

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel laterit merupakan salah satu sumber daya mineral yang ada di Indonesia, khususnya di wilayah Sulawesi Tenggara. PT Vale Indonesia merupakan salah satu perusahaan tambang yang melakukan penambangan dan pengolahan nikel laterit. PT Vale Indonesia terus melakukan eksplorasi dan pengembangan deposit nikel laterit, termasuk di wilayah Pomalaa. Dalam proses eksplorasi dan penambangan nikel laterit, pemahaman mengenai kondisi geologi, terutama struktur batuan dasar (*bedrock*) sangat krusial untuk optimalisasi operasi penambangan dan estimasi cadangan.

Shear zone atau zona geser pada batuan dasar memiliki peran signifikan dalam pembentukan dan distribusi deposit nikel laterit. *Shear zone* adalah area di dalam batuan di mana terjadi deformasi akibat gaya geser. Dalam konteks geologi, *shear zone* merupakan zona di mana batuan mengalami perubahan bentuk (deformasi) yang signifikan akibat tekanan dan gesekan yang terjadi selama proses tektonik (Micklethwaite dkk., 2010). Penelitian ini ingin melihat seberapa besar struktur ini dapat mempengaruhi proses pelapukan dan mineralisasi, yang pada akhirnya berdampak pada kualitas dan kuantitas deposit nikel laterit yang terbentuk di atasnya. Identifikasi dan karakterisasi *shear zone* menjadi tantangan tersendiri karena letaknya yang berada di bawah permukaan dan tertutup oleh lapisan laterit.

Menurut Loke & Barker pada tahun 1996 mengatakan bahwa Metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) merupakan metode geofisika yang bertujuan untuk memetakan struktur bawah permukaan dengan memanfaatkan perbedaan resistivitas listrik antara berbagai jenis batuan dan mineral dan memetakan struktur bawah permukaan, termasuk *Shear zone*. Metode ini mampu memberikan gambaran mengenai variasi resistivitas batuan yang dapat digunakan untuk menginterpretasikan kondisi geologi bawah permukaan.

Beberapa penelitian terdahulu yang dilakukan di daerah Pomalaa oleh Kamaruddin dkk (2018) yang berjudul "Profil Endapan Laterit Nikel Di Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara", didapatkan informasi tentang kondisi geologi dan karakteristik profil nikel laterit di daerah Pomalaa. Serta beberapa penelitian terdahulu yang membahas mengenai penggunaan metode ERT dalam eksplorasi nikel laterit diantaranya adalah "Optimalisasi Penggunaan ERT Konfigurasi *Gradient* Dalam Memaksimalkan Eksplorasi Nikel Laterit" oleh Surawan (2014), "Analisis Perbandingan Cadangan Terkira Nikel Laterit Berdasarkan Data ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) Dan Data Drillhole Pada Area AZ" oleh Azzahra (2024), dan "Korelasi Nilai Resistivitas Pada *Bedrock*: Study Kasus di Area NK PT Vale IGP Pomalaa" (2024).



akan dilakukan untuk melihat pengaplikasian metode ERT dan data bor untuk mengetahui keberadaan *shear zone* pada profil nikel laterit terkhusus pada penelitian berjudul "Analisis *Shear zone* Pada Batuan Dasar Profil Nikel Laterit Berdasarkan Data *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) di PT. Vale IGP Pomalaa".

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengidentifikasi *shear zone* pada batuan dasar profil nikel laterit berdasarkan nilai resistivitas dan data bor
2. Menganalisis pengaruh keberadaan *shear zone* terhadap ketebalan lapisan *saprolite*.

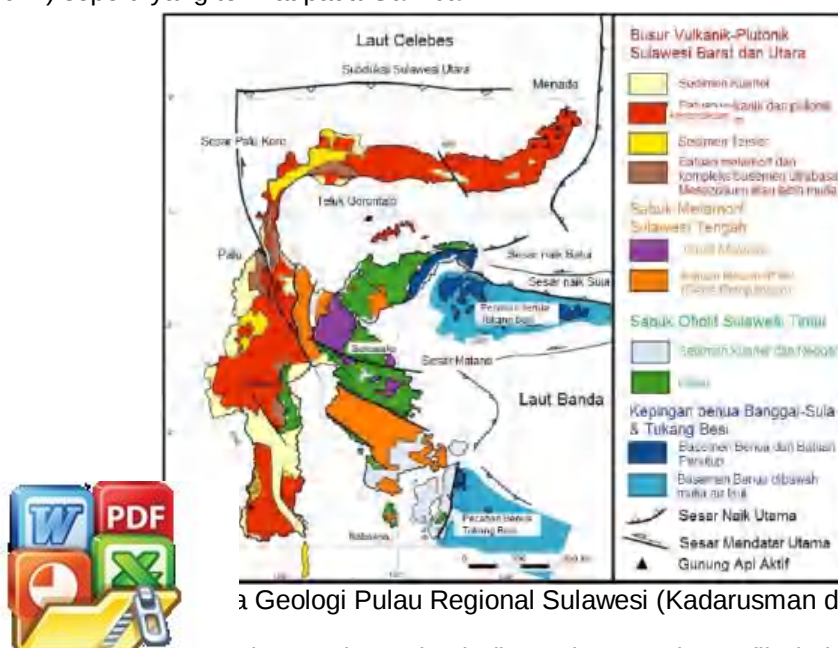
1.2.2 Manfaat

Setelah melakukan penelitian ini, maka diperoleh informasi mengenai pemetaan *shear zone* berdasarkan dari nilai resistivitas dan data bor serta mengetahui pengaruh keberadaan *shear zone* terhadap ketebalan lapisan *saprolite* dan oprasional mining.

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Geologi Regional

Pulau Sulawesi adalah salah satu pulau besar yang terletak di tengah Kepulauan Indonesia dengan luas wilayah sekitar 174.600 km². Pulau ini terbentuk akibat tumbukan empat lempeng tektonik, yaitu lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara, lempeng Pasifik yang bergerak ke barat, lempeng Eurasia yang bergerak ke selatan-tenggara, dan lempeng kecil Filipina. Tumbukan lempeng ini menciptakan tatanan geologi yang kompleks dengan stratigrafi yang rumit akibat pencampuran berbagai jenis batuan. Proses tumbukan tersebut menyebabkan Pulau Sulawesi memiliki banyak struktur sesar aktif, seperti Sesar Palu-Koro, Sesar Poso, Sesar Matano, Sesar Lawanopo, Sesar Walanae, Sesar Gorontalo, Sesar Batui, Sesar Tolo, dan Sesar Makassar (Sompotan, 2012) seperti yang terlihat pada **Gambar 1**.

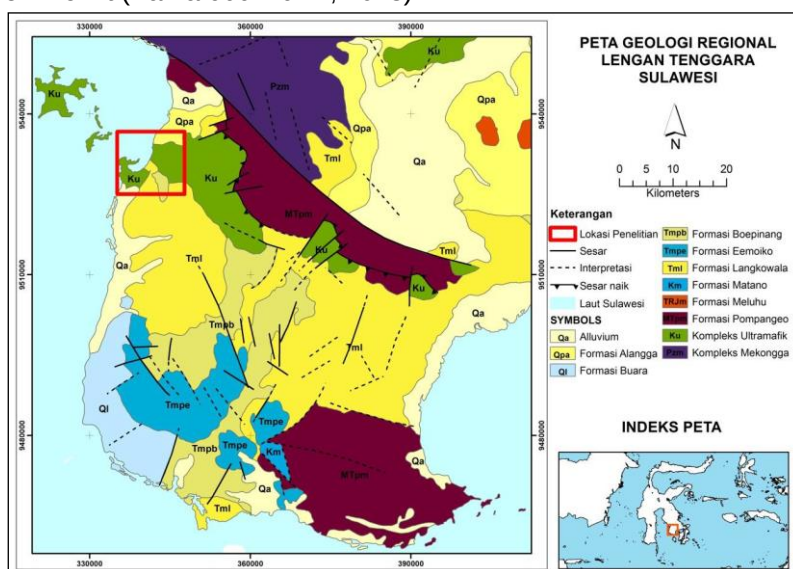


a Geologi Pulau Regional Sulawesi (Kadarusman dkk., 2004).

ah Pomalaa terletak di atas batuan ultramafik dari Ofiolit Sulawesi
asi oleh batuan peridotit (serpentin) seperti yang terlihat pada



Gambar 2. Ofiolit Sulawesi Timur terbentuk dari peristiwa geologi yang kompleks dan berumur antara 120 hingga 5 juta tahun yang lalu. Kompleks ini diduga berasal dari pecahan lempeng samudra Pasifik yang terpisah akibat aktivitas *mid-oceanic ridge* (MOR). Kemudian, kompleks Ofiolit ini terdorong ke arah barat mendekati batas Sundaland karena tekanan dari lempeng Indo-Australia. Sekitar 10 juta tahun yang lalu, terjadi subduksi antara kompleks Ofiolit dan kepingan benua Banggai-Sula. Sejak saat itu, kompleks Ofiolit Sulawesi Timur berada di posisinya saat ini dengan sedikit perubahan akibat terbentuknya Selat Makassar (Kadarusman dkk., 2004). Batuan ultramafik di daerah Pomalaa didominasi oleh peridotit yang umumnya berupa harzburgit dan dunit yang sebagian telah mengalami serpentinisasi. Komposisi mineral penyusun batuan peridotit didominasi oleh olivin, klinopiroksen, orthopiroksen, kadang-kadang disertai oleh kromit (Kamaruddin dkk., 2018)



Gambar 2. Geologi Regional Lengan Tenggara Sulawesi (Simandjuntak dkk., 1993)

1.3.2 Nikel Laterit

Nikel Laterite merupakan batuan ultramafik yang mengalami pelapukan dan pengayaan kaya akan Fe, Ni, Mn, Al dan Co. Batuan induk endapan nikel laterit adalah batuan ultramafik; umumnya peridotit (harzburgit dan lherzolit), dunit dan jenis peridotit yang lain. Batuan ini banyak mengandung olivin, piroksen, magnesium silikat dan besi, mineral-mineral tersebut tidak stabil dan mudah mengalami proses pelapukan. Istilah "*laterite*" bisa diartikan sebagai endapan yang kaya akan besi dan nikel miskin unsur silika dan secara intensif ditemukan lapukan di iklim tropis (Puspita dkk., 2022).



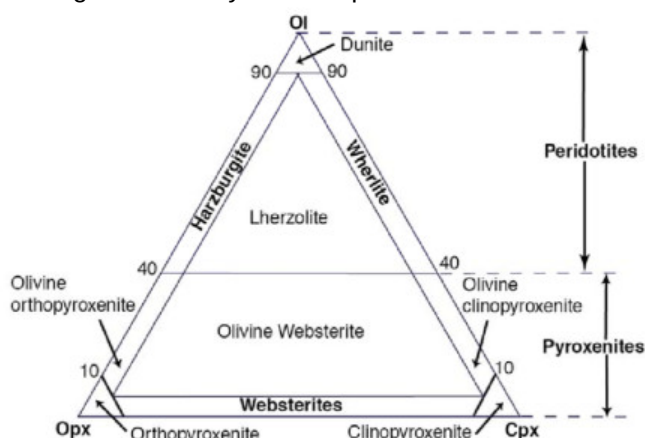
n dasar membuat batuan tersebut mengalami perubahan secara imia yang terjadi akibat perubahan lingkungan. Pelapukan mekanik an suhu yang besar antara siang dan malam, yang menyebabkan gangan hingga akhirnya retak. Sedangkan pelapukan kimia adalah ah struktur mineral dengan penambahan atau pengurangan unsur

dalam mineral tersebut, sehingga komposisi mineral batuan berubah dan terbentuk mineral-mineral baru (Isjudarto, 2013).

Menurut Ahmad tahun 2006 menyatakan bahwa pembentukan nikel laterit terjadi karena beberapa faktor. Adapun faktor-faktor terbentuknya nikel laterit adalah sebagai berikut:

1. Tipe batuan induk

Jenis batuan asal yang umum adalah batuan ultramafik. Pada batuan ultramafik ini umumnya mengandung unsur Ni dalam jumlah terbesar dibandingkan dengan batuan lain, memiliki mineral-mineral yang mudah lapuk atau tidak stabil, seperti olivin dan piroksen dan memiliki komponen-komponen yang mudah larut dan menciptakan kondisi yang ideal untuk pengendapan nikel. Jadi dari keterangan sebelumnya dijelaskan bahwa batuan induk umumnya merupakan batuan ultramafik dimana menurut Streckeisen (1976) memperlihatkan klasifikasi batuan ultramafik berdasarkan kandungan mineralnya terlihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Klasifikasi batuan ultramafik (Streckeisen, 1976)

2. Iklim

Perubahan antara musim kemarau dan musim hujan, yang menyebabkan naik-turunnya permukaan air tanah, juga dapat memicu proses pemisahan dan akumulasi unsur-unsur. Perbedaan suhu yang cukup signifikan akan mendukung terjadinya pelapukan mekanis, di mana retakan pada batuan terbentuk dan mempermudah terjadinya proses atau reaksi kimia batuan (Ahmad, 2006).

3. Vegetasi

Vegetasi memiliki beberapa pengaruh penting dalam proses ini. Pertama, air dapat menembus lebih dalam ke dalam tanah dengan lebih mudah melalui jalur akar pohon-pohonan. Selain itu, akumulasi air hujan di daerah yang vegetasinya lebat akan lebih banyak, sementara lapisan humus akan menjadi lebih tebal. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada lingkungan dengan hutan lebat dan kondisi yang baik, endung lebih tebal dengan kadar yang lebih tinggi. Selain itu, berfungsi untuk melindungi hasil pelapukan dari erosi mekanis



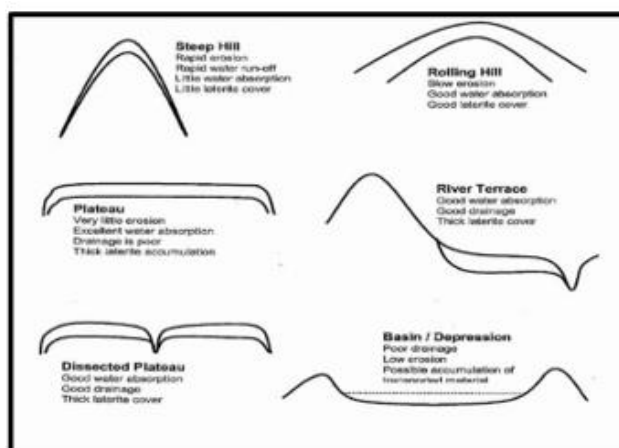
reaksi senyawa kimia)

senyawa-senyawa tertentu berperan dalam mempercepat proses tanah yang mengandung karbon dioksida memiliki peran penting

dalam pelapukan kimia. Selain itu, asam-asam humus juga berkontribusi dengan memicu dekomposisi batuan dan dapat mengubah pH larutan, yang pada akhirnya mempercepat proses pelapukan (Ahmad, 2006).

5. Topografi dan Morfologi

Di daerah yang landai, air bergerak lebih lambat, memberikan kesempatan bagi air untuk menembus lebih dalam melalui rekahan atau pori-pori batuan. Endapan biasanya terakumulasi di daerah dengan topografi landai hingga kemiringan sedang (*rolling hill*), yang menunjukkan bahwa ketebalan pelapukan cenderung mengikuti bentuk topografi (**Gambar 4**). Di daerah yang curam, secara teori, aliran air permukaan (*run-off*) lebih dominan dibandingkan dengan air yang meresap, sehingga proses pelapukan menjadi kurang intensif.



Gambar 4. Jenis-jenis bentuk lahan dan proses laterisasi (Ahmad, 2006).

6. Struktur geologi

Struktur yang paling dominan di daerah penelitian adalah struktur kekar (*joint*) dibandingkan dengan struktur patahan. Seperti yang diketahui, batuan beku memiliki porositas dan permeabilitas yang sangat rendah, sehingga air sulit menembusnya. Namun, keberadaan rekahan-rekahan ini mempermudah air masuk ke dalam batuan, hal ini membuat pelapukan menjadi lebih intensif (Ahmad, 2006).

7. Waktu

Waktu yang cukup lama akan menyebabkan pelapukan yang lebih intensif, karena selama periode tersebut terjadi akumulasi unsur nikel yang cukup tinggi. Pertambahan jumlah nikel 2,9 - 4,7 mm per 100 tahun.

Batuan Ultramafik adalah jenis batuan beku yang plutonik yang terbentuk di mantel bumi. Dimana batuan beku plutonik berarti batuan yang berasal dari pembekuan magma dan mengkristal jauh di bawah kerak bumi (Puspita dkk., 2022). Hal ini membuat batuan



g banyak mineral primer seperti olivin, piroksen, dan hornblende. is jenis batuan ultramafik yaitu seperti batuan peridotit, dunit dan 'a batuan tersebut termasuk batuan yang keras dan compact ituan serpentinit merupakan batuan yang mengalami proses ntinisasi merupakan proses dimana batuan ultramafik kaya olivin ksi dengan air pada suhu dan tekanan rendah hingga sedang

menyebabkan peningkatan volume batuan, menurunnya densitas batuan sehingga cenderung lembek dan merubah tekstur batuan (Puspita dkk., 2022).

Keberadaan endapan nikel laterit, memiliki perbedaan karakteristik pada masing-masing daerah. Perbedaan tersebut dapat diketahui dari sifat fisik yang nampak di atas permukaan meliputi jenis laterit, litologi, vegetasi yang tumbuh, dan kondisi morfologi (Lintjewas dkk., 2019). Proses pelapukan kimia pada *fresh rock* nantinya akan menghasilkan pembentukan profil laterit yang bertingkat dengan laterit termuda berada di bagian bawah dan laterit tertua akan berada di bagian atas. Profil nikel laterit pada umumnya terdiri dari 4 zona yaitu zona Batuan Induk (*Bedrock*), zona Saprolit, zona Limonit dan zona Topsoil (Ahmad, 2006).

1. Zona *Bedrock*

Zona ini berasal dari batuan dasar yang tidak mengalami pelapukan. Zona ini ditandai dengan adanya rekahan dan kekar pada batuan, dan tersusun dari bongkahan peridotit atau blok batuan induk yang umumnya sudah tidak mengandung mineral ekonomis (kadar mineralnya mendekati atau sama dengan batuan dasar) (Puspita dkk., 2022). Bagian ini adalah bagian paling bawah dari profil laterit. *Bedrock* terdiri dari batuan peridotit yang berwarna hijau saat segar dan berubah menjadi coklat kehitaman saat lapuk. Kristalinitas batumannya holokristalin, dengan kristal berbentuk suhedral hingga anhedral, dan berukuran faneritik. Struktur batuan ini masif, dengan urat silika yang sangat intensif. Secara mineralogi, batuan ini tersusun dari olivin, piroksen, serpentin, dan urat kuarsa (Raivel & Firman, 2020)

2. Zona *Saprolite*

Zona ini terletak di bawah lapisan zona limonit atau di atas zona *bedrock*. Pada zona ini, batuan asal ultramafik mengalami perubahan menjadi saprolit akibat pengaruh air tanah. Mineral utama yang terbentuk di zona ini adalah serpentin, kuarsa sekunder, dan garnierit (Santoso & Subagio, 2018). Zona saprolit biasanya berada di bawah permukaan air pada area yang basah atau lembab. Zona ini merupakan tempat dengan kandungan nikel laterit tertinggi, berkisar antara 1,5-3% (Puspita dkk., 2022). Tekstur saprolit bervariasi, mulai dari yang berbutir halus (*Earthy Saprolite*) hingga sangat kasar, keras, dan berbatu (*Rocky Saprolite*), dengan tekstur batuan asal yang masih terlihat jelas. Zona saprolit mengalami pelapukan kimia yang intensif dan dikenal sebagai zona pencucian, di mana unsur-unsur yang mudah larut terakumulasi dan bergerak ke bawah hingga mencapai zona dengan pH netral.

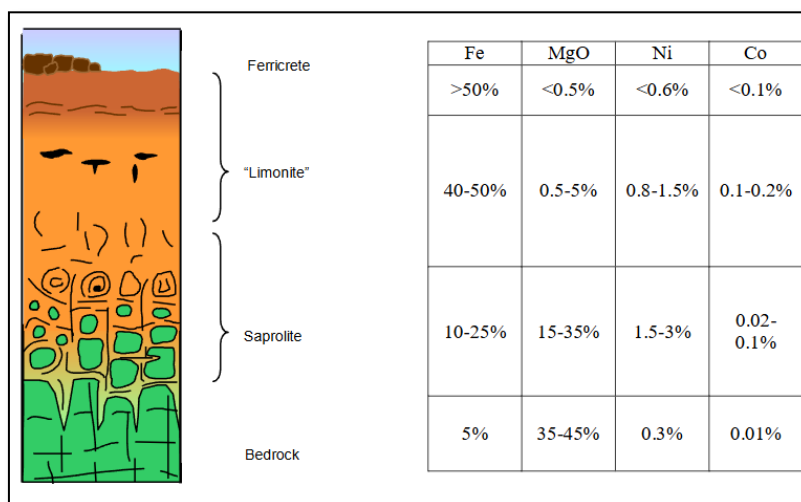
3. Zona *Limonite*

Zona Limonit adalah lapisan yang berada di atas lapisan saprolit karena telah mengalami pelapukan lebih lanjut. Tekstur dan struktur pada lapisan ini lebih halus dibandingkan dengan saprolit, dengan warna yang bervariasi dari kuning kecokelatan (*yellow limonite*) coklat kehitaman, hingga merah kehitaman (*red limonite*) (Raivel & Firman, 2020). Lapisan ini mengandung banyak unsur besi, sehingga mudah menyebabkan warnanya lebih gelap. Kandungan besinya berkisar 0,8-1,5%, dan kandungan nikel sekitar 0,8-1,5%.



4. Zona *Top Soil*

Zona ini merupakan lapisan paling atas dari deposit nikel laterit yang kaya akan unsur hara dan berperan penting dalam proses pembentukan tanah. Termasuk dalam kategori tanah residu, zona ini umumnya berwarna merah tua akibat tingginya kandungan besi yang mengalami oksidasi. Warna merah yang khas ini mencerminkan kandungan besi yang melimpah, terutama dalam bentuk mineral seperti hematit dan goethite. Selain itu, lapisan ini bersifat gembur dan mudah diolah, yang membuatnya mendukung pertumbuhan tanaman. Meskipun zona ini tidak mengandung nikel dalam jumlah yang signifikan, keberadaannya tetap penting dalam struktur keseluruhan profil laterit karena memberikan petunjuk tentang kondisi pelapukan yang terjadi di daerah tersebut.



Gambar 5. Ilustrasi profil nikel laterit (Elias, 2002)

Ketebalan setiap lapisan bervariasi, tergantung pada morfologi dan relief wilayahnya. Biasanya, endapan laterit lebih banyak terakumulasi di bagian bawah bukit dengan kemiringan yang landai. Sebaliknya, di area dengan relief yang curam, endapan laterit cenderung menipis. Selain itu, mineral berkadar tinggi sering kali ditemukan di zona-zona seperti retakan, sesar, dan rekahan pada batuan, yang memberikan jalur bagi akumulasi mineral tersebut.

1.3.3 Sifat Kelistrikan Batuan

Mengalirnya arus listrik di bawah permukaan terjadi karena adanya sifat kelistrikan pada batuan. Sifat kelistrikan batuan merupakan karakteristik batuan dalam menghantarkan arus listrik. Sifat kelistrikan batuan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu



Optimized using
trial version
www.balesio.com

logam, kandungan mineral non-logam, kandungan elektrolit padat, perbedaan tekstur batuan, perbedaan porositas batuan, jenis batuan, dan perbedaan temperatur. Sedangkan sifat kelistrikan batuan menjadi tiga, yakni resistivitas, aktivitas elektrokimia dan konstanta dielektrik. Resistivitas adalah kemampuan dari suatu bahan untuk melawan aliran arus listrik. Nilai resistivitas batuan atau bahan memiliki nilai yang berbeda-beda. Adapun

faktor-faktor yang menghasilkan nilai resistivitas suatu batuan adalah kandungan air, porositas, kepadatan dan permeabilitas batuan itu sendiri (Septyanto dkk., 2018).

Pengukuran resistivitas memberikan gambaran mengenai distribusi resistivitas bawah permukaan, yang kemudian diinterpretasikan berdasarkan model geologi bawah permukaan (Loke, 2004). Setiap jenis batuan memiliki resistivitas yang berbeda. Batuan beku yang terbentuk dari magma yang telah mendingin cenderung memiliki resistivitas tinggi, sedangkan batuan sedimen umumnya memiliki resistivitas yang lebih rendah. Resistivitas batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk usia dan litologi batuan, yang mempengaruhi porositas batuan dan salinitas air yang dikandungnya. Porositas tinggi dan salinitas yang besar akan mengurangi nilai resistivitas. Setiap jenis batuan memiliki nilai resistivitas yang berbeda. Batuan yang terbentuk dari pendinginan magma biasanya memiliki resistivitas tinggi, sedangkan batuan sedimen cenderung memiliki resistivitas rendah (konduktif). Nilai resistivitas material di bawah permukaan bumi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Resistivitas Batuan (Telford dkk., 1990).

Material	Nilai Resistivitas (Ωm)
Air Tanah	0,5-10
Top Soil	170-250
Gabro	$100-50 \times 10^4$
Batu Pasir (Sandstone)	$200-8 \times 10^3$
Gamping (Limestone)	$50-10^6$
Basal (Basalt)	$10^3 - 10^5$
Kwarsa (Quartz)	$500-8 \times 10^5$
Peridotit	3×10^3 (wet) – 6.5×10^3 (dry)
Batu Serpih (Shale)	$20 - 2 \times 10^3$
Konglomerat	$6 \times 10^3 - 2 \times 10^4$
Kerikil (Gravel)	100-600
Lempung (Clay)	1-100
Limonite	$10^4 - 10^7$
Laterite	$800 - 15 \times 10^2$
Laterite Soil	120-750
Hematite	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$
Magnetite	$5 \times 10^{-5} - 5.7 \times 10^3$
Serpentine	$2 \times 10^2 - 3 \times 10^3$

1.3.4 Metode Geolistrik Resistivitas

Metode geolistrik resistivitas merupakan salah satu teknik geofisika yang digunakan untuk menganalisis perubahan tahanan jenis lapisan batuan di bawah permukaan tanah.

Teknik ini bekerja dengan mengalirkan *Direct Current* (DC) bertegangan tinggi ke dalam tanah, dan diperoleh dari perhitungan tahanan jenis semu yang dihitung berdasarkan perbedaan potensial antara elektroda yang ditempatkan di permukaan tanah (Suroto & Afifah, 2008). Hasil pengukuran resistivitas ini memberikan gambaran distribusi resistivitas bawah permukaan, yang selanjutnya dianalisis untuk membangun model geologi bawah permukaan (Loke, 2004).



1.3.4.1 Prinsip Dasar Metode Resistivitas

Metode ini berguna untuk mengetahui persebaran resistivitas bawah permukaan yang akan diinterpretasi untuk mengetahui informasi geologi bawah permukaan. Metode ini menggunakan konsep dasar Hukum Ohm yang menggambarkan hubungan antara tegangan V pada penghantar dan arus I (Kurniawan dkk., 2020). Pada tahun 1826, George Simon Ohm melakukan percobaan untuk menentukan hubungan antara tegangan (V) pada penghantar dan arus listrik (I) yang mengalir melalui penghantar, dengan mempertimbangkan karakteristik parameter penghantar tersebut. Parameter ini disebut resistansi (R) sebagai perbandingan antara tegangan (V) dan arus (I), dan dapat dinyatakan dalam persamaan (Gilbert dkk., 2024):

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

Dimana,

V = Beda Potensial (Volt)

I = Arus (Ampere)

R = Resistansi (Ohm)

Dengan R merupakan resistansi atau hambatan kawat tersebut. Jika ditinjau suatu kawat berbeda dengan bahan yang sama menunjukkan bahwa kawat yang panjang mempunyai hambatan lebih besar dibandingkan dengan kawat pendek, dan kawat tipis mempunyai hambatan yang lebih besar dibandingkan dengan kawat tebal. Besar dari resistansi bergantung dari jenis material serta geometri dari kawat tersebut yang diekspresikan pada persamaan berikut:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Prinsip survei resistivitas adalah mengalirkan arus listrik searah (DC) ke dalam bumi melalui dua elektroda arus yang ditancapkan pada dua titik permukaan tanah dan kemudian mengukur respon beda potensial yang terjadi antara dua titik yang lain di permukaan bumi dimana dua elektroda potensial ditempatkan dalam suatu susunan tertentu (Syamsuddin, 2007). Dalam pendugaan resistivitas, digunakan asumsi-asumsi bahwa pada bawah permukaan bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan ketebalan tertentu, kecuali pada lapisan terbawah yang mempunyai ketebalan tidak berhingga. Selanjutnya digunakan asumsi bahwa bidang batas antar lapisan adalah horizontal dan setiap lapisan dianggap homogen isotropis.

1.3.4.2 Potensial Medium Homogen Isotropis

Pada metode resistivitas, bumi dianggap bersifat homogen dan isotropis, sehingga diharapkan pengukuran resistivitas tidak dipengaruhi oleh jarak elektroda potensial. Namun, kenyataannya, bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan resistivitas yang bervariasi. Akibatnya, nilai resistivitas yang diukur bergantung pada jarak elektroda potensial dan pengaruh dari setiap lapisan yang ada. Oleh karena itu, nilai resistivitas dalam model resistivitas di bawah permukaan, melainkan resistivitas merupakan gabungan efek dari semua lapisan tersebut (Telford dkk., 1990). (1990) jika arus listrik searah dialirkan ke dalam medium homogen dengan elemen arus (dI) yang mengalir melalui suatu elemen luasan ($d\vec{A}$), dinyatakan melalui persamaan:



$$dI = \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (3)$$

Terdapat hubungan antara kerapatan arus $\vec{J}$ dengan medan listrik $\vec{E}$ yang dijelaskan oleh hukum Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

dengan :

$\vec{E}$ = medan listrik (Volt/m)

σ = konduktivitas medium (S/m)

Medan listrik merupakan gradien dari potensial skalar (V) sehingga :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (5)$$

$$\vec{J} = -\sigma \vec{\nabla}V \quad (6)$$

Dalam medium homogen isotropis, aliran arus mengikuti prinsip hukum kekekalan muatan yang dinyatakan sebagai:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (7)$$

Di mana $\vec{J}$ merupakan kerapatan arus listrik (A/m²), dan q adalah kerapatan muatan (C/m³). Menurut Teorema Gauss, integral volume dari divergensi arus listrik ($\vec{\nabla} \cdot \vec{J}$) melalui permukaan tertutup sama dengan jumlah total muatan dalam volume tersebut sehingga tidak ada sumber arus maka dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (8)$$

Maka diperoleh,

$$\vec{\nabla} \cdot (-\sigma \vec{\nabla}V) = 0 \quad (9)$$

Persamaan 9 ini selesaikan dengan menggunakan teorema vektor, sehingga menghasilkan persamaan:

$$\vec{\nabla} \sigma \cdot \vec{\nabla}V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (10)$$

Jika medium homogen isotropis maka konduktivitas (σ) dianggap konstan, maka suku pertama dari persamaan tersebut menjadi nol sehingga suku kedua memenuhi persamaan Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (11)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa potensial listrik dalam medium homogen isotropis dan merupakan persamaan dasar teori geolistrik tahanan jenis (resistivitas).

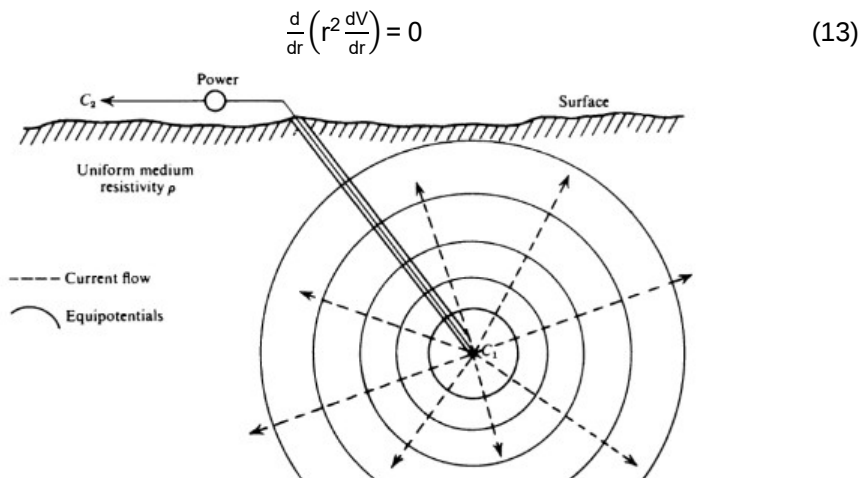
1.3.4.3 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di dalam Bumi

Apabila arus listrik (I) diinjeksikan ke dalam bumi yang homogen isotropik melalui sebuah elektroda dipermukaan pada suatu titik P, maka arus tersebut akan mengalir ke segala arah dengan nilai sama besar dan potensial di suatu yang berjarak r dari titik P dapat ditentukan seperti yang ilustasikan pada **Gambar 6**. Persamaan Laplace yang berhubungan dengan kondisi ini dituliskan dalam koordinat bola seperti :



$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right\} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (12)$$

potensial dalam bumi membentuk permukaan bola yang mempunyai radius yang keluar melalui luas permukaan bola dengan jari-jari r, maka dan sehingga persamaan Laplace koordinat bola disederhanakan



Gambar 6. Sumber arus di dalam Bumi (Telford dkk., 1990).

Integrasi sebanyak dua kali terhadap persamaan (13) menghasilkan persamaan:

$$\int \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = \int 0 \rightarrow r^2 \frac{dV}{dr} = P \rightarrow \frac{dV}{dr} = \frac{P}{r^2} \quad (14)$$

$$\int dV = \int \frac{P}{r^2} dr \rightarrow V = -\frac{P}{r} + Q \quad (15)$$

dengan P dan Q merupakan konstanta. Apabila jarak suatu titik jauh tak terhingga ($r = \infty$) maka potensial di titik tersebut sama dengan nol ($V = 0$) dan konstanta $Q = 0$. Sehingga persamaan (15) menjadi:

$$V = -\frac{P}{r} \quad (16)$$

Dalam kasus sumber arus di dalam bumi homogen isotropis, maka medan-medan ekipotensialnya berbentuk bola. Sehingga jumlah arus yang menembus permukaan ekipotensial tersebut.

$$I = A \vec{J} \quad (17)$$

Dengan $A = 4\pi r^2$ dan disubstitusi persamaan (17) maka didapatkan:

$$I = A \vec{J} = 4\pi r^2 (-\sigma \vec{\nabla} V) \quad (18)$$

Karena V dalam fungsi r maka $\vec{\nabla} V = \frac{dV}{dr}$, kemudian persamaan (16) di substitusikan kedalam persamaan (18) maka,

$$I = 4\pi r^2 \sigma \frac{P}{r^2} = -4\pi \sigma P \quad (19)$$

Karena $\sigma = \frac{1}{\rho}$, maka persamaan (19) menjadi:

$$P = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (20)$$

Persamaan (20) disubstitusikan pada persamaan (16) maka didapatkan:

$$V = \left(\frac{I\rho}{4\pi} \right) \frac{1}{r} \quad (21)$$

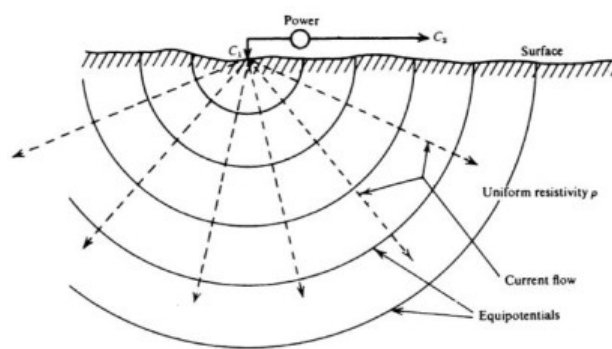
ensial Listrik (Volt), ρ adalah resistivitas (Ωm), I adalah kuat arus σ adalah konduktivitas (S/m).



1.3.4.4 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Permukaan Bumi

Apabila elektroda arus berada di permukaan pada medium homogen isotropik seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 7** dan nilai konduktivitas udara sama dengan nol, maka bidang equipotensial yang tinggal membentuk setengah bola sehingga persamaan (21) menjadi (Telford dkk., 1990):

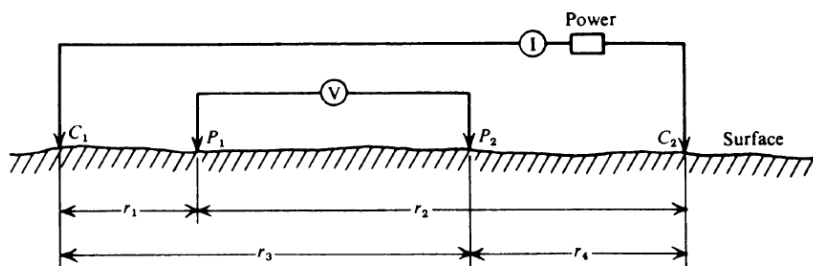
$$V = \left(\frac{\rho}{2\pi} \right) \frac{1}{r} \quad (22)$$



Gambar 7. Potensial di Sekitar Titik Arus di Permukaan Bumi (Telford dkk., 1990).

1.3.4.5 Potensial Sumber Arus Ganda di Permukaan Bumi

Pada pengukuran geolistrik resistivitas ini menggunakan dua buah elektroda arus dan dua buah elektroda potensial seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 8**. Namun ada juga metode geolistrik yang menggunakan kurang dari dua pasang elektroda, baik itu hanya elektroda arus atau hanya sepasang elektroda (satu elektroda arus dan satu elektroda potensial) (Telford dkk., 1990).



Gambar 8. Potensial Sumber Arus Ganda di Permukaan Bumi (Telford dkk., 1990).

Ketika jarak antara dua elektroda arus dibatasi di permukaan, maka besarnya nilai potensial di permukaan dipengaruhi oleh kedua elektroda arus tersebut. Potensial total di titik P₁ yang ditimbulkan arus C₁ dan C₂ adalah (Telford dkk., 1990).

$$V_{P1} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (23)$$

titik P₂ yang ditimbulkan arus C₁ dan C₂ adalah:

$$V_{P2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (24)$$

di titik P₁ dan P₂ ($V_{P1} - V_{P2}$) dapat diperoleh dengan menggunakan

$$\Delta V = V_{P1} - V_{P2} \rightarrow \frac{\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (25)$$



Dimana,

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \quad (26)$$

Sehingga diperoleh,

$$\Delta V = \frac{I\rho}{K} \quad (27)$$

Keterangan:

ΔV = beda potensial antara P_1 dan P_2 (Volt)

I = kuat arus yang melalui elektroda arus C_1 C_2 (Ampere)

r_1 = jarak antara C_1 dan P_1 (m)

r_2 = jarak antara C_2 dan P_1 (m)

r_3 = jarak antara C_1 dan P_2 (m)

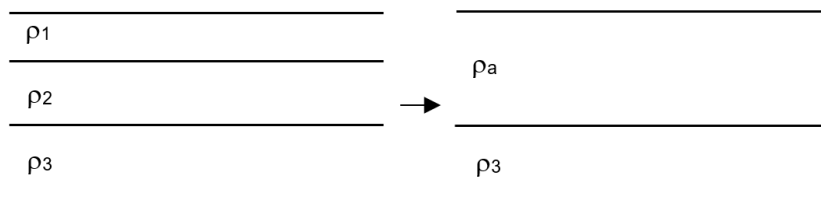
r_4 = jarak antara C_2 dan P_2 (m)

1.3.4.6 Konsep Resistivitas Semu

Bumi diasumsikan mempunyai sifat yang homogen isotropis. Dengan asumsi ini, hasil pengolahan dan inversi menunjukkan resistivitas total dan tidak tergantung pada spasi elektroda. Pada kenyataannya bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan ρ yang berbeda-beda, sehingga potensial yang terukur merupakan pengaruh dari lapisan lapisan tersebut. Maka harga resistivitas yang terukur merupakan harga resistivitas untuk satu lapisan saja, hal ini terutama untuk spasi yang lebar (Nainggolan dkk., 2024).

Untuk kasus tak homogen, bumi diasumsikan berlapis-lapis dengan masing-masing lapisan mempunyai harga resistivitas yang berbeda. Resistivitas semu merupakan resistivitas dari suatu medium fiktif homogen yang ekuivalen dengan medium berlapis yang ditinjau.

Sebagai contoh dapat dilihat pada **Gambar 9** jika terdapat medium berlapis yang ditinjau misalnya terdiri dari 2 lapis yang mempunyai resistivitas berbeda (ρ_1 dan ρ_2) dianggap sebagai medium satu lapis homogen yang mempunyai nilai resistivitas disebut sebagai resistivitas semu (ρ_a) (Halawa & Tanjung, 2022).



Gambar 9. Konsep Resistivitas Semu (Hendrajaya & Arif, 1990).



cal Resistivity Tomography (ERT)

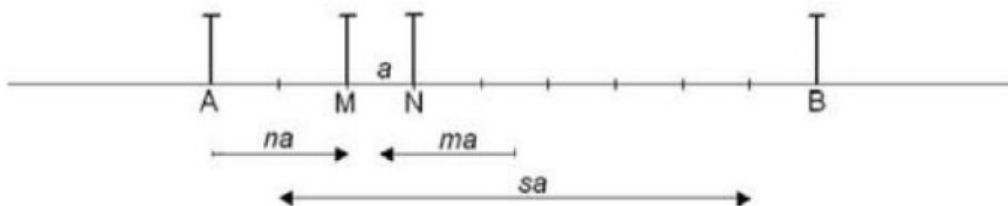
al Resistivity Tomography) adalah metode yang digunakan untuk bawah permukaan secara dua atau tiga dimensi. Metode ini bekerja arus listrik melalui pasangan elektroda arus dan mengukur beda jan elektroda lainnya yang ditempatkan di permukaan tanah. Data

potensial yang diperoleh kemudian diproses menggunakan teknik inversi untuk menghasilkan citra resistivitas bawah permukaan (Lowrie, 2007).

Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mendeteksi endapan nikel laterit adalah Metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT). Pada metode ini, yang dipelajari adalah sifat aliran listrik dalam batuan, khususnya resistivitasnya. Resistivitas batuan merupakan besaran fisik yang menunjukkan kemampuan batuan untuk menghantarkan arus listrik. Lapisan batuan dengan resistivitas rendah akan lebih mudah menghantarkan arus listrik, sedangkan lapisan dengan resistivitas tinggi cenderung sulit menghantarkan arus listrik. Batuan dengan porositas tinggi cenderung memiliki resistivitas lebih rendah karena banyaknya ruang kosong yang sering terisi fluida, seperti air, yang dapat menurunkan resistivitasnya. Selain itu, lapisan dengan permeabilitas tinggi memungkinkan fluida bergerak lebih mudah, yang juga memengaruhi resistivitas. Kandungan fluida, seperti air atau larutan mineral dalam pori-pori batuan laterit, sangat mempengaruhi resistivitas karena fluida cenderung meningkatkan konduktivitas listrik pada batuan. Oleh karena itu, metode ERT sangat cocok untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik dalam profil nikel laterit.

1.3.6 Konfigurasi Gradient Array

Konfigurasi gradient adalah salah satu konfigurasi non-konvensional yang diusulkan oleh Dahlin dan Zou (2006), dalam konfigurasi ini elektroda arus berada di ujung-ujung garis survei sementara elektroda potensial berada diantara elektroda arus. Konfigurasi gradient mampu merekam banyak titik data secara simultan untuk setiap injeksi arus, namun konfigurasi ini perlu menggunakan sistem multichannel agar dapat mengefisienkan waktu. Konfigurasi gradien mampu mendapatkan hasil resolusi yang paling baik di bawah permukaan, namun konfigurasi gradient lebih sensitif terhadap *noise* jika dibandingkan dengan konfigurasi Wenner.



Gambar 10. Konfigurasi Gradient (Dahlin dan Zhou, 2006).

Konfigurasi gradien merupakan survei gradien multi-elektroda yang dilakukan dengan menginjeksi elektroda arus dengan pemisah $(s+2)a$ seperti pada **Gambar 10**, dimana a adalah jarak pemisah/separasi (s) yang memberikan jarak elektroda AB. Sedangkan faktor (n) didefinisikan sebagai $r_1 = AM = na$, $r_2 = BM = (s+2-n)a$, $r_3 = BN = (s+1-n)a$ substitusi jarak tersebut ke persamaan (26), maka jurasi gradien dirumuskan sebagai berikut:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{na} - \frac{1}{(s+2-n)a} - \frac{1}{(n+1)a} + \frac{1}{(s+1-n)a}} \quad (29)$$



Perhitungan resistivitas semu ρ_a ini nantinya akan diproses lebih lanjut melalui proses inversi untuk memperoleh model resistivitas di bawah permukaan (Dahlin & Zhou, 2006).

1.3.7 *Shear zone* (Zona Geser)

Shear zone adalah area di dalam batuan di mana terjadi deformasi tinggi disebabkan oleh tekanan yang besar, yang mengakibatkan pergeseran dan perubahan struktur batuan. *Shear zone* memiliki batas yang jelas, yang ditandai oleh adanya struktur dan batuan yang terdeformasi, dan deformasi dalam *shear zone* biasanya terfokus pada area tertentu, yang dapat menyebabkan pembentukan batuan dengan karakteristik khusus, seperti mylonite atau cataclasite. *Shear zone* penting untuk diketahui karena dapat memberikan informasi tentang sejarah deformasi dan evolusi geologi suatu wilayah, serta membantu dalam memahami evolusi geologi dari suatu daerah, termasuk hubungan antara deformasi, intrusi magma, dan aktivitas seismik. (Ortega dkk., 2021).

Shear zone seringkali terbentuk sebagai respons terhadap tekanan dan deformasi dalam kerak bumi, memisahkan bagian-bagian kerak yang kurang terdeformasi atau tidak terdeformasi. Zona ini memiliki beberapa karakteristik utama yang memengaruhi sifat fisik dan kimia batuan di sekitarnya, termasuk pembentukan endapan mineral dan perubahan struktur geologi. Berikut adalah penjabaran lebih detail mengenai karakteristik *shear zone* (Ortega dkk., 2021):

1. Deformasi yang Intensif

Shear zone terbentuk akibat tekanan dan geseran dari aktivitas tektonik, menyebabkan batuan mengalami deformasi dalam bentuk rekahan, lipatan, atau pergeseran. Semakin besar energi deformasi, semakin besar pula perubahan tekstur dan struktur batuan (Ortega dkk., 2021).

2. Memiliki Bentuk Memanjang

Shear zone umumnya berbentuk pita panjang yang sejajar atau membentuk sudut tertentu terhadap gaya utama yang bekerja di kerak bumi. Bentuk ini mencerminkan arah tegangan utama yang menyebabkan deformasi dan dapat memanjang hingga ratusan kilometer. Zona ini berperan sebagai jalur transportasi fluida geotermal yang membawa mineral ekonomis atau sebagai batas antara blok batuan dengan perbedaan deformasi signifikan.

3. Zona shear dapat bersifat rapuh (*brittle*), plastis (*plastic*), atau kombinasi keduanya, tergantung pada mekanisme deformasi dominan, kondisi tekanan, suhu, serta keberadaan fluida. *Shear zone* juga dapat melibatkan kombinasi mekanisme deformasi murni (*pure shear*) dan geser sederhana (*simple shear*), sehingga sering menghasilkan deformasi tiga dimensi (Fossen & Cavalcante, 2017).

4. Adanya Foliasi dan Lineasi

Foliasi dalam *shear zone* terbentuk akibat tekanan diferensial yang menyebabkan batuan tersusun sejajar, menciptakan tekstur seperti *mylonitic* pada batuan itu, lineasi muncul dalam bentuk perpanjangan mineral, batuan yang sejajar dengan arah geser (Ortega dkk., 2021).



Gouge adalah zona yang mengalami deformasi rapuh, pergeseran batuan dapat menghasilkan *breccia* dan *gouge*. *Fault breccia* terdiri dari fragmen batuan yang

pecah tetapi masih memiliki sudut tajam, sedangkan gouge adalah material yang lebih halus seperti tanah liat akibat penghancuran lebih lanjut. Kehadiran fault breccia dan gouge sering dikaitkan dengan zona lemah di kerak bumi atau menjadi zona berisiko dalam kestabilan geoteknik, seperti yang sering ditemukan di area tambang atau zona seismik aktif (Ortega dkk., 2021).

6. *Mylonite* dan *Cataclasite*

Shear zone yang mengalami deformasi plastis dapat menghasilkan *mylonite* dan *cataclasite*, yang mencerminkan intensitas deformasi yang terjadi pada tekanan dan suhu tinggi. *Mylonite* memiliki tekstur halus akibat rekristalisasi mineral dalam kondisi geseran kuat, sementara *cataclasite* terbentuk dari kombinasi deformasi rapuh dan plastis yang menghasilkan batuan dengan fragmen keras dalam matriks yang lebih halus

7. *Shear Bands*

Shear bands adalah bidang geser sekunder yang terbentuk di dalam *shear zone* utama dan berfungsi sebagai indikator arah tegangan yang terjadi. *Shear bands* dapat berbentuk simetris atau asimetris, tergantung pada gaya deformasi yang bekerja.

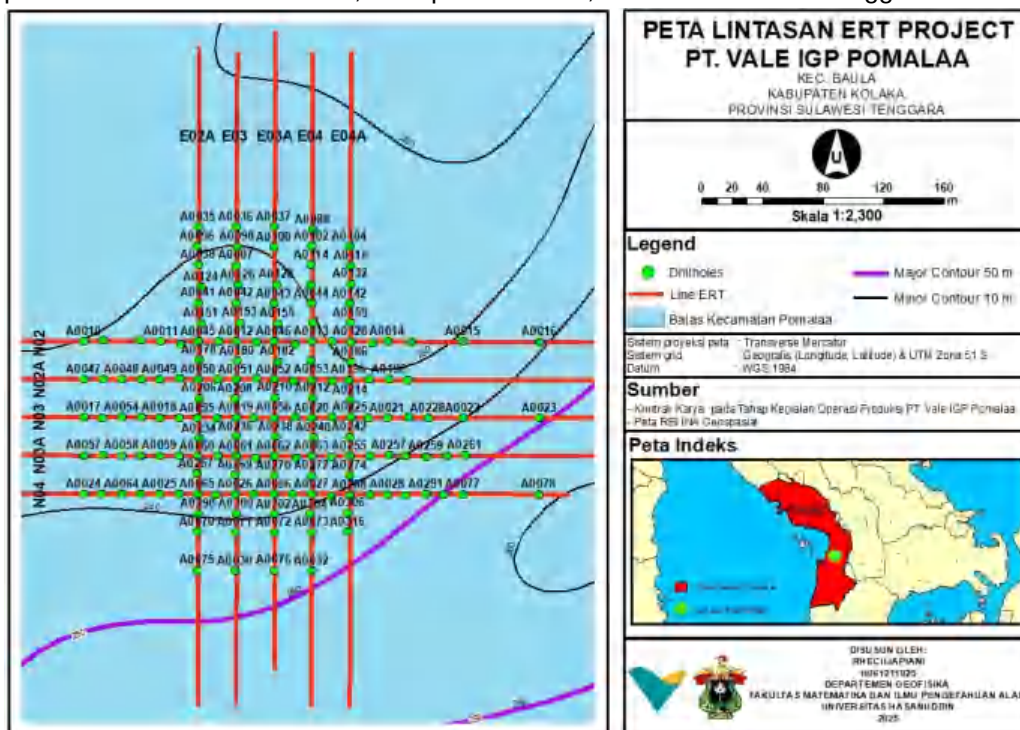
Shear zone berperan penting dalam pembentukan dan distribusi endapan nikel laterit karena mempengaruhi pelapukan batuan ultramafik serta jalur migrasi fluida hidrotermal. Struktur ini meningkatkan permeabilitas batuan dasar, memungkinkan air meteorit meresap lebih dalam dan mempercepat proses pelepasan nikel dari mineral seperti olivin dan serpentin. Selain itu, *shear zone* juga menjadi jalur utama bagi fluida hidrotermal yang dapat memperkaya endapan nikel melalui pengendapan mineral sekunder seperti garnierite dan *goethite*, yang sering dikaitkan dengan anomali kadar nikel tinggi. Dari segi geoteknik, *shear zone* dapat menciptakan zona lemah yang memengaruhi kestabilan lereng tambang. Material seperti *fault breccia* dan *gouge* meningkatkan risiko longsor, sehingga pemetaan *shear zone* sangat penting dalam perencanaan tambang terbuka sehingga diperlukan identifikasi *shear zone* dan membantu menentukan lokasi eksplorasi yang lebih akurat. (Ortega dkk., 2021).



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di area tambang PT. VALE IGP POMALAA, lokasi penelitian terletak di Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara.



Gambar 11. Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Software Res2Dinv 4.8.10*
2. *Software Datamine Studio RM*
3. *Software Microsoft Excel*

2.2.2 Bahan

Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder dari PT Vale IGP Pomalaa yang terdiri dari:

1. Data ERT



an data hasil pengukuran ERT yang terdiri dari nilai resistivitas, logografi lintasan. Panjang lintasan yaitu 441 m untuk masing-masing lintasan menggunakan konfigurasi gradient sebanyak 10 lintasan, 5 atan dan 5 lintasan timur-barat. Adapun data yang diolah terdiri dari lan topografi lintasan dengan spasi antar lintasan yaitu 50 m tiap

2. Data Bor

Data bor yang digunakan sebanyak 162 *holes* yang *overlap* dengan 10 lintasan ERT yang terdiri dari data *Assay* dan *Collar*. Adapun historical data bor yang *overlap* dengan data ERT yaitu sebagai berikut:

- 1) Data Bor spasi 50 m pada tahun 2006 sebanyak 22 Bor
- 2) Data Bor *Project CRA* spasi 25 m pada tahun 2007 sebanyak 38 Bor
- 3) *Infill Drilling* spasi 12,5 m pada tahun 2022 sebanyak 102 Bor

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Tahap Kajian Pustaka

Tahapan ini meliputi pengumpulan berbagai macam literatur mengenai kondisi geologi daerah penelitian seperti genesa pembentukan nikel laterit serta karakteristik nikel laterit daerah penelitian yang dapat memudahkan dalam menginterpretasi setiap zona pada lapisan nikel laterit.

2.3.2 Tahap Pengolahan Data

Data yang diperoleh terdiri dari data ERT dan disertai dengan data pendukung yaitu data bor dan data topografi. Data ERT yang diperoleh ini terdiri dari data resistivitas semu, sehingga dilakukan proses inversi untuk mendapat model resistivitas di bawah permukaan pada setiap lintasan ERT menggunakan *software* Res2DInv. Sebelum memulai inversi data, dilakukan pengaturan format data dalam bentuk (.dat) yang terdiri dari data pengukuran, topografi dan global koordinat sesuai dengan format yang bisa dibaca oleh Res2DInv. Pada *software* Res2DInv, perlu untuk mengatur beberapa parameter inversi yang sesuai dengan data yang dimiliki, dalam hal ini parameter yang akan digunakan ditentukan oleh perusahaan. Setelah memasukkan parameter inversi, maka dilakukan proses inversi. Kemudian dilakukan *quality control* data dengan melihat *RMS Error Data*. Data yang memiliki error yang cukup tinggi (>10%) dianalisis apakah termasuk data anomali atau data yang error, apabila terdapat data yang dianggap error maka perlu dilakukan penghapusan data. Dalam penghapusan data perlu diperhatikan agar tidak menghilangkan informasi penting, hal tersebut dapat dilakukan dengan validasi atau pengecekan data yang dianggap anomali dengan melihat populasi disekitarnya. Setelah data dianggap bagus maka dilakukan inversi kembali untuk mendapatkan model penampang 2D pada semua lintasan. Selanjutnya, *export* data X, Y, Z dan nilai resistivitas yang akan dimasukkan pada *software* *datamine* untuk interpretasi batas lapisan profil nikel laterit.

2.3.3 Tahap Interpretasi Data

Pada penelitian ini interpretasi batas lapisan limonit, saprolite dan berdrock dilakukan resistivitas tanpa bergantung pada data bor. Hasil interpretasi dari profil unjukkan sistem perlapisan nikel laterit yaitu limonite, saprolite dan kan didapatkan rentang nilai resistivitas tiap lapisan. Dalam sistivitas ini menggunakan metode statistik berupa boxplot untuk ribusi data. Boxplot memberikan gambaran grafis dari data yang tentang nilai minimum, kuartil pertama (Q_1), median (Q_2), Kuartil maksimum. Selain itu boxplot juga dapat menampilkan nilai *outlier*

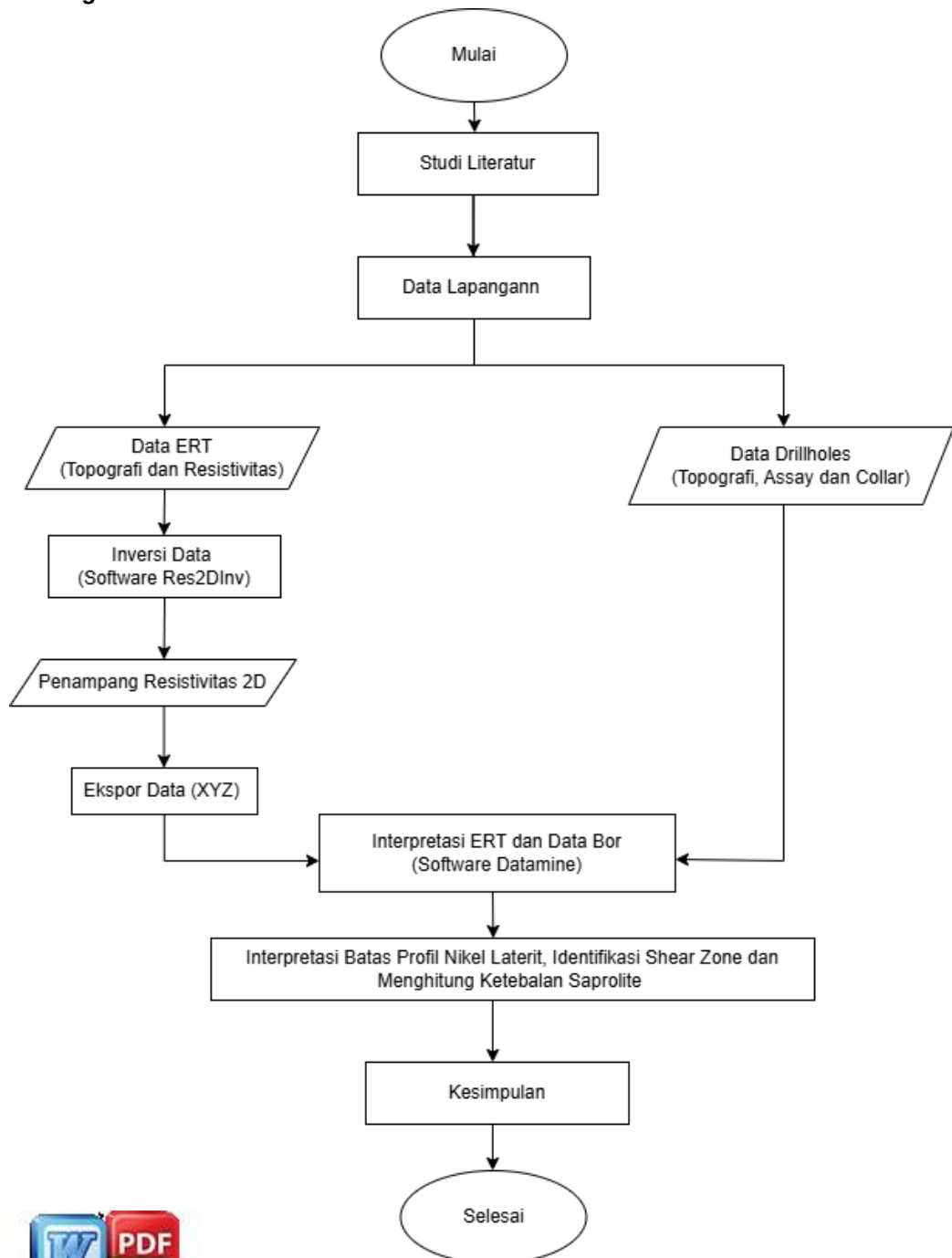


dan nilai ekstrim dari distribusi data. Box pada boxplot ini menunjukkan rentang di mana 50% data tengah berada, yaitu antara kuartil pertama (Q_1) dan kuartil ketiga (Q_3). Artinya, 25% data berada di bawah Q_1 , 50% data di antara Q_1 dan Q_3 (dalam box), dan 25% data di atas Q_3 . Garis di dalam box (median) yaitu garis tebal di dalam kotak menunjukkan median (Q_2), yaitu nilai tengah data. *Whiskers* menunjukkan rentang data di luar box hingga nilai minimum dan maksimum, tetapi maksimal sampai 1,5 kali rentang interkuartil ($IQR = Q_3 - Q_1$). Jika ada nilai yang lebih jauh dari 1,5 IQR, nilai tersebut dianggap sebagai data pencilan (*outlier*), yaitu data yang sangat berbeda dari mayoritas data lainnya.

Kemudian dalam *Shear zone* pada batuan dasar berdasarkan karakteristik yang ditunjukkan dalam data bor dengan tanda "shear zone". Mengidentifikasi struktur pada batuan dasar, seperti patahan (*fracture*) dan keterdapatannya material milonit, serta menemukan *fault* material pada data bor. Selanjutnya, dikorelasikan dengan data ERT untuk membuat batas *Shear zone* sebagai zonasi yang terletak di bawah lapisan saprolit. Kemudian melakukan perhitungan ketebalan lapisan saprolit dengan menggunakan batas limonit *bottom* dan saprolit *bottom*. Selanjutnya membuat *wireframe* lapisan limonit dan saprolit. Kemudian grid 1x1 meter masing lapisan limonit *bottom* dan saprolit *bottom* yang bertujuan untuk mendapatkan informasi ketebalan tiap 1 meter sehingga dapat mencitrakan bawah permukaan yang lebih baik.



2.4 Bagan Alir Penelitian



Gambar 12. Bagan Alir Penelitian

