

KORELASI ANTARA NILAI RQD DAN NILAI RESISTIVITAS PADA BEDROCK: STUDI KASUS DI AREA “NK” PT VALE INDONESIA



NI KOMANG AYU LIDYARNI
H061201057



PROGRAM STUDI GEOFISIKA
DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024

**KORELASI ANTARA NILAI RQD DAN NILAI RESISTIVITAS PADA
BEDROCK: STUDI KASUS DI AREA “NK” PT VALE INDONESIA**

**NI KOMANG AYU LIDYARNI
H061 20 1057**



**PROGRAM STUDI GEOFISIKA
DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**KORELASI ANTARA NILAI RQD DAN NILAI RESISTIVITAS PADA
BEDROCK: STUDI KASUS DI AREA “NK” PT VALE INDONESIA**

**NI KOMANG AYU LIDYARNI
H061 20 1057**

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Geofisika

pada

**PROGRAM STUDI GEOFISIKA
DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

SKRIPSI**KORELASI ANTARA NILAI RQD DAN NILAI RESISTIVITAS PADA
BEDROCK: STUDI KASUS DI AREA "NK" PT VALE INDONESIA**

NI KOMANG AYU LIDYARNI
H061 20 1057

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Geofisika pada tanggal 12
Agustus 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Geofisika
Departemen Geofisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin
Makassar
2024

Mengesahkan:

Pembimbing Utama

Pembimbing Pertama


Syamsuddin, S.Si. MT
NIP. 197401152002121001


Sabrianto Aswad, S.Si. MT
NIP. 197805242005011002

Mengetahui:
Ketua Departemen


Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M. Eng
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "Korelasi Antara Nilai RQD dan Nilai Resistivitas Pada Bedrock: Studi Kasus di Area "NK" PT. Vale Indonesia" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing Syamsuddin, S.Si., M.T sebagai Pembimbing Utama dan Sabrianto Aswad, S.Si., M.T sebagai Pembimbing Pendamping. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 08 Agustus 2024



Ni Komang Ayu Lidyarni
NIM H061201057

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Esa, Ida Sang Hyang Widhi Wasa atas berkat beserta Asung Kerta Wara Nugraha-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Korelasi Antara Nilai RQD dan Nilai Resistivitas Pada Bedrock: Studi Kasus di Area "NK" PT. Vale Indonesia" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Skripsi ini dapat diselesaikan dan dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan dari dosen pembimbing, bapak **Syamsuddin, S.Si. MT** dan **Sabrianto Aswad S.Si. MT** serta dosen penguji bapak **Drs.Erfan, M.Si.** dan **Ir. Bambang Harimei, M.Si.** Penulis mengucapkan banyak terima kasih atas ilmu yang sangat berharga, saran serta masukan yang membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada pimpinan Universitas Hasanuddin serta **Bapak/Ibu Dosen** dan **Staff Departemen Geofisika** yang telah membimbing, memberikan ilmu, pengalaman, dan bantuan selama masa perkuliahan. Penghargaan yang tulus dan ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada pembimbing-pembimbing di PT. Vale, bapak **Adhie Wahyudi**, pak **Erwin**, kak **Asnur Azis**, kak **Hidayat Latuconsina**, kak **Muammar Hakim**, kak **Akram Ramadhan**, kak **Iswar Edis**, pak **Fisco**, kak **Nasar**, kak **Agus**, kak **Ricky** dan semua pihak yang telah banyak membantu penulis, terima kasih atas kebaikan, ilmu serta pengalaman yang sangat mengesankan yang diberikan kepada penulis.

Selanjutnya penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua tercinta Bapak **Ketut Suryo** dan Ibu **Margaretha Pabontongan** yang selalu mendoakan, mendukung, dan memberikan pengorbanan serta cinta kasihnya yang luar biasa. Terima kasih untuk saudara dan seluruh keluarga besar di mana pun berada untuk cinta dan dukungan yang selalu diberikan bagi penulis.

Teman-teman baik yang selalu menemani, memotivasi dan berjuang bersama penulis dari awal hingga selesainya skripsi ini, **Aza Azzahra**, kak **Ismi Zalsabilla** dan kak **Asyifa**. Penulis mengucapkan terima kasih atas semua pertolongan, suka duka, dukungan serta momen kebersamaan yang sangat berharga bagi penulis. Teman-teman seperjuangan di PT. Vale, **Erika**, **Qalbi**, **Hasnawiah**, **Jane**, kak **Diaz**, **Insan**, **Putra Andika**, **Gilang**, **Idzhar** dan **Rezky** serta teman-teman, **Asi**, **Angel**, dan **Glori** penulis ucapkan terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang diberikan kepada penulis.

Untuk saudara-saudara **KKN Desa Kompang** yang telah banyak menghibur beserta semua teman-teman **Geofisika 2020** yang tidak dapat disebutkan satu-persatu terima kasih atas semua bantuan serta kebaikan yang telah diberikan kepada penulis. Kepada pihak-pihak yang telah membantu dari awal sampai masa akhir perkuliahan, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Akhir kata, penulis mengucapkan permohonan maaf atas segala kesalahan dan semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi siapapun.

Makassar, 08 Agustus 2024

Ni Komang Ayu Lidyarni

ABSTRAK

NI KOMANG AYU LIDYARNI. **Korelasi Antara Nilai RQD dan Nilai Resistivitas Pada Bedrock: Studi Kasus di Area “NK” PT. Vale Indonesia** (dibimbing oleh Syamsuddin dan Sabrianto Aswad).

Endapan nikel laterit di PT. Vale Indonesia Tbk dibedakan menjadi dua blok yaitu *West Block* dan *East Blok*. Pada *west blok* batuan dasarnya tidak terserpentinisasi sehingga tipe batuan dasar diklasifikasikan berdasarkan RQD. RQD (*Rock Quality Designation*) merupakan penunjukkan kualitas batuan yang diperoleh dari proses pengeboran, namun metode pengeboran kurang efisien dan sulit dilakukan pada topografi yang curam. Oleh karena itu dibutuhkan metode lain sebagai alternatif untuk menentukan nilai RQD. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan antara nilai RQD dan resistivitas dari metode ERT sehingga hasilnya diharapkan dapat memaksimalkan penentuan RQD yang lebih efektif dan efisien. Data ERT di olah sehingga menghasilkan penampang inversi 2D. Penampang hasil inversi kemudian dikorelasi dengan data bor dan di interpretasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa zona limonit memiliki nilai resistivitas 110-550 Ωm , zona saprolit memiliki nilai resistivitas 10-310 Ωm , dan zona bedrock memiliki nilai resistivitas 90-990 Ωm . Nilai RQD dan resistivitas menunjukkan adanya hubungan yang *match* dengan korelasi kuat, dimana RQD tinggi menunjukkan resistivitas yang tinggi dan sebaliknya. Namun, terdapat beberapa data penelitian yang tidak *match* (tidak memiliki korelasi), dimana terdapat RQD yang tinggi namun memiliki nilai resistivitas rendah dan sebaliknya. Secara umum, pada profil nikel laterit zona limonit merupakan lapisan yang bersifat resistif, zona saprolit bersifat konduktif dan zona bedrock bersifat lebih resistif. Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara nilai RQD dan resistivitas yaitu sebesar 76% data, namun terdapat 24% data yang tidak memiliki hubungan yang disebabkan karena adanya pengaruh fisis, geokimia dan pengaruh geologi pada daerah penelitian.

Kata Kunci: ERT; Resistivitas; Nikel Laterit; *West Block*; RQD

ABSTRACT

NI KOMANG AYU LIDYARNI. Correlation between RQD Value and Resistivity Value in Bedrock: Case Study in the “NK” Area of PT Vale Indonesia (supervised by Syamsuddin and Sabrianto Aswad).

Nickel laterite deposits at PT Vale Indonesia Tbk are divided into two blocks, namely West Block and East Block. In the West Block, the bedrock is not serpentinized, so the bedrock type is classified based on RQD. RQD (Rock Quality Designation) is an indication of rock quality obtained from the drilling process, but the drilling method is less efficient and difficult to do on steep topography. Therefore, another method is needed as an alternative to determine the RQD value. This study aims to identify the relationship between RQD and resistivity values from the ERT method so that the results are expected to maximize the determination of RQD more effectively and efficiently. ERT data is processed to produce 2D inversion cross sections. The inversion cross section was then correlated with drill data and interpreted. The results show that the limonite zone has a resistivity value of 110-550 Ωm , the saprolite zone has a resistivity value of 10-310 Ωm , and the bedrock zone has a resistivity value of 90-990 Ωm . The RQD and resistivity values show a matching relationship with a strong correlation, where high RQD shows high resistivity and vice versa. However, there are some research data that do not match (have no correlation), where there is a high RQD but has a low resistivity value and vice versa. In general, in nickel laterite profiles the limonite zone is a resistive layer, the saprolite zone is conductive and the bedrock zone is more resistive. The results show that there is a relationship between RQD and resistivity values, which is 76% of the data, but there are 24% of data that do not have a relationship due to physical, geochemical and geological influences in the study area.

Keywords: ERT, Resistivity, Laterite Nickel, West Block, RQD

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Manfaat Penelitian.....	2
1.4 Landasan Teori	2
1.4.1 Geologi Regional Sorowako.....	2
1.4.2 Nikel Laterit	3
1.4.3 Potensial Pada Bumi Homogen Isotropik.....	6
1.4.3.1 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Dalam Bumi.....	8
1.4.3.2 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Permukaan Bumi.....	9
1.4.3.3 Potensial Oleh Dua Sumber Arus di Permukaan Bumi	10
1.4.4 Metode Electrical Resistivity Tomography (ERT)	11
1.4.5 Konfigurasi <i>Gradient</i>	12
1.4.6 Pemodelan Geofisika	13
1.4.6.1 <i>Forward Modeling</i>	13
1.4.6.2 <i>Inverse Modeling</i>	15
1.4.7 Hubungan Antara Geologi dan Nilai Resistivitas	16
1.4.8 Rock Quality Designation (RQD)	18
1.4.8.1 Metode Langsung	19
1.4.8.2 Korelasi Antara RQD (<i>Rock Quality Designation</i>) dan Metode ERT (<i>Electrical Resistivity Tomography</i>)	19
1.4.9 Konsep Koefisien Korelasi	20
BAB II METODOLOGI PENELITIAN	22
2.1 Lokasi Penelitian	22
2.2 Alat dan Bahan.....	22

2.3	Prosedur Penelitian	23
2.4	Bagan Alir Penelitian	24
BAB III HASIL PENELITIAN		25
3.1	Hasil.....	25
BAB IV PEMBAHASAN		28
4.1	Interpretasi Profil Nikel Laterit Berdasarkan Korelasi Antara Nilai Resistivitas dan Data Bor	28
4.2	Nilai RQD dan Nilai Resistivitas Pada Zona Bedrock	39
4.2.1	Nilai Rock Quality Designation (RQD)	41
4.2.2	Nilai Resistivitas	42
4.3	Hubungan RQD (Rock Quality Designation) dengan Nilai Resistivitas pada Bedrock	43
4.3.1	Hubungan yang Sesuai (<i>Match</i>) antara RQD dan Resistivitas.....	43
4.3.2	Hubungan yang Tidak Sesuai (<i>Not Match</i>) antara RQD dan Resistivitas.....	46
4.3.2.1	Pengaruh Fisis (Resolusi Data Geofisika)	48
4.3.2.2	Pengaruh Geologi	52
4.3.2.3	Pengaruh Geokimia	54
BAB V KESIMPULAN		55
DAFTAR PUSTAKA		56
LAMPIRAN		59

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai Resistivitas Batuan dan Mineral (Telford dkk, 1990).....	17
Tabel 2. Hubungan RQD dan kualitas massa batuan (Deere, 1967).....	19
Tabel 3. Interval nilai koefisien korelasi dan kekuatan hubungan	21
Tabel 4. Nilai RQD di titik bor C180670Z pada lintasan E02	41
Tabel 5. Nilai RQD di titik bor C151720Z pada lintasan N02	42
Tabel 6. Nilai rata-rata resistivitas pada hole C180670Z lintasan E02	42
Tabel 7. Nilai rata-rata resistivitas pada hole C151720Z lintasan N02	42
Tabel 8. Nilai RQD dan Resistivitas secara Umum	43
Tabel 9. Nilai RQD Tinggi-Sedang dengan Resistivitas Rendah	50
Tabel 10. Nilai RQD Rendah-Sedang dengan Resistivitas Tinggi	51
Tabel 11. Nilai RQD Tinggi dengan Resistivitas Rendah	53
Tabel 12. Nilai RQD Tinggi dengan Resistivitas Rendah.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Peta Geologi Regional Sorowako (Golightly, 1979).....	3
Gambar 2. Profil Nikel Laterit (Ahmad, 2009)	6
Gambar 3. Sumber Arus Di Dalam Bumi (Telford dkk,1990)	9
Gambar 4. Sumber Arus Di Permukaan Bumi (Telford dkk,1990)	10
Gambar 5. Dua Elektroda Arus dan Potensial di Permukaan (Telford dkk., 1990) 10	10
Gambar 6. Sketsa Susunan Konfigurasi Gradient (Dahlin dan Zhou,2006)	13
Gambar 7. Metode Pengukuran RQD Menurut Deere	19
Gambar 8. Arah Koefisien Korelasi	20
Gambar 9. Peta Lintasan ERT	22
Gambar 10. Peta Lintasan ERT	24
Gambar 11. Skema lintasan ERT dan drillhole	25
Gambar 12. Hasil Inversi Lintasan E02.....	26
Gambar 13. Hasil Inversi Lintasan N01.....	26
Gambar 14. Batas profil nikel laterit lintasan E02	29
Gambar 15. Batas profil nikel laterit lintasan E03	30
Gambar 16. Batas profil nikel laterit lintasan E05	31
Gambar 17. Batas profil nikel laterit lintasan E07	32
Gambar 18. Batas profil nikel laterit lintasan E08	33
Gambar 19. Batas profil nikel laterit lintasan E09	34
Gambar 20. Batas profil nikel laterit lintasan N01	35
Gambar 21. Batas profil nikel laterit lintasan N02	36
Gambar 22. Batas profil nikel laterit lintasan N04	37
Gambar 23. Batas profil nikel laterit lintasan N05	38
Gambar 24. Batas profil nikel laterit lintasan N06	39
Gambar 25. Penampang resistivitas N05.....	40
Gambar 26. Drillhole pada titik penampang crossection.....	40
Gambar 27. Hubungan yang Match antara Nilai RQD dan nilai resistivitas	44
Gambar 28. Hubungan nilai RQD dan nilai resistivitas secara kuantitatif.....	45
Gambar 29. Hubungan nilai RQD dan nilai resistivitas secara kualitatif	46
Gambar 30. Nilai RQD Rendah dengan Nilai resistivitas Tinggi	47
Gambar 31. Nilai RQD Tinggi dengan Nilai resistivitas Rendah	47
Gambar 32. Stacking Chart Lintasan E07	48
Gambar 33. zona struktur pada penampang resistivitas 3D	52
Gambar 34. fotocore pada titik C180187Z	53
Gambar 35. fotocore pada titik C151154Z	54
Gambar 36. keberadaan silika pada hole C180080Z kedalaman 48	55
Gambar 37. keberadaan silika pada hole C180864Z kedalaman 19	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Inversi	59
Lampiran 2. Drillhole pada penampang ERT yang tidak digunakan dalam perhitungan RQD dan Resistivitas	63
Lampiran 3. Fotocore	67
Lampiran 4. Hasil Perhitungan RQD dan Nilai Resistivitas	74
Lampiran 5. Stacking Chart Pada Lintasan ERT	82
Lampiran 6. Faktor Geometri Konfigurasi Gradient	88
Lampiran 7. Rumus Geolistrik	89
Lampiran 8. Pemodelan ke Depan (<i>Forward modeling</i>).....	93

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel laterit adalah produk mineral logam dari proses pelapukan kimiawi batuan ultramafik, yang mengalami pengayaan unsur Ni, Fe, Mn, dan Co. Endapan nikel laterit merupakan hasil pelapukan lebih lanjut dari batuan ultramafik yang mengandung silikat Ni, yang umumnya ditemukan di daerah yang beriklim tropis hingga subtropis (Febryanty dkk, 2023).

Indonesia merupakan negara penghasil nikel laterit terbesar di dunia yang tersebar di Sulawesi, Halmahera dan pulau-pulau kecil lainnya (Surianti, 2022). Sorowako, yang terletak di kabupaten Luwu Timur Sulawesi Selatan menjadi salah satu penghasil utama nikel di Indonesia dan memiliki cadangan nikel yang berlimpah. Endapan lateritnya merupakan sumber utama logam nikel di Indonesia yang sampai saat ini masih di tambang dan diolah oleh PT. Vale Indonesia dengan menggunakan teknik peleburan konvensional (Fitrian, 2021).

Endapan nikel laterit di PT. Vale Indonesia secara garis besar dibagi menjadi 2 blok, yaitu Blok Barat (*west block*), dan Blok Timur (*east block*). Pembagian tersebut berdasarkan adanya perbedaan sifat fisik dan kimia dari batuan (Ahmad, 2005). Pada daerah *west block* tingkat serpentinisasi sangat rendah yang menyebabkan batuan dasarnya relatif lebih masif dibandingkan dengan blok timur. Oleh karena itu, tipe batuan dasar daerah west diklasifikasikan berdasarkan RQD. RQD (*Rock Quality Designation*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas batuan. Semakin tinggi nilai RQD, maka semakin baik kualitas batuan atau semakin padat batuan tersebut.

Pada tahap eksplorasi nikel laterit di PT Vale terdapat beberapa metode yang digunakan salah satunya yaitu metode ERT. Metode ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) adalah metode geofisika yang mengukur respon batuan dari bawah permukaan berupa potensial listrik pada dua elektroda potensial akibat adanya arus yang diinjeksikan ke dalam bumi melalui elektroda arus (Simamora dkk., 2022). Beberapa penelitian sebelumnya tentang metode ERT dalam eksplorasi nikel laterit adalah "*Model Profil Endapan Nikel Laterit Berdasarkan Metode Geolistrik Resistivitas Daerah Sorowako Sulawesi Selatan*" oleh Hasrianto, dkk (2022), "*Penentuan Profil Nikel Laterit Dengan Menggunakan Metode ERT (Electrical Resistivity Tomography) Dan Hasil Analisis Unsur Kimia Data Bor*" oleh Haerunnisa (2014), "*Hubungan Nilai Resistivitas Dan Sifat Kimia Batuan Untuk Menentukan Karakteristik Profil Nikel Laterit Di Kecamatan Nuha, Luwu Timur*" oleh Arif (2017).

Korelasi nilai resistivitas dan *drillhole* telah digunakan secara luas untuk mengevaluasi lapisan geologi yang berbeda di bawah permukaan, seperti pada salah satu penelitian yaitu "*Determinan of Rock Quality Designation (RQD) Using A Novel Geophysical Approach: A Case Study*" oleh Hasan dkk (2023) yang menggunakan metode geofisika ERT untuk mengidentifikasi nilai RQD. Metode geofisika ERT dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengidentifikasi RQD di wilayah-wilayah yang

sulit dijangkau oleh pengeboran seperti pada medan yang terjal. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa RQD yang rendah memiliki resistivitas yang rendah begitupun sebaliknya. Namun, kisaran dari RQD dan resistivitas untuk berbagai unit massa batuan tidak mutlak dan dapat berubah, tergantung pada kondisi geologi suatu wilayah (Hasan dkk, 2023). RQD sangat penting dalam merancang kemiringan lereng (*slope*) di tambang terbuka. Jika nilai RQD rendah, maka lereng harus dirancang lebih landai untuk mencegah longsor. Sebaliknya, nilai RQD yang tinggi memungkinkan perancangan kemiringan yang lebih curam tanpa mengurangi stabilitas.

Berdasarkan uraian diatas maka penelitian ini hadir untuk mengidentifikasi bagaimana hubungan yang dihasilkan antara nilai RQD dan nilai resistivitas khususnya pada daerah penelitian.

1.2 Tujuan Penelitian

1. Menentukan profil nikel laterit berdasarkan data resistivitas dan data bor.
2. Menghitung nilai RQD pada zona bedrock serta menentukan hubungan nilai RQD terhadap nilai resistivitas.

1.3 Manfaat Penelitian

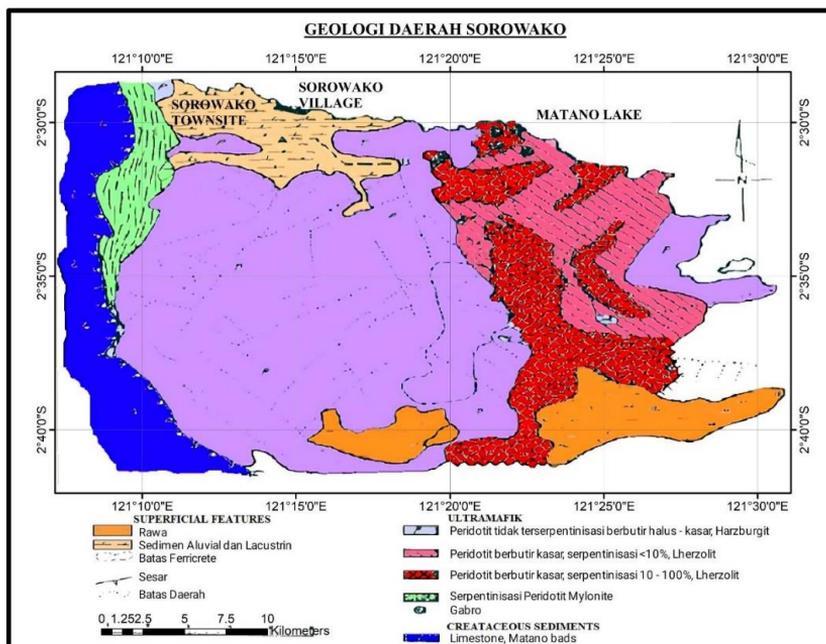
Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk membantu dalam mengidentifikasi RQD di wilayah yang sulit dijangkau oleh pengeboran dengan menggunakan metode ERT. Dengan penggunaan metode ERT, nilai RQD dapat diidentifikasi dengan lebih mudah dan efisien, serta dapat mengurangi jumlah pengeboran.

1.4 Landasan Teori

1.4.1 Geologi Regional Sorowako

Geologi daerah Sorowako dibagi menjadi tiga bagian, seperti yang terlihat dalam Gambar 1, yaitu:

1. Satuan batuan sedimen yang berumur Kapur; terdiri dari batugamping laut dalam dan rijang. Terdapat di bagian barat Sorowako dan dibatasi oleh sesar naik dengan kemiringan ke arah barat.
2. Satuan batuan ultrabasa yang berumur awal Tersier; umumnya terdiri dari jenis peridotit, sebagian mengalami serpentinisasi dengan derajat yang bervariasi dan umumnya terdapat di bagian timur. Pada satuan ini juga terdapat intrusi-intrusi pegmatit yang bersifat gabroik dan terdapat di bagian utara.
3. Endapan aluvial dan sedimen danau (*lacustrine*) yang berumur Kuartar, umumnya terdapat di bagian utara dekat desa Sorowako.



Gambar 1. Peta Geologi Regional Sorowako (Golightly, 1979).

1.4.2 Nikel Laterit

Nikel laterit adalah produk residual pelapukan kimia pada batuan ultramafik. Proses lateritisasi berlangsung selama jutaan tahun dimulai ketika batuan ultramafik tersingkap dipermukaan bumi sampai menghasilkan berupa residu nikel yang diakibatkan oleh faktor laju pelapukan, struktur geologi, iklim, topografi, reagen-reagen kimia dan vegetasi, dan waktu (Jarot, 2022).

1.4.2.1 Genesa Pembentukan Nikel Laterit

Proses pembentukan nikel laterit diawali dari proses pelapukan batuan ultramafik seperti peridotit, dunit dan serpentin, dimana batuan ini banyak mengandung mineral olivin, piraksen, magnesium silikat dan besi silikat, yang pada umumnya mengandung 0,30 % nikel. Batuan tersebut sangat mudah dipengaruhi oleh pelapukan lateritik (Bolt, 1967).

Proses laterisasi adalah proses pencucian pada mineral yang mudah larut dan silika dari profil laterit pada lingkungan yang bersifat asam, hangat dan lembab serta membentuk konsentrasi endapan hasil pengayaan proses laterisasi pada unsur Fe, Cr, Al, Ni dan Co.

Proses pelapukan batuan ultramafik dimulai ketika air permukaan yang mengandung CO₂ dari atmosfer dan terkayakan kembali oleh material-material organik di permukaan meresap ke bawah permukaan tanah sampai pada zona pelindian, dimana fluktuasi air tanah berlangsung. Akibat fluktuasi ini, air tanah yang kaya CO₂ akan kontak dengan zona saprolit yang masih mengandung batuan asal dan melarutkan mineral-mineral yang tidak stabil seperti olivin, serpentin, dan

piraksen. Mg, Si, dan Ni akan larut dan terbawa sesuai dengan aliran air tanah dan akan memberikan mineral-mineral baru pada proses pengendapan kembali. Endapan besi yang bersenyawa dengan oksida akan terakumulasi dekat dengan permukaan tanah, sedangkan magnesium, nikel dan silika akan tetap tertinggal di dalam larutan dan bergerak turun selama suplai air yang masuk ke dalam tanah terus berlangsung. Pada proses pelapukan lebih lanjut Mg, Si dan Ni akan tertinggal di dalam larutan selama air masih bersifat asam. Tetapi jika di netralisasi karena adanya reaksi dengan batuan dan tanah, maka zat-zat tersebut akan cenderung mengendap sebagai mineral hidrosilikat (Nickel-magnesium silikat) yang disebut mineral garnierite $[(Ni, Mg)_6Si_4O_{10}(OH)_8]$ atau mineral pembawa Ni.

Adanya suplai air dan saluran untuk turunnya air, dalam hal ini berupa kekar, maka Ni yang terbawa oleh air turun kebawah, lambat laun akan terkumpul di zona air yang sudah tidak dapat turun lagi dan tidak dapat menembus batuan dasar (*bedrock*). Ikatan dari Ni yang berasosiasi dengan Mg, SiO dan H akan membentuk mineral garnierit dengan rumus kimia $(Ni, Mg) Si_4O_5(OH)_4$. Apabila proses ini berlangsung terus menerus, maka akan terjadi proses pengkayaan supergen (*supergen enrichment*). Zona pengkayaan supergen ini terbentuk di zona saprolit.

Di bawah zona pengkayaan supergen terdapat zona mineralisasi primer yang tidak terpengaruh oleh proses oksidasi maupun pelindihan, yang sering disebut sebagai zona batuan dasar (*bedrock*). Biasanya berupa batuan ultramafik seperti peridotit atau dunit. Zona ini merupakan zona yang tidak mengandung mineral ekonomis seperti Ni, akan tetapi tinggi kandungan silika dan magnesium tapi kecil kandungan Fe, Co, dan zona ini sebagai zona paling bawah dari suatu profil nikel laterit. Zona *bedrock* ini banyak dijumpai rekahan-rekahan yang terisi mineral kuarsa dan tersebar tidak merata (Pujiono dan Wijaya, 2022).

1.4.2.2 Faktor-Faktor Pembentukan Nikel Laterit

Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan bijih nikel laterit adalah sebagai berikut (Ahmad, 2009):

a. Batuan asal

Merupakan syarat utama terbentuknya endapan nikel laterit, jenis batuan asalnya adalah batuan ultramafik. Dalam hal ini pada batuan ultramafik terdapat elemen Ni yang paling banyak di antara batuan lainnya, mempunyai mineral-mineral yang paling mudah lapuk atau tidak stabil, seperti olivin dan piroksin, mempunyai komponen-komponen yang mudah larut dan memberikan lingkungan pengendapan yang baik untuk nikel.

b. Iklim

Adanya pergantian musim kemarau dan musim penghujan dapat menimbulkan perbedaan temperatur yang cukup besar yang dapat membantu terjadinya pelapukan mekanis. Curah hujan dan sinar matahari memegang peranan penting dalam proses pelapukan dan pelarutan unsur-unsur yang terdapat pada batuan asal.

- c. Suhu atau temperatur yang tinggi
Suhu dan temperatur yang tinggi sangat penting dalam mempercepat proses pelapukan kimia yang merupakan kondisi yang sangat ideal dalam pengembangan laterit.
- d. Struktur
Adanya struktur seperti struktur kekar (joint) pada batuan ultramafik akan lebih memudahkan masuknya air dan berarti proses pelapukan akan lebih intensif.
- e. Topografi
Pada daerah yang mempunyai topografi landai, air akan bergerak perlahan-lahan sehingga akan mempunyai kesempatan untuk mengadakan penetrasi lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan. Akumulasi endapan biasanya terdapat pada daerah landai sampai kemiringan sedang. Pada daerah yang curam, air akan tererosi kebawah yang menyebabkan pelapukan kurang intensif.
- f. Waktu
Waktu yang cukup lama akan mengakibatkan pelapukan yang cukup intensif dan pada umumnya akan menghasilkan endapan yang relatif lebih tebal, sedangkan pelapukan yang berlangsung dalam waktu singkat akan membentuk endapan yang tipis.

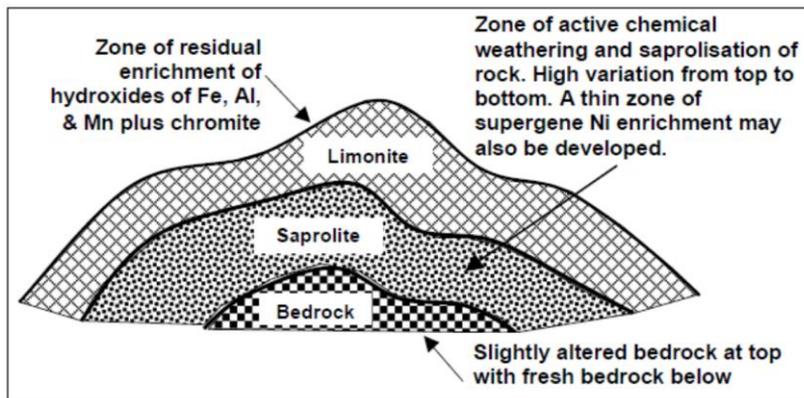
1.4.2.3 Profil Nikel Laterit

Profil Nikel laterit secara umum terdiri dari 3 zona yaitu zona limonit, zona saprolit dan zona bedrock seperti yang ditunjukkan pada gambar 2 (Ahmad, 2009)

1. Zona Limonit
Zona ini merupakan zona dimana unsur tidak dapat terlarut mencapai nilai maksimum. Semua unsur yang terlarut seperti Ca, Na, K, dan Si dari zona pelapukan meninggalkan Fe, Al, dan Mn yang teroksidasi di permukaan (tidak terlarut). Bagian atas dari zona yang kaya akan besi merupakan geothite sedangkan bagian bawahnya yang terbentuk dari hidrasi oksida besi dikelompokkan sebagai limonit. *Geothite* dapat termobilisasi ulang dekat permukaan yang kemudian mengkristal kembali sehingga disebut *ferricrete*. Struktur asli dan tekstur batuan asal sudah tidak terlihat lagi pada zona ini.
2. Zona Saprolit
Zona saprolit umumnya terletak dibawah permukaan air, pada daerah saturasi yang umumnya lembab/basah. Pelapukan dan reaksi kimia berlangsung di sepanjang kekar dan rekahan. Proses saprolisasi disepanjang permukaan rekahan mengarah pada pembentukan *boulder* di zona saprolit. Boulder dapat membentuk saprolit *crust* yang mengandung kadar nikel yang tinggi. Tekstur dan struktur batuan asal masih terlihat. Pada batuan asal yang tidak terserpentinisasi, proses saprolisasi terbatas pada permukaan batuan dasar yang diakibatkan karena sulitnya air menembus batuan dasar. Tingkat porositas pada umumnya meningkat pada bagian atas zona saprolit dan mencapai nilai maksimum pada zona pertengahan.

3. Zona *Bedrock*

Zona *bedrock* merupakan zona yang terletak paling bawah dari profil nikel laterit. Zona ini berasal dari batuan dasar yang belum terpengaruh oleh proses pelapukan.



Gambar 2. Profil Nikel Laterit (Ahmad, 2009)

1.4.2.4 Tipe Nikel Laterit Sorowako

Menurut Ahmad (2005), tipe endapan nikel laterit di daerah Sorowako pada dasarnya dibagi menjadi 2, yaitu blok barat (*west block*) dan blok timur (*east block*). Pembagian tipe endapan tersebut berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu tipe batuan ultramafik, derajat serpentinisasi, kandungan kimia bijih, fraksi batuan dan kandungan olivin.

1. Tipe Blok Barat (*West Type*)

Tipe ini didominasi oleh Harzburgit dengan beberapa batuan dunit yang kaya olivin. Kandungan olivin tinggi dan piroksen yang hadir umumnya orthopiroksen. Batuan di daerah ini umumnya tidak terserpentinisasi atau sedikit terserpentinisasi. Sifat material yang relatif keras menyebabkan kesulitan dalam penambangan, namun batuan di daerah ini menunjukkan rasio silika magnesia yang relatif lebih tinggi (2,2 - 2,6) dibanding *east type*.

2. Tipe Blok Timur (*East Type*)

Tipe ini didominasi oleh Lherzolit dengan kandungan olivin yang rendah dan mengandung orthopiroksen maupun klinopiroksen. Peningkatan derajat serpentinisasi di daerah ini didukung juga oleh peningkatan kandungan magnetik dalam material batuan. Sifat batuan relatif lebih lunak dan menunjukkan rasio silika magnesia yang lebih rendah (1,4 – 2) dibandingkan *west type*.

1.4.3 Potensial Pada Bumi Homogen Isotropik

Apabila suatu arus kontinu dialirkan ke dalam medium yang homogen isotropik, Jika dA adalah elemen luas permukaan dan J adalah rapat arus listrik (A/m^2), maka

besarnya elemen arus yang melalui elemen permukaan tersebut adalah (Telford dkk, 1990):

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

Sedangkan rapat arus J dan medan listrik E yang ditimbulkan dihubungkan dengan hukum Ohm

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

Dengan E medan listrik dalam volt/meter dan σ adalah konduktivitas medium dalam (Ω/m), karena medan listrik merupakan medan konservatif, maka medan listrik tidak lain adalah gradien potensial sehingga:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (3)$$

Dengan V adalah potensial listrik. Substitusi 3 ke persamaan 2, sehingga:

$$\vec{j} = -\sigma \vec{\nabla}V \quad (4)$$

Untuk arus tetap, maka berlaku persamaan:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (5)$$

Maka,

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla}V) = 0 \quad (6)$$

Persamaan 6 di selesaikan menggunakan teorema vektor, sehingga menghasilkan:

$$\vec{\nabla} \sigma \cdot \vec{\nabla}V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (7)$$

Jika σ adalah koefisien konstan, maka suku pertama pada persamaan (7) akan berubah menjadi nol dan memenuhi persamaan Laplace yang disebut potensial harmonik:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (8)$$

Persamaan Laplace dalam koordinat bola:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} \right) = 0 \quad (9)$$

1.4.3.1 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Dalam Bumi

Pada model homogen isotropis yang mana elektroda arus ditancapkan di dalam bumi yang berfungsi sebagai sumber injeksi arus listrik ke segala arah dalam bumi seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3 (Telford dkk, 1990). Pada setiap bidang equipotensial dalam bumi yang membentuk permukaan bola mempunyai jari-jari r . Dalam koordinat bola terlihat dari titik pusat terdapat simetri bola ke arah θ dan ϕ , maka turunan untuk suku θ dan ϕ pada persamaan 9 adalah nol, sehingga persamaan Laplace menjadi:

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0 \quad (10)$$

Integrasi sebanyak dua kali terhadap persamaan (10) menghasilkan:

$$\int \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = \int 0 \, dr \rightarrow r^2 \frac{dV}{dr} = A \rightarrow \frac{dV}{dr} = \frac{A}{r^2} \quad (11)$$

$$V = \int \frac{A}{r^2} \, dr = -\frac{A}{r} + C \quad (12)$$

Dengan A dan C adalah konstanta. Karena $V = 0$ pada saat jarak mendekati tak hingga ($r = \infty$), maka diperoleh $C = 0$, sehingga persamaan (12) menjadi:

$$V = -\frac{A}{r} \quad (13)$$

Dalam kasus sumber arus di dalam bumi homogen isotropik, maka medan-medannya equipotensialnya berbentuk bola. Sehingga jumlah arus yang menembus permukaan medan equipotensial berbentuk bola tersebut adalah:

$$I = \vec{A} \cdot \vec{j} \quad (14)$$

Pada persamaan (14) luas permukaan equipotensial berbentuk bola adalah

$A = 4\pi r^2$, maka didapatkan:

$$I = 4\pi r^2 (-\sigma \vec{\nabla} V) \quad (15)$$

Karena V dalam fungsi $r \rightarrow \vec{\nabla} V = \frac{dv}{dr}$, kemudian persamaan (11) disubstitusikan ke persamaan (15) maka,

$$I = -4\pi r^2 \sigma \frac{A}{r^2} = -4\pi \sigma A \quad (16)$$

Karena $\sigma = \frac{1}{\rho}$, maka persamaan (16) dapat ditulis:

$$I = -4\pi \frac{1}{\rho} A \rightarrow A = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (17)$$

Persamaan (17) disubstitusikan pada persamaan (13) maka dihasilkan:

$$V = \left(\frac{I\rho}{4\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (18)$$

Dengan,

V = Potensial Listrik (Volt)

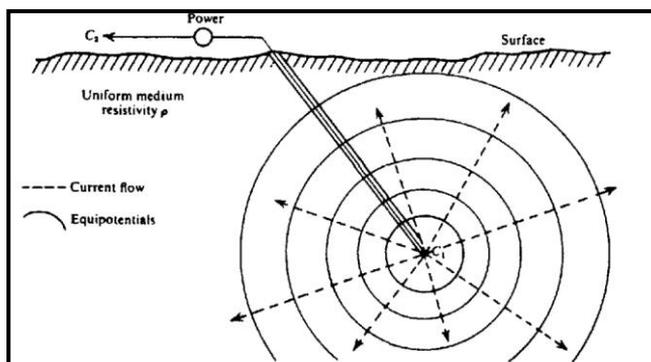
I = Kuat Arus Listrik (Ampere)

ρ = Resistivitas (Ohm.m)

P = Konstanta

\vec{J} = Rapat Arus (A/m^2)

σ = Konduktivitas (S/m)

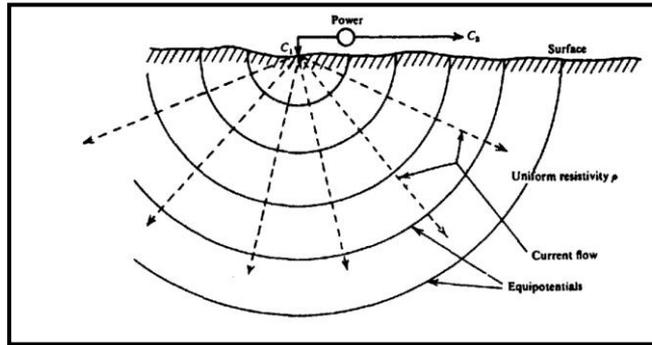


Gambar 3. Sumber Arus Di Dalam Bumi (Telford dkk,1990)

1.4.3.2 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Permukaan Bumi

Apabila elektroda arus berada di permukaan pada medium homogen isotropik seperti yang diilustrasikan pada gambar 4 dan nilai konduktivitas udara sama dengan nol, maka bidang equipotensial yang tinggal membentuk setengah bola sehingga persamaan 18 menjadi: (Telford dkk, 1990):

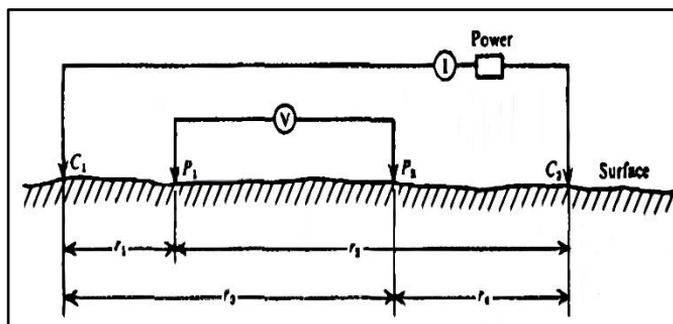
$$V = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (19)$$



Gambar 4. Sumber Arus Di Permukaan Bumi (Telford dkk,1990)

1.4.3.3 Potensial Oleh Dua Sumber Arus di Permukaan Bumi

Pada pengukuran geofisika resistivitas umumnya menggunakan dua buah elektroda arus dan dua buah elektroda potensial seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5. 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 5. Dua Elektroda Arus dan Potensial di Permukaan (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 P_1 yang ditimbulkan arus C_1 dan C_2 adalah (Telford dkk., 1990):

$$V_{P1} = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (20)$$

Dan potensial total di titik P_2 yang ditimbulkan arus C_1 dan C_2 adalah:

$$V_{P2} = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) \quad (21)$$

Beda potensial antara P_1 dan P_2 sebagai berikut:

$$\Delta V = V_{P1} - V_{P2} \rightarrow \Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) \right\} \quad (22)$$

Sehingga didapatkan persamaan:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \frac{\Delta V}{I} \quad (23)$$

Atau dapat dituliskan:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (24)$$

Dengan:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \quad (25)$$

ΔV adalah beda potensial antara P_1 dan P_2 , I adalah kuat arus (A), ρ adalah resistivitas semu (Ωm), r_1 adalah jarak C_1 ke P_1 (m), r_2 adalah jarak C_2 ke P_1 (m), r_3 adalah jarak C_1 ke P_2 (m), r_4 adalah jarak C_2 ke P_2 (m), dan K adalah faktor geometri.

1.4.4 Metode Electrical Resistivity Tomography (ERT)

Metode geolistrik merupakan metode yang mampu mendeteksi keberadaan bawah permukaan. Metode ini mempelajari sifat aliran listrik di bumi dan cara mendeteksinya di permukaan bumi. Salah satu metode geolistrik yaitu metode geolistrik resistivitas (Massiani dkk, 2018). Metode geolistrik resistivitas merupakan metode geofisika yang bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat kelistrikan lapisan batuan di bawah permukaan bumi dengan cara menginjeksikan arus listrik ke dalam bumi melalui sepasang elektroda arus, kemudian mengukur respon beda potensial listrik melalui sepasang elektroda potensial. Kelebihan metode ini adalah efisiensi pada akuisisi data dan tidak memerlukan pengeboran, yang cenderung akan merusak sifat asli tanah (Erfan dkk, 2019).

Prinsip dasar metode geolistrik resistivitas adalah hukum Ohm, yang menghubungkan antara arus listrik yang mengalir pada sebuah material konduktif dengan tegangan listrik yang di hasilkan. Hubungan secara matematis dari hukum tersebut dapat ditulis:

$$\Delta V = I \cdot R \quad (26)$$

Dengan:

ΔV = Beda Potensial (Volt)

I = Arus Listrik (Ampere)

R = Resistansi (Ohm)

Resistivitas listrik tidak hanya dipengaruhi oleh jenis material, akan tetapi juga dipengaruhi oleh bentuk geometri bahan yang dilewati arus listrik. Dengan demikian, bentuk geometri dan tahanan listrik suatu bahan merupakan parameter

penting di dalam menentukan nilai resistivitas suatu material, dengan hubungan matematis seperti berikut:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (27)$$

Dengan:

R = Resistansi (Ohm)

ρ = Resistivitas (Ohm.m)

L = Perubahan panjang penampang (m)

A = Luas penampang (m²)

Substitusi persamaan (26) ke persamaan (27) menghasilkan hubungan matematis seperti:

$$\rho = \frac{A}{L} \frac{\Delta V}{I} \quad (28)$$

Resistivitas (ρ) yang sesungguhnya dari suatu material dapat di hitung menggunakan persamaan 28. Namun, istilah resistivitas semu (ρ_a) muncul karena dalam kenyataannya, bumi atau lapisan dibawah permukaan bukanlah material yang homogen. Nilai resistivitas yang terbaca dalam pengukuran geolistrik tahanan jenis adalah fiktif homogen yang diasumsikan sebagai gambaran dari struktur bawah permukaan bumi yang berlapis-lapis. (Erfan dkk, 2019)

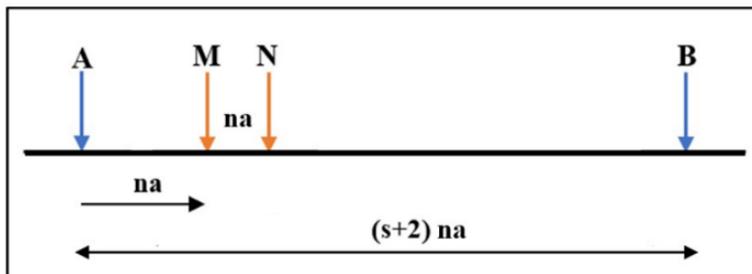
Formulasi kemudian berubah dengan memperhatikan faktor resistivitas dari nilai sesungguhnya, melalui hubungan berikut:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (29)$$

1.4.5 Konfigurasi *Gradient*

Dalam eksplorasi, tata letak elektroda memiliki dampak yang signifikan dalam menentukan sensitivitas pengukuran target. Penempatan elektroda dikenal sebagai konfigurasi elektroda. Metode umum untuk penempatan elektroda meliputi Wenner, Schlumberger dan Dipole-Dipole. Walaupun demikian, ada variasi lain dalam penempatan elektroda, seperti konfigurasi *gradient*.

Konfigurasi *gradient* merupakan konfigurasi dengan menggunakan sistem *multichannel* dan *multielektroda* dan mampu memberikan hasil resolusi yang baik di bawah permukaan di banding dengan konfigurasi lain, karena memiliki lebih banyak titik datum. Konfigurasi *gradient* adalah gabungan dari konfigurasi schlumberger, wenner dan pole-dipole (Dahlin dan Zhou, 2004). Pada konfigurasi *gradient*, elektroda potensial (MN) akan berpindah secara bertahap sepanjang garis antara elektroda arus yang tetap. Setelah perpindahan elektroda potensial telah mencapai pembacaan maksimum, selanjutnya elektroda arus (AB) akan berpindah atau bergeser ke elektroda selanjutnya.



Gambar 6. Sketsa Susunan Konfigurasi Gradient (Dahlin dan Zhou,2006)

Gambar 6 memperlihatkan sketsa dari Konfigurasi *gradient*. Dengan $(s+2)na$ merupakan jarak pemisah antara elektroda arus A dan B. Selanjutnya elektroda potensial berada di tengah elektroda arus dengan jarak spasi na dan s adalah bilangan bulat dimana merupakan nilai maksimum perpindahan elektroda potensial diantara elektroda arus. Sedangkan n adalah faktor rasio jarak antara elektroda arus dengan potensial.

Faktor geometri konfigurasi Gradient:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \quad (30)$$

Dimana,

$$r_1 = na, r_2 = (s + 1)na, r_3 = 2na \text{ dan } r_4 = sna$$

Keterangan:

na = jarak spasi elektroda

n = faktor rasio jarak antara elektroda arus dengan potensial

s = faktor separasi/perpindahan elektroda

1.4.6 Pemodelan Geofisika

Dalam geofisika, model dan parameter model digunakan untuk mengkarakterisasi suatu kondisi geologi bawah permukaan. Pemodelan merupakan proses estimasi model dan parameter model berdasarkan data yang diamati di permukaan bumi (Grandis,2009).

1.4.6.1 Forward Modeling

Pemodelan ke depan (*forward modelling*) menyatakan proses perhitungan data yang secara teoritis akan teramati di permukaan bumi jika diketahui harga parameter model bawah permukaan tertentu.

Untuk memperoleh kesesuaian antara data teoritis (respon model) dengan data lapangan dapat dilakukan proses coba-coba (*trial and error*) dengan mengubah harga parameter model. Seringkali istilah pemodelan ke depan atau *forward modelling* digunakan untuk menyatakan pemodelan data geofisika dengan cara

coba-coba tersebut. Dengan kata lain, istilah pemodelan ke depan tidak hanya mencakup perhitungan respons model tetapi juga proses coba-coba secara manual untuk memperoleh model yang memberikan respons yang cocok dengan data (Grandis, 2009).

Salah satu metode yang terdapat pada pemodelan ke depan (*forward modelling*) yaitu metode elemen hingga atau biasa disebut *finite element method*. Metode *finite element* merupakan teknik matematika yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial yang rumit dengan membagi domain menjadi bagian-bagian kecil yang lebih mudah dihitung, yang disebut elemen. Setiap elemen memiliki titik simpul atau node yang merepresentasikan solusi persamaan diferensial parsial (Bargallo, 2006). Setiap node memiliki fungsi bentuk (*shape function*) yang berbeda-beda yang ditampilkan pada persamaan (25) (Xiong, 2002).

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(1-\xi)(1-\eta)}{4} \\ N_2 &= \frac{(1+\xi)(1-\eta)}{4} \\ N_3 &= \frac{(1+\xi)(1+\eta)}{4} \\ N_4 &= \frac{(1-\xi)(1+\eta)}{4} \end{aligned} \quad (31)$$

Variasi potensial listrik pada penampang geolistrik 2D diberikan oleh:

$$F(U) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 + \frac{1}{2} \sigma k^2 U^2 - I \delta(A) U \right] d\Omega \quad (32)$$

Daerah domain Ω didiskritisasi dengan elemen segi empat. Jumlah node total adalah n , maka integral domain Ω didekomposisi menjadi integral untuk setiap elemen e (Cai dkk., 2007).

$$F(U) = \sum_{\Omega} \int_e \frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 d\Omega + \sum_{\Omega} \frac{1}{2} \sigma k^2 U^2 d\Omega - \sum_{\Omega} I \delta(A) U d\Omega \quad (33)$$

$$KU = P \quad (34)$$

$$F(U) = \frac{1}{2} U_e^T K_{1e} U_e + \frac{1}{2} U_e^T K_{2e} U_e - U^T P \quad (35)$$

$$= U^T KU - U^T P \quad (36)$$

$$= KU - P \quad (37)$$

Dengan $F(U) = 0$, maka

$$KU = P \quad (38)$$

Dengan K adalah matriks orde $m \times m$ yang merupakan penjumlahan dari $(k_{e1} + k_{e2})$, U adalah vektor kolom yang merupakan potensial listrik dari semua titik elemen dalam domain *wave-number*.

Persamaan linear ($KU = P$) diselesaikan untuk memperoleh potensial listrik (U) dari setiap elemen dalam domain. Kemudian dengan menggunakan transformasi invers fourier diperoleh potensial listrik kompleks dalam ruang 3D. persamaan Transformasi Inverse Fourier (Cai dkk., 2007):

$$u(M) = \sum_{i=1}^5 g_i U(M, k_i) \quad (39)$$

Dimana M adalah posisi titik observasi, k_i adalah bilangan gelombang, dan g_i adalah koefisien pembobotan.

Untuk posisi elektroda arus tertentu resistivitas semu dapat dihitung dengan persamaan (Cai dkk., 2007).

$$\rho_a = G \frac{u(M) - u(N)}{I} \quad (40)$$

Dengan ρ_a adalah resistivitas semu, G adalah faktor geometri, $u(M)$ dan $u(N)$ adalah potensial listrik pada node yang diukur oleh elektroda M dan N dan I adalah arus.

1.4.6.2 Inverse Modeling

Inverse modelling merupakan kebalikan dari *forward modelling* (Pemodelan ke depan) karena dalam pemodelan inversi parameter model diperoleh secara langsung dari data. Pemodelan inversi sering pula disebut sebagai *data fitting* karena dalam prosesnya dicari parameter model yang menghasilkan respon yang fit dengan data pengamatan (Grandis, 2009).

Pemodelan inversi 2D dilakukan menggunakan perangkat lunak Res2dinv untuk mendapatkan nilai resistivitas yang sebenarnya. Dalam inversi 2D, sifat-sifat tanah diasumsikan konstan tegak lurus terhadap garis profil, sedangkan elektroda arus dimodelkan sebagai sumber 3D. Model beda hingga (*finite difference*) atau elemen hingga (*Finite element*) yang dihasilkan dari distribusi resistivitas di dalam tanah, disesuaikan secara iteratif agar sesuai dengan data sehingga meminimalkan perbedaan antara respon model dan data yang diukur (model residual). Hal ini dapat dilakukan dengan meminimalkan nilai absolut dari perbedaan (inversi dengan L_1 -norm atau *robust-constrain inversion*), atau meminimalkan kuadrat perbedaan (inversi dengan L_2 -norm atau *smoothness-constrained least square inversion*).

Metode *smoothness-constrained* (L_2 -norm) adalah salah satu metode yang umum digunakan. Metode ini meminimalkan jumlah kuadrat dari perubahan spasial pada resistivitas model dan ketidaksesuaian data. Metode ini memberikan hasil yang baik di mana geologi bawah permukaan menunjukkan variasi yang halus, seperti perubahan bertahap dalam kandungan material dalam tanah atau perubahan bertahap dalam komposisi kimia. Akan tetapi, dalam kasus dimana terjadi perbedaan nilai resistivitas yang besar di bawah permukaan, misalnya kontak antara inti batuan

sedimen berbutir halus dan batuan beku segar, metode ini cenderung menciptakan overshooting dan undershooting pada masing-masing sisi batas. Sebagai alternatif, metode L_1 -norm menghasilkan model dengan daerah yang lebih berbentuk blok, dimana nilai-nilai pada setiap bagian dipisahkan oleh batas-batas yang tajam. Metode inversi L_1 -norm mampu mereduksi data *outlier* jika dibandingkan dengan L_2 -norm. Metode *robust constrain inversion* mampu menunjukkan dengan sangat baik hasil resolusi batas antar lapisan. Formulasi matematis yang digunakan pada metode optimasi L_2 -norm dan L_1 -norm diberikan di bawah ini (Johansson dkk, 2005).

Metode *smoothness-constrained* (L_2 -norm) didasarkan pada persamaan berikut:

$$(J_i^T J_i + \lambda_i W^T W) \delta m_i = J_i^T \delta d_i - \lambda_i W^T W m_{i-1} \quad (41)$$

di mana i adalah jumlah iterasi, J_i adalah matriks Jacobian dari turunan parsial, δd_i adalah vektor perbedaan yang berisi perbedaan antara logaritma nilai resistivitas semu yang diukur dan dihitung, λ_i adalah faktor redaman, δm_i adalah vektor perturbasi ke parameter model untuk iterasi ke- i , dan m_{i-1} adalah model vektor parameter model untuk iterasi sebelumnya. Parameter model adalah logaritma dari nilai resistivitas sel dalam model. W adalah filter kekasaran yang membatasi kekasaran parameter model, dan dapat disesuaikan berdasarkan yang tersedia informasi untuk menekankan sifat perubahan spasial dalam resistivitas model nilai.

Pada metode *least square* menggunakan kuadrat dari ketidaksesuaian data, metode ini cenderung memberikan pengaruh yang lebih besar pada titik data dengan ketidaksesuaian yang lebih besar. Hal ini menyebabkan metode tersebut sangat sensitif terhadap titik data yang buruk. Metode robust dapat meminimalkan jumlah dari nilai absolut dari ketidaksesuaian data, atau ukuran norma L_1 dari ketidaksesuaian data. Salah satu metode untuk mengimplementasikan metode optimasi berbasis L_1 -norm menggunakan formulasi *least square* adalah metode *iteratively reweighted least-squares*. Optimasi dalam persamaan (2.40) dimodifikasi menjadi:

$$(J_i^T R_d J_i + \lambda_i W^T R_m W) \Delta r_i = J_i^T R_d g_i - \lambda_i W^T R_m W r_{i-1} \quad (42)$$

di mana R_d dan R_m adalah matriks pembobotan sehingga elemen yang berbeda dari ketidaksesuaian data dan vektor kekasaran model diberikan bobot yang kurang lebih sama dalam proses inversi. Ketika norma L_1 diterapkan pada filter kekasaran model, maka metode inversi cenderung menghasilkan model yang terdiri dari area dengan nilai resistivitas yang konstan (Johansson dkk, 2005).

1.4.7 Hubungan Antara Geologi dan Nilai Resistivitas

Setiap batuan memiliki nilai resistivitas dan konduktivitas yang berbeda tergantung pada karakteristik geologi daerah setempat. Umumnya batuan beku dan metamorf

cenderung memiliki nilai resistivitas yang tinggi, sebaliknya batuan sedimen biasanya memiliki nilai resistivitas rendah bila dibandingkan dengan batuan beku dan metamorf. Hal ini dikarenakan tekstur batuan sedimen memiliki nilai porositas yang tinggi dan cenderung meresap air (Paembonan dkk, 2021).

Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai resistivitas pada batuan yaitu (Telford kk, 1990):

a. Tipe Batuan dan Mineral

Resistivitas batuan sangat bervariasi bergantung pada tipe batuan atau mineral. Variasi nilai resistivitas pada jenis batuan dikarenakan proses yang terjadi saat pembentukan batuan tersebut. Mineral yang memiliki karakter yang berbeda-beda membuat nilai resistivitas pada jenis batuan berbeda-beda pula. Semakin tinggi resistivitas pada batuan, maka kemampuan batuan dalam menghambat listrik semakin besar.

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

Material	Resistivitas (Ωm)
Air Tanah (ground water)	0.5 – 10
Topsoil	250 – 170
Gabro	100 – 500000
Batu Pasir (Sandstone)	200 – 8000
Gamping (Limestone)	50 – 10000000
Basal (Basalt)	1000 – 1000000
Kwarsa (Quartz)	500 – 800000
Peridotite	3000 – 650000
Batu Serpih (Shale)	20 – 2000
Konglomerat	6000 – 20000
Kerikil (Gravel)	100 – 600
Lempung (Clay)	1 – 100
Limonite	10000 – 10000000
Laterite	800 – 1500
Laterite Soil	120 – 750

b. Porositas

Hubungan antara resistivitas dan porositas adalah berbanding terbalik. Semakin besar porositas maka semakin kecil resistivitas, hal ini dikarenakan batuan yang memiliki pori lebih besar maka di dalam pori tersebut akan tersaturasi lebih banyak oleh fluida khususnya air dan air memiliki resistivitas rendah (mudah menghantarkan listrik) karena memiliki banyak electron bebas yang akan mempengaruhi daya hantar listrik dari suatu batuan tersebut akan semakin rendah.

c. Permeabilitas

Permeabilitas memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan porositas karena semakin besar porositas pada suatu batuan maka semakin baik kemampuan batuan

tersebut dalam mengalirkan fluida. Sehingga hubungan antara resistivitas dan permeabilitas adalah berbanding terbalik.

d. Saturasi Air

Nilai Resistivitas batuan berbanding terbalik dengan nilai saturasinya. minyak dan gas adalah insulator listrik, yang tidak dapat mengalirkan aliran listrik dan mengakibatkan resistivitas nya sangat besar. Batuan dalam terisi oleh air formasi dan minyak. Semakin kecil saturasi air makin banyak minyak dalam pori dan resistivitas batuan makin besar.

e. Salinitas

Salinitas adalah tingkat keasinan atau kadar garam terlarut dalam air. Salinitas juga mengacu pada kandungan garam dalam tanah. Elektrolit / ion seperti natrium klorida, magnesium klorida, kalsium klorida dan sebagainya membantu meningkatkan konduktivitas. Elektrolit ini merupakan elektrolit jenis garam. Tingkat kadar garam dalam batuan ataupun air dapat diukur dari kadar salinitas nya. Semakin tinggi salinitas nya maka semakin tinggi konduktivitas nya dan semakin rendah resistivitas. Jadi hubungan antara resistivitas dan salinitas adalah berbanding terbalik.

1.4.8 Rock Quality Designation (RQD)

Rock Quality Designation (RQD) merupakan sebuah indeks atau ukuran kualitas batuan. Distribusi dan klasifikasi kualitas batuan akan sangat membantu dalam memberikan informasi kondisi batuan setempat (Patiung, 2021).

Pada tahun 1967, D.U. Deere memperkenalkan Rock Quality Designation (RQD) sebagai metode untuk memperkirakan kualitas dari massa batuan secara kuantitatif. Hanya bagian yang utuh dengan panjang lebih besar dari 10 cm yang dijumlahkan kemudian dibagi panjang total pengeboran (core run). Dalam hal ini, inti terambil yang lunak atau tidak keras tidak perlu dihitung walaupun mempunyai panjang lebih dari 10 cm (Deere, 1967). Diameter ini bor (core) harus berukuran minimal NW (54,7 mm atau 2,15 inch). RQD juga menandakan tingkat jointing atau fraktur dalam massa batuan yang diukur dalam persentase. Semakin tinggi tingkat fraktur menandakan RQD rendah dengan kualitas batuan rendah dan sebaliknya.

$$RQD = \frac{\sum \text{Lenght of core pieces } > 10 \text{ cm leng}}{\text{Total lenght of core run}} \times 100\% \quad (43)$$

Hubungan antara nilai RQD dan kualitas dari suatu massa batuan diperkenalkan oleh Deere (1967) seperti table berikut ini.

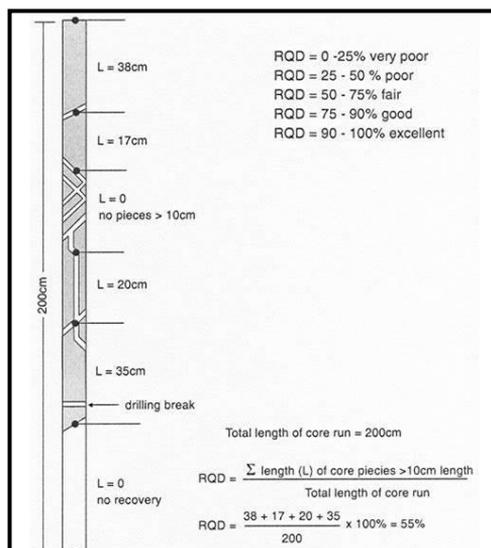
Tabel 2. Hubungan RQD dan kualitas massa batuan (Deere, 1967)

RQD (%)	Kualitas Batuan
< 25	Sangat Jelek (Very Poor)
25 – 50	Jelek (Poor)
50 – 75	Sedang (Fair)
75 – 90	Baik (Good)
90 – 100	Sangat Baik (Excellent)

1.4.8.1 Metode Langsung

Dalam menghitung nilai RQD, metode langsung digunakan apabila core logs tersedia. Tata cara untuk menghitung RQD menurut Deere diilustrasikan pada gambar dibawah. Selama pengukuran panjang core pieces, Pengukuran harus dilakukan sepanjang garis tengahnya. Inti bor (core) yang pecah atau retak akibat aktivitas pengeboran atau secara alami. Semua pecahan atau retakan yang bukan terjadi secara alami tidak diperhitungkan pada perhitungan panjang inti bor (core) untuk RQD (Deere, 1967).

Berdasarkan pengalaman Deere, semua ukuran inti bor (core) dan teknik pengeboran dapat digunakan dalam perhitungan RQD selama tidak menyebabkan inti bor (Core) pecah.

**Gambar 7.** Metode Pengukuran RQD Menurut Deere

1.4.8.2 Korelasi Antara RQD (*Rock Quality Designation*) dan Metode ERT (*Electrical Resistivity Tomography*)

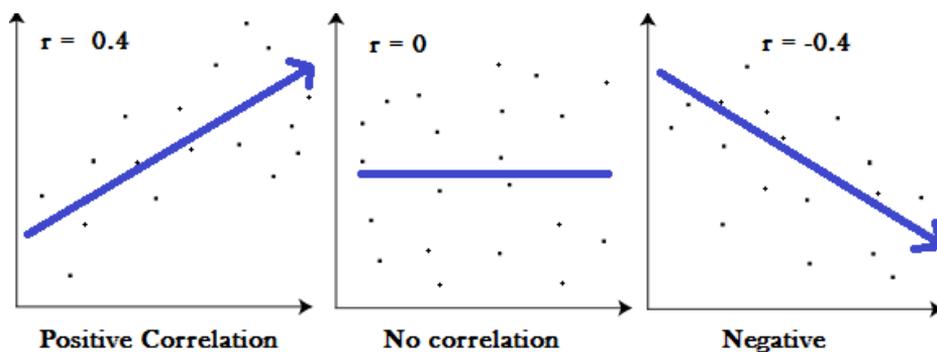
Penelitian yang dilakukan Hasan (2023) di Huidog, Cina Selatan menjelaskan tentang bagaimana menentukan nilai RQD dengan pendekatan geofisika ERT. Secara konvensional, RQD dihitung dengan menggunakan inti batuan dari beberapa lubang bor. Namun, proses pengeboran memakan waktu dan biaya, hampir tidak

dapat dilakukan pada topografi yang curam, membutuhkan lebih banyak peralatan, dan hanya menyediakan pengukuran vertikal skala titik pada kedalaman yang dangkal. Metode geofisika (ERT), sebagai alternatif, bersifat non-invasif, lebih cepat, dan lebih ekonomis, menyediakan pengukuran volumetrik bawah permukaan, dan dapat digunakan bahkan di medan topografi yang curam.

Hasan melakukan penelitian di tiga zona batuan yang berbeda yaitu batuan yang sangat retak (*high fracture*), batuan yang sebagian retak (*medium fracture*) dan untuk batuan yang masih utuh (masif). Zona batuan paling atas merupakan lapisan yang sangat retak (lapuk) yang memiliki resistivitas $<400 \Omega\text{m}$ dan RQD yang bervariasi dari 0-50%. Zona berikutnya merupakan lapisan yang sebagian retak yang terletak diantara lapisan yang sangat retak (lapuk) dan zona batuan yang tidak mengalami pelapukan, dinilai memiliki resistivitas $400-1000 \Omega\text{m}$ dan RQD antara 50-75%. Zona paling bawah dievaluasi sebagai bedrock yang tidak terpengaruh pelapukan (segar) yang memiliki nilai resistivitas $>1000 \Omega\text{m}$ dan RQD dari 75-100%. Nilai RQD dan resistivitas menunjukkan adanya hubungan, dimana nilai RQD berbanding lurus dengan resistivitas. Untuk batuan utuh (segar) dengan RQD tinggi memiliki nilai resistivitas yang tinggi pula. Untuk batuan yang retak dengan RQD rendah juga memiliki nilai resistivitas rendah (Hasan dkk, 2023).

1.4.9 Konsep Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi digunakan untuk mengetahui besarnya atau kekuatan hubungan antara antara dua variabel. Koefisien korelasi menunjukkan seberapa erat (kuat, lemah, atau tidak ada) hubungan antara variabel-variabel tersebut. Hubungan ini bisa positif atau negatif. Nilai koefisien korelasi berkisar antara -1 hingga +1, dengan koefisien +1 yang menunjukkan bahwa kedua variabel sangat terkait secara positif (linier), koefisien -1 mengindikasikan bahwa dua variabel berhubungan sempurna secara negatif (linier), dan koefisien 0 menunjukkan tidak adanya hubungan linier antara kedua variabel. Untuk memahami besaran koefisien korelasi, dapat dilihat pada gambar 8 yang menggambarkan korelasi positif, tidak ada korelasi, dan korelasi negatif (Mustafa, 2023).



Gambar 8. Arah Koefisien Korelasi

Rumus koefisien korelasi:

$$r_{xy} = \frac{N \Sigma XY - \Sigma X \Sigma Y}{\sqrt{[N \Sigma X^2 - (\Sigma X)^2][N \Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2]}} \quad (44)$$

Keterangan

r_{xy} = Koefisien korelasi antara variabel X dan Y

ΣX = Jumlah skor yang diperoleh dari responden yang diuji

ΣY = Jumlah skor total seluruh item dari keseluruhan responden yang diuji

N = Jumlah responden

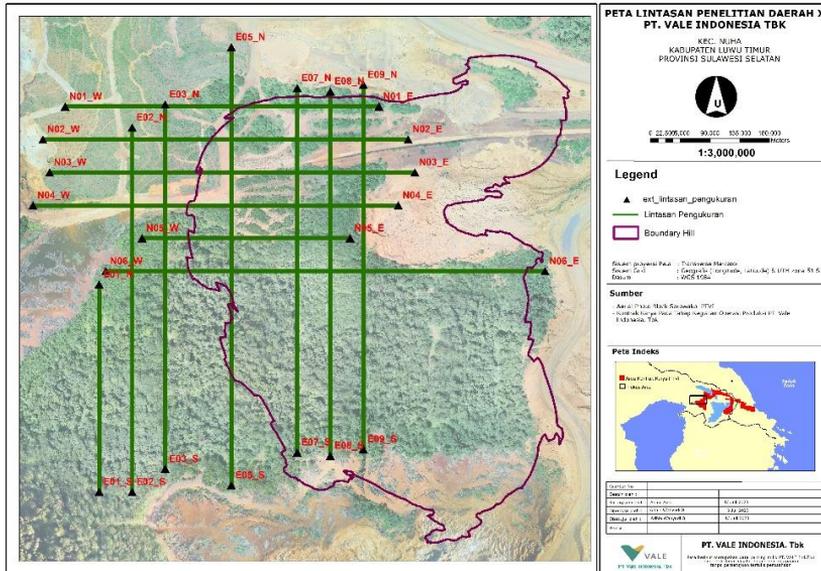
Tabel 3. Interval nilai koefisien korelasi dan kekuatan hubungan

Interval Nilai	Tingkat Hubungan
0,000–0,199	Sangat lemah/sangat rendah
0,200–0,399	Lemah/rendah
0,400–0,599	Sedang/cukup
0,600–0,799	Kuat/tinggi
0,800–0,100	Sangat kuat/sangat tinggi

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak pada daerah “NK” yang merupakan wilayah kuasa pertambangan PT. Vale Indonesia, yang secara administratif terletak pada daerah Sorowako, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan yang ditunjukkan oleh gambar 9.



Gambar 9. Peta Lintasan ERT

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam pengolahan data yaitu:

- Software Res2Dinv*
- Software Datamine Studio RM*
- Microsoft Excel*

2.2.2 Bahan

Data penelitian berupa data sekunder perusahaan PT Vale Indonesia Tbk yang terdiri dari:

1. Data ERT

Data pengukuran ERT *konfigurasi gradien* sebanyak 11 lintasan yang terdiri dari 6 lintasan arah Utara-Selatan dan 5 lintasan arah Timur-Barat. Data yang diolah terdiri dari nilai resistivitas dan topografi dari setiap lintasan.

2. Data bor

Data Bor sebanyak 51 data yang *overlap* dengan lintasan ERT. Data bor yang digunakan terdiri dari data *Assay* dan data *Collar*.

3. *Photo Core*

Photo Core sebanyak 51 yang digunakan untuk menghitung nilai RQD.

2.3 Prosedur Penelitian

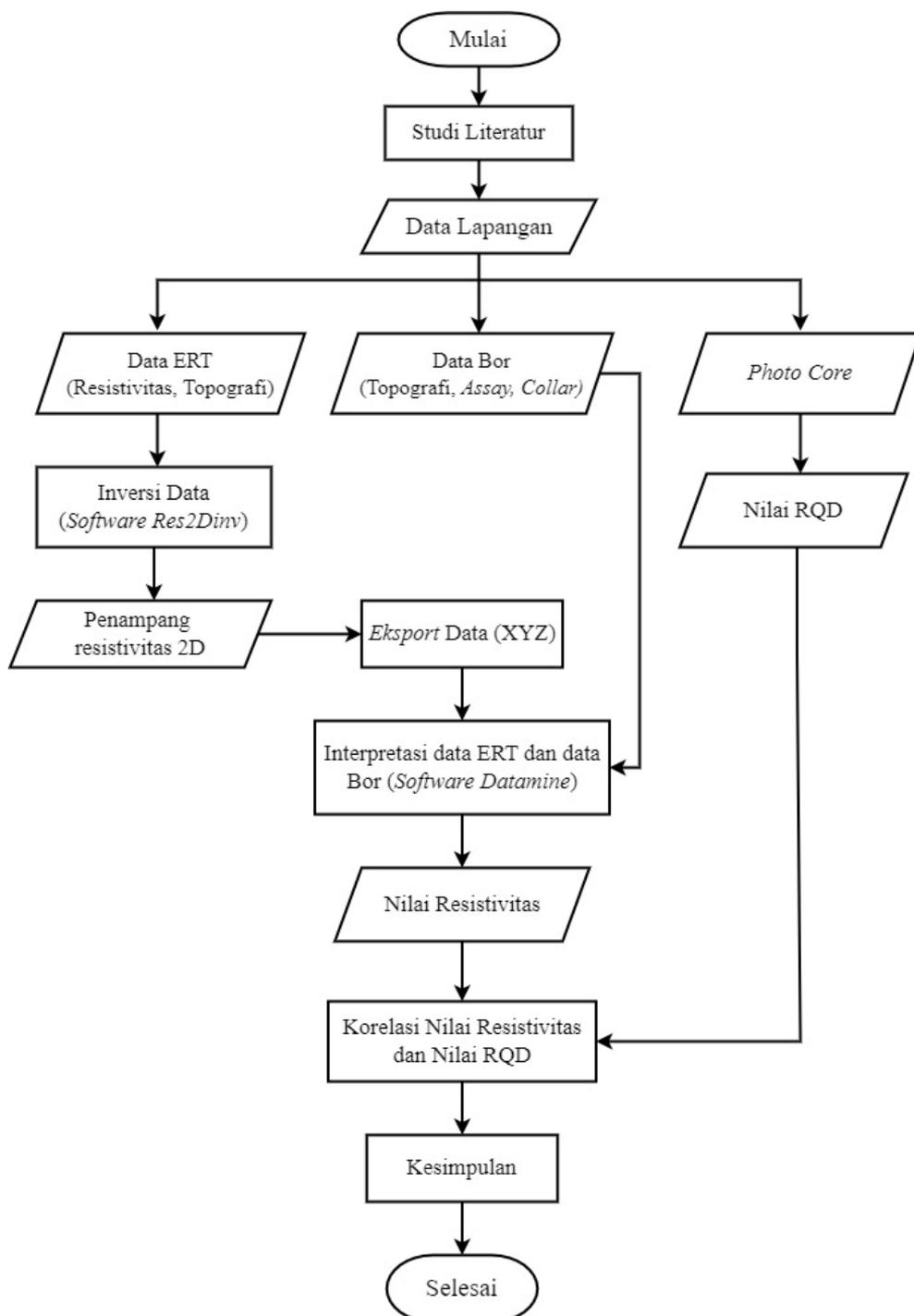
2.3.1 Tahap Kajian Pustaka

Tahapan ini meliputi pengumpulan berbagai macam literatur yang berhubungan dengan metode geolistrik ERT, metode RQD dan eksplorasi Nikel.

2.3.2 Tahap Pengolahan Data

1. Data lapangan diperoleh dari PT. Vale Indonesia Tbk. Data lapangan berupa data sekunder yang terdiri 11 lintasan pengukuran ERT. Data yang diperoleh merupakan data nilai resistivitas semu, sehingga dilakukan proses inversi untuk mendapatkan nilai resistivitas sebenarnya.
2. Data lapangan dengan format *.dat* kemudian dilakukan proses inversi pada *software Res2Dinv* dengan memasukkan parameter inversi yang telah ditentukan oleh perusahaan, sehingga diperoleh penampang resistivitas 2D hasil inversi.
3. Data hasil inversi, di *ekspor* dalam format *(.xyz)*. kemudian data XYZ diubah menjadi format *CSV* agar dapat dibaca oleh *software datamine*. Selanjutnya dilakukan pengolahan data pada *software datamine* untuk mendapatkan penampang 2D dalam bentuk kontur, kemudian dilakukan korelasi dengan data bor untuk memudahkan tahap interpretasi. Pada tahap interpretasi dilakukan penarikan *batas limonit bottom* dan *saprolit bottom*.
4. Selanjutnya melakukan perhitungan nilai *RQD* melalui *photo core*. Nilai *RQD* dihitung untuk setiap kedalaman pada *bedrock*. Begitupun dengan nilai resistivitas. Nilai resistivitas di ambil dari nilai kontur rata-rata yang melewati setiap kedalaman pada *bedrock*.
5. Data nilai *RQD* dan resistivitas yang diperoleh pada zona *bedrock*, kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui hubungan antara kedua variabel tersebut.

2.4 Bagan Alir Penelitian



Gambar 10. Peta Lintasan ERT