakteristik pada lapisan limonit yakni;

a. Mineralogi dan Warna

Lapisan limonit terbentuk di bagian atas profil laterit dan terdiri dari oksida besi yang dominan, seperti goethite, hematit, dan lepidokrosit. Warna lapisan ini biasanya coklat hingga merah tua, yang disebabkan oleh tingginya kandungan besi oksida. Limonit umumnya memiliki tekstur yang lebih lunak dan lebih rapuh dibandingkan dengan saprolit, dan seringkali mengandung porositas yang tinggi akibat pelapukan intensif yang menghilangkan mineral silikat (Suryana, 2016).

b. Komposisi Kimia

Secara kimia, limonit kaya akan oksida besi (Fe_2O_3) dan rendah akan silika (SiO_2) dan magnesia (MgO). Selain besi, limonit juga mengandung nikel, namun kandungan nikel dalam lapisan ini biasanya lebih rendah dibandingkan dengan saprolit. Penelitian di Sulawesi oleh Sutrisno (2018) menunjukkan bahwa kandungan nikel dalam lapisan

limonit berkisar antara 0,8% hingga 1,2%, yang masih dapat dimanfaatkan melalui proses hidrometalurgi. Selain nikel, limonit juga dapat mengandung unsur-unsur minor seperti kobalt, aluminium, dan mangan, yang terkonsentrasi selama proses pelapukan (Suryana, 2019).

c. Kekuatan Mekanis

Kekuatan mekanis limonit relatif rendah dibandingkan dengan saprolit. Lapisan ini seringkali lebih mudah dihancurkan dan mengalami erosi karena teksturnya yang gembur dan kandungan air yang tinggi. Namun, porositas yang tinggi ini juga memungkinkan air dan larutan kimiawi untuk dengan mudah meresap ke dalam tanah, yang mempercepat proses pelapukan lebih lanjut dan pelindian unsur-unsur logam seperti nikel (Hartono, 2018).

2. Karakteristik Saprolit

Ada beberapa karakteristik pada lapisan limonit yakni;

d. Mineralogi dan Warna

Saprolit terbentuk di bawah lapisan limonit dan terdiri dari mineral-mineral sisa hasil pelapukan yang belum sepenuhnya terdekomposisi, seperti serpentin, olivin, dan piroksen. Warna saprolit cenderung lebih bervariasi, dari hijau, abu-abu hingga coklat kekuningan, tergantung pada komposisi mineralogi dan tingkat pelapukan (Widodo, 2017). Karena saprolit merupakan lapisan transisi antara batuan induk dan limonit, mineral-mineral dalam saprolit sering kali masih menunjukkan struktur kristalin yang utuh meskipun telah mengalami alterasi.

e. Komposisi Kimia

Saprolit lebih kaya akan nikel dibandingkan dengan limonit, dengan kandungan nikel berkisar antara 1,5% hingga 2,5%. Kandungan silika dan magnesia dalam saprolit juga lebih tinggi karena adanya mineral-mineral primer yang masih tersisa. Di Indonesia, penelitian oleh Yuliani (2017) menunjukkan bahwa lapisan saprolit di Pulau Halmahera memiliki kandungan nikel rata-rata sekitar 1,8%, yang menjadikannya lebih bernilai untuk ekstraksi nikel melalui proses pirometalurgi atau kombinasi pirometalurgi dan hidrometalurgi.

2.1.5. Klasifikasi Endapan Nikel Laterit

Nikel laterit adalah salah satu sumber utama nikel di dunia dan terbentuk melalui proses pelapukan batuan ultramafik. Klasifikasi nikel laterit didasarkan pada karakteristik geologi, mineralogi, dan kimia dari lapisan-lapisan yang membentuk profil laterit. Memahami klasifikasi ini penting dalam eksplorasi dan pengembangan tambang, karena setiap kelas nikel laterit memiliki metode pengolahan dan nilai ekonomi yang berbeda. Klasifikasi utama nikel laterit biasanya terbagi menjadi dua jenis besar: limonit dan saprolit, meskipun ada juga subklasifikasi lainnya yang lebih spesifik. Klasifikasi berdasarkan profil endapan nikel laterit sebagai:

1. Limonit

Limonit adalah lapisan atas dari profil nikel laterit, yang kaya akan oksida besi. Limonit umumnya terbentuk di lingkungan yang sangat teroksidasi dan memiliki kandungan besi (Fe) yang tinggi dengan kandungan nikel (Ni) yang lebih rendah. Limonit biasanya ditemukan pada kedalaman 10-20 meter dari permukaan tanah. Penelitian di Sulawesi menunjukkan bahwa lapisan limonit bisa memiliki kandungan nikel sekitar 0,8% hingga 1,5%, yang membuatnya cocok untuk diolah menggunakan teknologi hidrometalurgi, seperti HPAL (*High Pressure Acid Leaching*).

2. Saprolit

Saprolit terletak di bawah lapisan limonit dan merupakan hasil pelapukan lanjut dari batuan induk ultramafik. Saprolit memiliki kandungan nikel yang lebih tinggi, biasanya berkisar antara 1,5% hingga 2,5%, dan kaya akan mineral silikat seperti serpentin dan olivin. Warna lapisan ini bisa bervariasi dari kuning kehijauan hingga abu-abu, tergantung pada kandungan mineralogi yang ada. Saprolit sering kali diproses menggunakan metode pirometalurgi untuk memproduksi feronikel atau nikel matte.

3. Zona Transisi

Antara limonit dan saprolit, terdapat zona transisi yang mengandung campuran karakteristik dari kedua lapisan tersebut. Zona ini memiliki variasi kandungan nikel yang cukup lebar dan sering dianggap sebagai lapisan dengan potensi ekonomis menengah. Penelitian oleh Santoso (2020) di

Halmahera menunjukkan bahwa zona transisi dapat memiliki kandungan nikel yang bervariasi antara 1,0% hingga 2,0%, tergantung pada derajat pelapukan dan komposisi mineral awal.

2.1.6. Klasifikasi Berdasarkan Kandungan Mineral

Beberapa klasifikasi kandungan mineral pada nikel

1. Laterit Oksida

Laterit oksida adalah endapan yang didominasi oleh mineral oksida, terutama hematit dan goethite, yang terbentuk di lingkungan tropis dengan kondisi pelapukan yang sangat intens. Endapan ini kaya akan besi tetapi memiliki kandungan nikel yang relatif lebih rendah. Sebagian besar nikel dalam laterit oksida terkonsentrasi dalam limonit, yang umumnya diolah melalui teknologi hidrometalurgi.

2. Laterit Silikat

Laterit silikat terutama terdiri dari mineral silikat, seperti serpentin dan olivin, dan terbentuk di daerah di mana pelapukan kurang intens dibandingkan dengan pembentukan laterit oksida. Saprolit adalah contoh utama dari laterit silikat, yang memiliki kandungan nikel lebih tinggi dan lebih bernilai ekonomis untuk ekstraksi menggunakan metode pirometalurgi. Penelitian di Papua menunjukkan bahwa laterit silikat memiliki kandungan nikel yang dapat mencapai lebih dari 2% dalam kondisi optimal.

2.2. Metode Eksplorasi Nikel Laterit

Eksplorasi endapan nikel laterit sangat banyak dilakukan mulai dari fisika maupun kimia, berikut beberapa metode eksplorasi fisika.

2.2.1 Metode Eksplorasi Geofisika

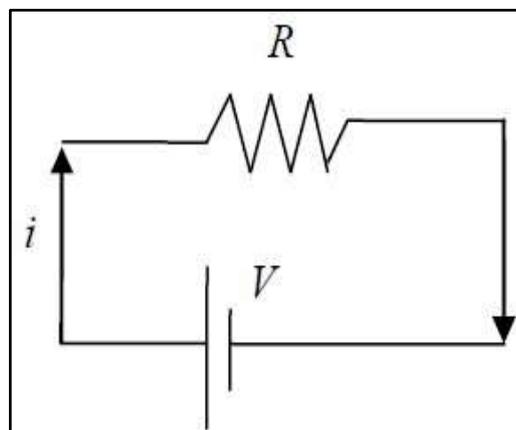
Metode geolistrik resistivitas merupakan salah satu dari metode geolistrik yang mempelajari sifat resistivitas dari lapisan batuan di dalam bumi. Pada metode ini arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua buah elektroda arus dan dilakukan pengukuran beda potensial melalui dua buah elektroda potensial, hasilnya berupa beda potensial yang terukur pada elektroda di permukaan. Dari beda potensial yang diukur dapat ditentukan variasi resistivitas masing masing lapisan di bawah titik pengukuran (Reynolds, 2005). Di dalam metode geolistrik resistivitas ini terdapat 2 macam metode dalam pengambilan datanya, yaitu: metode

geolistrik resistivitas mapping dan metode geolistrik resistivitas sounding. Metode resistivitas mapping merupakan metode resistivitas yang bertujuan untuk mempelajari variasi resistivitas lapisan tanah bawah permukaan secara horizontal. Sedangkan metode geolistrik resistivitas sounding bertujuan untuk mempelajari variasi resistivitas batuan di dalam permukaan bumi secara vertikal.

Konsep dasar metode resistivitas adalah Hukum Ohm. Pada tahun 1826 George Simon Ohm melakukan eksperimen menentukan hubungan antara tegangan V pada penghantar dan arus I yang melalui penghantar dalam batas-batas karakteristik parameter penghantar. Parameter itu disebut resistansi R , yang didefinisikan sebagai hasil bagi tegangan V dan arus, sehingga dituliskan (Manrulu dkk., 2018):

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

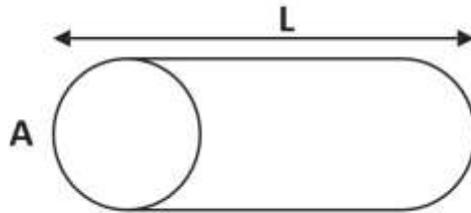
Dengan R adalah resistansi bahan (ohm), I adalah besar kuat arus (ampere), dan V adalah besar tegangan (volt). Hukum Ohm menyatakan bahwa potensial atau tegangan antara ujung-ujung penghantar adalah sama dengan hasil kali resistansi dan kuat arus. Hal ini diasumsikan bahwa R tidak tergantung I , bahwa R adalah konstan (tetap). Rangkaian resistansi, kuat arus, dan tegangan ditunjukkan oleh Gambar 9 (Manrulu dkk., 2018)



Gambar 9 Rangkaian resistansi (Manrulu, 2018)

Konduksi secara elektronik terjadi jika batuan atau mineral mempunyai banyak elektron bebas sehingga arus listrik dialirkan dalam batuan atau mineral oleh elektron-elektron bebas tersebut. Aliran listrik ini juga dipengaruhi oleh sifat atau karakteristik masing-masing batuan yang dilewatinya. Salah satu sifat atau karakteristik batuan tersebut adalah resistivitas (tahanan jenis). Resistivitas adalah karakteristik bahan yang menunjukkan kemampuan bahan

tersebut untuk menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu bahan maka semakin sulit bahan tersebut menghantarkan arus listrik. Sebaliknya, semakin rendah resistivitas bahan maka semakin mudah bahan tersebut menghantarkan arus listrik (Sulistiyowati, 2009). Konduksi secara elektronik dapat dijelaskan melalui sebuah silinder yang memiliki Panjang L , luas penampang A , dan resistensi R sebagaimana pada gambar berikut:



Gambar 10 Silinder Konduktor (Lowrie, 2007)

Berdasarkan silinder konduktor tersebut, maka didapat rumus sebagai berikut:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Keterangan:

ρ : resistivitas (Ωm)

L : Panjang silinder konduktor (m)

A : luas penampang silinder konduktor (m^2) R : resistensi (Ω)

Resistensi dirumuskan berdasarkan hukum ohm berikut:

$$R = \frac{V}{I}$$

Dimana:

R : resistensi (Ω)

V : beda potensial (volt)

I : kuat arus (ampere)

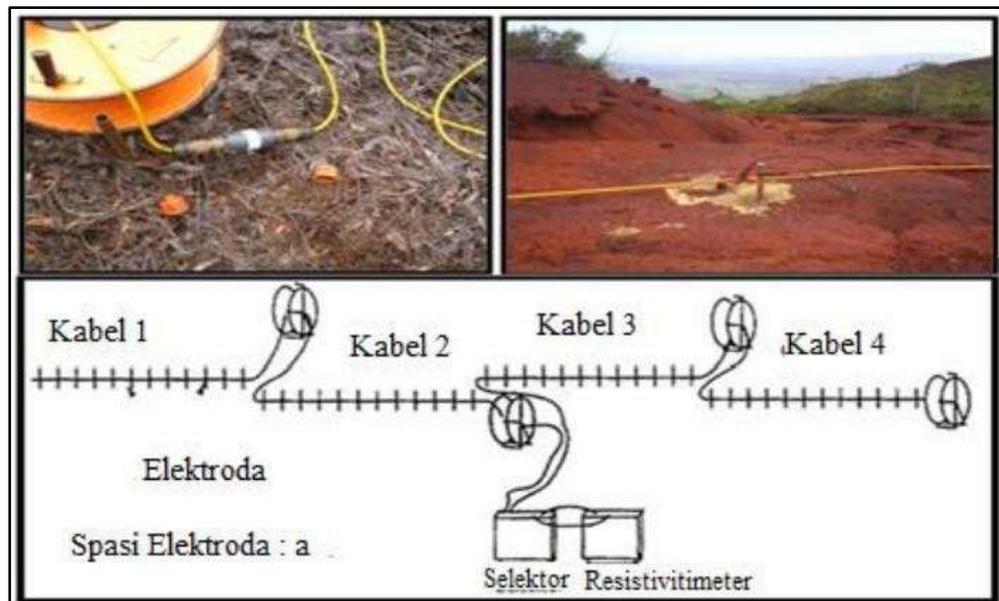
Rumus resistivitas (ρ) kemudian didapat berdasarkan kedua rumus di atas, yaitu:

$$\rho = \frac{VA}{IL}$$

Berdasarkan rumus resistivitas yang telah didapat tersebut dapat diketahui rumus konduktivitas, dimana konduktivitas batuan merupakan kebalikan dari resistivitas. Sehingga satuan yang digunakan adalah Ω/m .

1. Prinsip Dasar *Electrical Resistivity Tomography*

ERT 2D adalah kombinasi antara electrical sounding dan profiling. Prinsip ERT (Gambar 11) didasarkan pada penggunaan sistem multi-elektroda yang terbuat dari selektor elektroda dan multichannel sistem akuisisi yang memungkinkan koneksi dengan satu set elektroda yang tertanam dan terhubung ke resistivity meter. Resistivity meter terhubung ke laptop yang telah mempunyai program akuisisi secara berurut yang secara otomatis memilih nomor elektroda arus dan elektroda potensial (mengukur potensial). Setiap elektroda ditentukan oleh alamat numerik yang unik dalam sistem yang dapat diidentifikasi oleh komputer.



Gambar 11 Skema proses akuisisi ERT (Surawan, 2014)

Pengukuran ini dapat secara otomatis menyimpan data dari ratusan pengukuran single-channel. Data yang disajikan dalam bentuk penampang plot, yang diperoleh dengan menempatkan setiap nilai resistivitas semu pada penampang lintasan. Titik yang terletak dibawah elektroda ABMN dengan kedalaman setengah dari AB disebut dengan penampang kedalaman. Batas lapisan resistivitas yang sama pada beberapa kasus yang sama dapat memberikan penampang guna mendapatkan penampang resistivitas yang sebenarnya (Surawan, 2014).

2.2.2 Resistivitas dan Konduktivitas

Batuan dan mineral memiliki sifat fisika yang menunjukkan kemampuan bahan dalam menghantarkan listrik yang bervariasi. Hal ini bergantung pada tingkat konduktivitas dan resistivitas batuan. Resistivitas batuan adalah karakteristik bahan yang menunjukkan kemampuan bahan tersebut untuk menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu bahan maka akan semakin sulit bahan tersebut menghantarkan arus listrik. Sebaliknya semakin besar nilai konduktivitas batuan maka semakin mudah untuk menghantarkan arus listrik.

Resistivitas pada mineral-mineral logam nilainya berkisar $10^5 \Omega\text{m}$, batuan seperti gabbro berkisar $10^7 \Omega\text{m}$. Nilai resistivitas pada batuan lain dengan komposisi yang bermacam-macam akan bervariasi. Range resistivitas maksimum yang mungkin adalah dari $1,6 \times 10^8 \Omega\text{m}$ (perak asli) hingga $10^{16} \Omega\text{m}$ (belerang murni) (Sulistiyowati, 2009). Batuan yang memiliki resistivitas kurang dari $10^5 \Omega\text{m}$ disebut dengan konduktor, sedangkan yang memiliki nilai resistivitas lebih dari $10^7 \Omega\text{m}$ disebut dengan isolator. Berdasarkan nilai hambatan jenisnya, batuan dibedakan menjadi tiga, yaitu: a. Konduktor baik, yaitu batuan yang memiliki nilai resistivitas antara $10^{-8} < \rho < 1 \Omega\text{m}$. b. Konduktor pertengahan, yaitu batuan yang memiliki nilai resistivitas antara $1 < \rho < 10^7 \Omega\text{m}$. c. Isolator, yaitu batuan yang memiliki nilai resistivitas antara $\rho > 10^7 \Omega\text{m}$. Berikut dapat dilihat pada tabel 2 merupakan nilai resistivitas berbagai batuan menurut Telford (1990):

Tabel 2 Nilai Resistivitas Material-Material Bumi

Material	Resistivitas (Ωm)
Pirit	0,01-100
Kwarsa	$500-8 \times 10^5$
Kalsit	$10^{12}-10^{13}$
Batuan Garam	$30-10^{13}$
Granit	$200-10^5$
Andesit	$1,7 \times 10^2-45 \times 10^4$
Gamping	$500 - 10^4$
Batu Pasir	200-8000
Serpilh	20-2000
Pasir	1-1000
Lempung	1-100
Air Tanah	0,5-300
Air Asin	0,2
Kerikil Kering	$600-10^3$

Material	Resistivitas (Ωm)
Aluvium	10-800
Kerikil	100-600

Sumber: Telford et al., 1990

Nilai resistivitas profil endapan nikel laterit pada area sorowako blok timur terbagi menjadi tiga yaitu zona limonit, saprolit dan *bedrock*. Pada zona limonit memiliki nilai resistivitas berkisar 100 – 1000 Ωm , zona saprolit memiliki nilai resistivitas berkisar 20 – 300 Ωm dan zona *bedrock* memiliki nilai resistivitas >300 Ωm .

2.2.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Nilai Resistivitas Batuan

Tahanan jenis batuan yang ada di berbagai macam komposisi mineral di bumi tidak mempunyai harga tahanan jenis tertentu akan tetapi nilainya mempunyai jangkauan (*range*) tertentu. Secara teoritis setiap batuan mempunyai daya hantar listrik dan harga tahanan jenisnya masing - masing. Batuan yang sama belum tentu memiliki nilai tahanan jenis yang sama. Sebaliknya harga tahanan jenis yang sama bisa dimiliki oleh batuan yang berbeda jenis. Faktor faktor yang mempengaruhi nilai tahanan jenis antara lain: komposisi mineral pada batuan, kondisi batuan, komposisi benda cair pada batuan, dan faktor eksternal lainnya. Beberapa hal yang berpengaruh pada tahanan jenis suatu batuan adalah:

- a. Batuan sedimen yang bersifat lepas (urai) memiliki nilai tahanan jenis lebih rendah jika dibandingkan dengan batuan sedimen padat dan kompak.
- b. Batuan beku dan metamorf (ubahan) mempunyai nilai tahanan jenis yang tergolong tinggi.
- c. Batuan yang basah dan mengandung air, nilai tahanan jenisnya rendah, dan semakin lebih rendah lagi bila air yang dikandungnya bersifat payau atau asin.

Selain faktor tersebut dalam pengambilan data lapangan perlu diperhitungkan faktor luar seperti: kabel, tiang listrik, dan saluran pipa logam dapat mempengaruhi akurasi data lapangan.

2.2.4 Metode Pengukuran Geolistrik

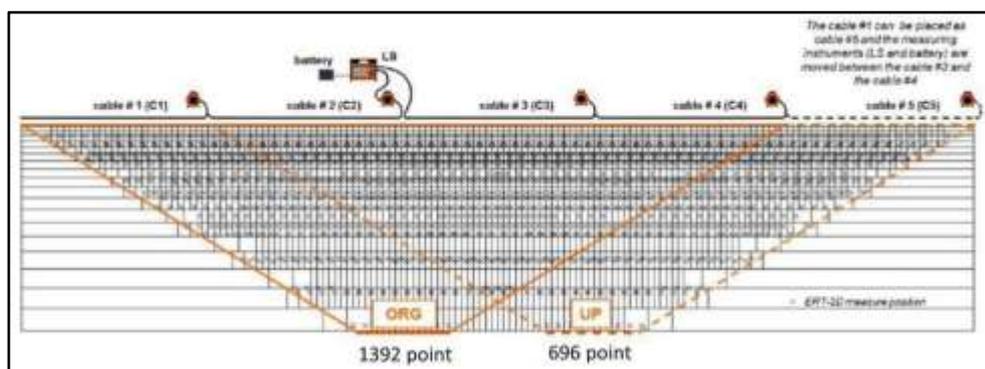
Metode geolistrik merupakan salah satu teknik geofisika yang digunakan untuk mengukur resistivitas atau tahanan jenis batuan di bawah permukaan tanah. Prinsip dasar dari metode ini adalah dengan menginjeksikan arus listrik ke dalam tanah melalui dua elektroda arus, kemudian mengukur tegangan yang muncul antara dua

elektroda potensial. Resistivitas bawah permukaan dapat dihitung berdasarkan hubungan antara arus, tegangan, dan jarak antar elektroda tersebut. Metode ini sangat efektif untuk mengidentifikasi lapisan bawah permukaan berdasarkan variasi resistivitasnya, yang seringkali berkaitan dengan perubahan litologi, kandungan air, dan mineralisasi (Taufik, 2016).

Pengukuran geolistrik umumnya dilakukan dengan menggunakan konfigurasi elektroda tertentu, seperti konfigurasi Schlumberger atau Wenner. Setiap konfigurasi memiliki kelebihan dan kekurangan, tergantung pada tujuan survei dan kondisi lapangan. Penelitian yang dilakukan oleh Rachman (2018) dari Universitas Gadjah Mada, menunjukkan bahwa konfigurasi Schlumberger sangat efektif digunakan pada daerah dengan variasi resistivitas yang besar antara lapisan, karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan vertikal resistivitas. Sebaliknya, konfigurasi Wenner lebih sensitif terhadap perubahan resistivitas lateral dan lebih cocok digunakan pada daerah dengan stratifikasi horisontal yang jelas.

1. Metode *Roll-Along*

Metode *roll-along* adalah teknik pengukuran geolistrik yang digunakan untuk mendapatkan wilayah pengukuran yang tidak terjangkau oleh bentangan kabel yang terbatas. Metode ini dilakukan dengan cara menggeser kabel ke beberapa satuan jarak elektroda untuk memperpanjang daerah cakupan sesuai lintasan target (Savin, 2015) dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12 Metode *roll-along* (Savin, 2015)

Dalam praktiknya, metode geolistrik dapat diaplikasikan pada berbagai studi geologi, seperti eksplorasi air tanah, eksplorasi mineral, serta kajian kestabilan lereng dan geoteknik. Studi oleh Pratama et al. (2019) dari Institut

Teknologi Bandung mengaplikasikan metode geolistrik untuk mengeksplorasi potensi air tanah di daerah karst. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode geolistrik dapat mengidentifikasi dengan baik zona-zona yang berpotensi sebagai akuifer, terutama pada daerah yang memiliki kontras resistivitas tinggi antara batuan penyusun akuifer dan lapisan impermeabel.

Metode geolistrik merupakan teknik eksplorasi geofisika yang digunakan untuk memetakan struktur bawah permukaan dengan mengukur resistivitas tanah dan batuan. Ada beberapa teknik pengukuran yang sering digunakan dalam metode geolistrik, yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangannya tergantung pada kondisi geologi dan tujuan survei.

- a. Konfigurasi *Wenner* adalah salah satu teknik yang paling umum digunakan dalam pengukuran geolistrik. Teknik ini melibatkan penempatan empat elektroda dalam satu garis lurus dengan jarak yang sama antara elektroda. Arus listrik disuntikkan melalui dua elektroda luar, sementara tegangan diukur antara dua elektroda dalam. Salah satu keunggulan dari konfigurasi *Wenner* adalah kemudahannya dalam pengaturan di lapangan dan kemampuan untuk memberikan hasil yang baik dalam survei resistivitas lateral, terutama untuk pemetaan dangkal (Taufik, 2016). Studi oleh Rachman (2018) dari Universitas Gadjah Mada menunjukkan bahwa konfigurasi ini efektif dalam mengidentifikasi variasi lateral resistivitas di daerah dengan stratifikasi yang jelas, seperti dalam eksplorasi mineral dangkal dan air tanah.
- b. Konfigurasi *Schlumberger* sering digunakan dalam survei yang memerlukan penetrasi lebih dalam dengan resolusi vertikal yang baik. Dalam konfigurasi ini, jarak antara elektroda arus diperluas secara bertahap sementara elektroda potensial tetap relatif dekat satu sama lain. Hal ini memungkinkan pengukuran resistivitas pada berbagai kedalaman, yang menjadikan teknik ini ideal untuk survei yang bertujuan mendeteksi variasi resistivitas vertikal, seperti dalam eksplorasi akuifer atau identifikasi lapisan batuan dasar (Wijaya, 2017). Penelitian oleh Pratama et al. (2019) dari Institut Teknologi Bandung menunjukkan bahwa konfigurasi *Schlumberger* mampu memberikan informasi mendalam

tentang distribusi resistivitas vertikal di daerah karst, yang penting dalam eksplorasi air tanah.

- c. Konfigurasi *Dipole-dipole* digunakan untuk mendeteksi variasi resistivitas lateral dan vertikal secara simultan. Teknik ini melibatkan penggunaan dua pasang elektroda arus dan potensial yang ditempatkan pada jarak tertentu, dengan jarak antar pasangan elektroda yang bisa diubah untuk mengukur resistivitas pada berbagai kedalaman. Konfigurasi ini sangat sensitif terhadap perubahan kecil dalam resistivitas dan sering digunakan dalam survei detail, terutama di daerah yang kompleks secara geologis (Setiawan, 2020). Studi oleh Setiawan *et al.* (2020) dari Universitas Hasanuddin menyoroti bahwa konfigurasi *Dipole-dipole* memberikan hasil yang akurat dalam pemetaan batas-batas zona mineralisasi pada endapan nikel laterit di Sulawesi Tenggara.

2.3. Prinsip dan Teori Dasar Metode Pengeboran Endapan Nikel Laterit

Beberapa prinsip serta teori dasar yang di dapat mengenai metode pengeboran endapan nikel laterit yakni:

2.3.1. Prinsip Dasar Pengeboran Endapan Nikel Laterit

Pengeboran adalah metode eksplorasi yang digunakan untuk mengakses dan mengambil sampel dari lapisan bawah tanah untuk analisis mineralogi dan penilaian sumberdaya. Dalam konteks nikel laterit, pengeboran bertujuan untuk mendapatkan data yang akurat mengenai kedalaman, ketebalan, dan kualitas deposit nikel yang ada di bawah permukaan. Ada beberapa metode pengeboran menurut (Harvey, 2021):

1. Pengeboran Inti (*Core Drilling*): Metode ini melibatkan penggunaan bit berlian untuk memotong inti batuan dari kedalaman tertentu. Sampel inti yang diambil memberikan informasi detail tentang lapisan geologi, struktur, dan komposisi mineral, termasuk kadar nikel dalam lapisan saprolit dan limonit³. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya untuk memberikan gambaran yang mendetail tentang mineralisasi dan kondisi geologi di bawah permukaan.

2. Pengeboran Terowongan (*Reverse Circulation Drilling*): Metode ini menggunakan udara bertekanan untuk mengangkat sampel dari dasar lubang bor ke permukaan. Teknik ini lebih cepat dan efisien untuk pengeboran di kedalaman yang lebih dangkal dan sering digunakan untuk eksplorasi awal dan pemetaan zona mineralisasi. *Reverse circulation drilling* memungkinkan pengambilan sampel yang cepat dan konsisten, serta memberikan data yang berguna untuk penilaian awal terhadap potensi deposit.

Teori dasar pengeboran melibatkan pemahaman tentang bagaimana alat pengebor berfungsi dan bagaimana teknik pengeboran mempengaruhi hasil eksplorasi. Prinsip dasar ini meliputi pemilihan bit pengebor, penentuan parameter pengeboran, dan manajemen sampel yang diambil (Bennett *et al*, 2021).

1. Pemilihan *Bit* Pengebor: *Bit* pengebor yang digunakan dalam pengeboran nikel laterit dirancang untuk memotong batuan dengan efisien. *Bit* berlian, misalnya, digunakan untuk pengeboran inti karena kemampuannya untuk memotong batuan keras dan memberikan sampel inti yang utuh dan representatif. Pemilihan bit yang tepat bergantung pada jenis batuan yang akan dibor dan tujuan eksplorasi.
2. Parameter Pengeboran: Parameter pengeboran seperti kecepatan putar, tekanan, dan laju aliran udara atau cairan pendingin mempengaruhi efisiensi pengeboran dan kualitas sampel yang diambil. Penyesuaian parameter ini penting untuk memastikan pengeboran yang efektif dan untuk meminimalkan kerusakan pada sampel yang diambil.
3. Manajemen Sampel: Pengambilan dan pengelolaan sampel yang baik sangat penting untuk memastikan bahwa data yang diperoleh akurat dan dapat diandalkan. Sampel harus diambil dengan cara yang konsisten dan disimpan dengan benar untuk analisis laboratorium. Proses ini melibatkan pencatatan kedalaman, lokasi, dan kondisi sampel yang diambil.

2.3.2. Teknik Pengeboran untuk Nikel Laterit

Teknik pengeboran untuk eksplorasi nikel laterit disesuaikan dengan kondisi geologi dan tujuan eksplorasi.

1. Pengeboran Terbuka: Untuk deposit nikel laterit yang berada dekat dengan permukaan, pengeboran terbuka dapat digunakan untuk mendapatkan sampel

dan mengevaluasi kualitas mineralisasi dengan cepat. Teknik ini juga sering digunakan untuk mengidentifikasi potensi deposit sebelum melanjutkan ke pengeboran yang lebih dalam.

2. Pengeboran Dalam (*Deep Drilling*): Untuk deposit yang lebih dalam, teknik pengeboran dalam dengan *bit* berlian digunakan untuk mendapatkan sampel dari kedalaman yang lebih besar. Teknik ini memungkinkan pemetaan yang lebih akurat dari lapisan mineral nikel yang dalam dan menyediakan data yang diperlukan untuk penilaian cadangan dan perencanaan ekstraksi.

2.4. Interpretasi Data Geolistrik dan Pengeboran untuk Identifikasi Limonit dan Saprolit

Identifikasi dan eksplorasi endapan nikel laterit memerlukan kombinasi dari beberapa metode geofisika dan geologi, di antaranya adalah metode geolistrik dan pengeboran. Kedua metode ini memberikan data yang saling melengkapi, yang sangat penting untuk pemodelan endapan nikel laterit secara akurat.

2.4.1. Interpretasi Data Geolistrik

Metode geolistrik sering digunakan dalam eksplorasi nikel laterit karena kemampuannya untuk memetakan variasi resistivitas di bawah permukaan yang berkorelasi dengan distribusi mineral. Endapan nikel laterit biasanya terbentuk di atas batuan ultramafik yang telah mengalami pelapukan, yang menghasilkan lapisan dengan resistivitas yang bervariasi. Zona limonit dan saprolit, yang merupakan dua lapisan utama dalam endapan nikel laterit, memiliki karakteristik resistivitas yang berbeda. Limonit, yang kaya akan oksida besi, umumnya memiliki resistivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan saprolit, yang mengandung lebih banyak silikat magnesium dan nikel (Taufik, 2018). Penelitian oleh Setiawan *et al.* (2020) dari Universitas Hasanuddin menunjukkan bahwa dengan menggunakan konfigurasi *Dipole-dipole* dalam survei geolistrik, dapat diidentifikasi batas-batas antara zona limonit dan saprolit serta kedalaman dari masing-masing lapisan tersebut. Hasil interpretasi geolistrik ini kemudian dibandingkan dengan data pengeboran untuk memastikan akurasi dalam pemetaan lapisan nikel laterit.

2.4.2. Interpretasi Data Pengeboran

Pengeboran merupakan metode langsung yang memberikan data konkret tentang komposisi dan ketebalan lapisan endapan nikel laterit. Dengan melakukan

pengeboran inti (*core drilling*), sampel dari setiap lapisan dapat diketahui material apa yang berada pada lapisan daerah pengeboran. Selain itu, pengeboran juga memungkinkan untuk mengukur ketebalan lapisan saprolit dan limonit, yang sangat penting untuk estimasi cadangan nikel laterit. Dalam konteks eksplorasi nikel laterit, hasil pengeboran sering digunakan untuk memvalidasi interpretasi data geolistrik. Misalnya, penelitian oleh Santoso (2019) dari Universitas Gadjah Mada menemukan bahwa data pengeboran dapat mengkonfirmasi anomali resistivitas yang diindikasikan oleh survei geolistrik sebagai batas antara zona limonit dan saprolit. Dengan demikian, kombinasi dari kedua metode ini memungkinkan pemetaan yang lebih akurat dan estimasi sumberdaya yang lebih andal.

2.4.3. Integrasi Data Geolistrik dan Pengeboran

Interpretasi data geolistrik dan pengeboran memainkan peran krusial dalam eksplorasi mineral, terutama dalam identifikasi dan pemetaan deposit limonit dan saprolit. Data geolistrik memberikan informasi tentang konduktivitas dan resistivitas tanah, sementara data dari pengeboran memberikan sampel nyata yang membantu memverifikasi dan memperjelas hasil geolistrik. Kombinasi dari kedua jenis data ini memungkinkan pembuatan model geologi yang akurat dan mendetail.

2.5. Perhitungan Volume Menggunakan Metode Geolistrik dan Pengeboran

Interpretasi perhitungan volume untuk lapisan memerlukan beberapa data yang dapat menunjang perhitungan volume untuk memetakan lapisan bawah permukaan bumi

2.5.1. Pengantar Perhitungan Volume

Menurut penelitian Jones (2020) Perhitungan volume lapisan mineral, seperti limonit dan saprolit, merupakan aspek penting dalam evaluasi sumber daya mineral. Perhitungan ini dilakukan untuk menentukan potensi cadangan dan membantu dalam perencanaan pengembangan tambang. Data dari metode geolistrik dan pengeboran memberikan informasi yang diperlukan untuk perhitungan ini. Metode geolistrik memberikan gambaran tentang distribusi lapisan di bawah permukaan, sedangkan pengeboran memberikan ketebalan dan komposisi lapisan secara langsung.

2.5.2. Metode Geolistrik dan Pengeboran dalam Perhitungan Volume

Adapun data yang diperlukan pada penelitian-penelitian terdahulu sebagai:

1. Data Geolistrik

Data geolistrik seperti resistivitas atau konduktivitas tanah digunakan untuk menentukan batas lapisan mineral di bawah permukaan (Williams, 2019). Resistivitas tinggi biasanya menunjukkan keberadaan limonit, sedangkan resistivitas rendah dapat menunjukkan saprolit (Anderson, 2021). Pengolahan data geolistrik menghasilkan model 3D yang menunjukkan ketebalan dan distribusi lapisan mineral, yang dapat digunakan untuk perhitungan volume.

2. Data Pengeboran

Pengeboran memberikan sampel dari berbagai kedalaman yang memungkinkan pengukuran ketebalan lapisan limonit dan saprolit secara langsung (Jones, 2020). Data dari pengeboran meliputi kedalaman lapisan, ketebalan lapisan, dan komposisi mineral. Data ini digunakan untuk memverifikasi hasil dari metode geolistrik dan menentukan parameter untuk perhitungan volume (Holmes, 2021).

2.5.3. Perhitungan Volume

Rumus dasar perhitungan volume lapisan mineral dapat dilakukan dengan rumus sederhana jika ketebalan lapisan diketahui dan area lapisan dapat diidentifikasi. Rumus dasar untuk menghitung volume seperti persamaan tiga adalah Perhitungan volume merupakan salah satu langkah penting dalam eksplorasi sumber daya mineral, terutama untuk menentukan potensi cadangan yang terkandung dalam suatu endapan. Metode perhitungan volume dapat dibagi menjadi metode sederhana berbasis geometri dan metode yang lebih kompleks berbasis interpolasi data bor. Pada penelitian yang dilakukan di (Jones, 2020), dijelaskan bahwa untuk endapan yang relatif sederhana, pendekatan geometri seperti kubus, prisma, atau piramida masih sering digunakan. Volume dihitung menggunakan rumus dasar geometri, seperti pada volume prisma:

$$V=A \times T \quad (3)$$

dimana:

V = Volume (m³)

A = Luas area lapisan (m²)

T = Ketebalan lapisan (m)