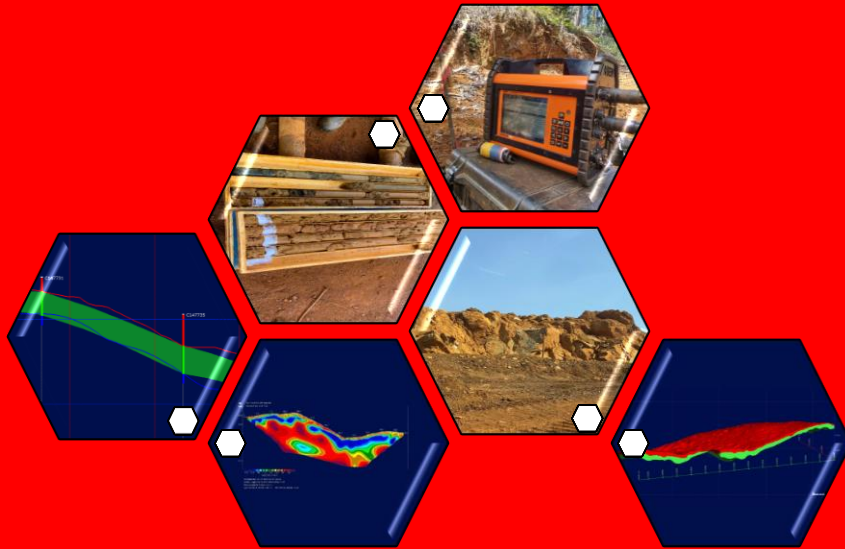


**ANALISIS PERBANDINGAN CADANGAN TERKIRA NIKEL LATERIT
BERDASARKAN DATA ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) DAN
DATA *DRILLHOLE* PADA AREA "AZ"**



AZA AZZAHRA

H061 20 1027



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

**ANALISIS PERBANDINGAN CADANGAN TERKIRA NIKEL LATERIT
BERDASARKAN DATA ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) DAN
DATA *DRILLHOLE* PADA AREA "AZ"**

**AZA AZZAHRA
H061 20 1027**



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

**ANALISIS PERBANDINGAN CADANGAN TERKIRA NIKEL LATERIT
BERDASARKAN DATA ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) DAN
DATA *DRILLHOLE* PADA AREA "AZ"**

**AZA AZZAHRA
H061 20 1027**

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Geofisika

pada

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

SKRIPSI

ANALISIS PERBANDINGAN CADANGAN TERKIRA NIKEL LATERIT BERDASARKAN DATA ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) DAN DATA DRILLHOLE PADA AREA "AZ"

AZA AZZAHRA

H061 20 1027

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Program Studi Geofisika pada 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**

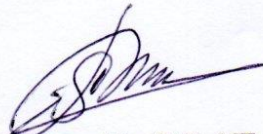
Mengesahkan:

Pembimbing Utama

Pembimbing 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 "Analisis Perbandingan Cadangan Terkira Nikel Laterit Berdasarkan Data ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) dan Data *Drillhole* Pada Area 'AZ'" 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 apapun 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, 13 Agustus 2024



Aza Azzahra
H061201027

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 pertolongan-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan Skripsi ini yang berjudul “**Analisis Perbandingan Cadangan Terkira Nikel Laterit Berdasarkan Data ERT dan Data Drillhole**” yang merupakan syarat dalam rangka penyelesaian studi untuk menempuh gelar Sarjana Sains di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin Kota Makassar. Penghargaan yang tulus dan ucapan terima kasih dengan penuh keikhlasan disampaikan kepada Bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.**, selaku Rektor Universitas Hasanuddin, **Bapak Dr. Eng. Amiruddin, S.Si., M.Si.**, selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin, Bapak **Sabrianto Aswad, S.Si., M.T** dan **Syamsuddin, S.Si., M.T** selaku pembimbing utama dan pendamping tugas akhir, Dosen penasehat akademik yang dengan penuh kesabaran telah membimbing penulis selama perkuliahan serta bersedia meluangkan waktu dan pemikiran untuk mendampingi penulis dalam penyelesaian skripsi ini, Bapak **Muh. Fawzy Ismullah, S.Si., M.T** dan **Bapak Drs.Erfan, M.Si** selaku penguji yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan saran dalam penyempurnaan penyusunan skripsi ini, serta **Bapak/Ibu Dosen** dan **Staff Departemen Geofisika** yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan bantuan selama masa perkuliahan.

Selanjutnya penulis haturkan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada Ayahanda **H.Madeali Laokko** dan Ibunda **Hj.Salma** tercinta yang senantiasa mendoakan, mendukung, dan memberikan cinta kasih serta pengorbanan dengan tulus dan ikhlas sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akademik tepat pada waktunya. Saudara tercinta Kakak **Didiet Prayudha, Kiki Priyanti, dan Yogi Pratama** serta Kakak Ipar **Ariyanto, Wildayati, dan Aghna Aliyah** yang senantiasa memberikan motivasi dan dukungan tak ternilai kepada penulis. Begitu pula kepada Tante tercinta **Risna Erawati, Mama Aji**, dan seluruh keluarga besar **Timboro dan Laokko**. Penghargaan yang tulus juga penulis haturkan kepada Bapak **Arpah Mustaring** dan Bapak **Adhie Wahyudi**, Kak **Hidayat Latuconsina**, Kak **Muammar Hakim**, Pak **Visko**, Kak **Asnur Azis**, Kak **Iswar Edis Pratama**, Kak **Akram Ramadhan**, dan Kak **Nasar** serta seluruh **Keluarga Besar Eksplorasi PT Vale Enggano**, di Sorowako yang telah banyak membantu dan memberikan ilmu kepada penulis selama pelaksanaan penelitian. Selanjutnya kepada **Hamman Badruttamanan Amiruddin** sebagai orang terkasih, yang senantiasa menghibur, memberikan banyak dukungan dan bantuan serta menemani penulis dalam berbagai keadaan, Sahabat-sahabat “Sehat Selalu” dan “Bestie” **Milka Tri Andriani, A.Muh.Imran Ismail, Wikal, Fadia Nurul Islami, dan Emi Asmiranda** yang telah menemani penulis di masa sulit dan senang dari awal hingga akhir perkuliahan, Teman-teman seperjuangan **Geofisika 2020 (T20POSFER)**, sebagai saudara di tanah rantau yang berasal dari berbagai daerah. Sahabat seperbimbingan “FEM Team” **Ni Komang Ayu Lidayani, Ismi Zalsabilla, dan Asyifah**. Serta Keluarga Besar **HMGF FMIPA Unhas** yang menjadi wadah pertama dalam proses pengembangan diri di masa perkuliahan dan sebagai tempat belajar banyak hal.

Penulis,

Aza Azzahra
H061201027

ABSTRAK

AZA AZZAHRA. Analisis Perbandingan Cadangan Terkira Nikel Laterit Berdasarkan Data ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) dan Data *Drillhole* Pada Area “AZ”. (dibimbing oleh Sabrianto Aswad, dan Syamsuddin).

Dalam eksplorasi nikel laterit, PT Vale Indonesia Tbk. awalnya hanya menggunakan metode pengeboran (*drilling*) untuk menentukan batas profil nikel laterit dengan jarak antar *drillhole* 50 meter. Sejak tahun 2014, metode geofisika *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) digunakan untuk memaksimalkan eksplorasi nikel laterit di area yang tidak tercover oleh *drillhole*. Penelitian ini berfokus pada analisis perbandingan cadangan nikel laterit yang dihasilkan dari dua metode interpretasi berbeda yaitu berdasarkan data resistivitas metode ERT sebanyak 25 lintasan dan data *drillhole* sejumlah 142 *hole*. Pengolahan data resistivitas konfigurasi *gradient* menghasilkan penampang inversi, kemudian dilakukan interpretasi batas lapisan nikel laterit menggunakan nilai resistivitas dan data *drillhole* serta dilanjutkan pada proses perhitungan cadangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ERT dapat mengidentifikasi batas-batas profil nikel laterit yang tidak tercover oleh *drillhole*, sehingga meningkatkan akurasi estimasi cadangan. Cadangan berdasarkan interpretasi *drillhole* adalah 1.005.600 m³ untuk limonit dan 1.219.400 m³ untuk saprolit. Sedangkan cadangan dari interpretasi ERT adalah 930.000 m³ untuk limonit dan 1.404.200 m³ untuk saprolit, dengan persentase perbedaan 4% pada limonit dan 7% pada saprolit. Dalam penelitian ini juga dilakukan perhitungan cadangan pada zona *ore* dan pengidentifikasian hubungan nilai resistivitas dengan zona *ore* menggunakan parameter Ni *grade*. Nilai resistivitas pada zona *ore* untuk limonit dan saprolit tidak jauh berbeda dengan zona diluar *ore* (zona *waste*), sehingga disimpulkan bahwa parameter Ni *grade* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap zona *ore*. Berdasarkan hasil yang didapatkan, penelitian ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai distribusi dan kuantitas cadangan nikel laterit pada area yang tidak tercover oleh *drillhole* sehingga dapat berguna dalam perencanaan dan pengelolaan tambang yang lebih efektif dan efisien.

Kata Kunci: Nikel Laterit, ERT, *Drillhole*, Cadangan, Interpretasi, Zona *Ore*

ABSTRACT

AZA AZZAHRA. **Comparative Analysis of Estimated Laterite Nickel Reserves Based on Ert (Electrical Resistivity Tomography) Data and Drillhole Data in the 'AZ' Area** (supervised by Sabrianto Aswad, and Syamsuddin).

In nickel laterite exploration, PT Vale Indonesia Tbk. initially only used the drilling method to determine the boundaries of the nickel laterite profile with a spacing distance of 50 meters between drillholes. Since 2014, the Electrical Resistivity Tomography (ERT) geophysical method has been used to maximize nickel laterite exploration in areas not covered by drillholes. This study focuses on the comparative analysis of nickel laterite reserves generated from two different interpretation methods, namely based on resistivity data of the ERT method of 25 passes and drillhole data of 142 holes. Processing of *gradient* configuration resistivity data produces an inversion cross section, then interpretation of nickel laterite layer boundaries using resistivity values and drillhole data is carried out and continued in the reserve calculation process. The results show that the ERT method can identify the boundaries of nickel laterite profiles that are not covered by the drillhole, thus increasing the accuracy of reserve estimation. Reserves based on drillhole interpretation are 1,005,600 m³ for limonite and 1,219,400 m³ for saprolite. Meanwhile, reserves from ERT interpretation are 930,000 m³ for limonite and 1,404,200 m³ for saprolite, with a percentage difference of 4% in limonite and 7% in saprolite. This study also calculates reserves in the ore zone and identifies the relationship between resistivity values and the ore zone using the Ni grade parameter. The resistivity value in the ore zone for limonite and saprolite is not much different from the zone outside the ore (waste zone), so it is concluded that the Ni grade parameter does not have a significant effect on the ore zone. Based on the results obtained, this research provides a more comprehensive picture of the distribution and quantity of nickel laterite reserves in areas not covered by drill holes so that it can be useful in planning and managing mines more effectively and efficiently.

Keywords: Nickel Laterite, ERT, Drillhole, Reserve, Interpretation, Ore Zone

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I.....	18
PENDAHULUAN	18
1.1 Latar Belakang.....	18
1.2 Tujuan dan Manfaat	19
1.2.1 Tujuan	19
1.2.2 Manfaat	19
1.3 Landasan Teori.....	19
1.3.1 Geologi Regional.....	19
1.3.2 Sumber Daya Mineral dan Cadangan.....	21
1.3.3 Nikel Laterit	22
1.3.4. Metode Geolistrik Resistivitas.....	26
1.3.5 Prinsip Dasar <i>Electrical Resistivity Tomography</i>	32
1.3.6 Konfigurasi <i>Gradient</i>	32
1.3.7 Pemodelan Geofisika	33
1.3.8 Hubungan Antara Geologi dan Nilai Resistivitas	37
1.3.9 Metode Pengeboran (<i>Drilling</i>).....	38
1.3.10 Interpolasi Radial Basis Function.....	38
BAB II.....	40
METODE PENELITIAN	40
2.1 Lokasi Penelitian	40
2.2 Alat dan Bahan.....	40
2.2.1 Alat	40
2.2.2 Bahan	41
2.3 Prosedur Penelitian.....	41

2.3.1 Tahap Kajian Pustaka	41
2.3.2 Tahap Pengolahan Data.....	41
2.3.3 Interpretasi Data.....	42
2.3.4 Perhitungan Cadangan Terkira	42
2.4 Bagan Alir Penelitian	44
BAB III	45
HASIL PENELITIAN	45
3.1 Data Penelitian.....	45
3.2 Hasil Inversi.....	45
BAB IV	47
PEMBAHASAN	47
4.1 Interpretasi Berdasarkan <i>Drillhole</i>	47
4.2 Interpretasi Berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	60
4.3 Perhitungan Cadangan Terkira	81
4.3.1 Cadangan Terkira Hasil Interpretasi <i>Drillhole</i>	82
4.3.2 Cadangan Terkira Hasil Interpretasi Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	82
4.4 Analisis Perbandingan Profil Nikel Laterit Berdasarkan <i>Drillhole</i> dan ERT	83
4.4.1 Tabel <i>Cross</i> Korelasi	85
4.5 Cadangan Zona <i>Ore</i>	86
4.5.1 Cadangan Zona <i>Ore</i> pada Limonit.....	86
4.5.2 Cadangan Zona <i>Ore</i> pada Saprolit.....	87
4.5.3 Cadangan Zona <i>Ore</i> pada Limonit dan Saprolit	87
4.6 Hubungan Nilai Resistivitas dengan Zona <i>Ore</i>	88
BAB V	89
KESIMPULAN	89
DAFTAR PUSTAKA	90
LAMPIRAN	94

DAFTAR TABEL

Nomor Urut	Halaman
Tabel 1. Perbandingan Kesesuaian antara <i>Drillhole</i> dan Nilai Resistivitas Limonit Bottom.....	62
Tabel 2. Perbandingan Kesesuaian antara <i>Drillhole</i> dan Nilai Resistivitas Saprolit Bottom.....	63
Tabel 3. Perbandingan Cadangan <i>Drillhole</i> dan ERT.....	83
Tabel 4. Tabel <i>Cross Korelasi</i> Cadangan <i>Drillhole</i> dan ERT.....	85

DAFTAR GAMBAR

Nomor Urut	Halaman
Gambar 1. Peta Geologi Sulawesi (Hall dan Wilson, 2000).....	20
Gambar 2. Geologi Regional Sorowako (Golightly, 1979).....	21
Gambar 3. Klasifikasi batuan ultramafik (Ahmad, 2009).....	22
Gambar 4. Profil nikel laterit (Ahmad, 2009).....	25
Gambar 5. Rangkaian resistansi, kuat arus, dan tegangan (Manrulu dkk., 2018)...	27
Gambar 6. Arus yang menembus luasan permukaan medium homogen isotropis (Surawan, 2014).....	27
Gambar 7. Sumber Arus di Dalam Bumi (Telford dkk., 1990).....	29
Gambar 8. Sumber Arus di Permukaan (Telford dkk., 1990).....	30
Gambar 9. Dua Elektroda Arus dan Potensial di Permukaan (Telford dkk., 1990)...	30
Gambar 10. Konsep Resistivitas Semu (Dwiangga, 2023).....	31
Gambar 11. Sketsa Susunan Konfigurasi <i>Gradient</i> (Binley & Slater, 2020).....	32
Gambar 12. Desain <i>mesh finite element</i> menggunakan empat node (Xiong, 2002).	34
Gambar 13. Karakteristik Geologi dan Nilai Resistivitas pada Area Keiko Nayoko, Blok Timur (PTVI Geophysics Report, 2016).....	38
Gambar 14. Peta Lintasan ERT.....	40
Gambar 15. Bagan Alir Penelitian.....	44
Gambar 16. Sketsa Data Penelitian.....	45
Gambar 17. Penampang Inversi Lintasan E06.....	46
Gambar 18. Penampang Inversi Lintasan N13.....	46
Gambar 19. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E01 berdasarkan <i>Drillhole</i>	47
Gambar 20. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E02 berdasarkan <i>Drillhole</i>	48
Gambar 21. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E03 berdasarkan <i>Drillhole</i>	48
Gambar 22. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E05 berdasarkan <i>Drillhole</i>	49

Gambar 23.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E06 berdasarkan <i>Drillhole</i>	49
Gambar 24.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E07 berdasarkan <i>Drillhole</i>	50
Gambar 25.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E08 berdasarkan <i>Drillhole</i>	50
Gambar 26.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E09 berdasarkan <i>Drillhole</i>	51
Gambar 27.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E10 berdasarkan <i>Drillhole</i>	51
Gambar 28.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N07 berdasarkan <i>Drillhole</i>	52
Gambar 29.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N08 berdasarkan <i>Drillhole</i>	52
Gambar 30.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N09 berdasarkan <i>Drillhole</i>	53
Gambar 31.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N10 berdasarkan <i>Drillhole</i>	53
Gambar 32.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N11 berdasarkan <i>Drillhole</i>	54
Gambar 33.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N12 berdasarkan <i>Drillhole</i>	54
Gambar 34.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N13 berdasarkan <i>Drillhole</i>	55
Gambar 35.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N14 berdasarkan <i>Drillhole</i>	55
Gambar 36.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N15 berdasarkan <i>Drillhole</i>	56
Gambar 37.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N16 berdasarkan <i>Drillhole</i>	56
Gambar 38.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N17 berdasarkan <i>Drillhole</i>	57
Gambar 39.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N18 berdasarkan <i>Drillhole</i>	57
Gambar 40.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N19 berdasarkan <i>Drillhole</i>	58
Gambar 41.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N20 berdasarkan <i>Drillhole</i>	58
Gambar 42.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N21 berdasarkan <i>Drillhole</i>	59
Gambar 43.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N22 berdasarkan <i>Drillhole</i>	59
Gambar 44.	Tampilan 3D hasil interpretasi <i>drillhole to drillhole</i> untuk <i>limonite bottom</i> pada 25 lintasan.....	60
Gambar 45.	Tampilan 3D hasil interpretasi <i>drillhole to drillhole</i> untuk <i>saprolite bottom</i> pada 25 lintasan.....	60
Gambar 46.	<i>Hole</i> yang <i>match</i> dan tidak <i>match</i> terhadap nilai resistivitas <i>limonite bottom</i>	61

Gambar 47. Hole yang <i>match</i> dan tidak <i>match</i> terhadap nilai resistivitas <i>saprolite bottom</i>	62
Gambar 48. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E01 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	64
Gambar 49. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E02 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	65
Gambar 50. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E03 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	65
Gambar 51. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E05 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	66
Gambar 52. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E06 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	67
Gambar 53. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E07 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	67
Gambar 54. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E08 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	68
Gambar 55. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E09 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	69
Gambar 56. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan E10 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	69
Gambar 57. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N07 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	70
Gambar 58. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N08 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	71
Gambar 59. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N09 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	71
Gambar 60. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N10 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	72
Gambar 61. Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N11 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	73

Gambar 62.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N12 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	73
Gambar 63.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N13 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	74
Gambar 64.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N14 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	75
Gambar 65.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N15 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	75
Gambar 66.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N16 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	76
Gambar 67.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N17 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	77
Gambar 68.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N18 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	77
Gambar 69.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N19 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	78
Gambar 70.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N20 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	79
Gambar 71.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N21 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	79
Gambar 72.	Batas Profil Nikel Laterit Lintasan N22 berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	80
Gambar 73.	Tampilan 3D hasil interpretasi korelasi nilai resistivitas dan <i>drillhole</i> untuk <i>limonite bottom</i> pada 25 lintasan.....	80
Gambar 74.	Tampilan 3D hasil interpretasi korelasi nilai resistivitas dan <i>drillhole</i> untuk <i>saprolite bottom</i> pada 25 lintasan.....	81
Gambar 75.	Area Perhitungan Cadangan.....	81
Gambar 76.	Tampilan 3D Cadangan Limonit dan Saprolit Hasil Interpretasi berdasarkan <i>Drillhole</i>	82

Gambar 77. Tampilan 3D Cadangan Limonit dan Saprolit Hasil Interpretasi berdasarkan Korelasi Nilai Resistivitas dan <i>Drillhole</i>	83
Gambar 78. <i>Overlay</i> penampang cadangan ERT dan <i>Drillhole</i>	84
Gambar 79. Perbedaan Penampang Cadangan ERT dan <i>Drillhole</i>	85
Gambar 80. Penampang Cadangan Zona <i>Ore</i> pada Limonit.....	86
Gambar 81. Penampang Cadangan Zona <i>Ore</i> pada Saprolit.....	87
Gambar 82. Penampang Cadangan Zona <i>Ore</i> pada Limonit dan Saprolit.....	87
Gambar 83. <i>Boxplot</i> Hubungan Nilai Resistivitas dengan Zona <i>Ore</i>	88

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor Urut	Halaman
Lampiran 1. Hasil Inversi.....	94
Lampiran 2. Pembuktian Rumus Geolistrik.....	103
Lampiran 3. Pemodelan Ke Depan (<i>Forward Modelling</i>).....	107
Lampiran 4. Faktor Geometri Konfigurasi <i>Gradient</i>	117

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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

Dalam eksplorasi nikel laterit, PT. Vale Indonesia awalnya hanya menggunakan metode pengeboran (*drilling*) untuk menentukan batas profil nikel laterit berdasarkan kandungan mineral dan karakteristik sampel atau batuan yang diambil secara langsung dengan jarak antar titik bor (*drillhole*) 50 dan 25 meter, namun sejak tahun 2014 terdapat metode geofisika yang dianggap bisa menjadi metode pendukung untuk memaksimalkan eksplorasi nikel laterit berdasarkan penentuan batas profil nikel laterit pada area yang tidak tercover oleh *drillhole* atau diantara *hole* yang satu dengan *hole* yang lainnya.

Metode geofisika yang dimaksud adalah metode ERT (*Electrical Resistivity Tomography*). Metode ERT dilakukan dengan menginjeksi listrik ke dalam bumi, dan melihat respon material bawah permukaan berupa distribusi nilai resistivitas batuan bawah permukaan. Nilai resistivitas yang dihasilkan dapat memudahkan untuk menginterpretasi material di bawah permukaan dan mengetahui batas-batas profil laterit.

Beberapa penelitian terdahulu tentang metode ERT dalam memaksimalkan eksplorasi nikel laterit adalah “Optimalisasi penggunaan ERT Konfigurasi *Gradient* dalam memaksimalkan eksplorasi nikel laterit” (Surawan, 2014), “Aplikasi Metode ERT dalam Eksplorasi Nikel Laterit untuk menentukan sebaran Nilai Resistivitas pada Layer *Ore* di Area DN” (Dwiangga, 2023), dan “Hubungan nilai resistivitas dan sifat kimia batuan untuk menentukan karakteristik profil nikel laterit di Kecamatan Nuha, Luwu Timur” (Arif, 2017).

Penelitian ini hadir untuk menganalisis perbandingan cadangan terkira yang dihasilkan dari interpretasi batas profil nikel laterit yang dihasilkan sebelum adanya metode ERT yaitu hanya menggunakan data *drillhole* dan interpretasi batas profil nikel laterit setelah adanya ERT berdasarkan nilai resistivitas yang dikorelasikan dengan data *drillhole*.

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

1. Mengidentifikasi profil nikel laterit dari penampang ERT berdasarkan nilai resistivitas.
2. Membuat korelasi profil nikel laterit berdasarkan nilai resistivitas dan *drillhole*.
3. Membandingkan cadangan terkira nikel laterit yang dihasilkan berdasarkan interpretasi *drillhole* to *drillhole* dan berdasarkan nilai resistivitas yang dikorelasikan dengan *drillhole*.
4. Menghitung cadangan terkira nikel laterit pada zona *ore* serta melihat sebaran nilai resistivitasnya.

1.2.2 Manfaat

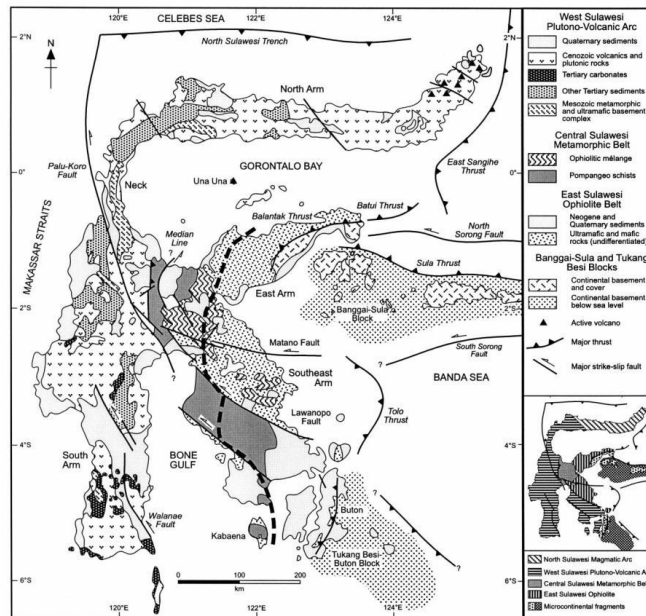
Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain :

1. Memberikan kontribusi dalam meningkatkan akurasi estimasi cadangan nikel laterit dengan menggabungkan data ERT dan data *drillhole*.
2. Mengoptimalkan metode eksplorasi nikel laterit khususnya di daerah yang sulit dijangkau oleh pengeboran dengan memanfaatkan metode ERT.

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Geologi Regional

Sulawesi dan sekitarnya termasuk daerah yang kompleks karena merupakan tempat pertemuan tiga lempeng besar yaitu lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara, lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat dan lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan-tenggara serta lempeng yang lebih kecil yaitu lempeng Filipina. Berdasarkan struktur litotektonik, Sulawesi dan pulau-pulau sekitarnya dibagi menjadi empat seperti pada Gambar 1 yaitu Mandala barat (*West & North Sulawesi Volcano-Plutonic Arc*), Mandala tengah (*Central Sulawesi Metamorphic Belt*), Mandala timur (*East Sulawesi Ophiolite Belt*) berupa ofiolit yang merupakan segmen dari kerak samudera berimbrikasi dan batuan sedimen berumur Trias-Miosen dan yang keempat adalah Fragmen Benua Banggai-Sula-Tukang Besi, kepulauan paling timur dan tenggara Sulawesi yang merupakan pecahan benua yang berpindah ke arah barat karena *strike-slip faults* dari New Guinea (Somptan, 2012).

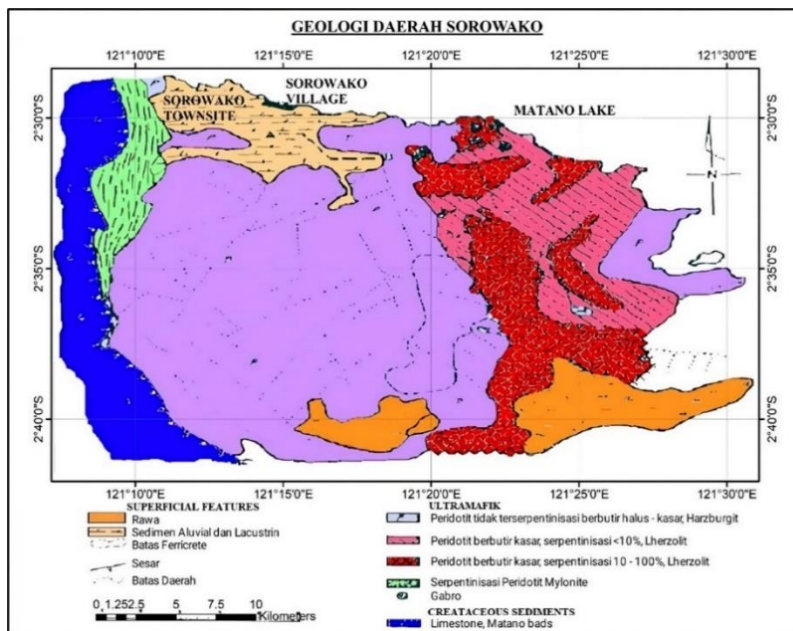


Gambar 1. Peta Geologi Sulawesi (Hall dan Wilson, 2000)

Daerah Sorowako dan sekitarnya termasuk dalam Mandala Indonesia bagian Timur yang dicirikan dengan batuan Ofiolit dan Malihan yang di beberapa tempat tertindih oleh sedimen Mesozoikum (Sukanto, 1975).

Golightly (1979) menyimpulkan geologi daerah Sorowako seperti pada gambar 2 menjadi tiga bagian yaitu :

- 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.
- 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.
- Satuan aluvial dan sedimen danau (*lacustrine*) yang berumur kuartar, umumnya terdapat di bagian utara dekat Desa Sorowako.



Gambar 2. Geologi Regional Sorowako (Golightly,1979)

1.3.2 Sumber Daya Mineral dan Cadangan

Sumber Daya Mineral (*Mineral Resource*) adalah endapan mineral yang diharapkan dapat dimanfaatkan secara nyata. Sumber daya mineral dengan keyakinan geologi tertentu dapat berubah menjadi cadangan setelah dilakukan pengkajian kelayakan tambang dan memenuhi kriteria layak tambang. Cadangan (*Reserve*) adalah endapan mineral yang telah diketahui ukuran, bentuk, sebaran, kuantitas dan kualitasnya dan yang secara ekonomis, teknis, hukum, lingkungan dan sosial dapat ditambang pada saat perhitungan dilakukan.

Klasifikasi Sumber Daya Mineral dan Cadangan adalah suatu proses pengumpulan, penyaringan serta pengolahan data dan informasi dari suatu endapan mineral untuk memperoleh gambaran yang ringkas mengenai endapan itu berdasarkan keyakinan geologi dan kelayakan tambang. Klasifikasi dari sumber daya mineral terbagi menjadi sumber daya mineral tereka, sumber daya mineral tertunjuk, dan sumber daya mineral terukur (KCMI, 2017).

Adapun klasifikasi dari cadangan mineral sebagai berikut (KCMI, 2017) :

A. Cadangan Mineral Terkira

Cadangan mineral terkiraan merupakan bagian sumberdaya mineral tertunjuk yang ekonomis untuk ditambang, dan dalam beberapa kondisi, juga merupakan bagian dari sumberdaya mineral terukur. Cadangan terkiraan memiliki tingkat kepastian yang lebih rendah dibandingkan cadangan terbukti, namun demikian sudah cukup untuk dijadikan dasar untuk pengembangan cebakan.

B. Cadangan Mineral Terbukti

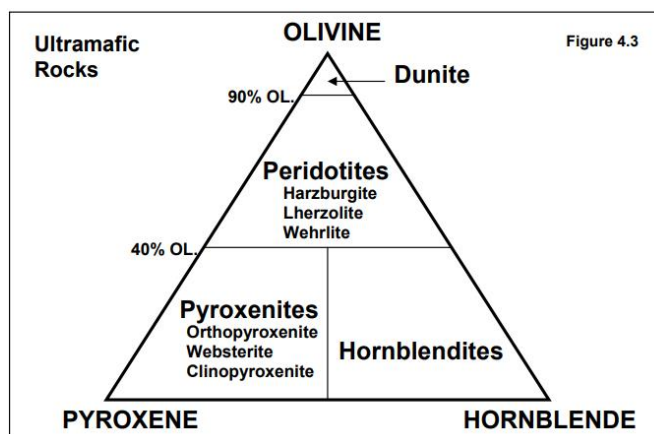
Cadangan mineral terbukti merupakan bagian dari sumberdaya mineral terukur yang ekonomis untuk ditambang. Cadangan mineral terbukti memiliki tingkat keyakinan yang tinggi pada faktor pengubahnya. Cadangan mineral terbukti mewakili tingkat keyakinan tertinggi dari estimasi cadangan. Jenis mineralisasi atau faktor-faktor lainnya dapat menyebabkan cadangan mineral terbukti tidak dapat ditetapkan untuk beberapa cebakan tertentu (KCMI, 2017).

1.3.3 Nikel Laterit

Nikel laterit adalah material dari *regolith* (lapisan hasil pelapukan batuan yang menyelimuti batuan dasar) yang berasal dari batuan ultramafik yang mengandung unsur Ni dan Co. Laterit berasal dari bahasa latin yaitu *later* (Guilbert dan Park, 1986) artinya bata atau membentuk bongkah-bongkah yang tersusun seperti bata. Tanah laterit tersusun oleh fragmen-fragmen batuan yang mengambang di antara matriks, seperti bata di antara semen (Santoso & Subagio, 2018).

A. Batuan Ultramafik

Batuan ultramafik adalah mineral kaya mafik (ferromagnesian) dengan komposisi utamanya adalah mineral olivin, piroksen, hornblende dan mika sehingga memiliki indeks warna lebih dari 70% gelap dan sebagian besar berasal dari plutonik (Ahmad, 2009).



Gambar 3. Klasifikasi batuan ultramafik (Ahmad, 2009)

Berdasarkan kandungan mineralnya, batuan ultramafik terbagi menjadi 5 macam seperti yang ditunjukkan pada gambar 3, yaitu (Ahmad, 2009) :

- 1) Dunit, merupakan batuan ultramafik monomineral yang seluruhnya terdiri dari mineral olivin. Kandungan olivin dunit lebih dari 90%, dengan mineral penyerta seperti kromit, magnetit, ilmenit dan spinel.

- 2) Piroksenit, merupakan batuan ultramafik monomineral yang seluruhnya terdiri dari mineral piroksen. Piroksenit diklasifikasikan menjadi ortopiroksenit dan klinopiroksenit.
- 3) Hornblendit, merupakan batuan ultramafik monomineral yang seluruhnya terdiri dari mineral hornblende.
- 4) Peridotit, merupakan batuan ultramafik yang mengandung sebagian besar olivin tapi juga mineral mafik lainnya dalam jumlah yang signifikan. Mineral penyerta meliputi magnetit, kromit, ilmenit, dan spinel. Batuan peridotit diklasifikasikan menjadi Harzburgit (olivin + ortopiroksen), Wehrlit (olivin + klinopiroksen) dan Lherzolit (olivin + ortopiroksen + klinopiroksen).
- 5) Serpentin, merupakan batuan monomineral yang seluruhnya terdiri dari serpentin. Batuan dapat dibentuk oleh serpentinisasi dunit, piroksenit, hornblendit atau peridotit.

B. Genesa Pembentukan Nikel Laterit

Proses terbentuknya nikel laterit dimulai adanya pelapukan yang intensif pada batuan peridotit / batuan induk. Batuan induk akan terjadi perubahan menjadi serpentin akibat adanya larutan hidrotermal pada waktu pembekuan magma / proses serpentinisasi. Kemudian terjadi pelapukan (kimia dan fisika) menyebabkan terjadi dekomposisi pada batuan induk. Adapun menurut Golightly (1981) sebagian unsur Ca, Mg, dan Si akan mengalami dekomposisi dan beberapa terkayakan secara supergen (Ni, Mn, Co, Zn) atau terkayakan secara relatif (Fe, Cr, Al, Ti, S, dan Cu) (Golightly, 1981). Air resapan yang mengandung CO₂ yang berasal dari udara meresap sampai ke permukaan tanah melindi mineral primer seperti olivin, serpentin, dan piroksen. Air meresap secara perlahan sampai batas antara zona limonit dan zona saprolit, kemudian mengalir secara lateral, kemudian lebih banyak didominasi oleh transportasi larutan secara horizontal. Untuk bahan-bahan yang sukar atau tidak mudah larut akan tinggal pada tempatnya dan sebagian turun ke bawah bersama larutan sebagai larutan koloid. Batuan-batuan seperti Fe, Ni, dan Co akan membentuk konsentrasi residual dan konsentrasi celah pada zona yang disebut dengan zona saprolit, berwarna coklat kuning kemerahan (Kurniadi dkk., 2018)

C. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pembentukan Nikel Laterit

Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan bijih nikel laterit adalah (Sianturi, 2008):

1. Batuan Asal, dalam pembentukan endapan nikel laterit batuan asalnya adalah batuan ultramafik. Batuan ini memiliki elemen Ni paling banyak dibandingkan dengan batuan lainnya, mineral-mineralnya mudah lapuk (tidak stabil), dan komponen-komponennya mudah larut yang memungkinkan terbentuknya endapan nikel.
2. Iklim dan Curah Hujan, iklim yang sesuai dalam pembentukan endapan laterit adalah iklim tropis dan subtropis, sedangkan curah hujan akan mempengaruhi jumlah air yang

melewati tanah, yang mempengaruhi intensitas pelarutan dan perpindahan komponen yang dapat dilarutkan.

3. Reagen-reagen kimia dan Vegetasi, asam-asam humus dapat menyebabkan dekomposisi batuan dan merubah PH larutan. Asam- asam humus ini erat hubungannya dengan vegetasi, yaitu akan mengakibatkan penetrasi air dapat lebih dalam dan lebih mudah dengan mengikuti akar-akar pepohonan, akumulasi air hujan akan lebih banyak, humus akan lebih tebal. Keadaan ini merupakan suatu petunjuk yaitu pada hutan yang lebat akan terdapat endapan bijih nikel yang lebih tebal dan kadar yang lebih tinggi.

4. Struktur Geologi, adanya kontrol struktur dalam pembentukan nikel laterit menyebabkan deformasi pada batuan yang paling dominan yaitu pada struktur rekahan dibandingkan dengan struktur patahan, batuan ultramafik memiliki permeabilitas dan porositas yang kecil sehingga penetrasi air menjadi sulit. Akan tetapi dengan adanya rekahan-rekahan tersebut akan lebih memudahkan air masuk dan berarti proses pelapukan akan lebih intensif.

5. Topografi, kondisi relief dan lereng sangat mempengaruhi sirkulasi air serta reagen-reagen lain. Untuk daerah landai, air akan bergerak perlahan-perlahan sehingga mempunyai kesempatan untuk mengadakan penetrasi yang lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan. Akumulasi endapan biasanya terdapat pada daerah landai sampai kemiringan sedang. Hal ini menggambarkan bahwa ketebalan pelapukan mengikuti bentuk topografi. Pada daerah yang curam jumlah air yang meluncur lebih banyak daripada air yang meresap, ini dapat menyebabkan pelapukan kurang intensif.

6. Waktu, pelapukan yang berlangsung dalam waktu lama pada umumnya akan menghasilkan endapan yang relatif lebih tebal, sedangkan pelapukan yang berlangsung dalam waktu singkat akan membentuk endapan yang tipis.

D. Profil Endapan Nikel Laterit

Pelapukan kimiawi batuan ultramafik disertai pelepasan unsur-unsur yang larut dalam air dan tidak larut dalam air. Unsur-unsur yang larut dalam air pada akhirnya akan larut pada sistem pelapukan sedangkan unsur-unsur yang tidak larut dalam air akan tertinggal pada sistem pengkayaan. Proses pelapukan kimia pada akhirnya menghasilkan pembentukan profil laterit berlapis (Ahmad, 2009).

Profil nikel laterit dapat dilihat pada gambar 4 dan dijelaskan dari bawah ke atas sebagai berikut (Ahmad, 2009):

1. Zona *Bedrock*

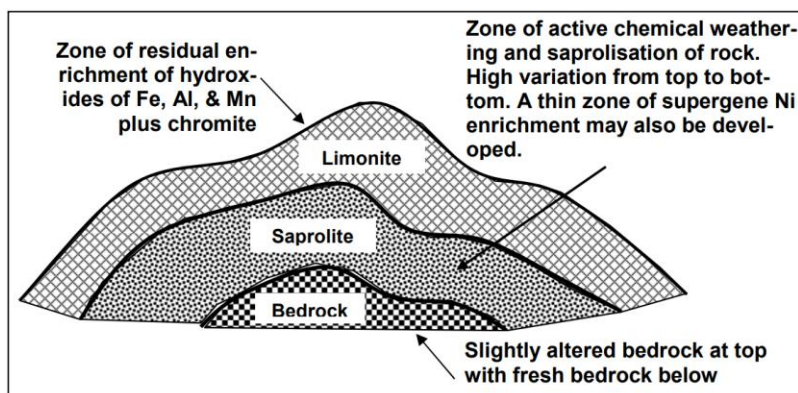
Zona ini terletak di bagian paling bawah profil laterit yang merupakan batuan ultramafik yang belum terpengaruh oleh proses pelapukan.

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 di sepanjang permukaan rekahan mengarah pada pembentukan *boulder* di zona saprolit. Boulder dapat membentuk saprolit crust yang mengandung kadar nikel 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 Limonit

Zona ini merupakan zona yang unsur tidak dapat terlarut mencapai nilai maksimum. Semua unsur yang terlarut seperti (Ca, Na, K, Si) dari zona pelapukan meninggalkan Fe, Al, dan Mn yang teroksidasi di permukaan (tidak terlarut). Bagian atas dari zona yang kaya akan besi merupakan *goethite* sedangkan bagian bawahnya yang terbentuk dari hidrasi oksida besi dikelompokkan sebagai limonit. Goethite dapat termobilisasi ulang di dekat permukaan yang kemudian mengkristal kembali sehingga disebut *ferricrete*. Struktur asli dan tekstur batuan asal sudah tidak terlihat lagi pada zona ini.



Gambar 4. Profil nikel laterit (Ahmad, 2009)

E. Tipe Nikel Laterit Sorowako

Menurut Ahmad (2009), tipe endapan nikel laterit di daerah Sorowako dibagi menjadi 2 yaitu *West Block* dan *East Block*. Pembagian tipe endapan ini berdasarkan beberapa parameter utama, diantaranya: Tipe batuan ultramafik, derajat serpentinisasi, kandungan kimia bijih, fraksi batuan, dan kandungan olivin.

1. Tipe *West Block*

Daerah *west block* memiliki topografi terjal dan membentuk pegunungan. Batuan di daerah ini umumnya adalah harzburgit yang mengandung olivin (rata-rata 80-90%) dan ortopiroksen (rata-rata 10-20%), juga ditemukan batuan dunit dengan kandungan olivin

90% dan sejumlah kecil mineral kromit. Batuan di daerah *west block* umumnya tidak terserpentinisasi atau sedikit terserpentinisasi, dengan sifat material yang relatif keras dan banyak dijumpai bongkah-bongkah peridotit segar (*boulder*) sisa proses pelapukan. Kadar nikel di daerah *west block* berkisar antara 1.6-2.5% Ni dan rasio silika magnesium yang relatif tinggi (2,2-2,6) dibandingkan *east block*.

2. Tipe *East Block*

Daerah *east block* memiliki topografi yang landai sedikit berbukit. Batuan di blok timur umumnya adalah lherzolite yang mengandung olivin (rata-rata 60-65%), ortopiroksen (rata-rata 25-30%), dan klinopiroksen (rata-rata 10%). Batuan di daerah ini memiliki tingkat serpentinisasi yang sedang hingga tinggi, dengan kekerasan batuan yang sedang. Kadar Ni dan rasio silika magnesium *east block* lebih rendah dibandingkan *west block*.

1.3.4. Metode Geolistrik Resistivitas

Metode geolistrik pertama kali dilakukan oleh *Conrad Schlumberger* pada tahun 1912. Metode geolistrik merupakan salah satu cabang ilmu geofisika yang mempelajari bumi dan lingkungannya berdasarkan sifat-sifat kelistrikan batuan. Sifat ini adalah tahanan jenis, konduktivitas, konstanta dielektrik, kemampuan menimbulkan potensial listrik sendiri, arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua elektroda arus dan distribusi potensial yang dihasilkan diukur dengan elektroda potensial (Sedana dkk., 2015)

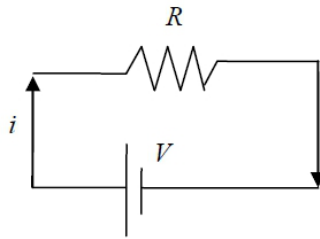
Tujuan dari survei kelistrikan adalah untuk menentukan distribusi resistivitas bawah permukaan dengan melakukan pengukuran di permukaan tanah. Dari pengukuran ini, sebenarnya resistivitas di bawah permukaan dapat diperkirakan. Resistivitas tanah/batuan berhubungan dengan berbagai parameter geologi seperti kandungan mineral, fluida, porositas dan tingkat saturasi air pada batuan. Survei resistivitas listrik telah digunakan selama beberapa dekade di hidrogeologi, pertambangan, investigasi geoteknik dan survei lingkungan (Loke, 2004).

A. Prinsip Dasar Metode Resistivitas

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

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

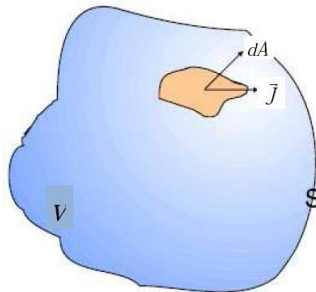
dengan R adalah resistansi bahan (ohm), I adalah besar kuat arus (ampere), dan V adalah besar tegangan (volt). Hukum Ohm menyatakan bahwa potensial atau tegangan antara ujung-ujung penghantar adalah sama dengan hasil kali resistansi dan kuat arus. Hal ini diasumsikan bahwa R tidak tergantung I , bahwa R adalah konstan (tetap). Rangkaian resistansi, kuat arus, dan tegangan ditunjukkan oleh Gambar 5 (Manrulu dkk., 2018)



Gambar 5. Rangkaian resistansi, kuat arus, dan tegangan (Manrulu dkk., 2018)

B. Potensial pada Bumi Homogen Isotropik

Bumi diasumsikan sebagai medium homogen isotropis, maka penjalaran arus yang kontinu pada medium bumi dapat digambarkan seperti pada Gambar 6 sebagai berikut (Fajar, 2022):



Gambar 6. Arus yang menembus luasan permukaan medium homogen isotropis (Surawan, 2014)

Apabila suatu arus kontinu dialirkan ke dalam medium yang homogen isotropik, Jika dA adalah elemen luas permukaan dan J adalah rapat arus listrik, maka besarnya elemen arus yang melalui elemen permukaan tersebut adalah (Telford dkk., 1990) :

$$dI = \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

Sedang rapat arus \vec{J} dan medan listrik E yang ditimbulkan dihubungkan dengan hukum Ohm

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

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

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

Dengan V adalah potensial listrik, maka:

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

Untuk arus tetap, maka berlaku persamaan:

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

Maka,

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

$$\vec{\nabla} \sigma \cdot \vec{\nabla} V + \sigma \vec{\nabla}^2 V = 0 \quad (8)$$

Jika σ adalah koefisien konstan, maka suku pertama pada persamaan (8) akan hilang dan memenuhi persamaan *Laplace* yang disebut potensial harmonik:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (9)$$

Adapun persamaan Laplace dalam koordinat bola :

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} \quad (10)$$

C. Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di dalam Bumi

Pada model homogen isotropis, elektroda arus ditancapkan di dalam bumi yang berfungsi sebagai sumber injeksi arus listrik ke segala arah dalam bumi seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7. Pada setiap titik equipotensial dalam bumi yang membentuk permukaan bola yang mempunyai jari-jari r . sehingga arus yang keluar melalui luas permukaan bola dengan jari-jari r yaitu (Telford dkk., 1990):

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dv}{dr} \right) = 0 \quad (11)$$

Integrasi sebanyak dua kali terhadap persamaan (10) menghasilkan:

$$\int \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dv}{dr} \right) = \int 0 \, dr \rightarrow r^2 \frac{dv}{dr} = A \rightarrow \frac{dv}{dr} = \frac{A}{r^2} \quad (12)$$

$$V = \int \frac{A}{r^2} \, dr = -\frac{A}{r} + C \quad (13)$$

Dengan A dan C merupakan konstanta. Karena $V = 0$ pada saat jarak mendekati tak hingga ($r = \infty$), maka diperoleh $C = 0$, sehingga persamaan (13) menjadi :

$$V = -\frac{A}{r} \quad (14)$$

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

$$I = A \vec{j} \quad (15)$$

$A = 4\pi r^2$ disubstitusi ke persamaan (15) maka didapatkan:

$$I = 4\pi r^2(-\sigma \vec{\nabla}V) \quad (16)$$

Karena V dalam fungsi $r \rightarrow \vec{\nabla}V = \frac{dv}{dr}$, kemudian persamaan (12) disubstitusikan ke persamaan (16) maka,

$$I = 4\pi r^2 \sigma \frac{A}{r^2} = -4\pi \sigma A \quad (17)$$

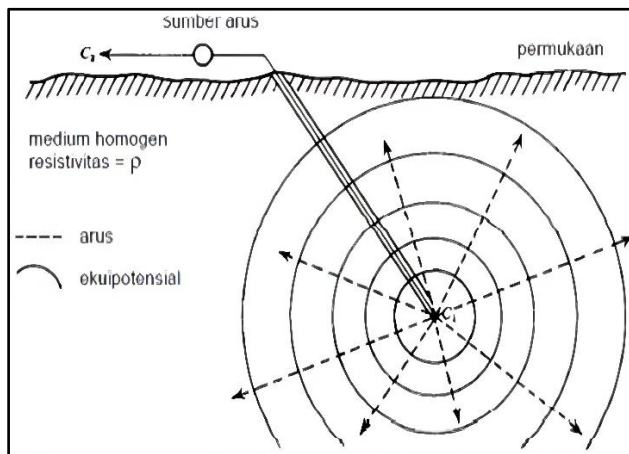
Karena $\sigma = \frac{1}{\rho}$, maka persamaan (17) dapat ditulis:

$$I = -4\pi \frac{1}{\rho} A \rightarrow A = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (18)$$

Persamaan (18) disubstitusikan pada persamaan (14) maka dihasilkan:

$$V = \left(\frac{I\rho}{4\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (19)$$

Dengan, V adalah potensial listrik (*Volt*), I adalah kuat arus listrik (*Ampere*), ρ merupakan resistivitas (*Ohm.m*), P adalah konstanta, \vec{J} adalah rapat arus (A/m^2), dan σ adalah konduktivitas (*S/m*).

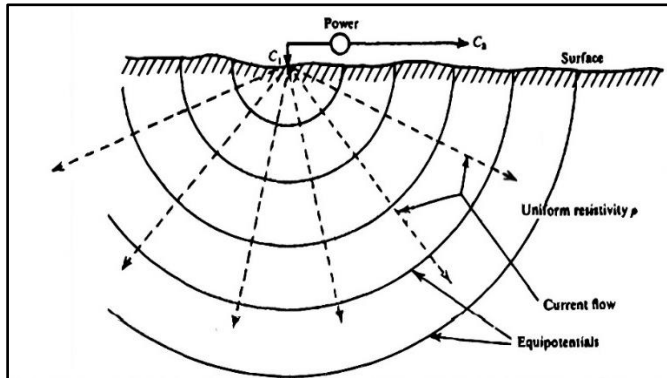


Gambar 7. Sumber Arus di Dalam Bumi (Telford dkk., 1990)

D. Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Permukaan Bumi

Apabila elektroda arus berada di permukaan pada medium homogen isotropik seperti yang diilustrasikan pada Gambar 8 dan nilai konduktivitas udara sama dengan nol, maka bidang equipotensial yang tinggal membentuk setengah bola sehingga persamaan (19) menjadi (Telford dkk., 1990):

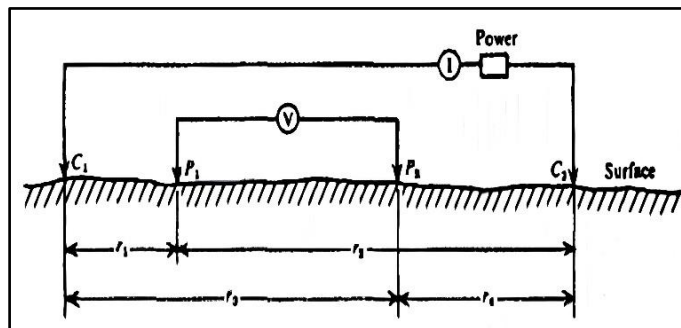
$$V = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (20)$$



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

E. 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 9. 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 9. 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 P₁ yang ditimbulkan arus C₁ dan C₂ adalah (Telford dkk., 1990):

$$V_{P1} = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \tag{21}$$

Dan potensial total di titik P₂ yang ditimbulkan arus C₁ dan C₂ adalah :

$$V_{P2} = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) \tag{22}$$

Beda potensial antara P_1 dan P_2 sebagai berikut :

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} \rightarrow \Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \quad (23)$$

Sehingga didapatkan persamaan :

$$\rho = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]} \frac{\Delta V}{I} \quad (24)$$

Atau dapat dituliskan :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (25)$$

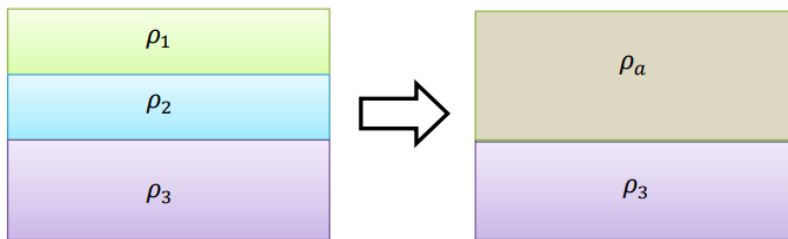
Dengan :

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

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.

F. Konsep Resistivitas Semu

Pada metode resistivitas, bumi dianggap bersifat homogen isotropis, maka pengukuran akan menunjukkan besaran resistivitas yang tidak bergantung pada jarak elektroda potensial yang akan digunakan. Akan tetapi, kenyataannya bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan resistivitas yang berbeda-beda (Gambar 10). Oleh karena itu, nilai resistivitas yang terukur harus bergantung pada jarak elektroda potensial, sehingga potensialnya merupakan pengaruh dari lapisan-lapisan tersebut. Maka nilai resistivitas yang terukur bukanlah nilai resistivitas sebenarnya, melainkan resistivitas semu (ρ_a) (Dwiangga, 2023).



Gambar 10. Konsep Resistivitas Semu (Dwiangga, 2023)

Nilai resistivitas yang dihitung bukanlah resistivitas sebenarnya dari bawah permukaan, tetapi nilai “semu” yaitu resistivitas suatu tanah homogen yang akan memberikan nilai resistansi yang sama untuk susunan elektroda yang sama. Hubungan antara resistivitas

"semu" dan resistivitas "sebenarnya" sangatlah kompleks. Untuk menentukan resistivitas sebenarnya dari bawah permukaan tanah diperlukan penginversian hasil resistivitas semu dengan menggunakan program di komputer (Loke, 2004).

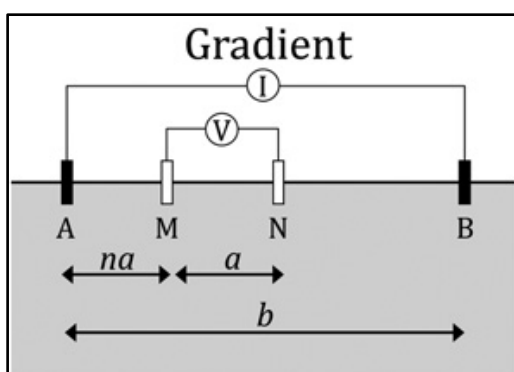
1.3.5 Prinsip Dasar Electrical Resistivity Tomography

Lowrie (2007) mendeskripsikan bahwa *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) merupakan metode geolistrik multi elektroda yang dilakukan untuk mendapatkan informasi tentang kondisi material di bawah permukaan bumi berdasarkan distribusi dari nilai resistivitas material di bawah permukaan bumi. Metode ERT dapat dilakukan untuk memperkirakan atau menentukan karakteristik material bawah permukaan bumi. Data yang diperoleh dari metode ERT lebih banyak sehingga keakuratan data lebih baik. Kelebihan metode ERT sering digunakan untuk melakukan penelitian dengan skala detail.

Prinsip ERT didasarkan pada penggunaan sistem multi-elektroda dan multi-*channel* yang memungkinkan koneksi dengan satu set elektroda yang tertanam dan terhubung ke resistivitas 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.

1.3.6 Konfigurasi Gradient

Konfigurasi *gradient* dilakukan dengan menginjeksi elektroda arus dengan jarak pemisah b seperti yang diilustrasikan pada Gambar 11 oleh Binley dan Slater (2020). Dahlin dan Zhou (2004) menyimpulkan bahwa elektroda arus AB dipisahkan oleh jarak pemisah $(s + 2)na$. Selanjutnya elektroda potensial berada ditengah elektroda arus dengan jarak na . S adalah perpindahan elektroda potensial untuk menunjukkan jumlah maksimum pembacaan beda potensial untuk injeksi arus.



Gambar 11. Sketsa Susunan Konfigurasi *Gradient* (Binley & Slater, 2020)

Konfigurasi *gradient* mampu memberikan resolusi yang baik di bawah permukaan dibanding dengan konfigurasi lain. Konfigurasi lain memiliki daerah investigasi yang dangkal dan juga mampu mendapatkan resolusi yang baik dari struktur vertikal. Tetapi

konfigurasi *gradient* lebih sensitif terhadap noise jika dibandingkan dengan konfigurasi Wenner (Dahlin dan Zhou, 2004). Setiap konfigurasi elektroda memiliki susunan yang berbeda. Susunan elektroda seperti pada Gambar 11 memiliki geometrinya tersendiri. Faktor geometri konfigurasi *gradient* dirumuskan sebagai berikut :

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \quad (27)$$

Dengan, $r_1 = na$, $r_2 = (s + 1)na$, $r_3 = (n + 1)a$ dan $r_4 = (s + 1)na - a$

Apabila r_1, r_2, r_3 dan r_4 dimasukkan kedalam persamaan (27) maka didapatkan faktor geometri dari konfigurasi *gradient array*.

1.3.7 Pemodelan Geofisika

Metode geofisika merupakan terapan dari beberapa prinsip fisika yang bertujuan untuk mengetahui dan memecahkan masalah yang berhubungan dengan bumi. Beberapa persoalan fisika yang sering kali dihadapi memiliki kerumitan terus menerus, dalam penyelesaian matematisnya yaitu secara analitik maka dapat dengan disederhanakan penyelesaiannya dengan menggunakan pendekatan komputasi (Melani dkk., 2021).

Pemodelan dalam geofisika dapat dibedakan atas pemodelan ke depan (*forward modeling*) dan pemodelan inversi (*inverse modeling*). *Forward Modelling* merupakan proses perhitungan data jika diketahui nilai parameter model bawah permukaan tertentu. Sedangkan *Inverse Modelling* merupakan proses untuk memperoleh parameter model berdasarkan data pengamatan (Grandis, 2009).

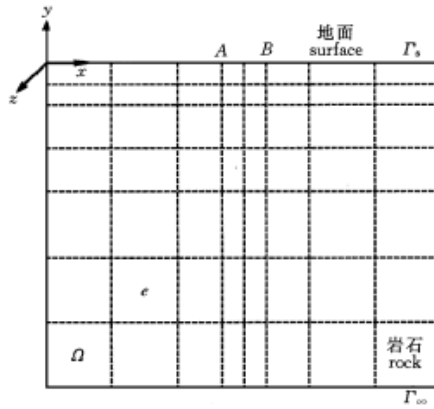
A. *Forward Modelling*

Salah satu metode dalam proses pemodelan geofisika adalah pemodelan ke depan atau *forward modelling*. Pemodelan ke depan (*forward modeling*) menyatakan proses perhitungan “data” yang secara teoritis akan teramati di permukaan bumi jika diketahui harga parameter model bawah permukaan tertentu. Perhitungan data teoritis tersebut menggunakan persamaan matematik yang diturunkan dari konsep fisika yang mendasari fenomena yang ditinjau. Dalam pemodelan data geofisika, dicari suatu model yang cocok (*fit*) dengan data pengamatan atau data lapangan. Dengan demikian, model tersebut dapat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan di tempat pengukuran data. Untuk memperoleh kesesuaian antara data teoritis (respon model) dengan data lapangan dapat dilakukan proses coba-coba (*trial and error*) dengan mengubah-ubah harga parameter model (Grandis, 2009).

Dalam survei geofisika, distribusi arus yang diperoleh pada bawah permukaan dapat berubah-ubah. Solusi yang bisa digunakan adalah menggunakan metode *finite element*, dimana nilai resistivitas yang berbeda-beda akan di diskritisasi menjadi mesh berdasarkan nilai resistivitasnya dan dapat menunjukkan potensial listrik pada model (Sasaki, 1989). Kelebihan metode *finite element* adalah banyaknya variasi bentuk

diskritisasi elemennya, yaitu bentuk segi empat, segitiga dan segi yang lain. Sedangkan jika dengan metode *finite difference*, bentuk diskritisasi elemennya hanya berbentuk segi empat saja, sehingga jika bentuk domainnya tidak teratur, maka penyelesaian dengan metode *finite element* dapat memperkecil tingkat galat (*error*) karena dapat mendiskritisasi domainnya menjadi bentuk segi tiga atau gabungan segitiga dan segi empat. Untuk geometri yang kompleks seperti topografi, lebih mudah direpresentasikan dalam *mesh finite element* (Supriyono, 2005).

Langkah pertama dalam diskritisasi *finite element* adalah *meshing*. Desain mesh yang digunakan untuk komputasi sangat penting. Jumlah node menentukan resolusi spasial, karena itu jumlah node memiliki dampak yang signifikan terhadap akurasi.



Gambar 12. Desain *mesh finite element* menggunakan empat node (Xiong, 2002)

Pada gambar 12 domain dibagi menjadi beberapa elemen, dimana setiap elemen memiliki 4 node yang berada di sudut elemen. Setiap node akan memiliki fungsi bentuk (*shape function*) yang berbeda-beda yang ditampilkan pada persamaan 28 (Xiong, 2002).

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{(1 - \xi)(1 - \eta)}{4} \\
 N_2 &= \frac{(1 + \xi)(1 - \eta)}{4} \\
 N_3 &= \frac{(1 + \xi)(1 + \eta)}{4} \\
 N_4 &= \frac{(1 - \xi)(1 + \eta)}{4}
 \end{aligned} \tag{28}$$

Variasi potensial listrik pada penampang geolistrik 2D diberikan oleh:

$$F(U) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 + \frac{1}{2} \sigma k^2 U^2 - I \delta(A) U \right] d\Omega \tag{29}$$

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).

$$F(U) = \sum_{\Omega} \int_e \frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 d\Omega + \sum_{\Omega} \frac{1}{2} \sigma k^2 U^2 d\Omega - \sum_{\Omega} I \delta(A) U d\Omega \quad (30)$$

$$KU = P \quad (31)$$

$$F(U) = \frac{1}{2} U_e^T K_{1e} U_e + \frac{1}{2} U_e^T K_{2e} U_e - U^T P \quad (32)$$

$$= U^T KU - U^T P \quad (33)$$

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

Dengan $F(U) = 0$, maka

$$KU = P \quad (35)$$

Dengan K adalah matriks ordo $n \times n$ 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 *inverse fourier* diperoleh potensial listrik kompleks dalam ruang 3D. persamaan Transformasi Inverse Fourier (Cai dkk., 2007):

$$u(M) = \sum_{i=1}^5 g_i U(M, k_i) \quad (36)$$

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).

$$\rho_a = G \frac{u(M) - u(N)}{I} \quad (37)$$

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

B. Inverse Modelling

Pemodelan inversi merupakan suatu metode yang digunakan dalam interpretasi komputer untuk memodelkan suatu data yang dimasukkan ke dalamnya. Proses pemodelan akan dilakukan secara otomatis untuk mendapatkan suatu model atau suatu nilai yang dicari. Pemodelan inversi (*inverse modeling*) sering disebut sebagai "kebalikan" dari pemodelan ke depan dikarenakan dalam pemodelan inversi parameter model didapatkan secara langsung dari data. (Melani dkk., 2021).

Pemodelan Inversi bertujuan untuk menentukan model yang memberikan respon yang paling cocok dengan data pengamatan. Kumpulan data yang diamati dapat ditulis sebagai vektor kolom y berikut (Wahyudin, 2017).

$$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (38)$$

Dengan m adalah jumlah data pengukuran. Respon model f dapat ditulis

$$f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (39)$$

Adapun parameter model diwakili oleh vektor berikut.

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_m) \quad (40)$$

dengan n adalah jumlah parameter model. Perbedaan antara data yang diamati dan respon model diberikan oleh vektor perbedaan g yang didefinisikan oleh :

$$g = y - f \quad (41)$$

Dalam metode optimasi *least-square*, model awal dimodifikasi sedemikian rupa sehingga jumlah kuadrat kesalahan E dari perbedaan antara respon model dan data pengamatan diminimalkan.

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (42)$$

Untuk mengurangi mengurangi eror data diatas, digunakan persamaan Gauss-Newton untuk menentukan perubahan parameter model yang dapat mengurangi kuadrat eror.

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (43)$$

Dimana Δq adalah vektor perubahan parameter model dan J adalah matriks Jacobian (ukuran $m \times n$) dari turunan parsial

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (44)$$

yaitu perubahan respon model ke- i akibat perubahan parameter model ke- j . Setelah menghitung vektor perubahan parameter, model baru diperoleh dengan persamaan

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (45)$$

Vektor perubahan parameter yang dihitung menggunakan persamaan 43 dapat memiliki komponen yang terlalu besar sehingga model baru yang dihitung dengan persamaan 45 memiliki nilai yang tidak realistis. Untuk menghindari kesalahan tersebut, dilakukan modifikasi *Marquardt-Levenberg* terhadap persamaan *Gauss-Newton* berikut :

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q = J^T g \quad (46)$$

dengan I adalah matriks identitas dan λ adalah faktor redaman. Metode ini berhasil digunakan dalam inversi data resistivitas *sounding* dimana model terdiri dari sejumlah kecil lapisan. Namun ketika jumlah parameter model besar seperti pada model inversi 2D dan 3D, model yang dihasilkan pada metode ini dapat memiliki distribusi resistivitas

yang tidak menentu dengan zona resistivitas tinggi atau rendah yang tidak akurat. Untuk mengatasi permasalahan ini persamaan *least-square Gauss Newton* dimodifikasi lebih lanjut untuk mendapatkan perubahan resistivitas model secara halus atau bertahap, dengan persamaan sebagai berikut :

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (47)$$

Pada persamaan ini Δq menjadi halus tapi tidak menjamin nilai resistivitas berubah dengan cara yang halus. Opsi pertama “sertakan penghalusan resistivitas model” menggunakan persamaan yang akan menerapkan batasan kehalusan secara langsung pada nilai resistivitas model. Persamaan ini diberikan oleh persamaan berikut :

$$(J^T J + \lambda W^T W) \Delta q = J^T g - \lambda W^T W q \quad (48)$$

Sehingga nilai resistivitas q berubah dengan cara yang halus. Opsi berikutnya dengan memodifikasi persamaan 48 sehingga elemen-elemen yang berbeda dari perubahan parameter model dan vektor *error* data memiliki besaran yang sama, yang diberikan oleh:

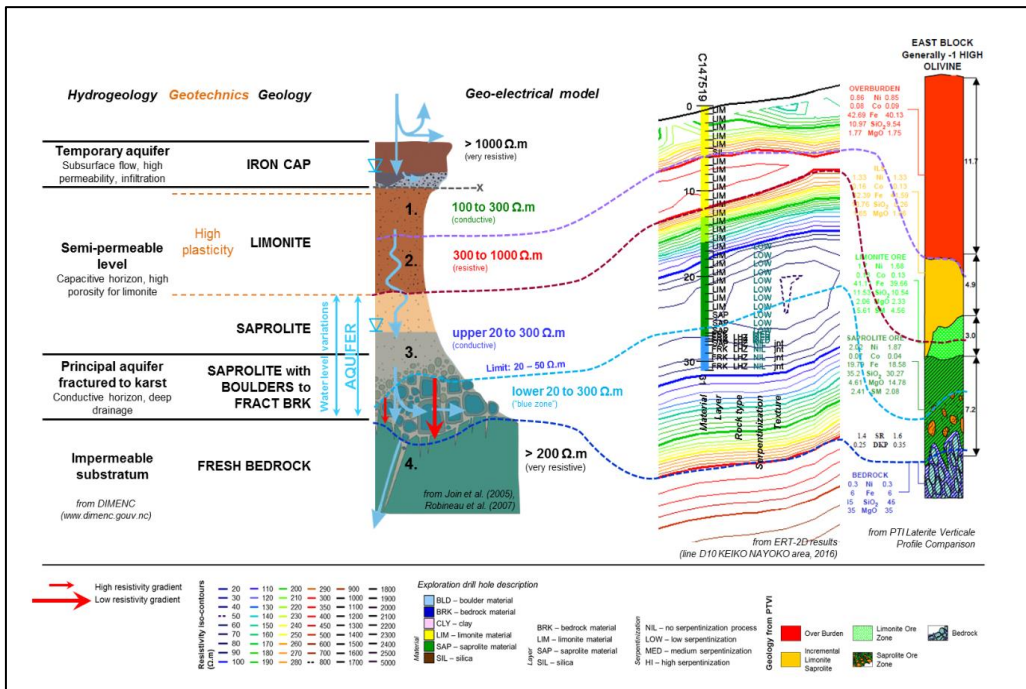
$$(J^T R_d J + \lambda W^T R_m W) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda W^T R_m W q_k \quad (49)$$

dengan R_d dan R_m matriks pembobotan. Metode ini dikenal dengan metode inversi $l_1 - norm$ atau *robust* atau *blocky*, sedangkan persamaan 48 adalah metode inversi $l_2 - norm$. Metode inversi $l_2 - norm$ memberikan hasil yang optimal ketika geologi bawah permukaan menunjukkan variasi yang halus. Namun dalam kasus dimana bawah permukaan terdiri dari benda-benda yang homogen secara internal dengan batas-batas yang tajam, metode *robust* lebih baik digunakan.

1.3.8 Hubungan Antara Geologi dan Nilai Resistivitas

Setiap jenis batuan memiliki tingkat resistivitas yang berbeda-beda. Untuk jenis batuan yang terbentuk dari magma yang telah mengalami pendinginan akan memiliki resistivitas yang tinggi, sedangkan untuk batuan sedimen memiliki resistivitas rendah. Beberapa hal yang mempengaruhi resistivitas jenis batuan diantaranya 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. (Telford dkk., 1990).

Nilai resistivitas profil nikel laterit pada area sorowako blok timur (*east block*) 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 >200 Ωm . Gambar 13 memperlihatkan karakteristik dari kondisi geologi dan nilai resistivitas pada daerah penelitian yaitu blok timur (PTVI *Geophysics Report*, 2016).



Gambar 13. Karakteristik Geologi dan Nilai Resistivitas pada Area Keiko Nayoko, Blok Timur (PTVI Geophysics Report, 2016)

1.3.9 Metode Pengeboran (*Drilling*)

Kegiatan pengeboran adalah salah satu kegiatan eksplorasi yang bertujuan untuk mencari data *subsurface* dan kemudian mengetahui model penyebaran endapan nikel laterit di bawah permukaan bumi (Chalik dkk., 2023). Hasil dari kegiatan pengeboran berupa sampel material bawah permukaan yang diletakkan pada *core box*. Dari sampel tersebut kemudian dapat diketahui batas zona transisi antara limonit, saprolit dan *bedrock* melalui proses analisa sampel. Untuk melakukan proses perhitungan cadangan, maka diperlukan beberapa data yang diperlukan, yaitu data *assay* dan *collar*. Data *assay* adalah data hasil analisis kadar nikel dan data *collar* merupakan data yang menggambarkan distribusi *drillhole* pada koordinat x, y, dan z (Akram, 2015).

1.3.10 Interpolasi Radial Basis Function

Interpolasi adalah metode numerik untuk memperkirakan nilai pada suatu titik data di antara titik-titik data yang diketahui. Metode interpolasi dapat dikategorikan berdasarkan susunan titik data yang diketahui. Jika susunan titik data yang diketahui bersifat tersebar, maka kita memerlukan metode interpolasi pada grid yang tidak teratur. Metode interpolasi pada grid yang tidak teratur yang paling banyak digunakan adalah interpolasi berbasis RBF karena memiliki akurasi tinggi dan stabilitas komputasional untuk jumlah data yang tersebar yang besar bahkan dalam dimensi yang tinggi (Iryanto dkk., 2020).

RBF adalah fungsi dengan nilai yang bergantung dari tingkat perbedaan atau jarak terhadap daerah asal, sehingga $\phi(x) = \phi(\|x\|)$ atau jarak dari sebuah titik c , yang dianggap sebagai titik tengah sehingga $\phi(x, c) = z(\|x - c\|)$. Fungsi ϕ yang memenuhi fungsi di atas adalah sebuah fungsi radial (*radial function*). RBF pada dasarnya dapat digunakan sebagai fungsi pendekatan sebuah nilai dengan bentuk yang terlihat pada persamaan 50 (Kartahadikusuma dan Gunadi, 2013).

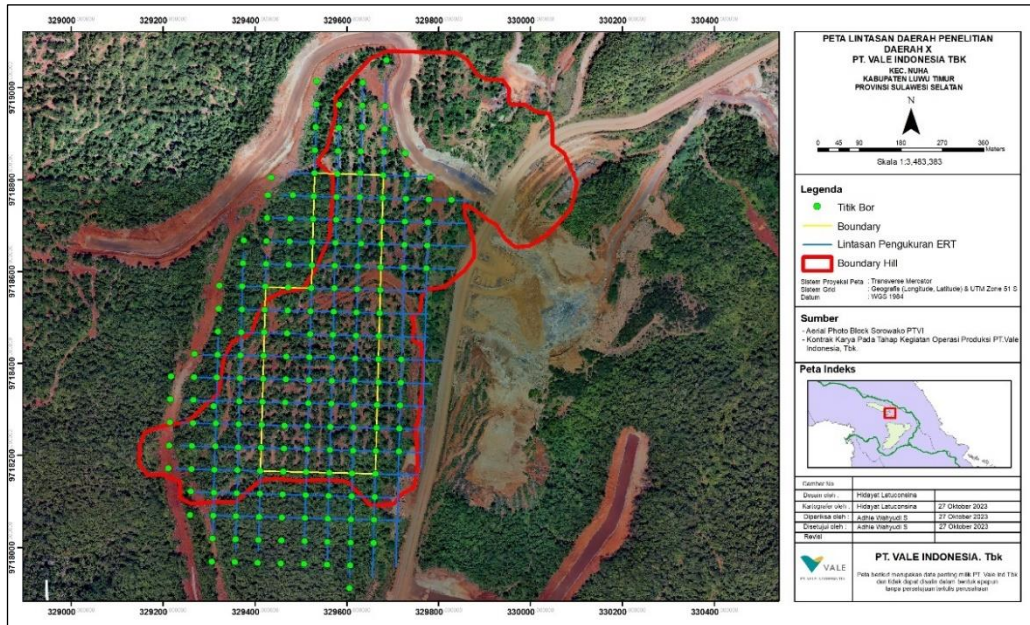
$$y(x) = \sum_{i=1}^N w_i \phi(\|x - c_i\|) \quad (50)$$

Dengan $y(x)$ adalah nilai yang diestimasi di lokasi x , N adalah jumlah titik data yang diketahui, w_i merupakan bobot untuk setiap titik data, c_i adalah posisi titik pusat, dan $\phi(\|x - c_i\|)$ merupakan fungsi basis radial yang mengukur jarak radial antara x dan c_i .

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak pada daerah “AZ” yang merupakan wilayah kuasa pertambangan PT. Vale Indonesia area blok timur (*east block*), Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan.



Gambar 14. Peta Lintasan ERT

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Adapun alat-alat yang digunakan pada saat pengolahan data adalah :

1. *Software Res2DInv* 4.8.10
2. *Software Datamine Studio RM*
3. *Software Leapfrog Geo* 5.1
4. *Software Microsoft Excel*

2.2.2 Bahan

a. Bahan Pengolahan Data

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder yang terdiri dari :

1. Data ERT

Data hasil pengukuran ERT Konfigurasi *Gradient* yang digunakan sebanyak 25 lintasan, terdiri dari 9 lintasan arah utara-selatan dan 16 lintasan arah timur-barat. Panjang lintasan terdiri dari 315 m, 441 m, 553 m, 665 m, 1001 m, dan 1113 m. Adapun data yang diolah terdiri dari nilai resistivitas dan topografi setiap lintasan.

2. Data *Drillhole*

Data *drillhole* meliputi data *Assay* dan data *Collar* dengan *hole* yang mengenai 25 lintasan ERT sebanyak 142 *Hole*.

2.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini meliputi beberapa tahapan yaitu :

2.3.1 Tahap Kajian Pustaka

Tahapan kajian pustaka merupakan langkah awal yang dilakukan, dengan mengumpulkan beberapa literatur yang berkaitan dengan geologi regional daerah penelitian, pembentukan nikel laterit, karakteristik nikel dari lokasi penelitian, kaitan nilai resistivitas dengan kondisi geologi lokasi penelitian, dan informasi lainnya yang akan memudahkan dalam proses interpretasi batas profil nikel laterit nantinya.

2.3.2 Tahap Pengolahan Data

Pada tahap pengolahan data, langkah awal yang perlu dilakukan adalah proses inversi, karena nilai yang diperoleh dari pengukuran ERT merupakan nilai resistivitas semu, sehingga untuk mendapatkan nilai resistivitas yang sebenarnya pada setiap lintasan ERT perlu dilakukan proses inversi menggunakan *software Res2DInv*. Namun terlebih dahulu dilakukan pengaturan format data dalam bentuk *.dat* yang terdiri dari data pengukuran, topografi dan global koordinat sesuai dengan format yang bisa dibaca oleh *Res2DInv*. Pada *software Res2DInv*, perlu untuk mengatur beberapa parameter inversi yang sesuai dengan data yang dimiliki, dalam hal ini parameter yang akan digunakan ditentukan oleh perusahaan. Setelah memasukkan parameter inversi, maka dilakukan proses inversi untuk mendapatkan penampang inversi. Langkah selanjutnya adalah melakukan *quality control* data dengan melihat *RMS Error* data. Data yang memiliki nilai *error* cukup tinggi (> 100%) dianalisis apakah termasuk data anomali atau data yang *error*, apabila terdapat data yang dianggap *error* maka perlu untuk melakukan penghapusan data. Namun perlu diperhatikan agar penghapusan data tidak menghilangkan informasi penting bawah permukaan, hal tersebut dapat dilakukan dengan melakukan validasi atau pengecekan terhadap data yang dianggap anomali dengan melihat populasi data disekitarnya. Setelah data dianggap bagus maka dilakukan inversi kembali untuk mendapatkan model

penampang 2D pada semua lintasan. Selanjutnya melakukan *export* data X,Y,Z dan nilai resistivitas yang nantinya digunakan pada *Software Datamine* untuk melakukan interpretasi batas lapisan nikel laterit.

2.3.3 Interpretasi Data

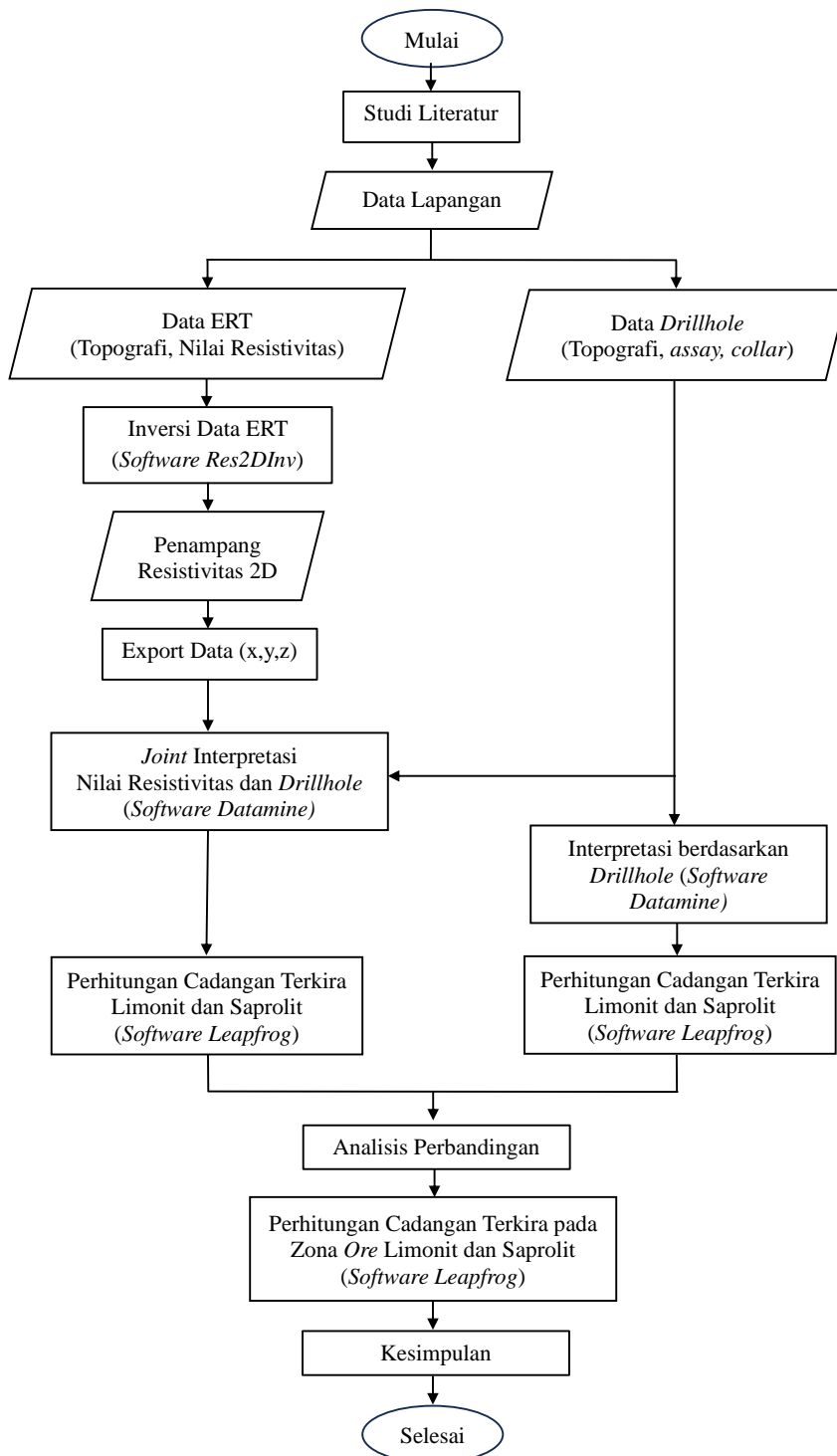
Interpretasi dilakukan dengan menentukan dan menarik batas tiap lapisan yaitu batas bawah lapisan limonit (*limonite bottom*) dan batas bawah lapisan saprolit (*saprolite bottom*) pada profil nikel laterit menggunakan *Software Datamine*. Adapun proses interpretasi batas lapisan nikel laterit yang dilakukan terdiri dari dua, yaitu penarikan batas *limonite bottom* dan *saprolite bottom* dengan menarik garis lurus sesuai dengan informasi litologi yang didapatkan dari data *drillhole* pada lokasi penelitian dengan jarak antar *drillhole* yaitu 50 meter. Interpretasi yang kedua yaitu penarikan batas *limonite bottom* dan *saprolite bottom* berdasarkan pola kontur dari nilai resistivitas setiap penampang yang dikorelasikan dengan data *drillhole*. Sebelum melakukan interpretasi, penting untuk mengetahui kondisi geologi daerah penelitian seperti tingkat serpentinisasi, keberadaan struktur, jenis batuan dasar, tingkat porositas dan permeabilitas suatu batuan dan informasi penting lainnya. Informasi tersebut sangat memudahkan dalam melakukan penarikan batas berdasarkan nilai resistivitas. Hasil interpretasi *limonite bottom* (limbot) dan *saprolite bottom* (sapbot) untuk semua lintasan pada masing masing parameter interpretasi kemudian digabungkan (*combine*) untuk digunakan dalam proses pembuatan *wireframe* dan perhitungan cadangan terkira.

2.3.4 Perhitungan Cadangan Terkira

Pada penelitian ini, perhitungan cadangan terkira limonit dan saprolit dilakukan berdasarkan hasil dari kedua interpretasi, yaitu interpretasi berdasarkan *drillhole to drillhole* dan interpretasi berdasarkan nilai resistivitas yang dikorelasikan dengan *drillhole*. Sebelum menghitung cadangan, langkah pertama yang harus dilakukan adalah membuat *boundary* atau batasan area yang akan dihitung cadangannya pada *Software Datamine*. Adapun *boundary* yang dibuat harus memuat area yang dianggap dapat mewakili area yang tumpang tindih antara lintasan ERT dan *drillhole*. Setelah membuat *boundary*, maka pengolahan data untuk perhitungan cadangan akan dilanjutkan menggunakan *Software Leapfrog*. Pada *Software Leapfrog*, dilakukan pembuatan batas *wireframe* lapisan limonit dan saprolit berdasarkan batas yang telah dibuat sebelumnya dari hasil interpretasi. Setelah itu, dilakukan perhitungan cadangan terkira lapisan limonit dan saprolit untuk masing-masing parameter interpretasi yang telah dibuat. Dari hasil perhitungan tersebut kemudian akan dilihat perbandingan cadangan yang dihasilkan antara interpretasi berdasarkan *drillhole* dan interpretasi berdasarkan nilai resistivitas yang dikorelasikan terhadap *drillhole*. Setelah itu, dilakukan analisis perbandingan terhadap model yang dihasilkan dan ketidaksesuaian domain antar lapisan yang dihasilkan dari kedua interpretasi tersebut. Adapun ketidaksesuaian domain yang dihasilkan dituangkan dalam bentuk tabel *cross* korelasi. Tabel *Cross* Korelasi dibuat berdasarkan jumlah cadangan yang didapatkan dari hasil pembuatan *geological model* untuk *drillhole* dan korelasi *drillhole* dengan ERT dari *Software Leapfrog* menggunakan

fitur pivot pada *Software Microsoft Excel*. Pembuatan tabel *cross* korelasi ini bertujuan untuk melihat hubungan antar domain yang dihasilkan dari dua parameter interpretasi yang berbeda. Setelah itu, dilakukan pula perhitungan cadangan limonit dan saprolit pada zona *ore* dengan parameter *Ni grade* 1.0 untuk limonit dan 1.5 untuk saprolit. Perhitungan cadangan pada zona *ore* ini menggunakan hasil interpretasi berdasarkan nilai resistivitas yang dikorelasikan dengan *drillhole*, hal ini didasarkan karena penelitian ini juga akan melihat distribusi nilai resistivitas pada zona *ore* dan zona *waste* kemudian menganalisis perbedaannya. Adapun distribusi nilai resistivitas pada zona *ore* disajikan dalam bentuk *boxplot*.

2.4 Bagan Alir Penelitian



Gambar 15. Bagan Alir Penelitian