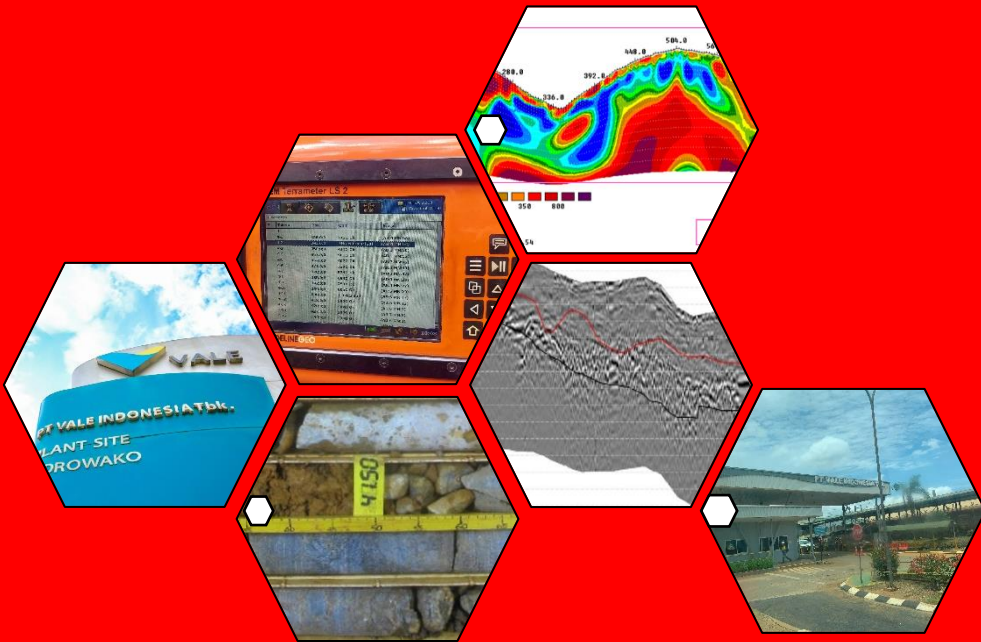


PERBANDINGAN METODE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT) DAN METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR) DALAM PENENTUAN BATAS DAN KETEBALAN LAPISAN LATERIT



**ISMI ZALSABILLA
H061 19 1085**



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

**PERBANDINGAN METODE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY
(ERT) DAN METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR) DALAM
PENENTUAN BATAS DAN KETEBALAN LAPISAN LATERIT**

**ISMI ZALSABILLA
H061 19 1085**



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

**PERBANDINGAN METODE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY
(ERT) DAN METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR) DALAM
PENENTUAN BATAS DAN KETEBALAN LAPISAN LATERIT**

**ISMI ZALSABILLA
H061 19 1085**

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**PERBANDINGAN METODE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY
(ERT) DAN METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR) DALAM
PENENTUAN BATAS DAN KETEBALAN LAPISAN NIKEL LATERIT**

ISMI ZALSABILLA
H061 19 1085

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Geofisika pada tanggal 09 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 Pendamping



Sabrianto Aswad, S.Si. MT
NIP. 197805242005011002



Syamsuddin, S.Si. MT
NIP. 197401152002121001

Mengetahui:
Ketua Program Studi Geofisika



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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul “Perbandingan Metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) Dan Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) Dalam Penentuan Batas Dan Ketebalan Lapisan Laterit” adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing Sabrianto Aswad, S.Si., M.T sebagai Pembimbing Utama dan Syamsuddin 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, 06 Agustus 2024



Ismi Zalsabilla
H061191085

UCAPAN TERIMA KASIH

Tiada kata yang paling indah selain puji dan rasa syukur kepada Allah SWT, yang telah menentukan segala sesuatu berada di tangan-Nya. Alhamdulillah atas hidayah dan inayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan Skripsi ini yang berjudul: **Perbandingan Metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) Dan Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) Dalam Penentuan Batas Dan Ketebalan Lapisan Nikel Laterit** yang merupakan syarat dalam rangka penyelesaian studi untuk menempuh gelar Sarjana Sains di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin Kota Makassar.

Skripsi ini dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan dari dosen pembimbing, bapak **Sabrianto Aswad, S.Si., M.T** dan **Syamsuddin, S.Si., M.T** serta dosen penguji Bapak **Drs.Erfan, M.Si** dan Bapak **Andi Muhammad Prammadite, ST, M.Eng, Ph.D.** penulis mengucapkan terima kasih atas ilmu, arahan, koreksi dan sarannya yang telah membuat penulis menjadi lebih banyak pengetahuan. Penghargaan yang tinggi juga penulis sampaikan kepada Mas **Dony**, Mba **Meida Reizki** dan Mas **Firdaus** yang telah memberikan pengalaman dan ilmu kepada penulis selama kerja praktek. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Om **Adhie Wahyudi**, Om **Muh. Erwin Syam**, Kak **Hidayat Latuconsina**, Kak **Muammar Hakim**, Kak **Asnur Azis**, Kak **Iswar Edis Pratama**, dan Kak **Akram Ramadhanyang** telah banyak memberikan bantuan serta meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan ilmu dan pengalaman serta memotivasi penulis dalam penyusunan Tugas Akhir.

Selanjutnya penulis haturkan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada Ayahanda **Masruddin Pasau, SE** dan Ibunda **Hj.Rosmiati Ahmad, SE** tercinta yang senantiasa mendoakan dan memberikan semangat yang luar biasa serta memberikan dukungan moral maupun materil dalam mendampingi penulis sehingga mendapatkan kemudahan dalam menyelesaikan tugas akademik tepat pada waktunya. Kepada terbaik terbaik **Rini Putriani, Ria Putriana Lestari, Irna Tiara Tri Argani** dan **Auliana Anindira** terimakasih atas dukungan dan do'a yang tiada hentinya diberikan kepada penulis.

Adanya keberadaan orang sekitar dan teman-teman seperjuangan yang selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada teman seperjuangan bermigrasi **Ayul, Lulu** dan **Ulfa** yang senantiasa menjadi pendengar, teman hangout, banyak lagi yang sangat berharga. Teman seperjuangan selama melaksanakan Kerja Praktek **Kafa, Indah, Ajeng** dan **Febri** yang senantiasa berbagi ilmu, kebahagiaan dan cerita. Teman seperjuangan selama melaksanakan Tugas Akhir **Jane, Rezky, Idzhar, Winda, Diaz, Esy, Beby** dan **Noval** yang senantiasa berbagi ilmu, cerita bahagia serta pengalaman yang tidak akan terlupakan. Tidak lupa kepada teman seperjuangan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini di masa senang dan sedih **Aza, Komang Ayu** dan **Asyifah**.

Demikian penulis yang tak berhenti bersyukur dan mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang terlibat. Permohonan maaf yang sebesar-besarnya penulis sampaikan atas segala kekeliruan dalam penulis skripsi ini. Penulis berharap, karya ini dapat memberikan manfaat sebaik-baiknya.

Penulis,

Ismi Zalsabilla
H061191085

ABSTRAK

ISMI ZALSABILLA. **Perbandingan Metode Electrical Resistivity Tomography (ERT) Dan Metode Ground Penetrating Radar (GPR) Dalam Penentuan Batas Dan Ketebalan Lapisan Laterit.** (dibimbing oleh Sabrianto Aswad, dan Syamsuddin).

Pada tahapan awal eksplorasi nikel laterit, PT. Vale Indonesia Tbk hanya menggunakan metode drilling dengan spasi antar drillhole 24 meter untuk menentukan profil nikel laterit. Sejak tahun 2014 metode geofisika seperti Metode Electrical Resistivity Tomography (ERT) gradient array dan Metode Ground Penetrating Radar (GPR) frekuensi 30 MHz di gunakan untuk mengcover daerah antar drillhole. Metode GPR digunakan untuk eksplorasi awal dalam menentukan keberadaan nikel laterit sementara metode ERT digunakan sebagai data dasar dalam menentukan blok model. Penelitian ini berfokus pada analisis perbandingan dalam penentuan batas dan ketebalan nikel laterit menggunakan metode ERT dan metode GPR di lima lintasan yang sama di daerah *West Block*. Pengolahan data geofisika menghasilkan penampang inversi dari data ERT dan radargram dari GPR yang kemudian dilakukan interpretasi batas lapisan nikel laterit menggunakan nilai resistivitas, radargram dan data *drillhole*. Perbandingan selisih ketebalan lapisan laterit yang dihasilkan oleh kedua metode juga dilakukan berdasarkan data *drillhole*. Berdasarkan hasil penelitian, pengukuran GPR dan ERT dapat mendefinisikan dasar limonit (*limonite bottom*) secara memuaskan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ERT konfigurasi gradient lebih akurat dalam menentukan batas limonite bottom, saprolite bottom, dan memberikan lebih banyak informasi yang dapat dijadikan acuan dalam pengeboran. Namun, baik ERT maupun GPR menghadapi kesulitan dalam menentukan batas saprolite bottom (Sapbot), terutama karena adanya boulder yang mirip dengan lapisan bedrock, yang menyebabkan kesulitan dalam identifikasi.

Kata Kunci: Perlapisan Laterit, *West Block*, *Electrical Resistivity Tomography* (ERT), *Ground Penetrating Radar* (GPR), *Data Drillhole*.

ABSTRACT

ISMI ZALSABILLA. Comparison of Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Ground Penetrating Radar (GPR) Methods in Determining the Boundary and Thickness of Laterite Layers. (Supervised by Sabrianto Aswad and Syamsuddin).

In the early stages of nickel laterite exploration, PT Vale Indonesia Tbk only used the drilling method with a drillhole spacing of 24 meters to determine the nickel laterite profile. Since 2014, geophysical methods such as the Electrical Resistivity Tomography (ERT) gradient array method and the 30 MHz frequency Ground Penetrating Radar (GPR) method have been used to cover the area between drillholes. The GPR method is used for initial exploration in determining the presence of nickel laterite while the ERT method is used as basic data in determining the block model. This research focuses on comparative analysis in determining the boundary and thickness of nickel laterite using ERT method and GPR method in the same five passes in the West Block area. Geophysical data processing produces inversion cross sections from ERT data and radargrams from GPR which then interpret the nickel laterite layer boundaries using resistivity values, radargrams and drillhole data. A comparison of the laterite layer thickness difference generated by the two methods was also carried out based on drillhole data. Based on the results, GPR and ERT measurements can satisfactorily define the limonite bottom. The results show that the gradient configuration ERT method is more accurate in defining the boundary of limonite bottom, saprolite bottom, and provides more information that can be used as a reference in drilling. However, both ERT and GPR faced difficulties in determining the boundary of saprolite bottom (Sapbot), mainly due to the presence of boulders similar to bedrock layers, which caused difficulties in identification.

Keywords: *Laterite Layering, West Block, Electrical Resistivity Tomography (ERT), Ground Penetrating Radar (GPR), Drillhole Data.*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Dan Manfaat.....	2
1.2.1 Tujuan	2
1.2.2 Manfaat	2
1.3 Landasan Teori	3
1.3.1 Geologi Regional	3
1.3.2 Batuan Ultramafik.....	4
1.3.2.1 Genesa Nikel Laterit	4
1.3.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pembentukan Nikel Laterit	5
1.3.4 Profil Nikel Laterit.....	6
1.3.5 Metode Geolistrik	8
1.3.5.1 Potensial pada Bumi Homogen Isotropis	8
1.3.5.2 Potensial di Sekitar Titik Arus di Bawah Permukaan Bumi	9
1.3.5.2 Potensial oleh Sumber Arus Ganda di Permukaan Bumi.....	10
1.3.6 Metode Electrical Tomography Resistivity (ERT)	10
1.3.7 Pemodelan Geofisika	11
1.3.7.1 Pemodelan ke Depan (<i>Forward Modelling</i>).....	11
1.3.7.2 Pemodelan Inversi	12
1.3.8 Metode Ground Penetrating Radar (GPR)	15
1.3.8.1 Prinsip Kerja Ground Penetrating Radar (GPR).....	15
1.3.8.2 Koefisien Refleksi	15
1.3.9 Hubungan Geologi dan Metode Geofisika	17

BAB II METODE PENELITIAN	18
2.1 Lokasi Penelitian	18
2.2 Alat dan Bahan.....	18
2.2.1 Alat.....	18
2.2.2 Bahan.....	18
2.3 Pengolahan Data	19
2.4 Tahap Interpretasi Data	19
2.5 Bagan Alir Penelitian.....	21
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN	22
3.1 HASIL	22
3.1.1 INTERPRETASI HASIL METODE ERT.....	22
3.1.2 INTERPRETASI HASIL METODE GPR	27
3.2 PEMBAHASAN	29
3.2.1 INTERPRETASI PENAMPANG RESISTIVITAS DAN DATA <i>DRILLHOLE</i>	29
3.2.2 INTERPRETASI PENAMPANG RADARGRAM DAN DATA <i>DRILLHOLE</i>	44
3.2.3 INTERPRETASI PENAMPANG RESISTIVITAS, RADARGRAM DAN DATA <i>DRILLHOLE</i>	56
3.2.4 Kelebihan dan Kekurangan Metode ERT dan Metode GPR Dalam Eksplorasi Nikel Laterit	75
BAB IV KESIMPULAN	78
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN	81

DAFTAR GAMBAR

Nomor Urut	Halaman
1. Peta Geologi Sorowako Lembar Malili (Simanjuntak dkk., 1991)	3
2. Proses pembentukan nikel laterit (Asy'ari, dkk., 2013)	4
3. Pengaruh topografi terhadap laterit (Ahmad, 2008)	6
4. Tipe endapan nikel laterit di Sorowako (Ahmad, 2009)	6
5. Profil Nikel Laterite (Dokumentasi Pribadi)	7
6. Sumber Arus tunggal C1 dalam medium homogen seluruh ruang, pasangan sumber arus C2 dianggap terletak di tak hingga (Telford, dkk., 1990)	9
7. Ilustrasi dua elektroda arus dan potensial di permukaan bumi pada medium homogen isotropis (Telford, dkk., 1990)	10
8. Sketsa dari konfigurasi gradient dengan memperlihatkan titik elektroda dengan jarak antar elektroda arus dan elektroda potensial (Dahlin dan Zhou, 2004)	11
9. Gambar Komponen alat GPR (Dokumentasi Pribadi)	20
10. Profil dan nilai konstanta dielektrik nikel laterit (Francke, 2009)	15
11. Pembacaan nilai koefisien refleksi (Rizqi, 2021)	16
12. Nilai Resistivitas Batuan dan Mineral	17
13. Desain Survey pengukuran ERT	18
14. Karakteristik daerah <i>West block</i> pada daerah penelitian	20
15. Bagan Alir Penelitian	21
16. Pseudodepth Section Hasil Inversi Penampang Resisitivitas	23
17. Model block data points lintasan E01	24
18. Hasil Inversi Lintasan E01	25
19. Penampang resistivitas lapisan zona laterit lintasan E01	26
20. Penampang resistivitas lapisan zona laterit lintasan N02	26
21. Penampang radar lapisan zona laterit lintasan E01	28
22. Penampang radar lapisan zona laterit lintasan N02	29
23. Penampang resistivitas dan data <i>drillhole</i> lapisan zona laterit lintasan E01	30
24. Fotocore drillhole C352962Z lapisan saprolit	31
25. <i>Drillhole</i> C354746Z kedalaman 41-44 meter	32
26. Penampang resistivitas dan data <i>drillhole</i> lapisan zona laterit lintasan E02	33
27. Penampang resistivitas dan data <i>drillhole</i> lapisan zona laterit lintasan N01	35

28. <i>Drillhole</i> C149553Z kedalaman 33-39meter teridentifikasi <i>silica boxwork</i> konduktif.	36
29. Penampang resistivitas dan data <i>drillhole</i> lapisan zona laterit lintasan N02	37
30. <i>Drillhole</i> C352886Z teridentifikasi <i>bedrock</i> konduktif	38
31. <i>Drillhole</i> C352893Z teridentifikasi <i>bedrock</i> konduktif.	39
32. <i>Drillhole</i> C352892Z teridentifikasi <i>red limonite</i>	39
33. <i>Drillhole</i> C352892Z teridentifikasi <i>yellow limonite</i>	40
34. Penampang resistivitas dan data <i>drillhole</i> lapisan zona laterit lintasan N03	41
35. <i>Fotocore</i> dan <i>drillhole</i> <i>Drillhole</i> C352916Z teridentifikasi <i>silica boxwork</i>	42
36. <i>Drillhole</i> C352911Z teridentifikasi <i>Hard Saprolit</i>	43
37. <i>Drillhole</i> C352914Z teridentifikasi <i>yellow limonite</i> yang terdapat <i>soft silica</i>	44
38. Penampang radar lapisan zona laterit lintasan E01	45
39. <i>Drillhole</i> C352881Z teridentifikasi variasi <i>bedrock</i> pada kedalaman 14-18m	46
40. Penampang radar lapisan zona laterit lintasan E02.....	50
41. Penampang radar lapisan zona laterit lintasan N01	51
42. Penampang radar lapisan zona laterit lintasan N02	53
43. Penampang radar lapisan zona laterit lintasan N03	55
44. Perbandingan <i>Limonite Bottom</i> (Limbott) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan E01.	57
45. Perbandingan <i>Saprolite bottom</i> (SapBot) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan E01	58
46. Perbandingan <i>Limonite Bottom</i> (Limbott) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan E02	60
47. Perbandingan <i>Saprolite bottom</i> (SapBot) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan E02	62
48. Perbandingan <i>Limonite Bottom</i> (Limbott) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan N01	18
49. Perbandingan <i>Saprolite bottom</i> (SapBot) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan N01	66
50. Perbandingan <i>Limonite Bottom</i> (Limbott) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan N02	68
51. Perbandingan <i>Saprolite bottom</i> (SapBot) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan N02	70

52. Perbandingan Limonite Bottom (Limbott) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan N03 72
53. Perbandingan *Saprolite bottom* (SapBot) dari penampang resistivitas dan penampang radar lintasan N03 73

DAFTAR TABEL

Nomor Urut	Halaman
1. Panjang lintasan dan kedalaman penetrasi yang dapat diukur menggunakan data ERT konfigurasi gradient array pada setiap lintasan	24
2. Kisaran nilai resistivities profil nikel laterit di setiap lintasan	27
3. <i>Drillhole</i> C352962Z pada kedalaman 54-61 meter	32
4. <i>Drillhole</i> C352962Z pada kedalaman 32-44 meter	42
5. Panjang lintasan dan kedalaman penetrasi yang dapat diukur menggunakan data GPR antenna frekuensi 70 MHz pada setiap lintasan	44
6. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>limonite bottom</i> di lintasan E01.....	57
7. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>saprolite bottom</i> di lintasan E01	59
8. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>limonite bottom</i> di lintasan E02.....	61
9. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>saprolite bottom</i> di lintasan E02	63
10. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>limonite bottom</i> di lintasan N01	65
11. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>saprolite bottom</i> di lintasan N01.	66
12. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>limonite bottom</i> di lintasan N02	69
13. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>saprolite bottom</i> di lintasan N02	71
14. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>limonite bottom</i> di lintasan N03.	72
15. Selisih ketebalan penampang resistivitas dan penampang radargram dalam penentuan lapisan <i>saprolite bottom</i> di lintasan N03	73
16. Kelebihan Metode Electrical Resistivity Tomography (ERT) dan Metode Ground Penetrating Radar (GPR)	75
17. Kekurangan Metode Electrical Resistivity Tomography (ERT) dan Metode Ground Penetrating Radar (GPR)	76

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel merupakan salah satu mineral logam yang banyak dimanfaatkan di sektor industri dunia. Menurut Oetomo (2023) Indonesia menjadi negara yang memproduksi nikel sebesar 48,48% atau 1.6 juta metrik ton dari total produksi nikel global pada tahun 2022 dan memiliki cadangan nikel sebesar 21 juta metrik ton. Pada tahapan eksplorasi nikel, hasil survei geofisika dapat memberikan nilai parameter fisis, kedalaman, ketebalan lapisan dan memaksimalkan eksplorasi nikel pada daerah yang tidak tercakup oleh *drillhole*. Metode geofisika yang banyak digunakan dalam eksplorasi nikel laterit adalah metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) dan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR).

Metode ERT adalah metode yang menginjeksikan arus searah (DC) ke bawah permukaan dan mengukur beda potensialnya. Metode GPR memanfaatkan pantulan atau refleksi gelombang elektromagnetik untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan. Meskipun kedua metode geofisika ini umum digunakan dalam tahapan eksplorasi nikel laterit, namun masih jarang ditemukan penggunaannya secara bersamaan. Hal ini tidak lepas dari efisiensi dan terdapatnya ambiguitas yang dihasilkan dalam metode GPR, sehingga studi aplikasi metode GPR untuk penentuan nikel laterit jarang dilakukan. Di PT. Vale Indonesia, Tbk data metode GPR digunakan untuk identifikasi awal keberadaan nikel laterit sedangkan data metode ERT digunakan sebagai salah satu data dalam pembuatan blok model untuk mengestimasi nikel laterit dan mengetahui *pinnacle zone* atau batuan yang menjulang ke atas pada *bedrock*. Kegunaan ini membantu *Engineer Geologist* dalam mengantisipasi penentuan kedalaman *drillhole* di kedalaman tersebut.

Beberapa penelitian terkait penerapan metode ERT dan GPR dalam eksplorasi nikel laterit telah dilakukan, termasuk oleh Pinandhito (2018) yang meneliti identifikasi profil deposit nikel laterit berdasarkan analisis ERT dan data *drillhole* di area "VDM" PT. Vale Indonesia, Tbk. Informasi mengenai ketebalan lapisan limonit dan saprolit dapat digunakan untuk membuat peta distribusi ketebalan sebagai informasi kawasan prioritas dalam perencanaan tambang. Dalam penelitian ini, terdapat perbedaan hasil kedalaman antara data ERT dan data *drillhole* di beberapa lokasi, yang disebabkan oleh jarak antar *drillhole* yang cukup besar, sekitar 50 meter.

Selain itu, Firni (2022) menggunakan metode *ground penetrating radar* (GPR) dalam identifikasi endapan nikel laterit di "daerah X" dengan membuat model sintetik dari hasil forward modeling. Pengukuran GPR dalam penelitian ini menggunakan antena frekuensi 25 MHz dengan panjang lintasan 100 meter, sehingga kedalaman yang dapat diukur mencapai sekitar 35 meter. Namun, penelitian ini tidak disertakan integrasi dengan data *drillhole* sehingga hanya mengandalkan data sintetik saja.

Terdapat penelitian yang memiliki kemiripan dalam penelitian ini yaitu penelitian yang dilakukan oleh Wicaksono (2022) dalam penelitiannya mengenai *Ground – Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography for Nickel Laterite Exploration : A Case Study in North Konawe, Indonesia* melakukan perbandingan kedua metode geofisika yaitu metode ERT menggunakan pengukuran Vertikal *Electrical Sounding* (VES) 1D konfigurasi schlumberger dan metode GPR *MALA Rough Terrain Antenna* (RTA) antenna frekuensi 25 MHz. Terdapat perbedaan ketebalan yang dihasilkan dari batas bagian bawah saprolit (*saprolite bottom*) pada kedua metode geofisika yang digunakan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik batuan saprolit yang mirip *fresh rock* dan ukuran batuan yang bervariasi pada saprolit bawah. Dalam penelitian ini didapatkan bahwa data GPR lebih bagus dalam menentukan Batasan profil nikel laterit. Dari hasil penelitiannya terdapat perbedaan level selisih dalam penentuan *limonite bottom* dan *saprolite bottom*. Data ERT yang digunakan dianggap kurang bagus dalam mempresentasikan bawah permukaan secara horizontal karena titik data pengukuran yang didapatkan hanya sedikit dan perubahan elektroda potensial yang tidak konsisten menyebabkan data ERT dalam penelitian ini kurang bagus digunakan dalam menentukan profil nikel laterit.

Berdasarkan uraian dan beberapa penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini dilakukan investigasi untuk mengetahui pengaruh keadaan geologi terhadap nilai resistivitas dan nilai amplitud dalam menentukan profil nikel laterit. Mengetahui pengaruh penggunaan konfigurasi gradien array, efisiensi waktu dalam pengambilan data lapangan dan kesesuaian kedua metode geofisika dalam menggambarkan profil nikel laterit dengan menggunakan metode ERT 2D konfigurasi gradien array dan metode GPR antenna frekuensi 30 MHz pada lintasan yang sama di area tipe *West Block* PT. Vale Indonesia di Sorowako, Sulawesi Selatan sehingga diharapkan dapat mengetahui kelebihan dan kekurangan dari setiap metode serta memberikan interpretasi yang lebih baik dalam menentukan profil nikel laterit.

1.2 Tujuan Dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan profil nikel laterit berdasarkan data ERT dan data GPR
2. Mengidentifikasi perbedaan ketebalan lapisan nikel laterit dari data metode ERT dan hasil *processing* metode GPR terhadap data *drillhole*
3. Mengidentifikasi pemilihan metode geofisika yang memiliki tingkat keakuratan lebih baik dalam menentukan profil nikel laterit terhadap data *drillhole*

1.2.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

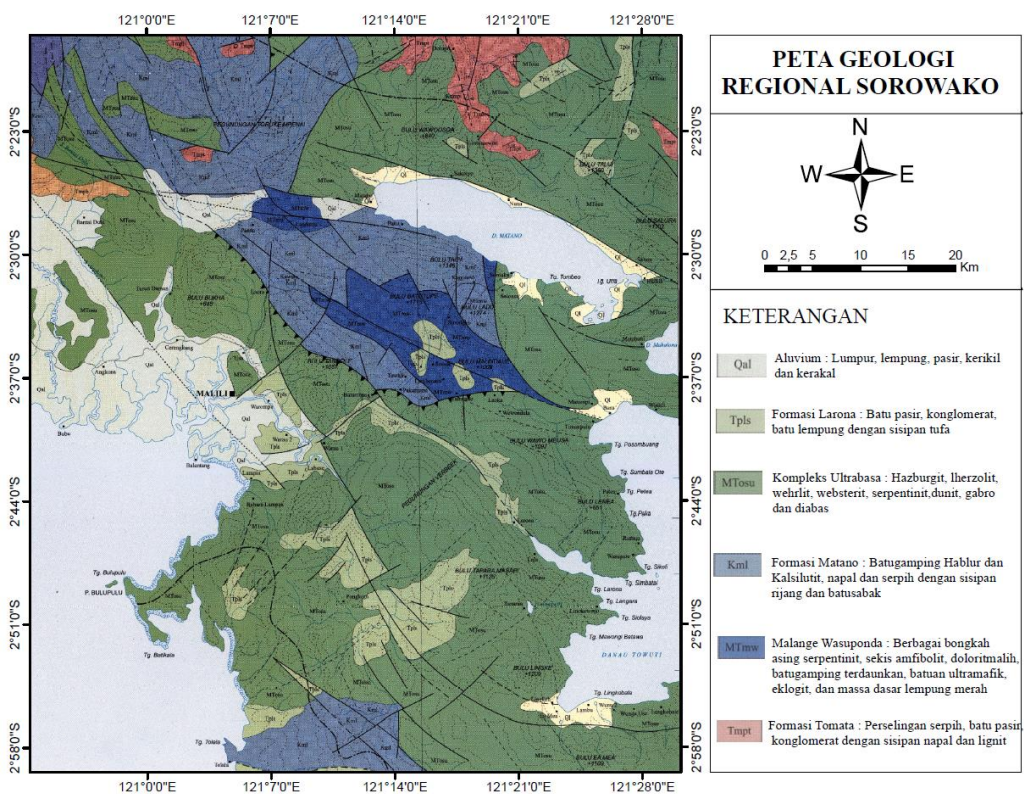
1. Mengoptimalkan metode eksplorasi nikel laterit khususnya di daerah yang sulit dijangkau oleh pengeboran dengan memanfaatkan metode ERT dan metode GPR di *West Block*.
2. Membantu dalam memberikan kekurangan dan kelebihan metode geofisika yaitu metode ERT dan metode GPR dalam eksplorasi nikel laterit.

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Geologi Regional

Pada gambar 1 menunjukan beberapa formasi dalam peta geologi Lembar Malili daerah Sorowako sebagai berikut (Simanjuntak dkk.,1991):

- Komplek Ultrabasa (MTosu) yang mengandung Harzburgit, lherzolit, wehrlit, websterit, serpentinit, dunit, gabro dan diabas.
- Formasi Matano (Kml): diatas ofiolit berupa batugamping kalsilitut, rijang, argilit dan batu lempung napalan, sedangkan bagian bawah ofiolit dicirikan oleh rijang radiolaria dengan sisipan kalsilitut yang semakin banyak ke bagian atas.
- Formasi Malange Wasuponda (MTmw): terdiri atas fragmen batugamping, batuan ultrabasa, amphibolit, sekis, pilit, eklogit, dan serpentinit yang terdapat dalam matriks lempung merah.
- Formasi Tomata (Tmpt): terdiri atas perselingan serpih, batupasir dan konglomerat dengan sisipan napal dan lignit.
- Larona (Tpls): Batupasir, konglomerat dan batulempung dengan sisipan tufa.
- Aluvial (Qal) berupa endapan komponen yang terdapat di daerah sekitar Danau Matano, Danau Towuti dan Danau Mahalona. Sedangkan endapan- endapan aluvial dapat ditemui di sekitar daerah aliran sungai yang terdiri dari lumpur, lempung, pasir, kerikil dan kerakal.

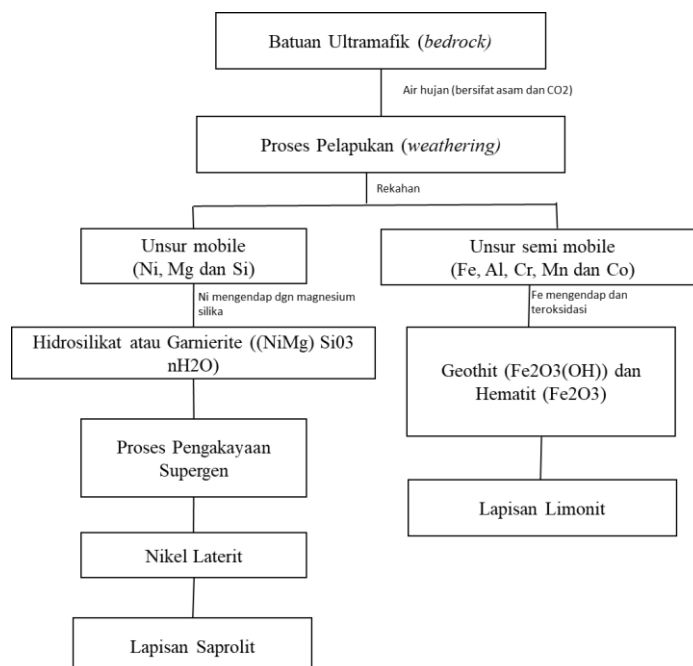


Gambar 1. Peta Geologi Sorowako Lembar Malili (Simanjuntak dkk., 1991)

1.3.2 Batuan Ultramafik

Batuan ultramafik merupakan batuan beku plutonik yang memiliki kandungan silika >40%. Terbentuk karena adanya gaya tektonik pada lempeng Samudra yang terangkat pada proses ofiolit. Kerak Samudra akan naik dan turun kebawah disertai proses subduksi. Naiknya kerak Samudra akibat proses obduksi inilah yang menyebabkan terbentuknya ofiolit (Ahmad, 2002). Menurut Ahmad (2001) batuan ultramafik terbagi menjadi batuan dunit yang banyak mengandung >90% olivin, batuan peridotit yang mengandung >40% olivin dan piroksin, tetapi juga mineral mafik lainnya dalam jumlah yang signifikan dan batuan serpentinit yang terbentuk karena adanya tekanan dan suhu yang berubah akibat sesar geologi lokal.

1.3.2.1 Genesa Nikel Laterit



Gambar 2. Proses pembentukan nikel laterit (Asy'ari, dkk., 2013)

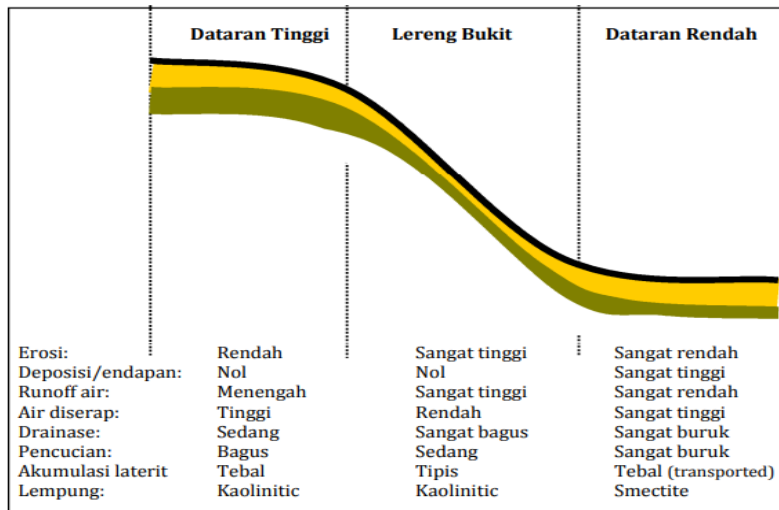
Pada gambar 2 terdapat proses pembentukan nikel laterit. Air hujan yang mengandung CO_2 dari atmosfer meresap ke bawah permukaan tanah yang mengalami inflasi melewati rekahan-rekahan. Kemudian akan melarutkan Ni, Fe, Co, Mg dan Si pada mineral olivin, piroksin maupun serpentin dalam bentuk larutan yang mudah larut. Fe yang berada di dekat permukaan akan mudah bersenyawa dengan oksidasi dan mengendap kembali menjadi ferrihidroksida yang membentuk goethite ($\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{OH})$) dan hematite (Fe_2O_3). Sedangkan mineral lainnya akan meresap sampai pada zona pelindian, dimana fluktuasi air tanah yang kaya CO_2 berlangsung. Akibatnya terdapat pengkayaan supergen di zona saprolit yang masih mengandung batuan asal yang mengalami pelapukan sehingga mengakibatkan rentan terjadi pencucian (*leaching*), sedangkan mineral yang massa jenisnya tinggi akan tertinggal di permukaan membentuk pengkayaan residual.

Pada lapisan saprolit batuan asal ultramafik akan mengisi pori-pori batuan. Alkali tanah, Mg dan Ca akan larut sebagai bikarbonat. Lalu mengendap menjadi dolomit dan magnesit, sedangkan silika (SiO_2) akan larut sebagai larutan koloid karena terjadi perpindahan oleh alkali tanah dan silika. Unsur Ni akan larut dan terbawa oleh air tanah kemudian mengalami proses presipitasi atau mengendap pada rekahan dengan larutan yang mengandung magnesium silika sehingga membentuk mineral hidrosilikat atau garnierite ($(\text{NiMg}) \text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Akibat disintegrasi pada batuan, air tanah akan masuk pada rekahan yang terbentuk dan memungkinkan intensitas pelindian. Lambat laun air tanah akan terkumpul di zona air yang sudah tidak dapat lagi turun dan tidak dapat menembus batuan dasar (*bedrock*) yang diakibatkan adanya pengaruh morfologi yang semakin besar. (Asy'ari, dkk., 2013).

1.3.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pembentukan Nikel Laterit

Menurut Waheed Ahmad (2008) terdapat 6 hal yang mempengaruhi proses pembentukan nikel laterit yaitu:

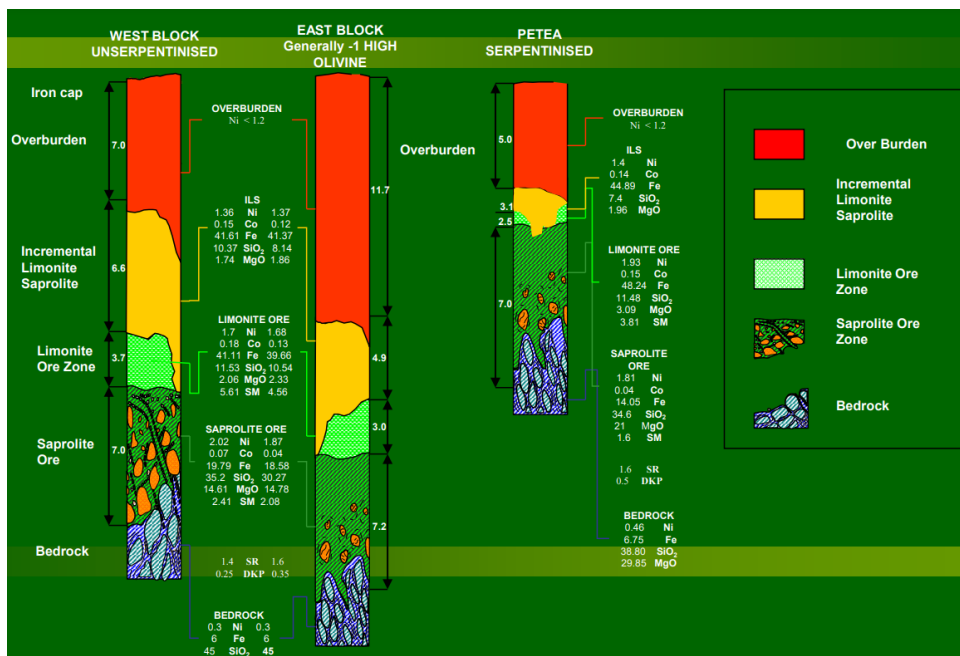
1. Batuan asal (*fresh rock*)
Komposisi dan struktur batuan penyusun mempengaruhi tingkat pelapukan (serpentinisasi) batuan. *Bedrock unserpentinisasi* lebih rentan terhadap pelapukan kimia dibandingkan batuan dasar yang terserpentinisasi (Ahmad, 2008).
2. Iklim dan Curah Hujan
Curah hujan menentukan jumlah air yang melewati tanah untuk mengendalikan suplai air pada reaksi kimia dan menghilangkan zat terlarut yang dapat mempengaruhi intensitas pencucian dan penghilangan komponen terlarut (Elias, 2002).
3. Proses Kimia
Proses kimia adalah unsur senyawa yang terlarut bersama dengan air yang dapat membantu percepatan proses pelapukan (Noor, 2017).
4. Struktur Geologi
Pada proses laterisasi dengan banyaknya kekar dan rekahan dapat menyebabkan terbentuknya variasi *boulder* akibat alterasi sepanjang rekahan dan tingkat pelapukan batuan yang tinggi akibat masuknya air yang melewati rekahan (Ahmad, 2008).
5. Tektonik
Pangkatan tektonik meningkatkan erosi pada bagian atas profil sehingga meningkatkan relief topografi dan menurunkan permukaan air (Elias, 2002).
6. Topografi
Pada gambar 3 terlihat bahwa akumulasi endapan banyak terdapat pada daerah landai sampai kemiringan sedang. Hal ini menggambarkan, ketebalan pelapukan mengikuti bentuk topografi (Ahmad, 2008).



Gambar 3. Pengaruh topografi terhadap laterit (Ahmad, 2008)

Untuk daerah landai, air akan bergerak perlahan-lahann melalui rekahan atau pori-pori batuan dan terakumulasi sehingga menyebabkan proses pelapukan yang intensif. Pada daerah yang curam, jumlah air yang meluncur atau ikut tererosi lebih banyak daripada air yang meresap, ini dapat menyebabkan pelapukan kurang intensif.

1.3.4 Profil Nikel Laterit



Gambar 4. Tipe endapan nikel laterit di Sorowako (Ahmad, 2009)

Pada gambar 4 tipe endapan nikel laterit di daerah Sorowako dibagi menjadi 3 yaitu West block, East Block dan Petea Block. Pembagian tipe endapan ini berdasarkan beberapa

parameter utama yaitu tipe batuan ultramafik, derajat serpentinisasi, kandungan kimia bijih, fraksi batuan, dan kandungan olivin:

1. Tipe *West block* memiliki topografi terjal dan membentuk pegunungan. Batuan di daerah ini umumnya adalah harzburgit yang mengandung olivin (rata-rata 80-90%) dan *orthopyroksen* (rata-rata 10-20%). Batuan di daerah *West Block* umumnya tidak terserpentinisasi, dengan sifat material yang relatif keras dan banyak dijumpai bongkahan (*boulder*) sisa proses pelapukan.

2. Tipe *East Block* memiliki topografi yang landai sedikit berbukit. Batuan di blok ini umumnya adalah lherzolit yang mengandung olivin (rata-rata 60-65%), *orthopyroksen* (rata-rata 25-30%), dan *klinopyroksen* (rata-rata 10%). Batuan di daerah ini memiliki tingkat serpentinisasi yang sedang hingga tinggi, dengan kekerasan batuan yang sedang.

3. Tipe *Petea Block* memiliki topografi yang landai. Batuan di blok ini umumnya adalah serpentin. Batuan di daerah ini memiliki tingkat serpentinisasi yang tinggi, dengan kekerasan batuan yang rendah.



Gambar 5. Profil Nikel Laterite (Dokumentasi Pribadi)

Secara umum profil nikel laterit terdiri atas 3 zona seperti yang terlihat pada gambar 5 yaitu:

1. Zona limonit memiliki warna merah kecoklatan dan mengandung oksida besi yang umumnya dalam bentuk senyawa *goethite* dan *hematite* (Jafar, 2017).
2. Zona saprolit berwarna kuning kecoklatan agak kemerahan. Struktur dan tekstur batuan induk masih terlihat dan dijumpai mineral *garnierite* sebagai hasil dari proses *leaching*. Zona saprolit berbatu dapat terdiri dari material dengan ukuran bervariasi dari bongkahan besar hingga kerikil (Francke, 2009).
3. Lapisan *bedrock* merupakan batuan ultrabasa yang tidak atau belum mengalami pelapukan. Zona ini biasanya memperlihatkan rekahan – rekahan (frakturisasi) yang kuat, kadang membuka dan terisi oleh mineral *garnierite* dan silika akibat proses *leaching*.

1.3.5 Metode Geolistrik

1.3.5.1 Potensial pada Bumi Homogen Isotropis

Seorang ilmuwan bernama George Simon Ohm (1787-1854) menyatakan bahwa beda potensial yang timbul di ujung-ujung suatu medium berbanding lurus dengan arus listrik yang mengalir pada medium, tahanan listrik berbanding lurus dengan panjang medium dan berbanding terbalik dengan luas penampangnya. Formulasi dari kedua pernyataan Ohm tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Syamsuddin, 2017):

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

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

Dimana V merupakan potensial (Volt), I adalah kuat arus (Ampere), R adalah resistansi (Ohm), ρ adalah resistivitas (Ωm), L adalah panjang penampang (m), dan A adalah luas penampang (m^2). Arus listrik yang mengalir diasumsikan melalui medium yang bersifat homogen isotropis. Hubungan kerapatan arus \vec{J} dan medan listrik \vec{E} berdasarkan hukum Ohm adalah (Telford, dkk., 1990):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

Dimana \vec{J} adalah rapat arus (A/m^2), \vec{E} adalah medan listrik dalam satuan volt/meter dan σ adalah konduktivitas medium dalam satuan siemens/meter yang merupakan kebalikan dari resistivitas. Medan listrik merupakan gradien dari potensial skalar ($\vec{E} = -\nabla V$) sehingga persamaan (3) menjadi:

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

Jika dianggap muatannya tetap dan arus yang mengalir stasioner (arah dan kecepatannya tetap), maka tidak ada arus yang keluar masuk dalam suatu volume yang tertutup. Menurut Teorema Gauss, integral volume dari divergensi ($\nabla \cdot$) arus melalui suatu daerah tertutup adalah sama dengan jumlah muatan total dalam volume tertutup.

$$\nabla \cdot (\sigma \vec{E}) + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (5)$$

Jika medium homogen isotropis maka σ bersifat konstan koefisien atau nilai konduktivitasnya tetap dari titik ke titik lain dalam medium, sehingga tidak mempengaruhi arus yang mengalir. Maka persamaan Laplace dengan potensial yang bersifat harmonik:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (6)$$

Pada setiap permukaan equipotensial dalam bumi membentuk permukaan bola konsentris dengan titik pusat terletak pada sumbu arus. Dari titik tersebut mengalir arus listrik di segala arah secara homogen dan membentuk lintasan tegak lurus terhadap equipotensial. Bentuk equipotensial yang berbentuk bola disebabkan karena sifat simetri dari sistem yang ditinjau dalam hal ini tidak berotasi dan berevolusi maka potensial hanya menerapkan fungsi dari jarak r . Akibatnya arus yang keluar hanya melalui luas permukaan bola dengan jari-jari r yaitu (Telford, dkk., 1990):

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dv}{dr} \right) = 0 \quad (7)$$

Persamaan laplace tersebut dilakukan integrasi r^2 terhadap potensial pada persamaan (7) menghasilkan:

$$\int r^2 \frac{dv}{dr} dr = 0 \rightarrow r^2 \frac{dv}{dr} = P \quad (8)$$

$$\frac{dv}{dr} = \frac{P}{r^2}$$

Untuk mencari potensial maka dilakukan integral terhadap r pada persamaan (8) menghasilkan:

$$V(r) = \int \frac{P}{r^2} dr = -\frac{P}{r} + Q \quad (9)$$

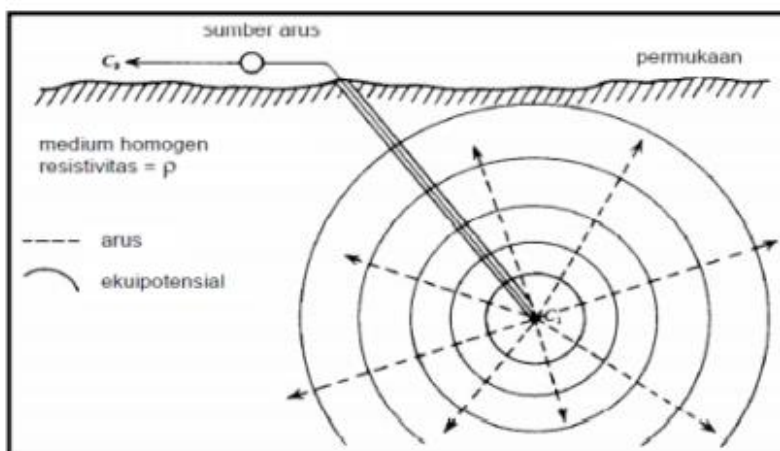
Dengan P dan Q merupakan suatu konstanta. Apabila jarak elektroda jauh tak berhingga ($r = \infty$) maka nilai potensialnya akan sama dengan nol ($V = 0$). Dengan demikian $Q = 0$, sehingga persamaan (9) menjadi:

$$V(r) = -\frac{P}{r} \quad (10)$$

1.3.5.2 Potensial di Sekitar Titik Arus di Bawah Permukaan Bumi

Sumber arus di bawah permukaan bumi yang diasumsikan bersifat homogen isotropis menyebabkan arus menyebar ke segala arah. Sehingga menimbulkan bidang ekipotensial berbentuk bola ($A = 4\pi r^2$) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6 (Telford, dkk., 1990).

$$I = \vec{J} A \quad (11)$$



Gambar 6. Sumber Arus tunggal C_1 dalam medium homogen seluruh ruang, pasangan sumber arus C_2 dianggap terletak di tak hingga (Telford, dkk., 1990)

Dengan mensubstitusi persamaan (3) ke dalam persamaan (11), kemudian memasukkan persamaan (8) maka arus total yang melalui permukaan bola dengan jarak r dapat ditulis:

$$I = \left(-\sigma \frac{dV}{dr}\right) (4\pi r^2) = -4\pi\sigma A \quad (12)$$

Karena $\sigma = \frac{1}{\rho}$ maka persamaan (12) dapat ditulis:

$$I = -\frac{4\pi A}{\rho} \text{ atau } A = -\frac{\rho I}{4\pi} \quad (13)$$

Jika persamaan (13) dimasukkan kedalam persamaan (12), maka potensialnya dapat dinyatakan sebagai:

$$V(r) = \left(\frac{\rho I}{4\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (14)$$

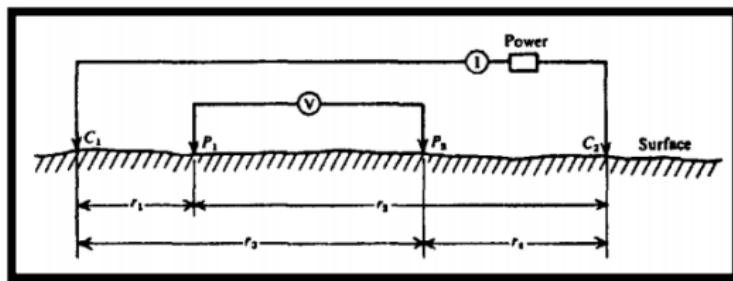
Pada sumber arus tunggal di permukaan bidang ekipotensial hanya membentuk setengah bola karena arus tidak mengalir di udara sehingga nilai konduktivitas udara

akan bernilai nol. Dengan demikian persamaan (13) berubah menjadi (Telford, dkk., 1990):

$$V(r) = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right)\frac{1}{r} \quad (15)$$

1.3.5.2 Potensial oleh Sumber Arus Ganda di Permukaan Bumi

Potensial listrik (P_1 dan P_2) oleh dua sumber arus di dalam bumi ketika jarak antara dua elektroda arus (C_1 dan C_2) telah ditentukan terlihat seperti pada Gambar 7. Perubahan potensial sangat besar terjadi pada daerah dekat sumber arus, dimana gradien potensial yang berada di luar C_1 dan C_2 yang menjauh dari linier memiliki gradien potensial yang besar, sedangkan pada daerah antara C_1 dan C_2 gradien potensial kecil dan mendekati linier. Dari alasan ini, pengukuran potensial paling baik dilakukan pada daerah di antara C_1 dan C_2 yang mempunyai gradien potensial linier.



Gambar 7. Ilustrasi dua elektroda arus dan potensial di permukaan bumi pada medium homogen isotropis (Telford, dkk., 1990)

Mengacu pada persamaan (15), potensial total masing-masing di titik P_1 dan P_2 akibat sumber arus C_1 dan C_2 yaitu:

$$\Delta V = V_{P1} - V_{P2} \rightarrow \Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \quad (16)$$

Berdasarkan persamaan (16) diperoleh persamaan resistivitas pada sumber arus ganda yaitu:

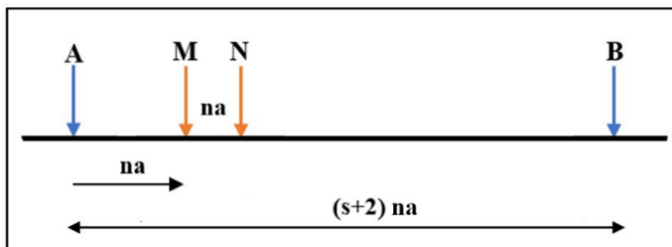
$$\rho = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]} \frac{\Delta V}{I} \quad (17)$$

Ketika mengidentifikasi bawah permukaan dimana tidak diketahui secara pasti jenis material di bawahnya untuk tanah homogen. Hasil resistivitas yang didapatkan disebut resistivitas semu (*apparent resistivity*) (Siregar, 2006). Oleh karena itu, nilai resistivitas yang diukur seolah-olah merupakan nilai resistivitas untuk satu lapisan saja yang dapat didefinisikan sebagai fungsi dari jarak elektroda sehingga diperlukan faktor geometri atau K dari konfigurasi yang digunakan dalam pengukuran.

1.3.6 Metode Electrical Tomography Resistivity (ERT)

Prinsip ERT didasarkan pada penggunaan sistem multi-elektroda dan *multi-channel* yang memungkinkan koneksi dengan satu set elektroda yang tertanam dan terhubung ke *resistivity* meter. Arus listrik searah (DC) diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua elektroda arus yang jaraknya tetap dan mengukur beda potensialnya melalui dua elektroda potensial yang jaraknya berubah-ubah.

Konfigurasi merupakan letak susunan elektroda potensial dan arus. Konfigurasi gradient merupakan gabungan dari konfigurasi wenner dan dipole-dipole. Konfigurasi ini dilakukan dengan menginjeksi elektroda arus dengan jarak pemisah $(s+2)na$ (lihat gambar 8). Apabila S adalah faktor pemisah yang dapat memberikan jarak antara elektroda arus, sedangkan banyaknya n tergantung pada panjang lintasan dalam sekali pengukuran (tanpa melibatkan system *roll-along*) dan a adalah jarak antar elektroda. Konfigurasi gradient merupakan konfigurasi *unconventional* yang merupakan konfigurasi yang dapat dimodifikasi. Selain itu, konfigurasi gradien memiliki keunggulan dari konfigurasi lainnya yaitu memiliki banyak datum yang mampu membantu memperjelas resolusi data dekat permukaan, memiliki jarak elektroda yang konsisten dan memiliki kemampuan *multi-channel* sehingga dapat memanfaatkan sistem *roll-along* yang dapat mempengaruhi kedalaman pengukuran. Ketika elektroda potensial (MN) mendekati salah satu elektroda arus (A atau B) maka tingkat sensitivitasnya lebih baik secara vertical seperti konfigurasi pole-dipole dan ketika elektroda potensial (MN) berada di tengah maka sensitivitasnya akan baik ke arah horizontal seperti konfigurasi schlumberger. Untuk menentukan kedalaman penetrasi pada konfigurasi gradien, digunakan nilai 0,166 hingga 0,33 kali panjang lintasan.



Gambar 8. Sketsa dari konfigurasi gradient dengan memperlihatkan titik elektroda dengan jarak antar elektroda arus dan elektroda potensial (Dahlin dan Zhou, 2004)

Bila diketahui bahwa jarak $r_1 = na$, $r_2 = (s+1)na$, $r_3 = 2na$ dan $r_4 = sna$ maka faktor geometri konfigurasi gradien dirumuskan sebagai berikut:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{na} - \frac{1}{(s+1)na} - \frac{1}{2na} + \frac{1}{sna} \right]^{-1} \quad (18)$$

Untuk mendapatkan faktor geometri konfigurasi gradient array dapat dilihat pada lampiran 1. Maka dengan mensubstitusi persamaan (18) ke persamaan (17) maka diperoleh persamaan untuk mencari *apparent resistivity* pada konfigurasi gradient array.:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \left(2\pi \left[\frac{1}{na} - \frac{1}{(s+1)na} - \frac{1}{2na} + \frac{1}{sna} \right]^{-1} \right) \quad (19)$$

1.3.7 Pemodelan Geofisika

1.3.7.1 Pemodelan ke Depan (*Forward Modelling*)

Pemodelan ke depan melibatkan persamaan yang mengatur aliran arus listrik melalui tanah non-homogen untuk distribusi resistivitas dan konfigurasi arus tertentu sehingga akan didapatkan distribusi potensial pada tiap titik datum sebagai data prediksi. Pemodelan ini merupakan bagian integral dari program inversi. Karen perlu menghitung nilai resistivitas semu teoritis untuk model yang dihasilkan oleh inversi untuk melihat

kesesuaian terhadap nilai terukur. Metode yang sering digunakan dalam pemodelan kedepan adalah metode Finite Difference (FD) dan metode Finite Element (Looke, 2004).

Dalam survei geofisika, distribusi arus yang diperoleh pada sub permukaan dapat berubah-ubah. Sehingga dengan menggunakan finite element, nilai resistivitas yang berbeda-beda akan di diskrit menjadi beberapa elemen berdasarkan nilai resistivitasnya dan dapat menunjukkan potensial listrik pada model (Sasaki, 1989). Adanya perhitungan menggunakan finite element membantu dalam menentukan nilai *apparent resistivity* pada daerah yang tidak memiliki nilai resistivitas. Diskritisasi model dapat dilakukan dengan tiga cara, pertama membagi model menjadi blok-blok kecil yang lebarnya sama dengan jarak terkecil antara elektroda. Selanjutnya, membagi model menjadi blok-blok yang pada beberapa lapisan pertamanya dibagi dua secara vertikal maupun horizontal. Pada tahap ketiga, blok-blok yang pada beberapa lapisan pertamanya hanya dibagi dua secara horizontal saja. Hal ini disebabkan resolusi metode resistivitas berkurang dengan bertambahnya kedalaman, maka lebih efektif jika blok yang dibagi dua hanya lapisan pertama dan kedua saja (Looke, 2000).

Forward modelling menyatakan proses perhitungan “data” yang secara teoritis (respon model) akan teramati di permukaan bumi, tidak hanya mencakup perhitungan respon model tetapi juga proses *trial and error* secara manual untuk memperoleh respon yang cocok dengan data. Adanya *forward modelling* maka potensial di setiap node akan dicari sebagai data prediksi yang dapat menggambarkan efek dari sebuah datum observasi terhadap noise dari parameter model (Grandis, 2009). Persamaan linear diselesaikan untuk memperoleh potensial listrik (V) dari setiap elemen dalam domain. Ukuran elemen akan membesar tergantung besarnya jarak elektroda sehingga ketika dimodelkan permukaan yang tidak terukur tidak akan memiliki sumber *error* dalam proses inversi.

$$KV = U \quad (20)$$

Dimana K merupakan matriks $L \times L$ (jumlah node atau hasil perpotongan antar *mesh*) dengan nilai positif simetris yang ditentukan oleh geometri dan konduktivitas setiap *finite element*, v merupakan vektor kolom potensial yang belum diketahui di setiap *node* dan S adalah vektor kolom intensitas sumber arus di setiap *node*. Persamaan linear $KV=U$ diselesaikan untuk mendapatkan potensial Listrik (V) dari setiap elemen dalam suatu domain. Untuk posisi elektroda arus tertentu maka *apparent resistivity* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Cai dkk., 2007).

$$\rho_a = G \frac{v(M) - v(N)}{I} \quad (21)$$

Dengan ρ_a adalah resistivitas semu, G adalah faktor geometri konfigurasi, $(M) - v(N)$ adalah potensial Listrik pada node yang di ukur oleh elektroda M dan N . Proses perhitungan finite element secara detail dapat dilihat pada lampiran 2.

1.3.7.2 Pemodelan Inversi

Fungsi atenuasi merupakan suatu fungsi yang menggambarkan hubungan antara intensitas gerakan tanah (I), magnitudo (M) dan jarak (R) dari suatu sumber titik dalam

daerah sumber. Secara umum, fungsi atenuasi tergantung pada faktor-faktor berikut antara lain Solusi yang di hasilkan dalam proses forward modelling masih kurang efektif dalam menggambarkan hasilnya, hal ini disebabkan terdapatnya manipulasi K^t K. Sehingga ketika matriksnya singular atau hampir singular saat di inversikan maka persamaan tersebut tidak memberikan solusi yang baik. Ketika dugaan model pada proses forward modelling tidak mendekati model sebenarnya, maka ditingkatka boundry condition untuk mendekati solusi model yang diinginkan dan menerapkan beberapa constrain condition pada perhitungan inversi. Nilai yang di dapatkan dari setiap element perubahan parameter model dibatasi oleh suatu kuantitas yang terbatas.

Proses inversi dalam bidang geofisika bertujuan mencari model yang memberikan respon yang mirip dengan nilai pengukuran di lapangan sehingga didapatkan jenis model yang merupakan representasi matematis ideal dari suatu bagian bumi. Selain itu, umumnya pemodelan inversi bukan untuk mengetahui secara keseluruhan bentuk dari permukaan fungsi objektif pada ruang model, melainkan untuk mencari nilai minimum. Semua metode inversi geofisika pada dasarnya berusaha untuk menentukan model bawah permukaan yang memiliki respon sesuai dengan data terukur dalam batasan-batasan tertentu (Loke, 2004).

Pemodelan inversi (*inverse modelling*) digunakan dimodifikasi agar diperoleh kecocokan data perhitungan dan data pengamatan yang lebih baik dilakukan secara otomatis. Pemodelan inversi biasa disebut data fitting karena dalam prosesnya dicari parameter model yang menghasilkan respons yang fit dengan data pengamatan (Grandis, 2009). Dalam proses ini, pemodelan inversi hanya bisa dilakukan apabila hubungan antara data dan parameter model (fungsi *forward modeling*) telah diketahui. Menke (1984) mendefinisikan teori inversi sebagai suatu kesatuan teknik atau metode matematika dan statistika untuk memperoleh informasi yang berguna mengenai suatu sistem fisika berdasarkan observasi terhadap sistem tersebut (Binley and Slater, 2020).

Dalam Metode *Least-square* persamaan Metode Gauss-Newton yaitu:

$$J^T J \Delta q_j = J^T (d - F(q_k)) \quad (22)$$

Untuk menghindari Δq yang tidak realistis, Metode Marquardt dimodifikasi ke persamaan (22). Pada persamaan Levenberg–Marquardt (dikenal dengan metode Marquardt) memanfaatkan pengaplikasian deret Taylor menjadi:

$$V_d(q_k + \Delta q) \approx V_d(q_k) + \frac{\partial V_d(q_k)}{\partial q} \Delta q + \frac{\partial^2 V_d(q_k)}{\partial q^2} \Delta q^2 \quad (23)$$

Jika persyaratan *higher-order terms* diabaikan, maka solusi turunan dari persamaan (23) adalah nol:

$$\frac{\partial V_d(q_k + \Delta q)}{\partial q} \approx \frac{\partial V_d(q_k)}{\partial q} + \frac{\partial^2 V_d(q_k)}{\partial q^2} \Delta q = 0 \quad (24)$$

Jika dituliskan kembali persamaan (24) menjad:

$$\frac{\partial^2 V_d(q_k)}{\partial q^2} \Delta q = - \frac{\partial V_d(q_k)}{\partial q} \quad (25)$$

Pada persamaan (25) membentuk aturan rantai dan mengabaikan syarat *higher order terms* $2(\nabla J^T) W_d^T W_d (d - F(q_k))$, dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\partial V_d(q_k)}{\partial q} = -2J^T W_d^T W_d (d - F(q_k)) \text{ dan } \frac{\partial^2 V_d(q_k)}{\partial q^2} = J^T W_d^T W_d J \quad (26)$$

Dimana d adalah data observasi (dalam bentuk *apparent resistivity*), q_k adalah parameter model, F ialah fungsi operator dari q_k , W_d adalah matrik bobot. Dengan menggunakan persamaan (26) persamaan (24) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan baru, yaitu:

$$(J^T W_d^T W_d J) \Delta q = J^T W_d^T (d - F(q_k)) \quad (27)$$

Dimana J merupakan matriks Jacobian (*sensitivity*), q_k adalah parameter yang ditetapkan pada iterasi, Δq adalah parameter baru pada iterasi k . Dalam praktiknya, persamaan (27) memiliki masalah yang dapat mengakibatkan konvergensi ke minimum local atau ketidakstabilan solusi sehingga gagal untuk konvergen. Salah satu metode untuk menghindari komponen yang besar sehingga model baru yang dihitung menyebabkan nilai yang dimiliki realistis adalah dengan menggunakan modifikasi Marquardt-Levenberg untuk persamaan Gauss-Newton. Umumnya $J^T J$ merupakan matriks yang tidak stabil, sehingga perlu diaplikasikan metode Marquardt dengan menambahkan *damping factor* (faktor peredam) ke elemen diagonal:

$$[J^T J + \lambda I] \Delta q_j = J^T (d - F(q_k)) \quad (28)$$

Dimana λ merupakan *damping factor* atau faktor Marquardt yang dapat membatasi rentang yang digunakan pada Δq_j dan I adalah matriks identitas. Semakin besar λ digunakan, maka akan mempengaruhi hasil pengukuran perbedaan massa jenis kalkulasi dan observasi. Nilai λ akan berkurang 2,5 kali tiap dilakukan iterasi dan akan mencapai max setelah iterasi ke-4, dimana pada iterasi ke-5 dst memiliki faktor redaman yang konstan dari minimal faktor redaman yang ditetapkan. Damping faktor secara efektif membatasi *range* nilai sehingga komponen-komponen vektor parameter perubahan dan mengikutsertakan Δq dalam perhitungan.

Pada proses inversi mengecilnya RMS hasil penampang model 2-D menunjukkan distribusi resistivitas yang kasar. Nilai resistivitas berubah secara tiba-tiba di antara dua blok yang bertetangga, terkadang naik atau turun. Walaupun model yang kasar dapat menghasilkan solusi numerik yang mendekati data observasi, namun seringkali tidak mempresentasikan struktur yang sebenarnya. Untuk menghindari hal tersebut dan mengurangi tingkat *roughness* pada variasi resistivitas, maka perlu diaplikasikan sebuah faktor *smoothing* ke dalam persamaan $J^T J$ dengan menggunakan operator *filter* Laplacian.

$$F_R = \alpha_i (\Delta v_j^L + \Delta v_j^R + \Delta v_j^A + \Delta v_j^B - 4\Delta v_j) \text{ dimana } j=1, 2, 3, \dots \text{dst} \quad (29)$$

Dimana L, R, A dan B menunjukkan keempat tetangga (kiri, kanan, atas dan bawah) pada blok ke- j dan α_i merupakan faktor *smoothing*. Dengan mengaplikasikan persamaan diatas ke dalam blok resistivitas, maka diperoleh:

$$\Delta \bar{q} = C \Delta q \quad (30)$$

$$[J^T J + \lambda F_R] \Delta q_j = J^T R_d (d - F(q_k)) - (\lambda F_R - \delta I)(q_k - q_r) \quad (31)$$

Agar proses *inverse modeling* stabil, perlu kehati-hatian dalam memilih faktor *smoothing*. Untuk dapat meminimalkan *roughness* model dan ketidakcocokkan data maka dilakukan *filter smoothness- data constraint* ($L_2 \text{norm}$) pada inversi non-linear.

$$[J^T J + \lambda F_R] \Delta q_j = J^T (d - F(q_k)) - \lambda F_R q_k \quad (32)$$

Agar proses *inverse modeling* stabil, perlu kehati-hatian dalam memilih faktor *smoothing*. Untuk dapat meminimalkan *roughness* model dan ketidakcocokan data maka dilakukan *filter smoothness- data constraint* (L_2 norm) pada inversi non-linear.

1.3.8 Metode Ground Penetrating Radar (GPR)

1.3.8.1 Prinsip Kerja Ground Penetrating Radar (GPR)

Pada gambar 9 terlihat komponen alat GPR yang terdiri dari *transmitter*, *receiver*, pemberat receiver dan *radar console*. Gelombang elektromagnetik dipancarkan melalui *antena transmitter* ke bawah permukaan tanah. Ketika gelombang elektromagnetik mengenai objek atau material yang memiliki sifat listrik bawah permukaan yang berbeda, maka akan terjadi redaman sehingga sinyal yang dipancarkan memiliki nilai permitivitas dielektrik yang berbeda. Radar yang dipancarkan akan melebar ke daerah yang lebih luas karena energi radar pada lapisan lainnya akan diserap oleh material yang memiliki permitivitas dielektrik lebih besar. Ketika sinyal mencapai permukaan dengan sudut atau jarak yang berbeda, maka sinyal yang dipancarkan akan mencerminkan kembali pantulan radar dengan perubahan *two wave travel time* yang berbeda. Gelombang yang tidak dipantulkan sebagian gelombangnya akan diteruskan hingga interface selanjutnya (Francke, 2000).



Gambar 9. Gambar Komponen alat GPR (Dokumentasi Pribadi)

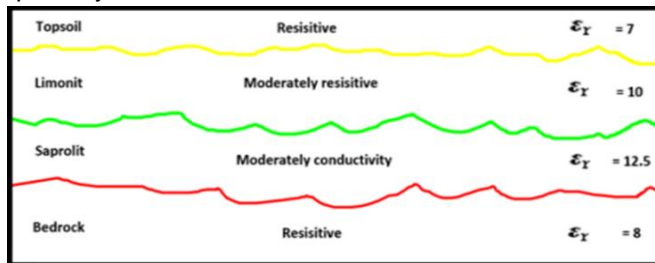
1.3.8.2 Koefisien Refleksi

Koefisien refleksi dapat mempengaruhi jumlah energi gelombang yang dipantulkan akibat adanya sudut datang dan sudut pantul saat terdapat adanya perbedaan elevasi. Selain itu, koefisien refleksi dapat digunakan untuk menentukan kontras sinyal amplitud yang disebabkan karena adanya perbedaan konstanta dielektrik dari suatu material (Francke, 2000).

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (33)$$

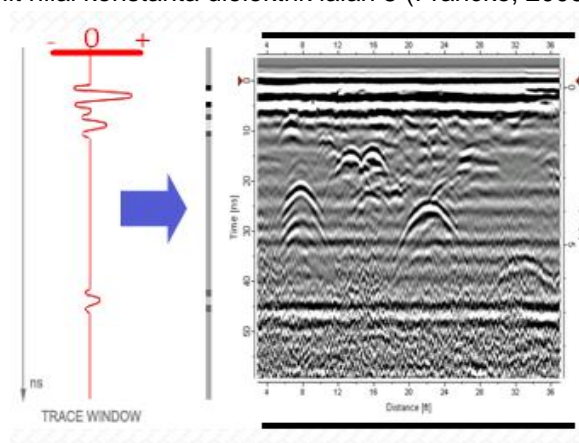
Pada persamaan (33) yang dihasilkan ketika konstanta dielektrik pada lapisan kedua lebih besar dari lapisan pertama maka kontras amplitud yang dihasilkan berwarna hitam hal ini karena hasil refleksi bernilai negatif dan sebaliknya (Franck, 2000). Pada

gambar 10 terlihat nilai konstanta dielektrik di setiap lapisan nikel laterit. Adanya perbedaan konstanta dielektrik pada setiap ini akan mengontrol tinggi rendahnya amplitud gelombang radar yang terpantulkan pada bidang atau objek per lapisan. Nilai ini menjadi dasar dalam menentukan warna akhir lapisan dari hasil perhitungan koefisien refleksi pada persamaan (33). Nilai koefisien refleksi semakin besar jika perbedaan konstanta dielektrik relatif antara kedua material besar sehingga menyebabkan semakin jelas kontras amplitudnya



Gambar 10. Profil dan nilai konstanta dielektrik nikel laterit (Francke, 2009)

Pada lapisan limonit nilai konstanta dielektrik ialah 10 (Francke, 2009). Hal ini menyebabkan amplitud pada sinyal ini sangat kuat, karena absorpsi energi gelombang radarnya kecil. Interpretasi ini didasarkan pada karakteristik limonit yang bersifat seperti tanah yang seragam dengan ukuran butir yang sama dan bersambung sehingga lapisan ini tidak menghasilkan pantulan yang kuat oleh karena itu air sulit untuk melewati materialnya. Pada lapisan saprolit nilai konstanta dielektrik ialah 12.5 (Francke, 2009). Lapisan saprolit merupakan lapisan yang tersusun dari tanah dan *boulder s* berupa *bedrock* yang terlapukkan. Hal ini disebabkan pada lapisan ini kurang terjadi pencucian (*leaching*) mineral yang konduktif dan memiliki material yang halus serta ukuran batuanannya besar sehingga radar memiliki jarak untuk memantulkan gelombang. Namun jika ukuran batuanannya kecil atau tanah berbongkah dan berbentuk kerikil maka pantulan gelombangnya akan tersebar. Lapisan *bedrock* merupakan lapisan yang lebih resistif dibandingkan dengan lapisan saprolit sehingga menyebabkan amplitud sinyal refleksi pada lapisan ini lebih kuat karena absorpsi energi gelombang radarnya kecil. Pada lapisan limonit nilai konstanta dielektrik ialah 8 (Francke, 2009)

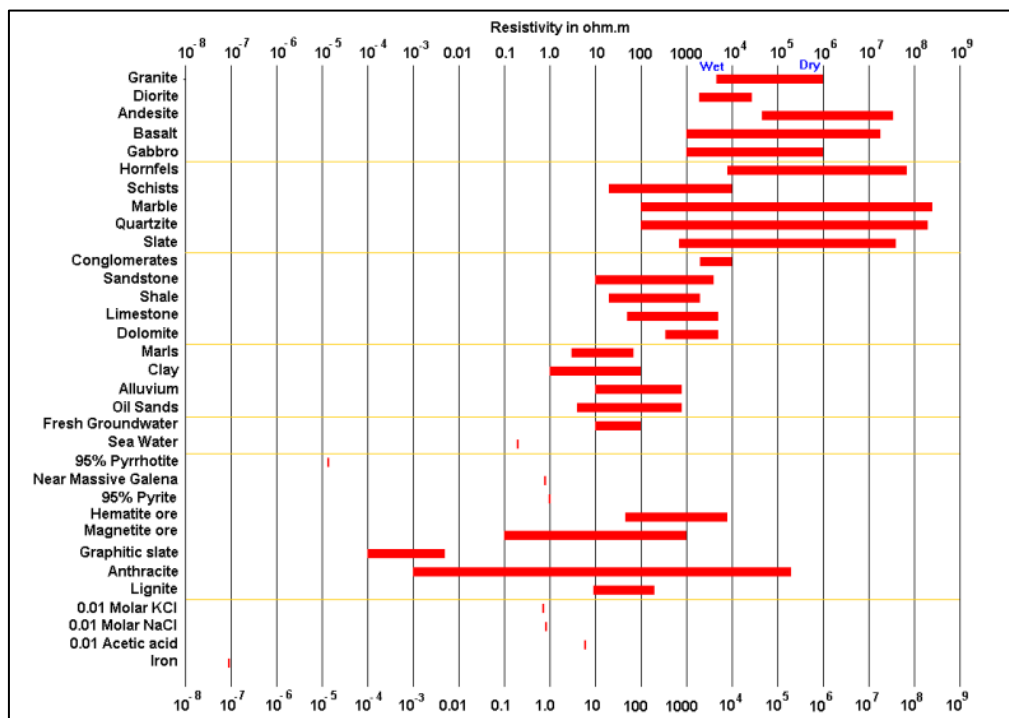


Gambar 11. Pembacaan nilai koefisien refleksi (Rizqi, 2021)

Pada Gambar 11 terlihat adanya pola refleksi yang diterima oleh receiver, yang menunjukkan adanya perubahan jarak, variasi kemiringan, ketebalan lapisan akibat topografi, variasi kepadatan, dan komposisi material antara sumber sinyal dan titik pantul. Ketika terdapat variasi yang diterima, sinyal radar yang dipantulkan dari objek tersebut akan menghasilkan pola garis hiperbolik yang tumpang tindih. Sehingga, adanya perbedaan ukuran, bentuk batuan, dan ketebalan batuan pada profil nikel laterit dapat mempengaruhi bentuk hiperbolik yang dihasilkan.

1.3.9 Hubungan Geologi dan Metode Geofisika

Beberapa hal yang mempengaruhi resistivitas jenis batuan di antaranya adalah usia dan litologi batuan tersebut. Hal ini sangat berpengaruh terhadap porositas batu dan Salinitas air yang dikandungnya. Porositas dan salinitas air yang berlebih akan menyebabkan berkurangnya resistivitas. Adapun nilai resistivitas suatu material di dalam bumi dapat dilihat pada gambar 12. Nilai resistivitas profil nikel laterit pada area sorowako blok timur terbagi menjadi tiga yaitu zona limonit, saprolit dan *bedrock*. Pada zona limonit memiliki nilai resistivitas berkisar 100 – 1000 Ωm , zona saprolit memiliki nilai resistivitas berkisar 20 – 300 Ωm dan zona *bedrock* memiliki nilai resistivitas $>300 \Omega\text{m}$.

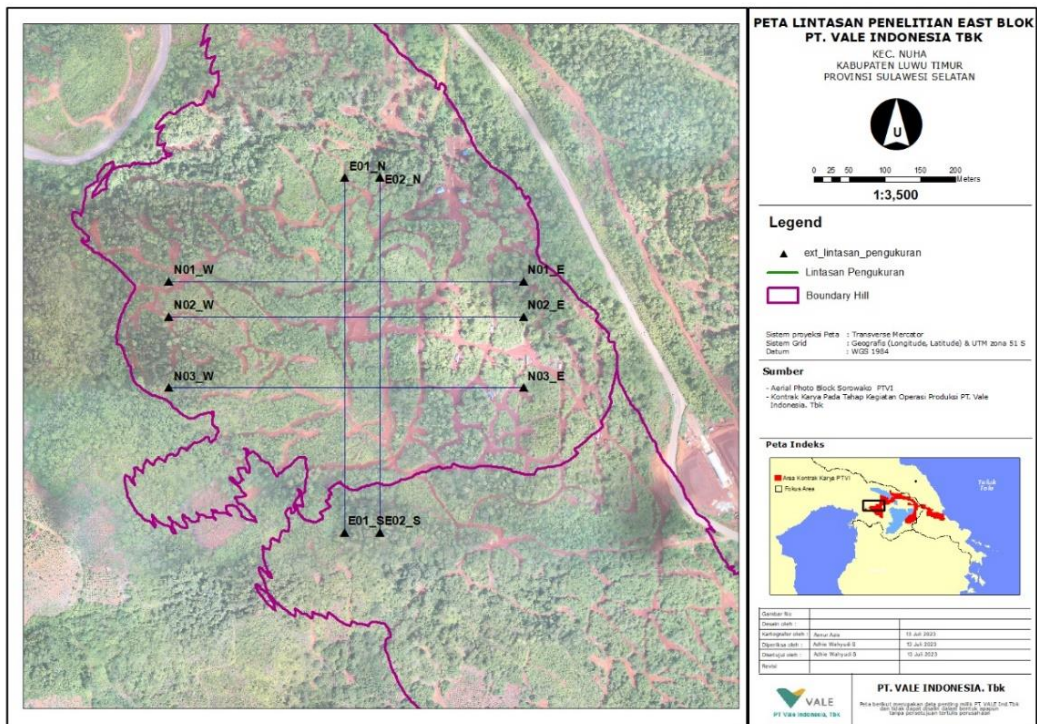


Gambar 12. Nilai Resistivitas Batuan dan Mineral (looke, 2004)

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Wilayah Penelitian ini terletak di area pertambangan PT. Vale Indonesia, Tbk. Penelitian dilakukan berada pada daerah "IZ" dalam area *type West block*. Penelitian memiliki 5 lintasan dengan arah lintasan pengukuran sendiri yaitu pada lintasan E01 dan E02 berarah utara-selatan dan lintasan N01, N02 dan N03 berarah barat-timur. Kedua metode ini di ukur pada lintasan yang sama, namun dengan panjang lintasan yang berbeda. Hal ini akan berdampak pada hasil penelitian, panjang lintasan akan disesuaikan dengan panjang lintasan kedua metode. Sehingga dapat mempresentasikan profil nikel laterit dengan panjang lintasan yang sama.



Gambar 13. Desain Survey pengukuran ERT

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada Penelitian Tugas Akhir ini yaitu:

- Software Res2DInv*
- Software Ground Radar Studio*
- Software ArcGIS*
- Software Datamine Studio RM*

2.2.2 Bahan

Data hasil pengukuran ERT meliputi koordinat, elevasi/kedalaman dan nilai resistivitas untuk tiap titik pengukuran menggunakan alat *Terrameter LS 12 channel* produksi ABEM.

Data hasil *processing* GPR meliputi koordinat, elevasi atau kedalaman dan kontras amplitud didapatkan dari pengukuran menggunakan alat UltraGPR 70 MHz. Nilai koordinat yang digunakan dalam data ini berbentuk UTM koordinat lokal, sedangkan nilai elevasinya dalam meter.

2.3 Pengolahan Data

Adapun tahapan pengolahan data ERT sebagai berikut:

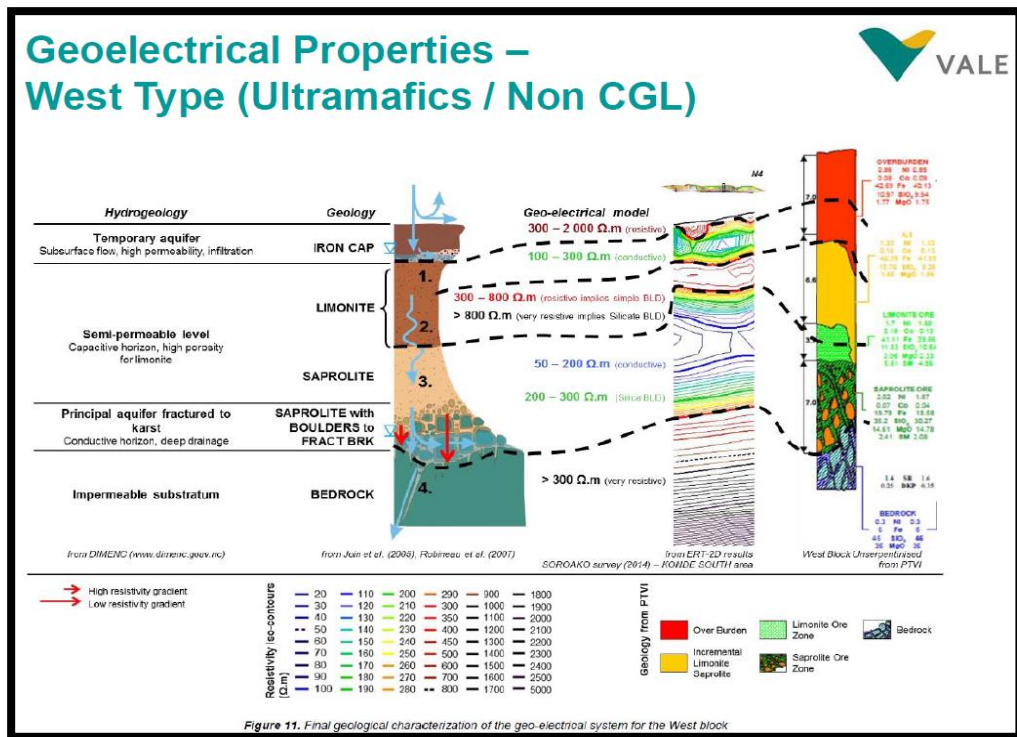
1. Menginput data *robust* atau parameter pengolahan yang digunakan dalam pengolahan *software RES2DINV* yang telah ditentukan sebelumnya oleh perusahaan PT. Vale Indonesia dengan cara memilih *change settings* kemudian klik *read inversion parameters*.
2. Menginput data berupa format dat* dengan cara klik file kemudian *read data*.
3. Menentukan tipe *modelling* topografi yang digunakan dalam proses inversi. Dengan memilih *Topography Options* kemudian klik *type of topography modelling* lalu memilih *S-C transformation with distorted finite-element grid*.
4. Memilih *apparent resistivity* yang digunakan karena data yang digunakan adalah data resistivitas semu.
5. Mengklik *inversion* lalu memilih *model discretization* kemudian klik *use model with blocks of same widths* lalu klik *yes*.
6. Melakukan *carry out inversion* untuk melakukan proses inversi. Kemudian memasukkan iterasi yang digunakan sebanyak 5 kali.
7. Mengekspor koordinat X, Y dan Z pada penampang 2D dari *software Res2DInv* ke *software Datamine Studio RM*
8. Selanjutnya masukkan data *drillhole* untuk memvalidasi hasil interpretasi data
9. Terakhir menarik batas lapisan limbot (*limonite bottom*) dan lapisan sapbot (*saprolite bottom*).

Adapun tahapan pengolahan data GPR sebagai berikut:

1. Memperoleh hasil *processing* data penampang radar yang diperoleh dari konsultan, kemudian diekspor ke *software Groundradar Studio* untuk melihat penampang batas lapisan nikel laterit
2. Mengekspor koordinat X, Y, Z, *Rocky Saprolit Depth* dan *Rocky Saprolit elevation* dari *Software Groundradar Studio* ke Arcgis 10.8 untuk membuat line
3. Selanjutnya line dari Arcgis 10.8 di ekspor ke *software Datamine Studio RM*
4. Terakhir mengukur perbedaan batas lapisan *limonite bottom* dan lapisan *saprolite bottom* tiap lapisan pada gabungan dua metode geofisika

2.4 Tahap Interpretasi Data

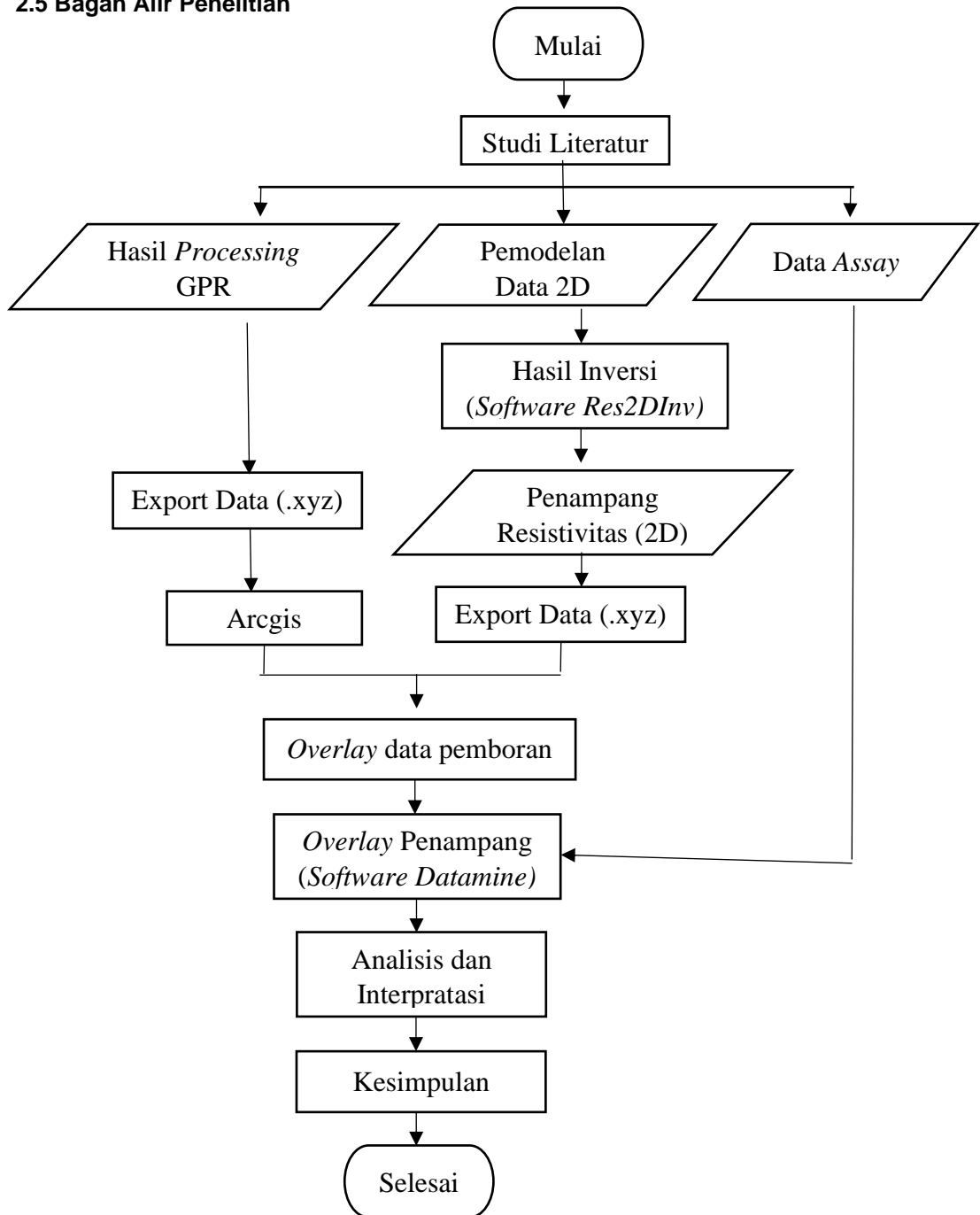
Hasil interpretasi dari profil nikel laterit akan menunjukkan sistem pelapisan nikel laterit yaitu *limonite*, *saprolite*, dan *bedrock*. Dimana akan didapatkan nilai ketebalan dan kedalaman dari zona setiap lapisan yang di *overlay* terhadap data *drillhole* untuk menggambarkan sistem pelapisan karakteristik *West Block* pada daerah penelitian seperti pada gambar 14 (PT. Vale Indonesia, 2016) yaitu.



Gambar 14. Karakteristik daerah *West block* pada daerah penelitian (PT. Vale Indonesia, 2016)

Interpretasi hasil pengukuran ERT dalam bentuk penampang, mempertimbangan berbagai macam faktor yang dapat mempengaruhi nilai resistivitas. Faktor ini dapat memperbesar atau memperkecil nilai resistivitas batuan.

2.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 15. Bagan Alir Penelitian