

Skripsi Geofisika

**PENENTUAN PROFIL NIKEL LATERIT MENGGUNAKAN METODE
ERT (*ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY*) DALAM
OPTIMALISASI PENGEBORAN DAN PERHITUNGAN
VOLUME NIKEL LATERIT**



Oleh:

HASNAWIAH

H061 20 1017

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



HALAMAN JUDUL

**PENENTUAN PROFIL NIKEL LATERIT MENGGUNAKAN METODE
ERT (*ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY*) DALAM
OPTIMALISASI PENGEBORAN DAN PERHITUNGAN
VOLUME NIKEL LATERIT**

*Diajukan untuk Melengkapi Tugas dan Memenuhi Salah Satu Syarat untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Sains*

Pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH:

HASNAWIAH

H061 20 1017

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



LEMBAR PENGESAHAN

Disusun dan Diajukan Oleh:


HASNAWIAH
H061 20 1017

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana pada Departemen Geofisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin

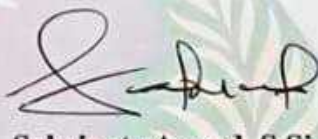
Pada tanggal 29 Februari 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama


Syamsuddin, S.Si., MT
NIP. 197401152002121001

Pembimbing Pertama


Sabrianto Aswad, S.Si., MT
NIP. 197202271998012002

Ketua Departemen Geofisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin


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



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hasnawiah
NIM : H061 20 1017
Departemen : Geofisika
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**“PENENTUAN PROFIL NIKEL LATERIT MENGGUNAKAN METODE
ERT (*ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY*) DALAM
OPTIMALISASI PENGEBORAN DAN PERHITUNGAN VOLUME NIKEL
LATERIT”**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain. Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 29 Februari 2024

Penulis,



HASNAWIAH

(H061 20 1017)



ABSTRAK

Eksplorasi nikel laterit di PT. Vale Indonesia menggunakan metode pengeboran dan metode ERT (*Electrical Resistivity Tomography*). Akuisisi data ERT dilakukan setelah pengeboran, sehingga pengeboran dilakukan tanpa adanya gambaran awal bawah permukaan yang akan dibor. Hal ini dapat menyebabkan permasalahan *over drill* dan *under drill* pada saat pengeboran. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis peranan ERT dalam menentukan kedalaman pengeboran agar pengeboran dilakukan dengan optimal. Data yang digunakan sebanyak 12 lintasan ERT dan 29 data bor. Data resistivitas semu diinversi untuk merekonstruksi bawah permukaan dengan menggunakan metode inversi $L_2 - norm$, dengan perhitungan *finite element* untuk pemodelan kedepan dan memasukkan topografi ke dalam pemrosesan data. Hasil inversi berupa penampang resistivitas 2D yang kemudian diinterpretasi untuk menentukan batas profil nikel laterit. Zona limonit memiliki nilai resistivitas 250 Ω m-750 Ω m, zona saprolit dengan nilai resistivitas 30 Ω m-270 Ω m, dan zona *bedrock* memiliki nilai resistivitas 150 Ω m-800 Ω m. Dari hasil interpretasi ditentukan rekomendasi kedalaman pengeboran dan dibandingkan dengan kedalaman bor aktual. Dari 29 data bor sebanyak 24 yang *over drill* dan 3 yang *under drill*. Biaya pengeboran yang bisa dikurangi dengan adanya data ERT sebagai gambaran awal dalam pengeboran sebanyak 3.380 USD untuk 29 titik bor. Setelah dilakukan interpretasi, dilakukan perhitungan volume dan diperoleh volume limonit dan saprolit berdasarkan interpretasi ERT lebih besar dibandingkan dari interpretasi data bor.

Kata Kunci: Profil Nikel Laterit, ERT, Data Bor, Optimalisasi, Volume



ABSTRACT

Nickel laterite exploration at PT Vale Indonesia uses drilling and ERT (Electrical Resistivity Tomography) methods. ERT data acquisition is done after drilling, so drilling is done without an initial picture of the subsurface to be drilled. This can cause over drill and under drill problems during drilling. This study was conducted to analyze the role of ERT in determining drilling depth so that drilling is carried out optimally. The data used were 12 ERT passes and 29 drill data. The apparent resistivity data were inverted to reconstruct the subsurface using the $L_2 - norm$ inversion method, with finite element calculations for forward modeling and incorporating topography into data processing. The inversion results in a 2D resistivity cross-section which was then interpreted to determine the limits of the nickel laterite profile. The limonite zone has a resistivity value of 250 Ωm -750 Ωm , the saprolite zone has a resistivity value of 30 Ωm -270 Ωm , and the bedrock zone has a resistivity value of 150 Ωm -800 Ωm . From the interpretation results, the recommended drilling depth is determined and compared with the actual drill depth. Of the 29 drill data, 24 were over drilled and 3 were under drilled. The cost of drilling that can be reduced by having ERT data as an initial description in drilling is 3,380 USD for 29 drill points. After interpretation, volume calculations were carried out and it was found that the volume of limonite and saprolite based on ERT interpretation was greater than that of drill data interpretation.

Keywords: Nickel Laterite Profile, ERT, Drill Data, Optimization, Volume



KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokatuh

Segala puji bagi Allah Subhana Wa Ta'ala, tiada kata yang terucap selain kata Syukur kepada-Nya atas segala limpahan Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis senantiasa berada pada garis kesabaran, kekuatan, dan selalu dalam naungan kikhlasan dalam menyelesaikan skripsi ini. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan kepada baginda **Rasulullah Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wasallam** beserta keluarga, para sahabat, dan para pengikutnya yang tetap istiqomah menjalankan sunnahnya. Tidak ada daya dan Upaya keculi atas pertolongan Allah yang Maha Agung sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul "**Penentuan Profil Nikel Laterit Menggunakan Metode Ert (*Electrical Resistivity Tomography*) Dalam Optimalisasi Pengeboran Dan Perhitungan Volume Nikel Laterit**" sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pngetahuan Alam Universitas Hasanuddin, serta sebagai cerminan sejauh mana penulis dapat mengaplikasikan ilmu yang didapat dibangku kuliah.

Seuntai kata sebagai bentuk terima kasih atas segala bantuan dari berbagai pihak



an ungkapan terindah yang penulis sampaikan. Dengan segala kerendahan
an terima kasih tidak terhingga penulis sampaikan kepada keluarga besar
kedua orang tua penulis sebagai motivasi terbesar penulis yaitu Bapak

Nahar dan Ibu **Dalle**, untuk saudari **Darna**, dan **Nurmia** atas motivasi dan arahnya. Serta seluruh keluarga besar yang telah memberikan cinta kasih, doa dan pengorbanan bagi penulis, semoga Allah menganugrahi dengan balasan yang terindah. Penulis juga ingin mengucapkan penghormatan dan terima kasih yang tulus serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku Ketua Departemen Geofisika FMIPA Unhas, seluruh staf dan dosen pengajar serta pegawai Departemen Geofisika FMIPA Unhas yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama penulis menjalani studi hingga menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak **Dr. Muhammad Hamzah Syahrudin, S.Si., MT** selaku Penasehat Akademik yang telah banyak memberikan nasehat serta ilmunya selama menempuh studi.
3. Bapak **Syamsuddin, S.Si., MT** dan Bapak **Sabrianto Aswad, S.Si., M.T** selaku pembimbing yang telah meluangkan waktunya dan selalu memberikan ilmu, bimbingan, nasihat, motivasi, dan solusi, serta dorongan kepada penulis dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini.
4. Bapak **Drs. Erfan, M.Si** dan Bapak **Dr. Muhammad Hamzah Syahrudin, S.Si., MT** selaku tim penguji yang telah memberikan ilmu, kritik, dan masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini.
5. Bapak **Muh. Fawzy Ismullah M., S.Si., MT** selaku bapak dosen yang banyak memberikan masukan dan arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan



penyusunan skripsi ini.

6. Om **Adhie Wahyudi**, Om **Deni Hernandi**, Om **Moh. Erwin Syam Noor**, Kak **Asnur Azis**, Kak **Hidayat Latuconsina**, Kak **Muammar Hakim**, Kak **Iswar Edis Pratama**, dan Kak **Akram Ramadhan** selaku pembimbing yang telah banyak membantu dan meluangkan waktu untuk membimbing, mengajarkan banyak hal, memberikan pengalaman dan memotivasi dalam penyusunan Tugas Akhir di PT. Vale Indonesia Tbk.
7. Pak **Zeth**, Pak **Wanni**, Om **Sule**, Om **Jumbo**, Pak **Fisko**, Kak **Nazar**, Kak **Ippang**, Kak **Agus**, Kak **Indrawahyu**, Kak **Cross**, Kak **Ricky**, Kak **Jenada**, Kak **Melati**, dan **Crew ERT** terima kasih atas bantuan, cerita, saran dan ilmunya selama Tugas Akhir di PT. Vale Indonesia Tbk.
8. Om **Ari**, Tante **Risna** dan keluarga yang telah memberikan bantuan dan memberikan tempat tinggal yang nyaman selama melaksanakan Tugas Akhir di Sorowako.
9. Terima kasih pada Kanda Senior **HMGF 2018** dan **HMGF 2019**, Yang selalu membagi ilmu dan memberikan arahan.
10. Teman-Teman **Geofisika 2020 Arpah, Milka, Guntur, Tiwi, Mela, Defina, Wulan, Alghi, Resty, Selfi, Umi, Ila, Gery, Hamman, Aza, Imran, Iis, Emi, Izzah, Tazkia, Akbar, Astri, Asmawan, Aurel, Sandra, Regita, Indah, Fira, Merlia, Wikal, Nikom, Ika, Faiz, Alif, Asi, Echa, Angel, Ima, Lola, Gloria, Jane, Rezky, Qalby, Mifta, Icha, Cholis, Magfirah, Ansyah, Yudi, Ical, Awi, Yonas, Agung, Rianul, Saiful dan Ihsan**. Terima kasih banyak atas bantuan dukungan selama perkuliahan virtual hingga pengerjaan Tugas Akhir.



11. Saudara seperjuangan yaitu **Nisa, Aini, Ema, Dirham dan Dayat**. Terima kasih sudah menjadi teman membureng kerja tugas dan selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Teman-teman seperjuangan **KP dan TA di PT Vale, Kak Asyifa, Kak ismi, Nikom, Qalby dan Aza** yang sama-sama belajar dan berjuang mengerjakan tugas akhir saat di PT Vale hingga di kampus.
13. Teman-teman **KKN Tematik Unhas Gelombang 109 Posko Baloli** yang memberikan banyak pengalaman hidup selama di lokasi KKN.
14. Teman-teman seperjuangan dari SMA, **Utti, Wildha, Lisa, Syariel, Andi Utti, dan Andis** yang selalu mendukung dan menyemangati penulis.
15. Terakhir kepada diri penulis sendiri **Hasnawiah**, terima kasih sudah berjuang sejauh ini. Tidak mudah untuk sampai di titik ini, bayak hal yang harus dikorbankan, terima kasih karena tidak menyerah meskipun banyak mengeluhnya. Akan ada banyak hal yang lebih menantang kedepannya, tetap semangat dan hadapi dengan penuh percaya diri. Mari menjadi rumah terbaik untuk diri sendiri.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kata sempurna, sehingga dengan segala kerendahan hati penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat, membangun untuk memperbaiki kekurangan yang ada. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca maupun penulis.

Makassar, 29 Februari 2024

Hasnawiah



DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Ruang Lingkup	3
I.3 Rumusan Masalah	3
I.4 Tujuan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Geologi Regional	4
II.2 Endapan Nikel Laterit	6
II.2.1 Batuan Ultramafik	7
II.2.2 Proses Pembentukan Endapan Nikel Laterit	9
II.2.3 Faktor Pembentukan Endapan Nikel Laterit	10
II.2.4 Profile Nikel Laterit	12
II.2.5 Tipe Nikel Laterit Sorowako	13
II.3 Sifat Kelistrikan Batuan	14
II.4 Metode Geolistrik Resistivitas	16
II.4.1 Prinsip Dasar Metode Resistivitas	17
Potensial Pada Medium Homogen Isotropik	19
Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Dalam Bumi	20
Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Permukaan Bumi	22



II.4.5 Potensial Listrik Akibat Arus Ganda di Permukaan Bumi.....	23
II.4.6 Konsep Resistivitas Semu	24
II.5 Electrical Resistivity Tomography (ERT).....	25
II.6 Konfigurasi Gradien	26
II.7 Metode Roll-Along	28
II.8 Pemodelan Inversi Data	29
II.8.1 Pemodelan Inversi (<i>Inverse Modelling</i>)	29
II.8.2 Pemodelan ke Depan (<i>Forward Modelling</i>)	32
II.9 Metode Perhitungan Volume	35
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	37
III.1 Lokasi Penelitian	37
III.2 Alat dan Bahan	37
III.2.1 Alat	37
III.2.2 Bahan	38
III.3 Prosedur Penelitian	38
III.3.1 Tahapan Kajian Pustaka	38
III.3.2 Tahapan Pengumpulan Data	39
III.3.3 Tahapan Pengolahan Data	39
III.3.4 Interpretasi Data	40
III.3.5 Perhitungan Volume	40
III.4 Bagan Alir Penelitian	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
IV. 1 Hasil.....	42
IV. 1.1 Data Penelitian.....	42
IV. 1.2 Hasil Inversi	43
IV. 2 Interpretasi Profil Nikel Laterit Berdasarkan Nilai Resistivitas.....	44
IV. 3 Analisis Nilai Resistivitas Profil Nikel Laterit	58
IV. 4 Penentuan Kedalaman Profile Nikel Laterit	61
Penentuan <i>Over Drill</i>	63
Penentuan <i>Under Drill</i>	65
Perbandingan Interpretasi ERT dan Interpretasi Data Bor.....	66



IV.4.4 Perbandingan Biaya Pengeboran.....	70
IV. 5 Perhitungan Volume.....	73
BAB V PENUTUP	78
V. 1 Kesimpulan.....	78
V. 2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA.....	80
LAMPIRAN.....	83



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Geologi Regional Pulau Sulawesi.....	5
Gambar 2.2 Geologi daerah Sorowako.....	6
Gambar 2.3 Klasifikasi batuan ultramafik.....	7
Gambar 2.4 Profil nikel laterit.....	13
Gambar 2.5 Sumber arus di dalam bumi	22
Gambar 2.6 Sumber arus di permukaan bumi	22
Gambar 2.7 Dua elektroda arus dan potensial di permukaan	23
Gambar 2.8 Konsep dasar resistivitas semu.....	25
Gambar 2.9 Sketsa dari konfigurasi gradient.	27
Gambar 2.10 Gambaran perhitungan titik plot pseudosection untuk konfigurasi gradient	28
Gambar 2.11 Metode Roll-Along	28
Gambar 2. 12 Desain mesh FE menggunakan empat node	32
Gambar 2. 13 Ilustrasi Wireframe	35
Gambar 3. 1 Peta Lintasan ERT	37
Gambar 3. 2 Bagan Alir Penelitian.....	41
Gambar 4. 1 Data Penelitian.....	42
Gambar 4. 2 Hasil Inversi Lintasan E02.....	43
Gambar 4. 3 Hasil Inversi Lintasan N01	44
Gambar 4.4 Batas profil nikel laterit lintasan E02	46
Gambar 4.5 Batas profil nikel laterit lintasan E03	47
Gambar 4.6 Batas profil nikel laterit lintasan E04	48
Gambar 4.7 Batas profil nikel laterit lintasan E05	49
Gambar 4.8 Batas profil nikel laterit lintasan E06	50
Gambar 4.9 Batas profil nikel laterit lintasan E07	51
Gambar 4.10 Batas profil nikel laterit lintasan N01	52
Gambar 4.11 Batas profil nikel laterit lintasan N02	53
4.12 Batas profil nikel laterit lintasan N03	54
4.13 Batas profil nikel laterit lintasan N04.....	55
4.14 Batas profil nikel laterit lintasan N05	56



Gambar 4.15	Batas profil nikel laterit lintasan N06	57
Gambar 4.16	Histogram nilai resistivitas zona limonit	58
Gambar 4.17	kandungan silika di zona limonit	59
Gambar 4.18	Histogram nilai resistivitas zona saprolit	59
Gambar 4.19	kandungan silika di zona saprolit	60
Gambar 4.20	Histogram nilai resistivitas zona bedrock	60
Gambar 4.21	struktur di zona bedrock	61
Gambar 4. 22	Overlay lintasan N01 dan Data Bor aktual	61
Gambar 4. 23	Overlay lintasan N01 dan Data Bor bayangan	62
Gambar 4.24	Overlay lintasan E04 dan data bor	63
Gambar 4.25	Titik Bor C151660Z	63
Gambar 4.26	Titik Bor C151458Z	64
Gambar 4.27	Overlay lintasan E03 dan data bor	65
Gambar 4.28	Titik Bor C151548Z	66
Gambar 4.29	Cross section semua lintasan	74
Gambar 4.30	Area perhitungan volume	74
Gambar 4.31	Wireframe interpretasi ERT	75
Gambar 4.32	Wireframe interpretasi data bor	75
Gambar 4.33	Hasil Cut and Fill interpretasi ERT	76
Gambar 4.34	Hasil Cut and Fill Interpretasi Data Bor	77



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Resistivitas Batuan dan Mineral	15
Tabel 4.1 Perbandingan kedalaman limonit bottom berdasarkan interpretasi ERT dan interpretasi data bor	67
Tabel 4.2 Perbandingan kedalaman saprolit bottom berdasarkan interpretasi ERT dan interpretasi data bor.....	68
Tabel 4.3 Perbandingan kedalaman End of Hole (EOH) berdasarkan interpretasi ERT dan interpretasi data bor	69
Tabel 4.4 Panjang lintasan ERT.....	70
Tabel 4.5 Kedalaman pengeboran aktual.....	71
Tabel 4.6 Kedalaman pengeboran berdasarkan data ERT	72



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Penjabaran Persamaan	84
Lampiran 2. Data Bor	96
Lampiran 3. Hasil Inversi Data ERT	103
Lampiran 4. Overlay Interpretasi ERT dan Data Bor.....	107
Lampiran 5. Dokumentasi Kegiatan.....	111



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil nikel terbesar di dunia. Berdasarkan data dari *United States Geological Survey* (USGS), total produksi nikel Indonesia pada tahun 2022 mencapai 1,6 juta metrik ton atau menyumbang 48,48% dari total produksi nikel global pada tahun 2022 (USGS, 2022).

Salah satu perusahaan yang bergerak dalam bidang penambangan nikel adalah PT. Vale Indonesia dengan wilayah konsesi 118.017 hektar, yang meliputi Sulawesi Selatan sebanyak 70.566 hektar, Sulawesi Tengah sebanyak 22.699 hektar dan Sulawesi Tenggara sebanyak 24.752 hektar (Siregar, 2014).

Eksplorasi nikel laterit di PT Vale Indonesia menggunakan 2 metode yaitu metode pengeboran dan metode ERT (*Electrical Resistivity Tomography*). Metode pengeboran menentukan batas profil nikel laterit berdasarkan karakteristik batuan dan kandungan mineral sampel yang diambil secara langsung. Sedangkan metode ERT menentukan profil nikel laterit berdasarkan distribusi nilai resistivitas yang diukur di permukaan.

Data ERT digunakan untuk mengikat data bor dalam menentukan batas profil nikel laterit. Data bor memiliki jarak yang cukup jauh yakni 25 meter dan 50 meter, sedangkan karakteristik dari laterit sendiri sangat mudah berubah-ubah untuk jarak

at, sehingga diperlukan data ERT untuk menentukan batas profil nikel antara titik bor tersebut. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Hernandi



dkk., (2017) yang mengikat data bor menggunakan data ERT, dengan hasil bahwa data ERT dianggap mencerminkan citra bawah permukaan yang lebih realistis untuk membedakan zona profil pelapukan nikel laterit dan memberikan dampak pada geometri yang berhubungan dengan ketebalan dan volume zona bijih.

Akuisisi data bor dilakukan tanpa adanya gambaran atau informasi awal kondisi bawah permukaan yang akan dibor, sehingga dapat menimbulkan permasalahan seperti *over drill* dan *under drill*. *Over drill* terjadi ketika zona *bedrock* tetap di bor sedalam 5 meter untuk memastikan keberadaan *bedrock* sesuai dengan SOP yang ada. Sedangkan *under drill* terjadi ketika pengeboran dihentikan saat mengenai *boulder* di zona saprolit, karena menganggap sudah mencapai *bedrock*. *Over drill* menyebabkan kelebihan biaya pengeboran, sedangkan *under drill* menyebabkan kekurangan data.

Permasalahan ini dapat diantisipasi, salah satunya dengan menggunakan data ERT sebagai *guidance* dalam melakukan pengeboran. Penampang ERT dapat memberikan gambaran seberapa dalam pengeboran bisa dilakukan berdasarkan keberadaan zona *bedrock*. Namun dalam praktiknya saat ini di PT. Vale, akuisisi data ERT dilakukan setelah pengeboran, sehingga data ERT tidak bisa dimanfaatkan secara optimal sebagai *guidance* dalam pengeboran.

Berdasarkan permasalahan diatas, penelitian ini hadir dengan judul “Penentuan Profil Nikel Laterit Menggunakan Metode ERT dalam Optimalisasi Pengeboran tungan Volume Nikel Laterit”.



I.2 Ruang Lingkup

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa data geolistrik resistivitas dua dimensi (2D) konfigurasi gradien dan data bor untuk menentukan profil nikel laterit. Pengolahan data geolistrik resistivitas dilakukan menggunakan *software Res2DInv*, sedangkan interpretasi profil nikel laterit dan perhitungan volume menggunakan *software Datamine Studio RM*.

I.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana profil nikel laterit berdasarkan berdasarkan nilai resistivitas?
2. Bagaimana peranan ERT (*Electrical Resistivity Tomografi*) dalam optimalisasi pengeboran?
3. Bagaimana volume profil nikel laterit berdasarkan interpretasi data ERT dan interpretasi data bor?

I.4 Tujuan

Adapun tujuan pada penelitian ini yaitu:

1. Menentukan profil nikel laterit berdasarkan berdasarkan nilai resistivitas.
2. Menganalisis peranan ERT (*Electrical Resistivity Tomografi*) dalam optimalisasi pengeboran.
3. Menghitung volume profil nikel laterit berdasarkan interpretasi data ERT dan interpretasi data bor.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Geologi Regional

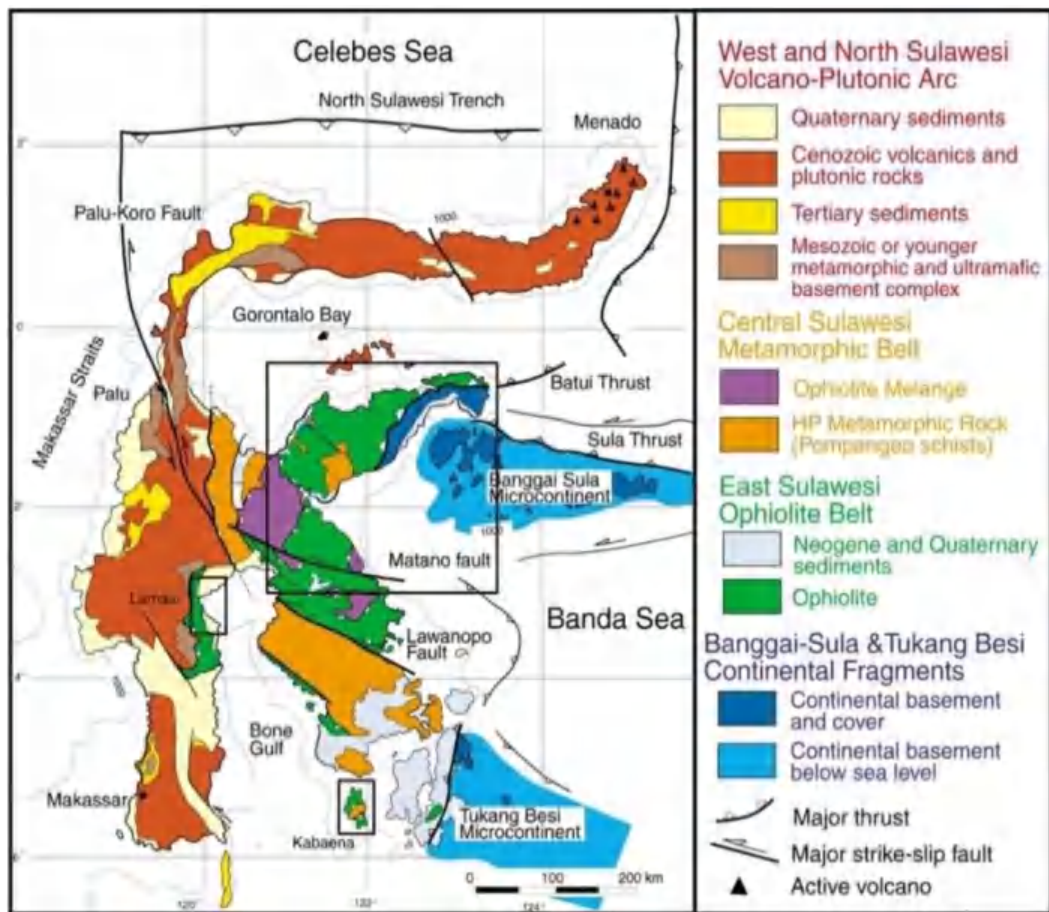
Geologi Pulau Sulawesi dan sekitarnya termasuk kompleks karena adanya proses divergensi oleh tiga lempeng, yaitu Lempeng Australia yang bergerak ke utara, Lempeng Pasifik yang bergerak ke barat, dan Lempeng Eurasia yang bergerak ke selatan-tenggara (Whitten dkk., 1987).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sukamto (1975), Pulau Sulawesi dan sekitarnya terdiri dari 3 Mandala Geologi seperti yang terlihat pada gambar 2.1:

- 1) Mandala Geologi Sulawesi Barat, yang dicirikan oleh adanya jalur gunung api paleogen, intrusi neogen dan sedimen mesozoikum.
- 2) Mandala Geologi Sulawesi Timur, yang dicirikan oleh batuan ofiolit yang berupa batuan ultramafik peridotit, harzburgite, dunit, piroksenit dan serpentine yang diperkirakan berumur kapur.
- 3) Mandala Geologi Banggai Sula, yang dicirikan oleh batuan dasar berupa batuan metamorf permo-karbon, batuan plutonik yang bersifat granitis berumur trias dan batuan sedimen mesozoikum.

Mandala Geologi Banggai Sula merupakan mikro kontinen berupa pecahan dari lempeng New Guinea yang bergerak ke arah Barat sepanjang Sesar Sorong (Simanjuntak dkk., 1991). Adapun Mandala Sulawesi bagian Timur dan Barat bertemu di bagian tengah Sulawesi, namun terpisah di Teluk Bone pada sisi selatan dan di Tomini di bagian utara (Hamilton, 1979).





Gambar 2.1 Peta Geologi Regional Pulau Sulawesi (Sukamto,1975)

Wilayah Sorowako dan sekitarnya termasuk ke dalam Mandala Indonesia bagian Timur yang dicirikan oleh batuan ofiolit dan malihan yang di beberapa tempat tertindih oleh sedimen mesozoikum.

Penelitian yang dilakukan oleh Golightly pada tahun 1979 membagi geologi daerah Sorowako menjadi tiga bagian, yaitu:

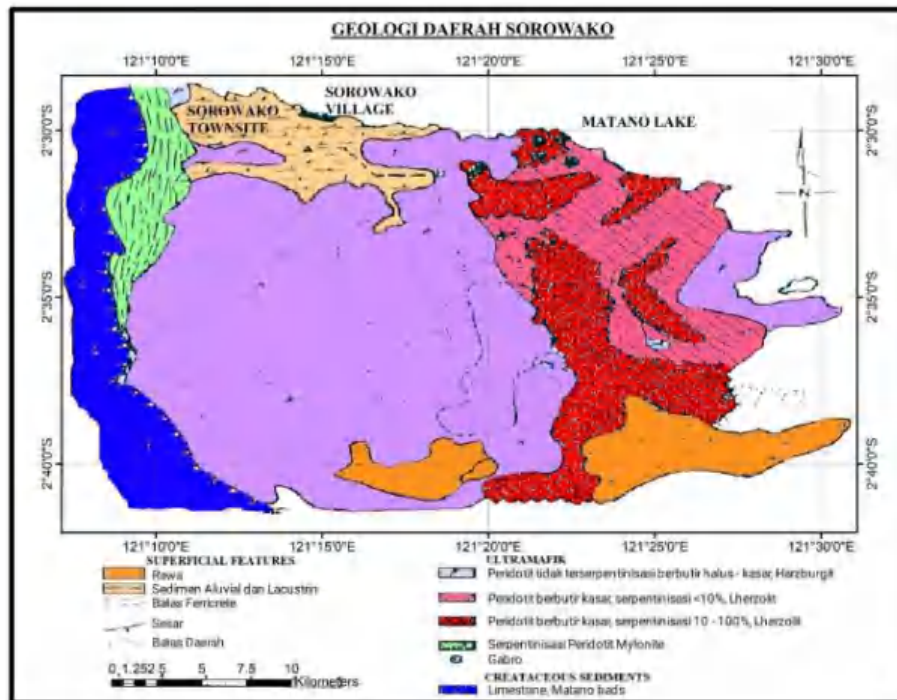
- 1) Satuan batuan sedimen yang berumur kapur, terdiri dari batu gamping laut dalam dan rijang. Terdapat dibagian barat Sorowako dan dibatasi oleh sesar naik dengan kemiringan ke arah barat.



batuan batuan ultrabasa yang berumur awal Tersier, umumnya terdiri dari nis peridotit, sebagian mengalami serpentinisasi dengan derajat yang

bervariasi dan umumnya terdapat di bagian timur. Pada satuan ini juga terdapat intrusi-intrusi pegmatite yang bersifat gambroik di bagian utara.

- 3) Endapan alluvial dan sedimen danau (*lacustrine*) yang berumur Kuartar, umumnya terdapat di bagian utara dekat desa Sorowako.



Gambar 2.2 Geologi daerah Sorowako (Golightly, 1979)

II.2 Endapan Nikel Laterit

Nikel laterit merupakan salah satu mineral logam hasil dari proses pelapukan kimia batuan ultramafik yang mengakibatkan pengkayaan unsur Ni, Fe, Mn, dan Co secara residual dan sekunder (Burger, 1996). Nikel laterit dicirikan oleh adanya logam oksida yang berwarna coklat kemerahan mengandung Ni dan Fe (Lintjewas dkk., 2019).



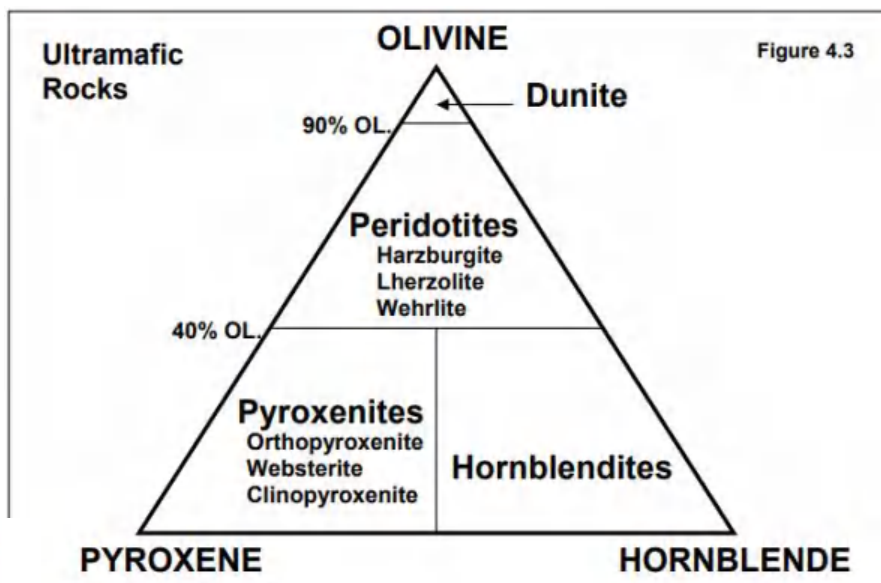
terite" bisa diartikan sebagai endapan yang kaya akan iron-oxide, miskin ka dan secara intensif ditemukan pada endapan lapukan di iklim tropis.

Batuan induk dari endapan nikel laterit adalah batuan ultrabasa dengan kandungan mineral ferromagnesian (olivine, piroksin, dan amphibole) dalam jumlah besar yang berasosiasi dengan struktur geologi yang terbentuk pada masa Precambrian hingga Tersier (Ahmad, 2009).

II.2.1 Batuan Ultramafik

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

Batuan ultramafik merupakan salah satu jenis batuan yang terdapat dalam kompleks ofiolit. Ofiolit adalah suatu rangkaian batuan yang terdiri dari batuan basalt, gabbro, peridotit, dan serpentin yang terbentuk di dasar laut dan kemudian terangkat ke permukaan bumi (Setyanta & Setiadi, 2006).



Gambar 2.3 Klasifikasi batuan ultramafik (Ahmad, 2009)



Berdasarkan kandungan mineralnya, batuan ultramafik terbagi menjadi 5 macam, yaitu Dunit, Piroksenit, Hornblendit, Peridotit dan Serpentinit.

1) Dunit

Dunit merupakan batuan ultramafik monomineralik yang seluruhnya terdiri dari mineral olivine. Kandungan olivine dunit lebih dari 90%, dengan mineral penyerta seperti kromit, magnetit, ilmenit dan spinel.

2) Piroksenit

Piroksenit merupakan batuan ultramafik monomineralik yang seluruhnya terdiri dari mineral piroksen. Piroksenit diklasifikasikan menjadi orthopyroxenit dan clinopyroxenit.

3) Hornblendit

Hornblendit merupakan batuan ultramafik monomineralik yang seluruhnya terdiri dari mineral hornblende.

4) Peridotit

Peridotit merupakan batuan ultramafik yang mengandung sebagian besar olivine tapi juga mineral mafik lainnya dalam jumlah yang signifikan. Mineral penyerta meliputi magnetit, kromit, ilmenit, dan spinel. Batuan peridotit diklasifikasikan menjadi Harzburgit (olivine + orthopyroxen), Wehrlit (olivine + clinopyroxen) dan Lherzolit (olivine + orthopyroxen + clinopyroxen).

5) Serpentinit

Serpentinit merupakan batuan monomineralik yang seluruhnya terdiri dari mineral serpentin. Batuan dapat dibentuk oleh serpentinisasi dunit, pyroxenit, hornblendit atau peridotit.



II.2.2 Proses Pembentukan Endapan Nikel Laterit

Proses pembentukan nikel laterit diawali dari proses pelapukan batuan ultramafik, dalam hal ini adalah batuan dunit dan peridotit. Batuan ini banyak mengandung olivin, piroksen, magnesium silikat dan besi, mineral-mineral tersebut tidak stabil dan mudah mengalami proses pelapukan (Boldt, 1967).

Pada pelapukan kimia, air tanah yang kaya akan CO_2 yang berasal dari udara dan pembusukan tumbuhan-tumbuhan akan menguraikan mineral-mineral yang tidak stabil (olivine dan piroksin) pada batuan ultramafik, kemudian menghasilkan unsur Mg, Fe, Ni, Al, Ca, yang larut dan Si yang cenderung membentuk koloid dari partikel-partikel silika sangat halus. Di dalam larutan, Fe teroksidasi dan mengendap sebagai ferri-hidroksida, akhirnya membentuk mineral-mineral seperti goethite, limonite, dan hematite dekat permukaan. Bersama mineral-mineral ini selalu ikut unsur cobalt dalam jumlah kecil.

Larutan yang mengandung Mg, Ni, dan Si terus mengalir ke bawah tanah selama larutannya bersifat asam, hingga pada suatu kondisi dimana suasana cukup netral akibat adanya kontak dengan tanah dan batuan, maka ada kecenderungan untuk membentuk endapan hidrosilikat. Nikel yang terkandung dalam rantai silikat atau hidrosilikat dengan komposisi yang mungkin bervariasi tersebut akan mengendap pada celah-celah atau rekahan-rekahan yang dikenal dengan urat-urat garnierit dan krisopras. Sedangkan larutan residunya akan membentuk suatu senyawa yang



aprolit yang berwarna coklat kuning kemerahan. Unsur-unsur lainnya a dan Mg yang terlarut sebagai bikarbonat akan terbawa ke bawah sampai apukan dan akan diendapkan sebagai dolomit, magnesit yang biasa

mengisi celah-celah atau rekahan-rekahan pada batuan induk. Dilapangan, urat-urat ini dikenal sebagai batas petunjuk antara zona pelapukan dengan zona batuan segar yang disebut dengan akar pelapukan (*root of weathering*).

II.2.3 Faktor Pembentukan Endapan Nikel Laterit

Menurut Ahmad (2006) terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi pembentukan endapan nikel laterit, diantaranya:

1) Batuan Induk

Adanya batuan induk berupa batuan ultrabasa merupakan syarat utama untuk terbentuknya endapan nikel laterit. Dalam hal ini pada batuan tersebut terdapat elemen Ni yang paling banyak diantara batuan lainnya, memiliki mineral-mineral yang mudah lapuk dan tidak stabil seperti olivine dan piroksin, serta mempunyai komponen yang mudah larut dan memberikan lingkungan pengendapan yang baik untuk nikel.

2) Iklim

Adanya pergantian musim kemarau dan musim penghujan dapat menimbulkan perbedaan temperatur yang cukup besar yang dapat membantu terjadinya pelapukan mekanis, yang akan terjadi rekahan dalam batuan yang akan mempermudah proses atau reaksi kimia pada batuan.

3) Reagen-reagen kimia dan vegetasi

Reagen-reagen kimia adalah unsur-unsur dan senyawa-senyawa yang membantu mempercepat proses pelapukan. Air tanah yang mengandung CO₂ memegang peranan penting dalam proses pelapukan kimia. Asam-asam humus menyebabkan dekomposisi batuan dan dapat merubah PH larutan. Asam-asam



humus ini erat kaitannya dengan vegetasi wilayah, dalam hal ini vegetasi akan mengakibatkan penetrasi air dapat lebih dalam dan mudah dengan mengikuti jalur akar pepohonan serta akumulasi air hujan bertambah banyak.

4) Struktur

Struktur yang sangat dominan adalah struktur kekar (*joint*) dibandingkan terhadap struktur patahannya. Seperti diketahui, batuan beku mempunyai porositas dan permeabilitas yang kecil sekali sehingga penetrasi air sangat sulit, maka dengan adanya rekahan-rekahan tersebut akan lebih memudahkan masuknya air dan berarti proses pelapukan akan lebih intensif.

5) Topografi

Keadaan topografi setempat sangat mempengaruhi sirkulasi air beserta Reagen-reagen lain. Daerah yang landau menyebabkan air bergerak perlahan-lahan sehingga mempunyai kesempatan untuk mengadakan penetrasi lebih dalam melalui rehan-rekahan atau pori-pori batuan. Akumulasi endapan umumnya berada pada daerah-daerah yang landa sampai kemiringan sedang. Sedangkan pada daerah yang curam, secara teoritis jumlah air yang meuncur (*run off*) lebih banyak dari pada air yang meresap, sehingga pelapukan yang terjadi kurang intensif.

6) Waktu

Waktu yang cukup lama mengakibatkan pelapukan yang cukup intensif karena memiliki akumulasi unsur nikel yang cukup besar.



II.2.4 Profile 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 dengan laterit termuda di bagian bawah dan laterit paling tua di bagian atas (Ahmad, 2009).

Profil nikel laterit dapat 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

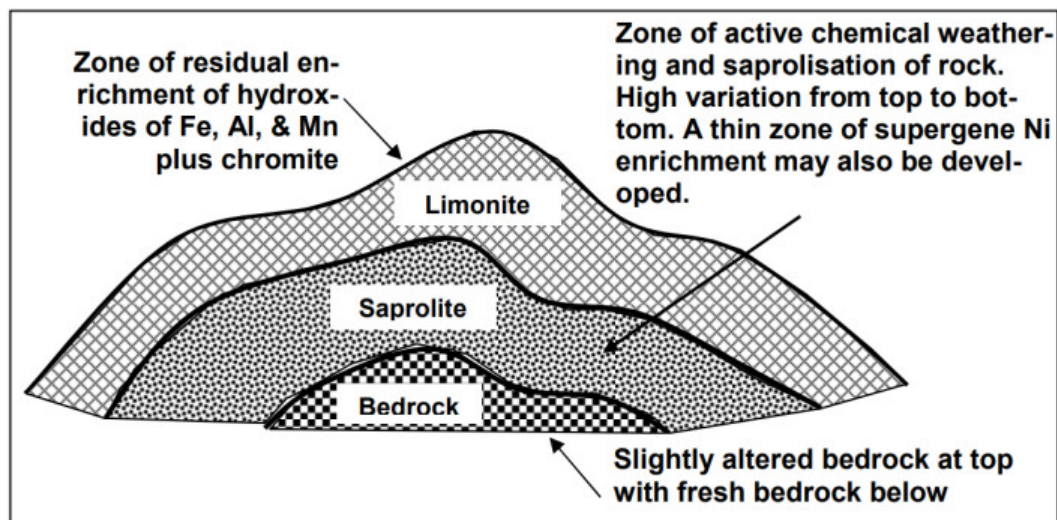
Zona saprolit umumnya terletak dibawah permukaan air, pada daerah saturasi yang umumnya lembab/basah. Pelapukan dan reaksi kimia berlangsung di sepanjang kekar dan rekahan. Proses saprolisasi disepanjang permukaan rekahan mengarah pada pembentukan “boulder” di zona saprolit. Boulder dapat membentuk saprolit 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

tingkat pada bagian atas zona saprolit dan mencapai nilai maksimum pada 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. 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 (iron cap). Bulk density pada zona limonit lebih tinggi dibandingkan zona transisi. Struktur asli dan tekstur batuan asal sudah tidak terlihat lagi pada zona ini.



Gambar 2.4 Profil nikel laterit (Ahmad, 2009)

II.2.5 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



parameter utama, diantaranya: tipe batuan ultramafik, derajat isasi, kandungan kimia bijih, fraksi batuan, dan kandungan olivine.

1. Tipe *West Block*

Daerah *west block* memiliki topografi terjal dan membentuk pegunungan. Batuan di daerah ini umumnya adalah harzburgite yang mengandung olivine (rata-rata 80-90%) dan orthopyroksen (rata-rata 10-20%), juga ditemukan batuan dunit dengan kandungan olivine 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 peridotite 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 olivine (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. Kadar Ni dan rasio silika magnesium *east block* lebih rendah dibandingkan *west block*.

II.3 Sifat Kelistrikan Batuan

Sifat kelistrikan batuan merupakan sifat fisik batuan yang menjelaskan karakteristik batuan ketika dialiri arus listrik ke dalamnya (Vebrianto, 2016). Salah satu sifat tersebut adalah resistivitas (tahanan jenis) yang menunjukkan kemampuan suatu batuan dalam menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu



bahan maka semakin sulit bahan tersebut menghantarkan arus listrik, begitu pula sebaliknya (Prameswari dkk., 2012).

Menurut Syukri (2020) berdasarkan nilai resistivitasnya, batuan dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu:

- a. Konduktor yang baik, nilai resistivitasnya $10^{-8} - 1 \Omega m$
- b. Konduktor sedang, nilai resistivitasnya $1 - 10^7 \Omega m$
- c. Konduktor buruk (isolator), nilai resistivitasnya lebih dari $10^7 \Omega m$

Setiap batuan memiliki nilai resistivitas yang berbeda-beda. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya jenis batuan, kandungan air, litologi, umur batuan, porositas serta permeabilitas batuan. Batuan beku cenderung memiliki resistivitas tinggi, batuan metamorf resistivitas menengah, dan batuan sedimen paling konduktif (resistivitas rendah) terutama karena kandungan fluida dalam pori batuan yang tinggi. Selain itu umur batuan juga sangat berpengaruh, batuan yang lebih tua cenderung memiliki nilai resistivitas yang lebih tinggi karena telah mengalami proses diagenesis yang mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan batuan. (Reynolds, 2011).

Tabel 2.1 Nilai Resistivitas Batuan dan Mineral (Telford dkk.,1990)

Material	Resistivitas (Ωm)
Kwarsa (Quartz)	$300 - 10^6$
Granit	$300 - 1.3 \times 10^6$
Gabro	$10^3 - 10^6$
asal	$10 - 1.3 \times 10^7$
konglomerat	$2 \times 10^3 - 10^4$



Batu Pasir (Sandstones)	$1 - 6.4 \times 10^8$
Gamping (Limestone)	$50 - 10^7$
Dolomit	$350 - 5 \times 10^3$
Topsoil	250 - 1700
Lempung (Clays)	1 - 100
Diorit	$10^4 - 10^5$
Laterit	800 - 1500
Limonit	$10^3 - 10^7$
Air Tanah	0.5 - 300
Air Asin	0.2
Peridotit	$3 \times 10^3 (wet) - 6.5 \times 10^3 (dry)$
Batu Serpih (Shale)	$20 - 2 \times 10^3$

II.4 Metode Geolistrik Resistivitas

Metode resistivitas merupakan salah satu metode geofisika yang bertujuan untuk menentukan distribusi tahanan jenis bawah permukaan dengan cara mengalirkan arus listrik DC (*Direct Current*) yang mempunyai tegangan tinggi ke dalam tanah (Broto & Afifah, 2008).

Data yang diperoleh di lapangan merupakan nilai resistivitas bawah permukaan yang kemudian dihubungkan dengan parameter geologi yang ada sehingga



kan informasi geologi seperti jenis batuan, keberadaan air, porositas, dan patahan, mineral dan seterusnya (Loke, 2004).

Metode ini sering digunakan dalam eksplorasi bawah permukaan yang relatif dangkal, seperti pencarian sumber air, identifikasi longsor, survei awal pertambangan, mitigasi bencana, dan arkeologi (Susilo dkk., 2022).

Menurut Syamsuddin dan Lantu (2009) berdasarkan pada tujuan penyelidikannya metode geolistrik resistivitas dapat dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu metode resistivitas *mapping* dan *sounding*.

1. Metode Resistivitas *Mapping*

Metode resistivitas *mapping* bertujuan untuk mengetahui variasi resistivitas bawah permukaan secara horizontal. Oleh karena itu pada metode ini digunakan konfigurasi elektroda yang sama untuk semua titik pengamatan dipermukaan bumi. Setelah itu baru dibuat kontour resistivitasnya (Syamsuddin dan Lantu, 2009). Menurut Telford dkk (1990) metode ini baik digunakan dalam eksplorasi mineral, di mana deteksi benda-benda terisolasi resistivitas anomali diperlukan.

2. Metode Resistivitas *Sounding*

Metode *sounding* bertujuan untuk mengetahui variasi resistivitas bawah permukaan secara vertikal. Pada metode ini pengukuran potensial dilakukan dengan cara mengubah-ubah jarak elektroda. Jarak ini sebanding dengan lapisan batuan yang ingin dideteksi (Syamsuddin dan Lantu, 2009).

II.4.1 Prinsip Dasar Metode Resistivitas

Teori yang mendasari metode resistivitas adalah hukum Ohm yang dicetuskan oleh



Simon Ohm (1787-1854) yang merumuskan hubungan antara kuat arus, hambatan (R), dan beda potensial (V) (Yasu dan Hadi, 2021). Hukum menyatakan bahwa beda potensial yang timbul di ujung-ujung suatu medium

berbanding lurus dengan arus listrik yang mengalir pada medium tersebut. Selain itu tahanan listrik berbanding lurus dengan panjang medium dan berbanding terbalik dengan luas penampangnya. Secara matematis kedua pernyataan hukum Ohm diatas dituliskan sebagai berikut:

$$V \sim I \text{ atau } V = I \times R \quad (2. 1)$$

$$V \sim \frac{L}{A} \text{ atau } R = \rho \frac{L}{A} \quad (2. 2)$$

dengan R adalah resistansi atau hambatan pada medium tersebut. Besar resistansi bergantung dari jenis material serta geometri dari kawat tersebut.

Prinsip pelaksanaan survei resistivitas adalah mengalirkan arus listrik searah (DC) ke dalam bumi melalui dua elektroda arus yang ditancapkan pada dua titik permukaan tanah dan kemudian mengukur respon beda potensial yang terjadi antara dua titik yang lain di permukaan bumi dimana dua elektroda potensial ditempatkan dalam suatu susunan tertentu (Syamsuddin, 2007).

Dalam pendugaan resistivitas digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut (Pratama dkk., 2019):

1. Pada bawah permukaan bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan ketebalan tertentu, kecuali pada lapisan terbawah yang mempunyai ketebalan tidak terhingga.
2. Bidang batas antar lapisan adalah horizontal.



↳ lapisan dianggap homogen isotropis.

II.4.2 Potensial Pada Medium Homogen Isotropik

Menurut Telford dkk (1990) apabila arus listrik searah dialirkan kedalam medium homegen isotropis, maka besarnya elemen arus (dI) yang melalui suatu elemen luasan (dA) dengan rapat arus (J), dinyatakan dengan persamaan:

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (2.3)$$

Sedangkan rapat arus \vec{j} dan medan listrik \vec{E} yang ditimbulkan, dihubungkan dengan hukum Ohm:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.4)$$

dengan \vec{E} adalah medan listrik dalam volt/meter (V/m) dan σ adalah konduktivitas medium dalam ohm/meter (Ω/m), karena medan listrik merupakan gradien potensial, maka:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (2.5)$$

dengan V adalah potensial listrik, sehingga diperoleh persamaan:

$$\vec{j} = -\sigma \vec{\nabla}V \quad (2.6)$$

Aliran arus yang mengalir dalam bumi homogen isotropis didasarkan pada hukum kekekalan muatan yang dirumuskan:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.7)$$

dengan \vec{j} adalah rapat arus (A/m^2) dan q adalah rapat muatan (C/m^3), jika tidak ada muatan, maka berlaku persamaan untuk arus stasioner:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (2.8)$$

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



atau

$$\vec{\nabla}\sigma \cdot \vec{\nabla}V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (2.9)$$

Apabila arus stasioner dengan koefisien konduktivitas (σ) konstan, maka suku pertama = 0 sehingga suku kedua memenuhi persamaan Laplace dengan potensial harmonis.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.10)$$

II.4.3 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Dalam Bumi

Pada model homogen isotropi, elektroda ditancapkan di dalam bumi yang berfungsi sebagai sumber injeksi arus listrik yang mengalir tagak lurus terhadap ekuipotensial ke segala arah secara homogen seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5. Pada setiap titik ekuipotensial dalam bumi yang membentuk permukaan bola yang memenuhi persamaan Laplace koordinat bola (r, θ, ϕ) sebagai berikut

$$\nabla^2 V = \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} \quad (2.11)$$

Dalam kondisi dimana rotasi dan revolusi bumi tidak mempengaruhi perubahan ekuipotensial, maka arah θ dan ϕ diabaikan sehingga persamaan Laplace koordinat bola disederhanakan menjadi (Telford dkk., 1990):

$$\nabla^2 V = \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) \quad (2.12)$$

Karena $\nabla^2 V = 0$, maka

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0 \quad (2.13)$$

in (2.13) kemudian diintegalkan sehingga diperoleh persamaan berikut:



$$\int \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = \int 0 \rightarrow r^2 \frac{dV}{dr} = P \rightarrow \frac{dV}{dr} = \frac{P}{r^2} \quad (2.14)$$

$$\int dV = \int \frac{P}{r^2} dr \rightarrow V = -\frac{P}{r} + Q \quad (2.15)$$

dimana P dan Q adalah konstanta. Dengan menerapkan batas bawah potensial pada jarak tak berhingga memiliki harga sama dengan nol ($r = \infty$ maka $V \approx 0$), maka diperoleh nilai $Q = 0$, sehingga persamaan (2.15) menjadi:

$$V = -\frac{P}{r} \quad (2.16)$$

Jumlah arus I yang menembus medan ekuipotensial berbentuk bola tersebut adalah:

$$I = AJ \rightarrow I = 4\pi r^2 J \quad (2.17)$$

Substitusikan persamaan (2.6) ke persamaan (2.17) maka,

$$I = 4\pi r^2 (-\sigma \vec{\nabla} V) \quad (2.18)$$

Karena V dalam fungsi r maka $\vec{\nabla} V = \frac{dV}{dr}$ dan $\frac{dV}{dr} = \frac{P}{r^2}$, sehingga diperoleh:

$$I = -4\pi r^2 \sigma \frac{P}{r^2} = -4\pi \sigma P \quad (2.19)$$

Karena konduktivitas $\sigma = \frac{1}{\rho}$ maka persamaan (2.19) menjadi:

$$I = -4\pi \frac{1}{\rho} P \rightarrow P = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (2.20)$$

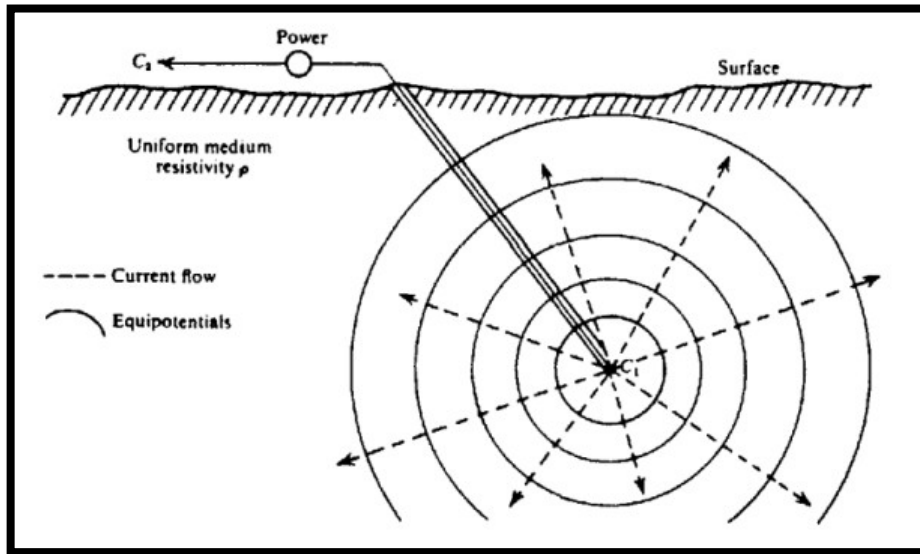
Substitusikan persamaan (2.20) pada persamaan (2.16) sehingga diperoleh:

$$V = \left(\frac{I\rho}{4\pi} \right) \frac{1}{r} \quad (2.21)$$

Dengan V adalah potensial listrik (V), ρ adalah resistivitas (Ohm.m), I adalah kuat

arus (I), dan σ adalah konduktivitas (S/m).



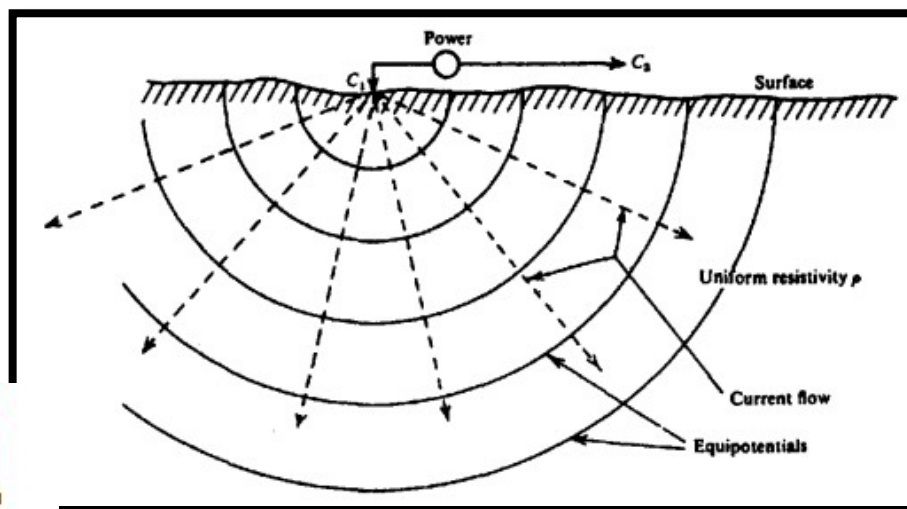


Gambar 2.5 Sumber arus di dalam bumi (Telford dkk., 1990)

II.4.4 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Permukaan Bumi

Arus tunggal yang diinjeksikan ke permukaan bumi homogen isotropik dan udara di atasnya dianggap mempunyai konduktivitas nol, akan membentuk bidang ekuipotensial berbentuk setengah bola seperti yang ditampilkan pada gambar 2.6, dengan luas menjadi $2\pi r^2$ sehingga persamaan (2.21) menjadi (Telford dkk., 1990).

$$V = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (2.22)$$

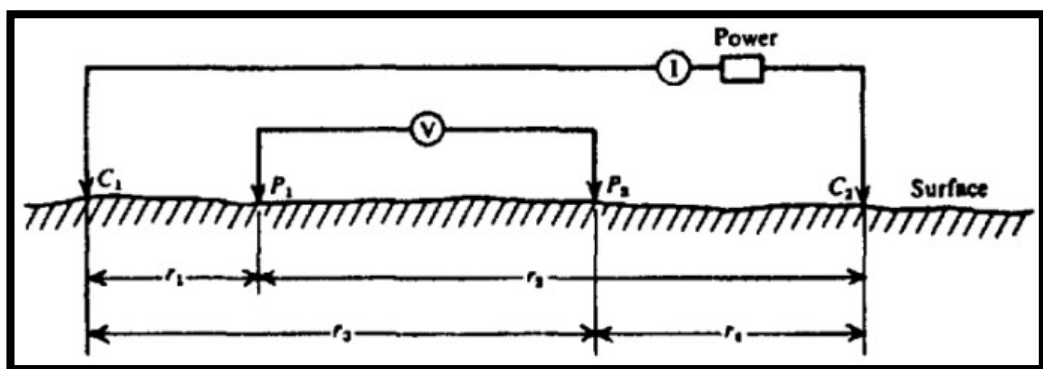


Gambar 2.6 Sumber arus di permukaan bumi (Telford dkk., 1990)



II.4.5 Potensial Listrik Akibat Arus Ganda di Permukaan Bumi

Pengambilan data survey resistivitas umumnya menggunakan elektroda arus dan elektroda potensial masing-masing sebanyak dua buah seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.7. 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 2.7 Dua elektroda arus dan potensial di permukaan (Telford dkk., 1990)

Dari gambar 2.7 dapat dilihat bahwa elektroda potensial P_1 dipengaruhi oleh elektroda arus pertama C_1 dan kedua C_2 , sedangkan elektroda potensial kedua P_2 juga dipengaruhi oleh elektroda arus pertama C_1 dan kedua C_2 (Pangestu dan Zulfian, 2020). Besarnya nilai potensial listrik pada P_1 oleh elektroda C_1 sama seperti aliran listrik pada elektroda tunggal dipermukaan, sehingga potensial V_1 yang disebabkan oleh arus C_1 merujuk pada persamaan 2.23 yaitu Telford dkk., 1990):

$$V_1 = \left(\frac{I\rho}{2\pi} \right) \frac{1}{r_1} \quad (2.23)$$

Karena arus pada dua elektroda besarnya sama dan arahnya berlawanan, maka

V_2 yang disebabkan oleh arus C_2 adalah:

$$V_2 = - \left(\frac{I\rho}{2\pi} \right) \frac{1}{r_2} \quad (2.24)$$



Sehingga diperoleh potensial total pada elektroda P₁ akibat arus C₁ dan C₂ adalah:

$$V_{P1} = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (2.25)$$

Dengan cara yang sama diperoleh potensial total di P₂ yaitu:

$$V_{P2} = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) \quad (2.26)$$

Sehingga diperoleh beda potensial ΔV antara P₁ dan P₂ yaitu:

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{P1} - V_{P2} \\ \Delta V &= \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

Dari persamaan (2.27) diperoleh nilai resistivitas yaitu:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \frac{\Delta V}{I} \quad (2.28)$$

Atau dapat dituliskan:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.29)$$

Dengan,

$$K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) \right]^{-1} \quad (2.30)$$

Dimana K adalah faktor geometri, r_1 adalah jarak C₁ ke P₁ (m), r_2 adalah jarak C₂ ke P₁ (m), r_3 adalah jarak C₁ ke P₂ (m), dan r_4 adalah jarak C₂ ke P₂ (m).

II.4.6 Konsep Resistivitas Semu

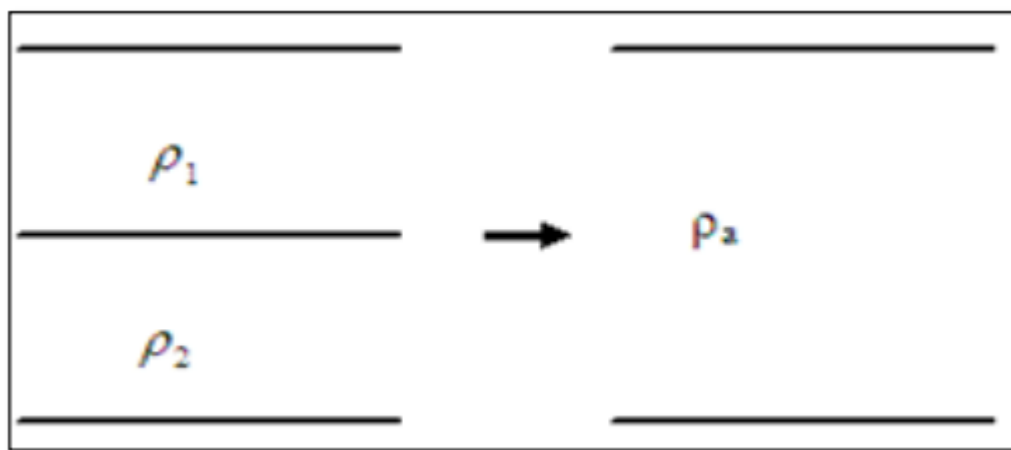
Pendekatan yang sering digunakan dalam metode geolistrik resistivitas adalah bumi bersifat homogen isotropis. Homogen isotropis merupakan anggapan bumi memiliki satu lapisan batuan dengan nilai resistivitas yang sama



(Fitrianto dkk., 2017). Ketika arus diinjeksikan ke dalam bumi, pengaruh dalam bentuk beda potensial yang diamati secara tidak langsung adalah hambatan jenis suatu lapisan bumi tertentu. Padahal kenyataannya bumi terdiri dari beberapa lapisan dengan nilai resistivitas yang berbeda-beda, sehingga potensial yang diukur merupakan pengaruh dari lapisan-lapisan tersebut. Resistivitas yang terukur ini disebut resistivitas semu yang dirumuskan (Halawa dan Tanjung, 2022):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

dengan ρ_a adalah resistivitas semu (Ωm). Konsep resistivitas semu dapat dilihat pada gambar 2.8 yang dimisalkan bahwa medium yang ditinjau terdiri dari dua lapisan dengan nilai resistivitas yang berbeda (ρ_1 dan ρ_2). Namun pada pengukuran medium ini dianggap 1 lapisan homogen yang memiliki nilai resistivitas semu (ρ_a) (Halawa dan Tanjung, 2022).



Gambar 2.8 Konsep dasar resistivitas semu (Halawa dan Tanjung, 2022)

II.5 Electrical Resistivity Tomography (ERT)



Resistivity Tomography (ERT) 2D merupakan kombinasi antara sounding dan profiling. Prinsip ERT didasarkan pada penggunaan sistem

multi-elektroda yang terbuat dari selektor elektroda dan multi-channel system akuisisi yang memungkinkan koneksi dengan satu set elektroda yang tertanam dan terhubung ke Terrameter. Resistivity meter terhubung ke laptop yang telah mempunyai program akuisisi secara berurut yang otomatis memilih nomor elektroda arus dan elektroda potensial. Setiap elektroda ditentukan oleh alamat numerik yang unik dalam system yang dapat diidentifikasi oleh komputer. Pengukuran ini dapat menyimpan secara otomatis ratusan pengukuran single-channel. Hasil data disajikan dalam bentuk penampang plot, yang diperoleh untuk mendapatkan setiap nilai resistivitas semu pada penampang lintasan.

II.6 Konfigurasi Gradien

Konfigurasi gradien merupakan konfigurasi *non-konvensional* yang dapat digunakan untuk survei resistivitas 2D atau 3D dengan cepat dan hemat biaya tanpa mengorbankan kepadatan data (Aizebeokhai dkk., 2014). Hal ini dikarenakan konfigurasi ini sangat sesuai digunakan dalam sistem *multichannel* yang dapat merekam banyak titik data secara simultan untuk setiap injeksi arus (Dahlin dan Zhou, 2004). Selain baik digunakan dalam sistem *multichannel*, konfigurasi gradien juga merupakan alternatif yang baik untuk akuisisi data *single channel* (Dahlin dan Zhou, 2006).

Survei gradient multi-elektroda dilakukan dengan menginjeksi elektroda arus dengan pemisah $(s+2)a$ seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.9, selanjutnya

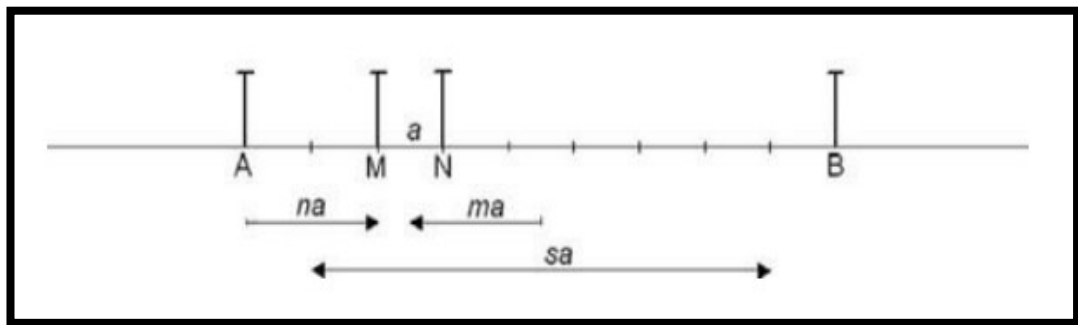


potensial berada ditengah elektroda arus dengan jarak a . Terdapat faktor s , yaitu bilangan bulat yang merupakan nilai maksimum antara elektroda angka faktor n dapat didefinisikan sebagai jarak antara elektroda arus

dan elektroda potensial terdekat. Oleh karena itu, hal ini dapat digunakan untuk mendefinisikan faktor m yaitu posisi titik tengah (*midpoint*) elektroda potensial terhadap titik tengah elektroda arus yang dapat dituliskan sebagai berikut (Dahlin dan Zhou, 2006):

$$m = \frac{\frac{x_M + x_N}{2} - \frac{x_A + x_B}{2}}{x_N - x_M} = \frac{x_{MN} - x_{AB}}{a} \quad (2.31)$$

Dimana x_A dan x_B adalah posisi elektroda arus A dan B dengan $x_B > x_A$, x_M dan x_N adalah posisi elektroda potensial M dan N dengan $x_N > x_M$, sedangkan x_{AB} dan x_{MN} adalah titik tengah elektroda arus dan potensial (Dahlin dan Zhou, 2006).



Gambar 2.9 Sketsa dari konfigurasi gradient (Dahlin dan Zhou, 2006).

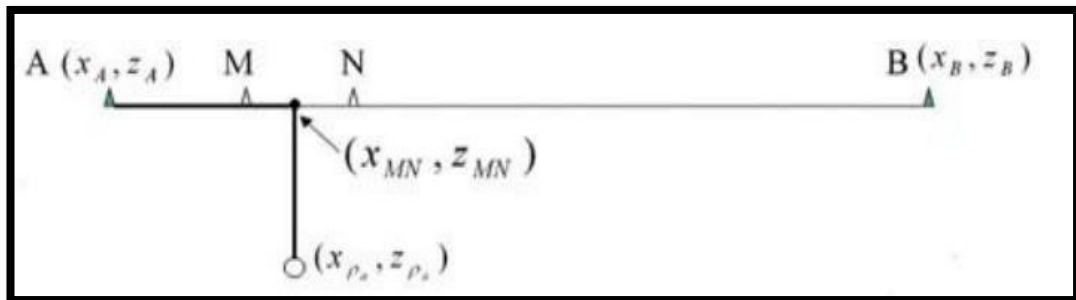
Memplot resistivitas semu yang terukur sebagai pseudosection penting dilakukan untuk menilai kualitas data dengan cepat, sehingga potensial masalah kualitas data dapat ditemukan dan ditangani sedini mungkin. Untuk memplot pseudosection resistivitas semu konfigurasi gradien digunakan rumus sebagai berikut:

$$x_{\rho_a} = x_{MN} \quad (2.32)$$

$$Z_{\rho_a} = \min \left\{ \frac{(x_{MN} - x_A), (x_B - x_{MN})}{3} \right\} \quad (2.33)$$



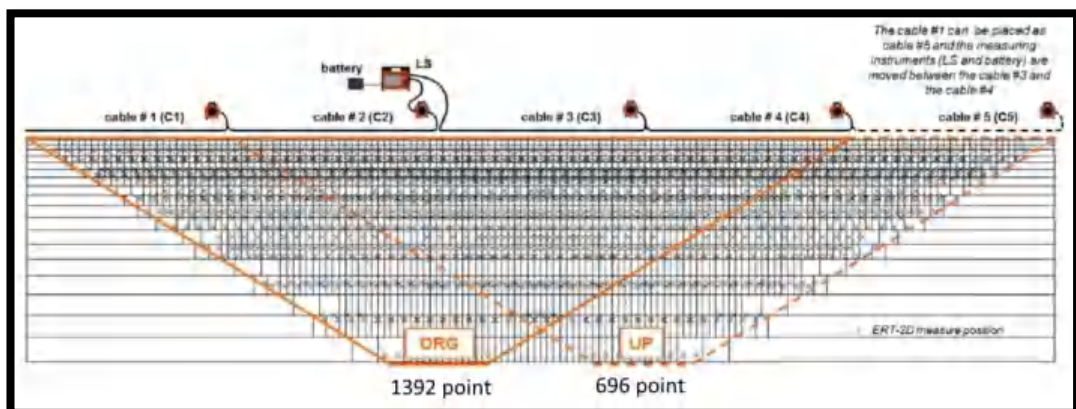
Dimana x_{ρ_a} adalah posisi resistivitas semu, Z_{ρ_a} adalah kedalaman resistivitas semu, x_{MN} adalah titik tengah elektroda potensial MN , x_A dan x_B adalah posisi elektroda A dan B seperti yang terlihat pada gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Gambaran perhitungan titik plot pseudosection untuk konfigurasi gradien (Dahlin dan Zhou, 2006).

II.7 Metode Roll-Along

Metode roll-along adalah teknik pengukuran geolistrik yang digunakan untuk mendapatkan wilayah pengukuran yang tidak terjangkau oleh bentangan kabel yang terbatas. Metode ini dilakukan dengan cara menggeser kabel ke beberapa satuan jarak elektroda untuk memperpanjang daerah cakupan sesuai lintasan target.



Gambar 2.11 Metode Roll-Along (Savin, 2015)



II.8 Pemodelan Inversi Data

Pemodelan merupakan proses estimasi model dan parameter model berdasarkan data yang diamati di permukaan bumi. (Grandis, 2009). Model adalah representasi keadaan geologi oleh besaran fisika agar permasalahan dapat disederhanakan dan responnya dapat diperkirakan atau dihitung secara teoritis. Besaran yang digunakan untuk mengkarakterisasi model disebut parameter model yang secara umum terdiri dari parameter fisika serta variasinya terhadap posisi (Hendrajaya, 1990).

Pemodelan dalam geofisika ada dua, yaitu pemodelan kedepan (*forward modelling*) dan pemodelan inversi (*inverse modelling*). Pemodelan ke depan merupakan proses perhitungan data jika diketahui nilai parameter model bawah permukaan tertentu. Sedangkan pemodelan inversi merupakan proses memperoleh parameter model berdasarkan data pengamatan (Grandis, 2009).

II.8.1 Pemodelan Inversi (*Inverse Modelling*)

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.

$$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (2.34)$$

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

$$f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (2.35)$$

Adapun parameter model diwakili oleh vektor berikut.

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (2.36)$$



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

$$g = y - f \quad (2.37)$$

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

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (2.38)$$

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

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (2.39)$$

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

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (2.40)$$

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

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (2.41)$$

Vektor perubahan parameter yang dihitung menggunakan persamaan (2.39) dapat memiliki komponen yang terlalu besar sehingga model baru yang dihitung dengan persamaan (2.41) memiliki nilai yang tidak realistis. Untuk menghindari kesalahan

dilakukan modifikasi *Marquardt-Levenberg* terhadap persamaan *Gauss-*erikut

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q = J^T g \quad (2.42)$$



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

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (2.43)$$

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

$$(J^T J + \lambda W^T W) \Delta q = J^T g - \lambda W^T W q \quad (2.44)$$

sehingga nilai resistivitas q berubah dengan cara yang halus. Opsi berikutnya dengan memodifikasi persamaan 2.44 sehingga elemen-elemen yang berbeda dari perubahan parameter model dan vektor *error* data memiliki besaran yang sama, yang diberikan oleh

$$(J^T R_d J + \lambda W^T R_m W) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda W^T R_m W q_k \quad (2.45)$$

dengan R_d dan R_m adalah matriks pembobotan. Metode ini dikenal dengan metode

l_1 -norm atau *robust* atau *blocky*, sedangkan persamaan 2.44 adalah metode

l_2 -norm. Metode inversi l_2 -norm memberikan hasil yang optimal ketika

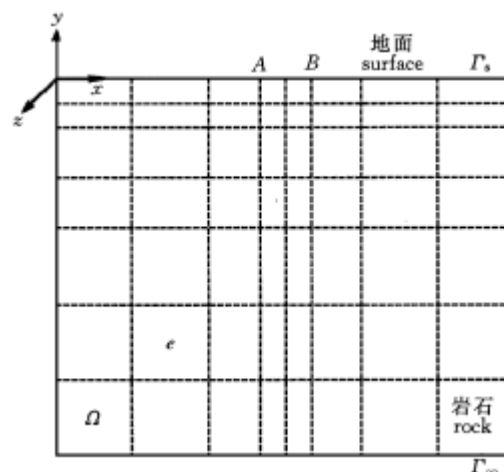


geologi bawah permukaan menunjukkan variasi yang halus. Namun dalam kasus dimana bawah permukaan terdiri dari benda-benda yang homogen secara internal dengan batas-batas yang tajam, metode *robust* lebih baik digunakan.

II.8.2 Pemodelan ke Depan (*Forward Modelling*)

Pemodelan ke depan merupakan bagian integral dari program inversi karena perlu menghitung nilai resistivitas semu teoritis untuk model yang dihasilkan oleh inversi untuk melihat kesesuaiannya dengan nilai yang terukur. Metode yang sering digunakan dalam pemodelan kedepan adalah metode *finite difference* (FD) dan metode *finite element* (FE). Pada metode FE, domain akan dibagi menjadi beberapa element berbentuk triangulasi atau poligon, sedangkan FD membagi domain menjadi elemen berbentuk persegi. (Loke, 2004).

Langkah pertama dalam diskritisasi FE 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 2. 12 Desain mesh FE menggunakan empat node (Xiong, 2022)



Pada gambar 2.12 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 2.46 (Xiong, 2022):

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{(1 - \xi)(1 - \eta)}{4} \\
 N_2 &= \frac{(1 + \xi)(1 - \eta)}{4} \\
 N_3 &= \frac{(1 + \xi)(1 + \eta)}{4} \\
 N_4 &= \frac{(1 - \xi)(1 + \eta)}{4}
 \end{aligned} \tag{2.46}$$

Variasi potensial listrik pada penampang geolistrik 2D diberikan oleh:

$$F(U) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 + \frac{1}{2} \sigma k^2 U^2 - I \delta(A) U \right] d\Omega \tag{2.47}$$

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

$$F(U) = \sum_{\Omega} \int_e \frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 d\Omega + \sum_{\Omega} \int_e \frac{1}{2} \sigma k^2 U^2 d\Omega - \sum_{\Omega} \int_e I \delta(A) U d\Omega \tag{2.48}$$

$$F(U) = \frac{1}{2} U_e^T K_{1e} U_e + \frac{1}{2} U_e^T K_{e2} U_e - U^T P \tag{2.49}$$

$$= U^T K U - U^T P \tag{2.50}$$

$$= K U - P \tag{2.51}$$

$\delta(U) = 0$, maka

$$K U = P \tag{2.52}$$



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

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

$$u(M) = \sum_{i=1}^5 g_i U(M, k_i) \quad (2.53)$$

Dimana M adalah posisi titik observasi, k_i adalah bilangan gelombang, dan g_i adalah koefisien pembobotan, yang ditunjukkan oleh tabel berikut.

Table 1 k_i and g_i parameters of Fourier inverse transform

i	1	2	3	4	5
k_i	0.00268	0.02419	0.09621	0.33991	1.26051
g_i	0.00565	0.02406	0.07849	0.27409	1.09590

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

$$\rho_a = G \frac{u(M) - u(N)}{I} \quad (2.54)$$

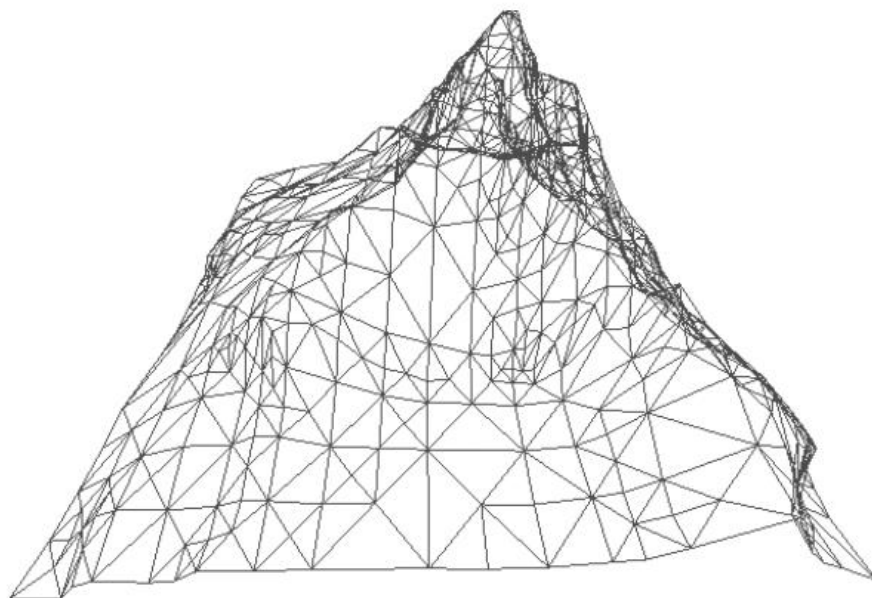
Dengan ρ_a adalah resistivitas semu, G adalah faktor konfigurasi, $u(M)$ dan $u(N)$ potensial listrik pada node yang diukur oleh elektroda M dan N . Penurunan detail element secara detail ditampilkan pada lampiran 1.



II.9 Metode Perhitungan Volume

Salah satu metode yang dapat digunakan dalam menghitung volume cadangan nikel laterit adalah metode *cut and fill*. Metode ini memiliki prinsip menghitung luasan dua penampang (penampang atas dan penampang bawah) serta jarak antara penampang atas dan penampang bawah tersebut (*thickness*) (Afriadi, 2015).

Tahapan perhitungan volume secara umum adalah import data, pembentukan model permukaan, serta penentuan metode perhitungan. Dalam perhitungan volume profil nikel laterit diperlukan data topografi, limonit bottom dan saprolit bottom dalam bentuk string. String inilah yang nantinya akan membentuk segitiga - segitiga yang saling berhimpit sehingga membentuk permukaan dari zona endapan endapan nikel laterit yang disebut *wireframe* (Afriadi, 2015).



Gambar 2. 13 Ilustrasi Wireframe (Balmelli dkk., 1999)

Cowan (2011) Wireframe adalah metode yang digunakan dalam industri ngan untuk membangun model geologi 3D untuk memperkirakan sumber



daya. Wireframe menggunakan konsep triangulasi dengan membentuk segitiga-segitiga dari titik-titik data yang ada dengan menggunakan persamaan triangulasi berikut.

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_i - D| \quad (2.55)$$

dimana δ_i merupakan derajat node i , $D = 6$ untuk *triangles*, dan $D = 12$ untuk *tetrahedra*, dan n adalah jumlah node dalam satu domain (Plaza & Rivara, 2002).

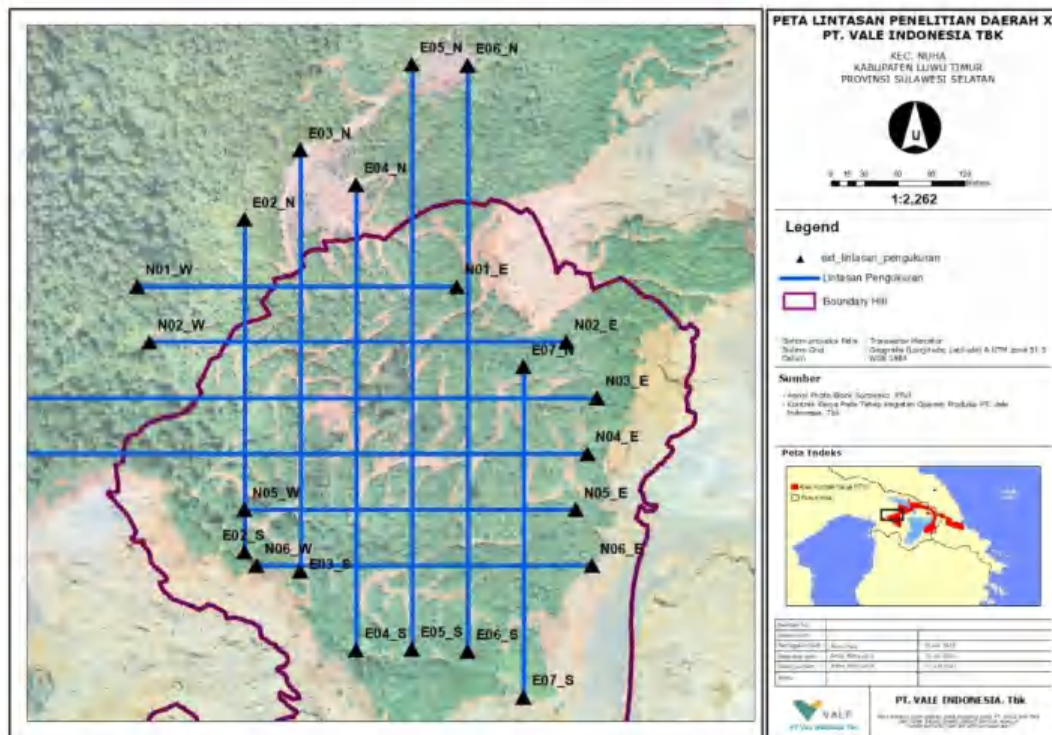


BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak pada daerah “H” yang merupakan wilayah kuasa pertambangan PT. Vale Indonesia area blok barat, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Terdiri dari 12 lintasan, 6 lintasan dengan arah utara-selatan dan 6 lintasan dengan arah barat-timur.



Gambar 3. 1 Peta Lintasan ERT

III.2 Alat dan Bahan

III.2.1 Alat



; digunakan dalam pengolahan data:

erangkat keras terdiri dari:

1 buah laptop

- b) 1 buah printer
- 2. Perangkat lunak terdiri dari:
 - a) *Software Res2DInv 4.8.10*
 - b) *Software Datamine Studio RM*

III.2.2 Bahan

Data yang digunakan pada penelitian ini berupa data data skunder perusahaan PT.

Vale yang terdiri dari:

- 1. Data ERT

Data pengukurun ERT konfigurasi gradient sebanyak 12 lintasan, 6 lintasan dengan arah utara-selatan dan 6 lintasan arah timur-barat. Panjang lintasan terdiri dari 250 m, 315 m, 395 m, 441 m, dan 553 m. Data yang diolah terdiri dari nilai resistivitas dan topografi setiap lintasan.

- 2. Data Bor

Data bor sebanyak 33 data yang *overlap* dengan 12 lintasan ERT. Terdiri dari data *Assay* dan data *Collar*.

III.3 Prosedur Penelitian

III.3.1 Tahapan Kajian Pustaka

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



III.3.2 Tahapan Pengumpulan Data

Tahapan ini meliputi pengumpulan data yang akan digunakan pada penelitian ini. Data yang digunakan merupakan data sekunder milik PT Vale Indonesia yang terdiri dari data utama berupa data ERT, dan data pendukung yang terdiri dari data bor, dan data topografi.

III.3.3 Tahapan Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari pengukuran ERT merupakan data resistivitas semu, sehingga dilakukan inversi data untuk mendapatkan nilai resistivitas sebenarnya pada setiap lintasan ERT. Inversi data dilakukan menggunakan *software Res2DInv*.

Sebelum memulai inversi data, dilakukan pengaturan format data dalam bentuk dat yang terdiri dari data pengukuran, topografi dan global koordinat sesuai dengan format yang bisa dibaca oleh *Res2DInv*. Setelah itu membuka *software Res2DInv*, kemudian melakukan *read parameter* yang telah ditentukan perusahaan, kemudian input data. Setelah itu melakukan inversi dan akan mendapatkan penampang pseudosection, dari penampang tersebut selanjutnya dapat menampilkan penampang dengan topografi. Kemudian melakukan quality control data dengan melihat Abs Error data. Data yang nilai errornya tinggi (> 10%) kemudian dianalisis kembali apakah ada data anomali atau data yang error, kemudian melakukan penghapusan data yang error tersebut. Setelah data dianggap bagus kemudian melakukan inversi kembali untuk mendapatkan model penampang 2D. Kemudian

in export data X, Y, Z dan nilai resistivitas yang nantinya digunakan pada dalam interpretasi batas lapisan nikel laterit.



III.3.4 Interpretasi Data

Pada penelitian ini interpretasi batas lapisan limonit, saprolite dan berdrock dilakukan berdasarkan nilai resistivitas tanpa bergantung pada data bor. Kemudian dari hasil interpretasi ini dilakukan pengukuran kedalaman limonit *bottom* dan saprolite *bottom* serta *end of hole* (EOH) pada setiap titik bor yang ada. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan data bor untuk melihat keakuratan hasil interpretasi ERT. Selanjutnya dilakukan perhitungan biaya pengeboran aktual dan biaya pengeboran berdasarkan interpretasi ERT.

III.3.5 Perhitungan Volume

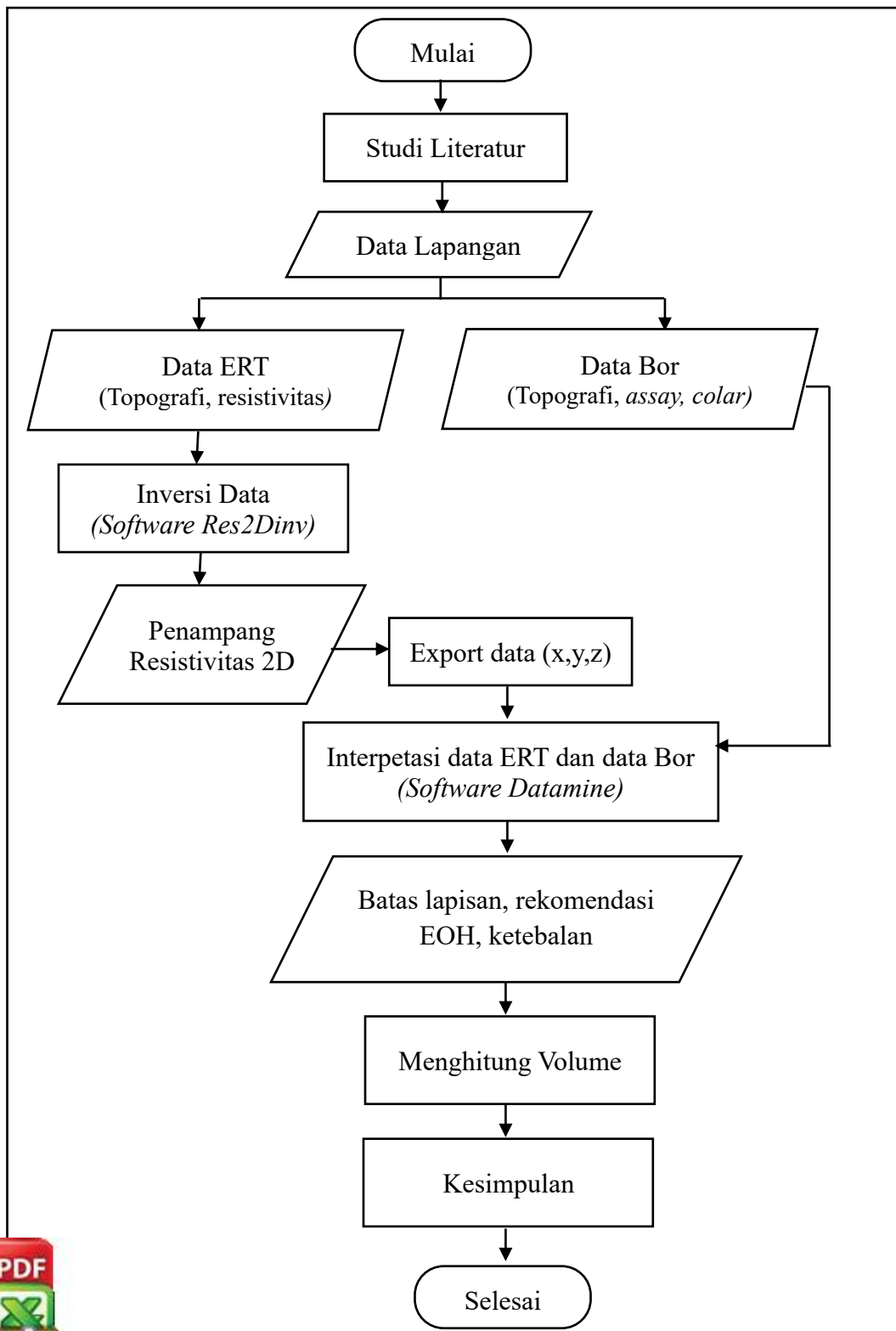
Pada penelitian ini dilakukan perhitungan volume limonit dan saprolite berdasarkan data resistivitas dan berdasarkan data bor. Metode perhitungan volume yang digunakan yaitu metode *cut and fill*. Langkah pertama yang dilakukan adalah membuat *cross section* penampang keseluruhan dalam bentuk 3D, membuat *boundary area* yang akan dihitung volumenya. Selanjutnya topografi, limonit *bottom* dan saprolite *bottom* dipotong sesuai dengan *boundary* yang sudah dibuat. Selanjutnya adalah membuat *wireframe* masing-masing lapisan, yang sebelumnya dibuatkan grid 1x1 meter yang bertujuan untuk mendapatkan informasi ketebalan tiap 1 meter sehingga dapat mencitrakan bawah permukaan yang lebih baik.

Setelah itu menghitung ketebalan saprolite dengan menggabungkan batas topografi dan limonit *bottom* kemudian melakukan *cut and fill* di *software datamine* untuk



tkan volume limonit. Dengan cara yang sama dilakukan dengan
kan batas limonit *bottom* dan saprolite *bottom* untuk mendapatkan volume

III.4 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3. 2 Bagan Alir Penelitian

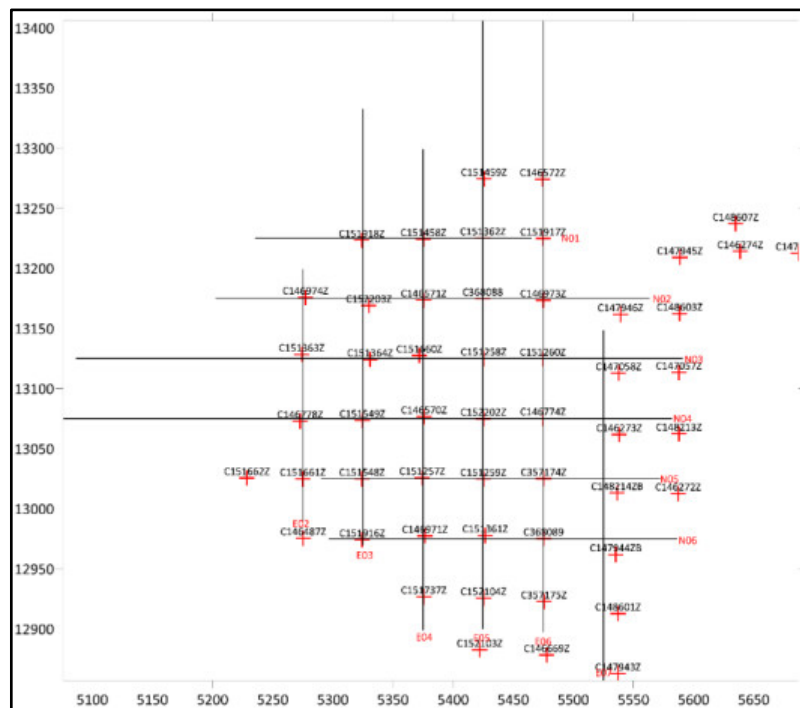
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV. 1 Hasil

IV. 1.1 Data Penelitian

Data penelitian terdiri dari data ERT dan data bor yang ditampilkan oleh gambar 4.1. Data ERT terdiri dari 12 lintasan yang dilambangkan oleh garis hitam, dengan arah utara-selatan sebanyak 6 lintasan dan arah timur-barat sebanyak 6 lintasan. Data bor keseluruhan di lokasi penelitian sebanyak 53 data bor yang dilambangkan oleh simbol (+), namun data bor yang *overlay* dengan data ERT hanya 33 data bor. Data bor terdiri dari data *assay* dan *collar* yang ditampilkan pada lampiran 2. Data *assay* merupakan data yang berisi informasi kedalaman lubang bor serta nilai kadar Ni, sedangkan data *collar* merupakan data yang menggambarkan distribusi titik bor pada koordinat x, y, dan z.

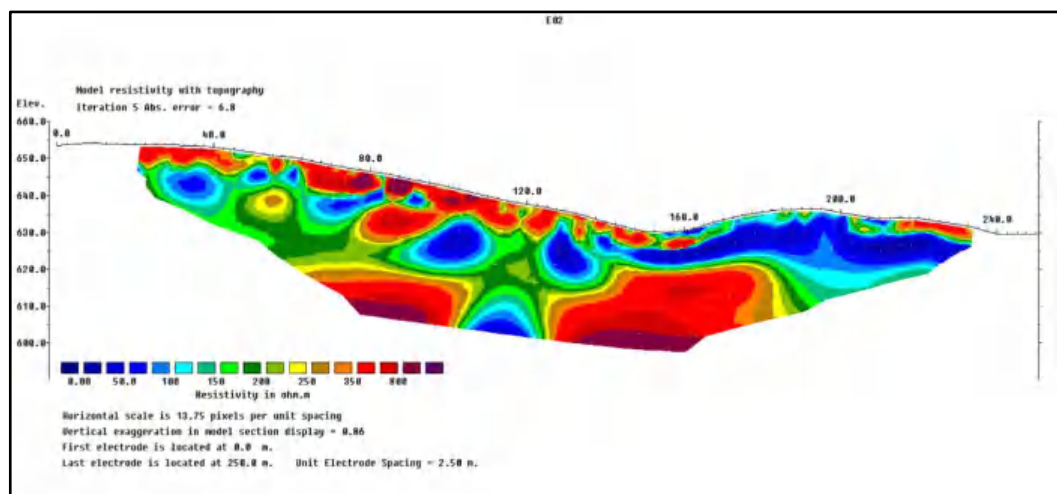


Gambar 4. 1 Data Penelitian



IV. 1.2 Hasil Inversi

Data pengukuran ERT berupa data resistivitas semu diinversi untuk memperoleh data resistivitas sebenarnya. Hasil inversi ditampilkan dalam bentuk penampang resistivitas 2 dimensi yang menggambarkan distribusi nilai resistivitas bawah permukaan. Hasil inversi lintasan E02 dan N01 ditampilkan pada gambar 4.2 dan 4.3, adapun hasil inversi keseluruhan lintasan akan ditampilkan pada lampiran 3.

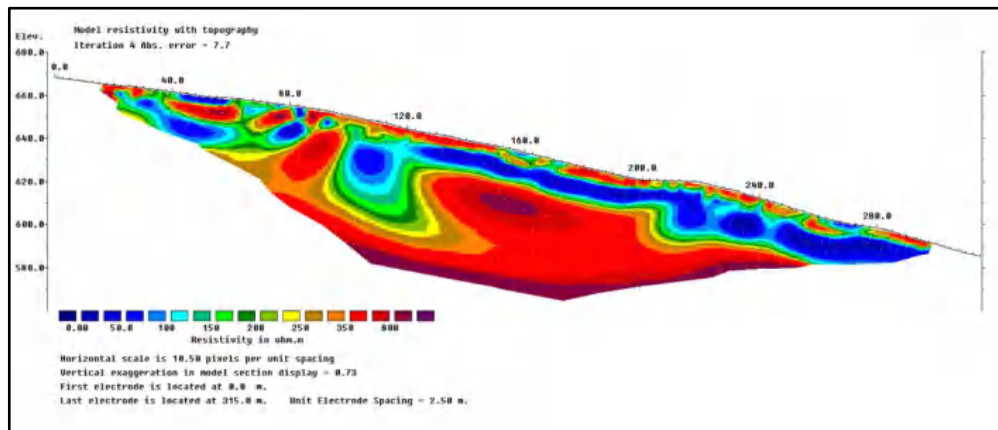


Gambar 4. 2 Hasil Inversi Lintasan E02

Gambar 4.2 menampilkan penampang resistivitas 2D hasil inversi lintasan E02 yang memiliki panjang lintasan 250 meter, dengan melibatkan data topografinya. Hasil inversi setelah dilakukan iterasi 5 kali diperoleh absolute error sebesar 6.8 persen yang dianggap termasuk nilai error yang rendah. Nilai resistivitas digambarkan oleh warna kontur dimana kontur berwarna biru mengindikasikan nilai resistivitas yang rendah yakni 0-150 Ω m, warna hijau-oranye mengindikasikan kontur dengan nilai 150-300 Ω m, dan warna merah untuk kontur



ilai $>300 \Omega$ m. Pada penampang E02 terlihat pada bagian *bedrock* terdapat resistivitas, dimana terdapat nilai resistivitas rendah yang berada di antara resistivitas tinggi.



Gambar 4.3 Hasil Inversi Lintasan N01

Penampang resistivitas 2D hasil inversi lintasan N01 yang memiliki panjang lintasan 315 meter ditampilkan pada gambar 4.3. Hasil inversi setelah dilakukan iterasi 5 kali diperoleh absolute error sebesar 7.7 persen, yang dianggap termasuk nilai error yang rendah. Nilai resistivitas digambarkan oleh warna kontur dimana kontur berwarna biru mengindikasikan nilai resistivitas yang rendah yakni 0-150 Ωm , warna hijau-oranye mengindikasikan kontur dengan nilai 150-300 Ωm , dan warna merah untuk kontur dengan nilai $>300 \Omega\text{m}$. Pada penampang terlihat anomali resistivitas pada *bedrock* yang seharusnya memiliki nilai resistivitas tinggi namun terdapat bagian yang memiliki nilai resistivitas yang rendah.

IV. 2 Interpretasi Profil Nikel Laterit Berdasarkan Nilai Resistivitas

Penentuan profil nikel laterit dilakukan berdasarkan distribusi nilai resistivitas bawah permukaan. Sebelum melakukan interpretasi, dilakukan evaluasi sejumlah *log book* untuk melihat karakteristik *geolectrical* beberapa *deposit* sebagai referensi melakukan interpretasi.



an terkait kondisi geologi daerah penelitian juga sangat penting untuk proses interpretasi. Daerah penelitian yang berada di wilayah *west block*,

memiliki batuan dasar harzburgite dan dunit dengan tingkat serpentinisasi yang rendah hingga tidak mengalami serpentinisasi sehingga batuananya relatif massif, struktur yang kurang berkembang, dan kemungkinan keterdapatannya *boulder* di lapisan saprolit.

Penentuan batas lapisan limonit, saprolit dan *bedrock* mengacu pada nilai resistivitas bawah permukaan yang direpresentasikan dari warna kontur. Kontur yang berwarna biru merupakan *low resistivity* dengan rentang nilai resistivitas $0 \Omega\text{m} - 150 \Omega\text{m}$, kontur yang berwarna hijau-oranye merupakan *medium resistivity* dengan rentang nilai resistivitas $150 \Omega\text{m} - 300 \Omega\text{m}$, dan kontur yang berwarna merah-hitam merupakan *high resistivity* dengan rentang nilai $>300 \Omega\text{m}$.

Dalam penarikan batas antara saprolit dan *bedrock*, ada beberapa daerah yang memiliki kondisi khusus dimana nilai resistivitasnya berbeda dari nilai seharusnya. Salah satu yang mempengaruhinya adalah struktur, sehingga pada beberapa lintasan juga dilakukan interpretasi struktur. Pada area struktur ini cenderung memiliki nilai resistivitas antara $70 \Omega\text{m} - 150 \Omega\text{m}$.

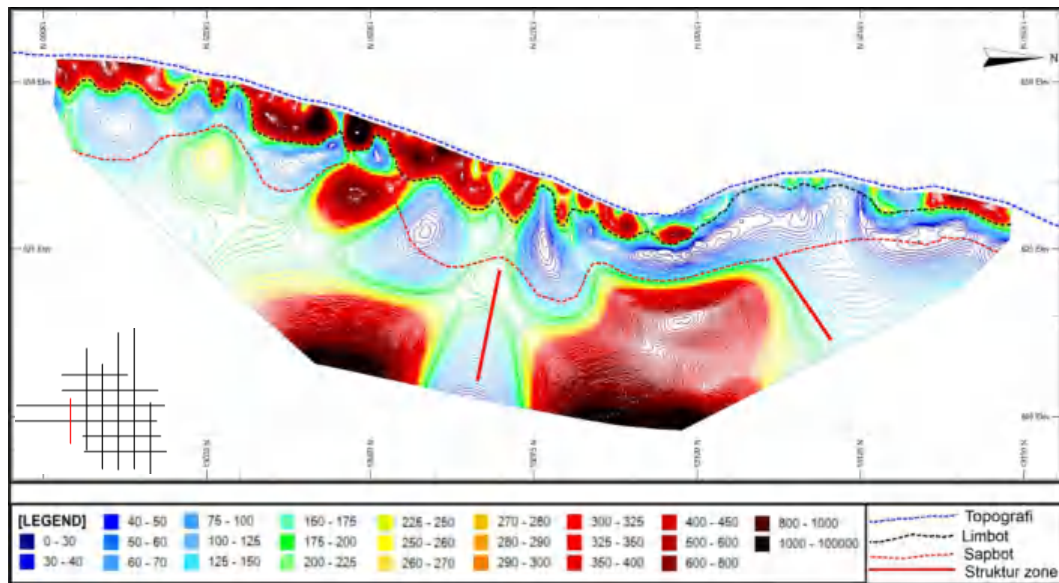
Berikut ini hasil interpretasi profil nikel laterit pada area penelitian.

1. Lintasan E02

Lintasan E02 membentang dari arah utara-selatan sepanjang 250 meter dengan spasi elektroda 5 meter. Hasil pengukuran di lapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.4 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah

in $10 \Omega\text{m}$ hingga $> 900 \Omega\text{m}$ dengan penetrasi kedalaman 42 meter.





Gambar 4.4 Batas profil nikel laterit lintasan E02

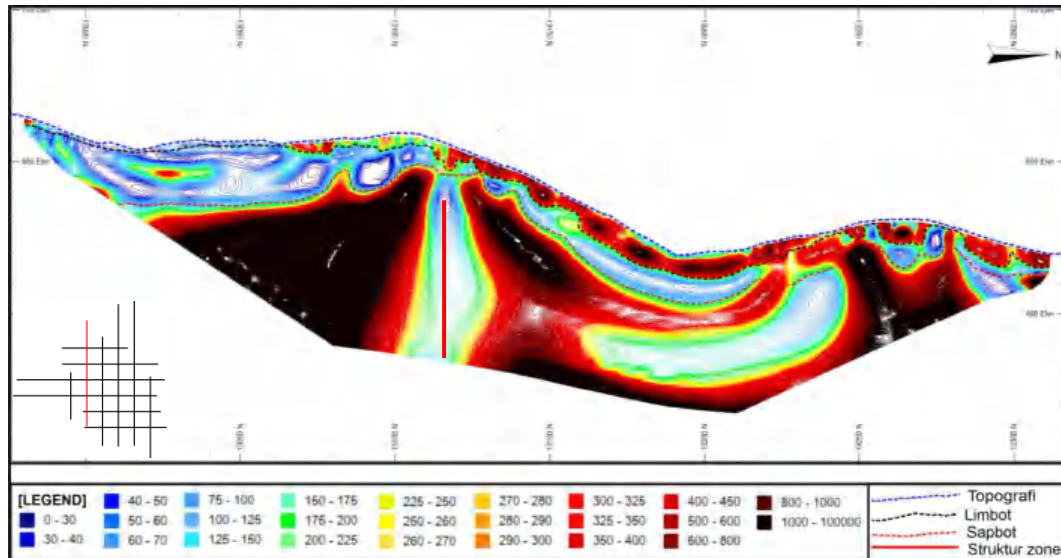
Pada gambar 4.4 garis putus-putus warna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan E02 memiliki resistivitas *medium to high resistivity* dengan rentan nilai 230 Ω m-680 Ω m. Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 30 Ω m -280 Ω m. Zona *bedrock* memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 100 Ω m-800 Ω m. Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar, sehingga memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Adapun nilai resistivitas yang sangat tinggi di zona limonit mengindikasikan adanya kandungan silika.

2. Lintasan E03

Lintasan E03 memiliki panjang 395 meter dan membentang dari arah utara-selatan dengan jarak antar elektroda 5 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menjadi penampang 2D seperti gambar 4.5 yang memiliki variasi nilai



resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga $>900 \Omega\text{m}$ dengan penetrasi kedalaman 65 meter.



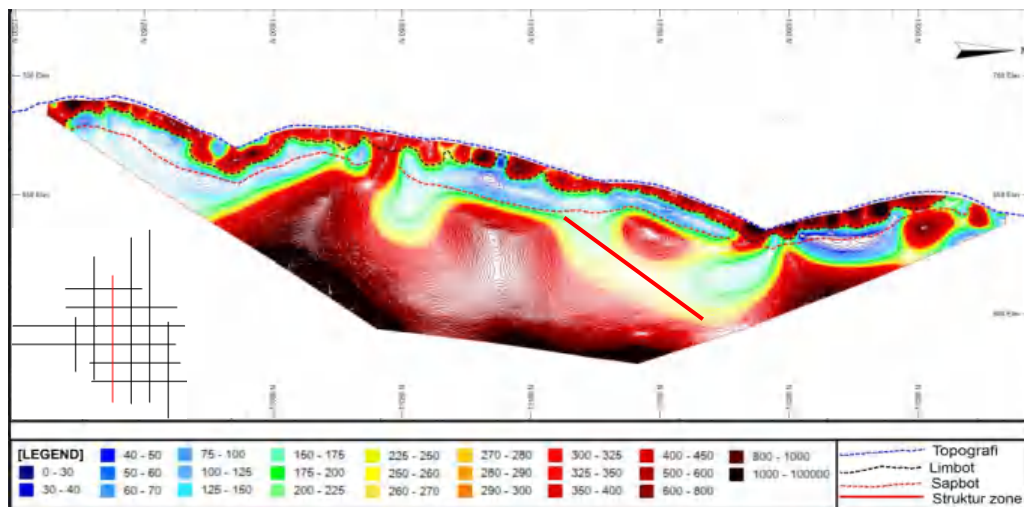
Gambar 4.5 Batas profil nikel laterit lintasan E03

Garis putus-putus pada gambar 4.5 menampilkan hasil interpretasi batas profile nikel laterit. Garis putus-putus warna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan E03 memiliki nilai resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai 250 Ωm -700 Ωm . Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 30 Ωm -270 Ωm . Zona *bedrock* memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 150 Ωm -900 Ωm . Pada zona *bedrock*, terdapat nilai resistivitas rendah yang diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar, hal ini memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Sedangkan pada zona saprolite terdapat indikasi yang memiliki nilai resistivitas tinggi. Adapun nilai resistivitas yang sangat zona limonit diakibatkan karena adanya kandungan silika silika.



3. Lintasan E04

Lintasan E04 sepanjang 441 meter membentang dari arah utara-selatan dengan spasi elektroda 7 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.6 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan $10 \Omega\text{m}$ hingga $>900 \Omega\text{m}$ dengan penetrasi kedalaman 73 meter.



Gambar 4.6 Batas profil nikel laterit lintasan E04

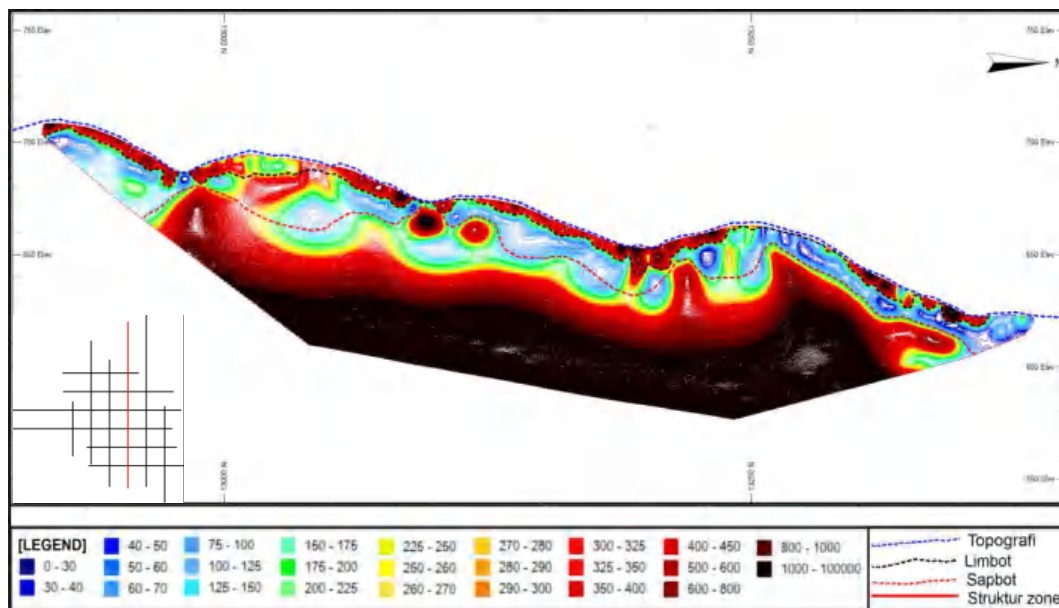
Pada gambar 4.6 garis putus-putus warna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan E04 memiliki nilai resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai $240 \Omega\text{m}$ - $780 \Omega\text{m}$. Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai $30 \Omega\text{m}$ - $350 \Omega\text{m}$. Zona *bedrock* memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai $120 \Omega\text{m}$ - $950 \Omega\text{m}$. Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar, sehingga memungkinkan air masuk ke celah batuan



bersifat konduktif. Sedangkan pada zona saprolite terdapat indikasi yang memiliki nilai resistivitas tinggi. Adapun nilai resistivitas yang sangat rendah di zona limonit mengindikasikan adanya silika.

4. Lintasan E05

Lintasan E05 membentang dari arah utara-selatan sepanjang 553 meter dengan spasi elektroda 7 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.7 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan $10 \Omega\text{m}$ hingga $>900 \Omega\text{m}$ dengan penetrasi kedalaman 73 meter.



Gambar 4.7 Batas profil nikel laterit lintasan E05

Batas profile nikel laterit dilambangkan oleh garis putus-putus seperti pada gambar 4.7. Garis putus-putus warna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan E05 memiliki nilai resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai $270 \Omega\text{m}$ - $720 \Omega\text{m}$. Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai $30 \Omega\text{m}$ - $300 \Omega\text{m}$. Zona *bedrock* memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai $150 \Omega\text{m}$ - $920 \Omega\text{m}$. Nilai

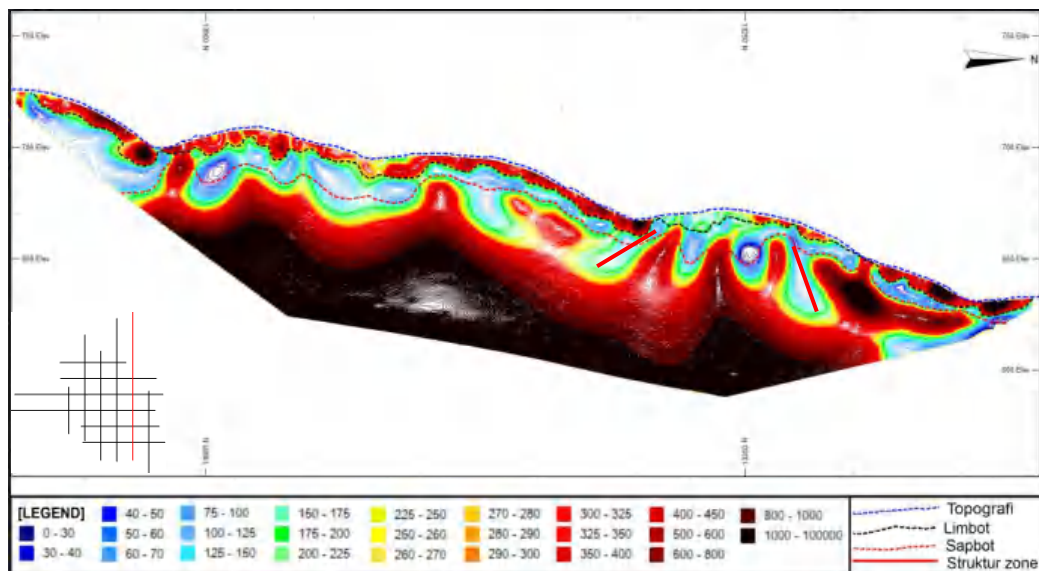
is rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada



batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif.

5. Lintasan E06

Lintasan E06 memiliki panjang 553 meter dan membentang dari arah utara-selatan dengan spasi elektroda 7 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.8 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga $>900 \Omega\text{m}$ dengan penetrasi kedalaman 73 meter.



Gambar 4.8 Batas profil nikel laterit lintasan E06

Garis putus-putus pada gambar 4.8 menampilkan hasil interpretasi batas profile nikel laterit. Garis putus-putus warna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan E06 memiliki nilai

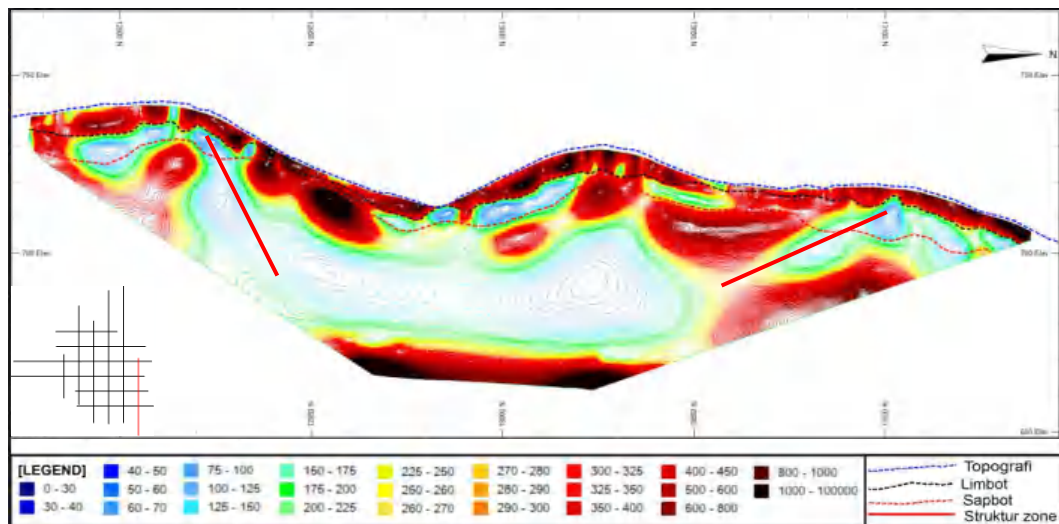
resistivitas *medium to high* dengan rentang nilai 250 Ωm -700 Ωm . Zona saprolite resistivitas *low to medium* dengan rentang nilai 30 Ωm -270 Ωm . Zona



bedrock memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 100 Ωm -800 Ωm . Pada zona *bedrock* nilai terdapat nilai resistivitas rendah yang diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Sedangkan pada zona saprolite terdapat indikasi *boulder* yang memiliki nilai resistivitas tinggi.

6. Lintasan E07

Lintasan E07 membentang dari arah utara-selatan sepanjang 315 meter dengan spasi elektroda 5 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.9 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga >900 Ωm dengan penetrasi kedalaman ± 52 meter.



Gambar 4.9 Batas profil nikel laterit lintasan E07

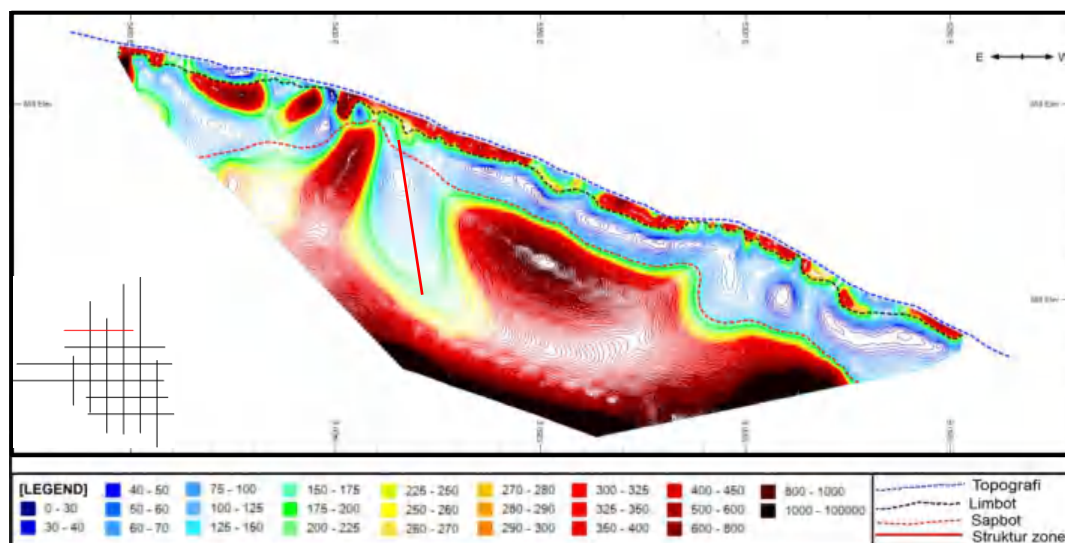
Pada gambar 4.9 garis putus-putus warna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan E07 memiliki nilai resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai 250 Ωm -750 Ωm . Zona saprolite resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 55 Ωm -300 Ωm . Zona



bedrock memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 135 Ωm -800 Ωm . Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Sedangkan pada zona saprolite dan limonit terdapat indikasi *boulder* dan silika yang memiliki nilai resistivitas tinggi.

7. Lintasan N01

Lintasan N01 membentang dari arah timur-barat sepanjang 315 meter dengan spasi elektroda 5 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.10 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga >900 Ωm dengan penetrasi kedalaman ± 52 meter.



Gambar 4.10 Batas profil nikel laterit lintasan N01

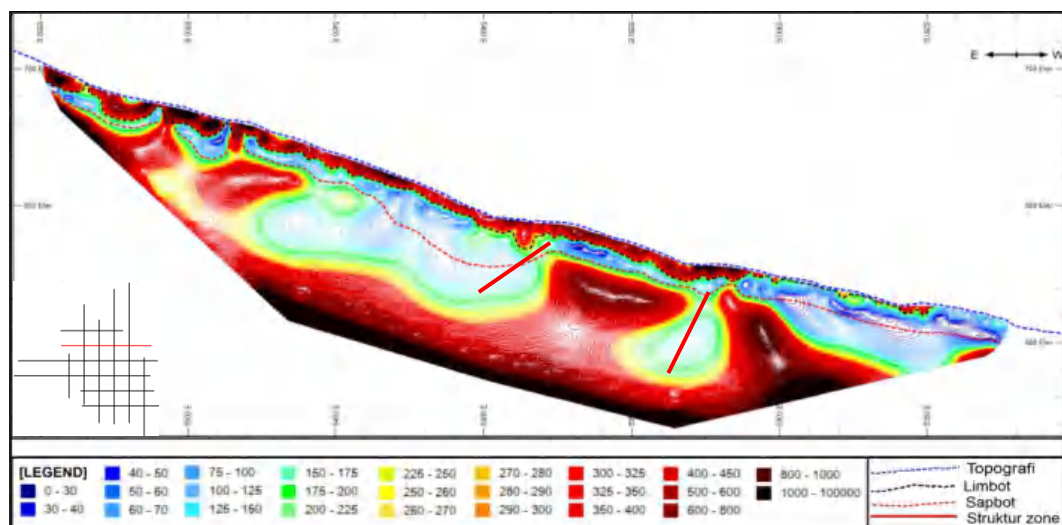
Pada gambar 4.10 garis putus-putus warna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna enunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan N01 memiliki nilai *medium to high* dengan rentan nilai 240 Ωm -520 Ωm . Zona saprolite resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 55 Ωm -300 Ωm . Zona



bedrock memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 135 Ωm -800 Ωm . Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Sedangkan pada zona saprolite terdapat indikasi *boulder* yang memiliki nilai resistivitas tinggi.

8. Lintasan N02

Lintasan N02 membentang dari arah timur-barat sepanjang 395 meter dengan spasi elektroda 5 meter. Gambar 4.11 menampilkan penampang resistivitas 2D hasil pengolahan data, dengan variasi nilai resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga >900 Ωm dengan penetrasi kedalaman 65 meter.



Gambar 4.11 Batas profil nikel laterit lintasan N02

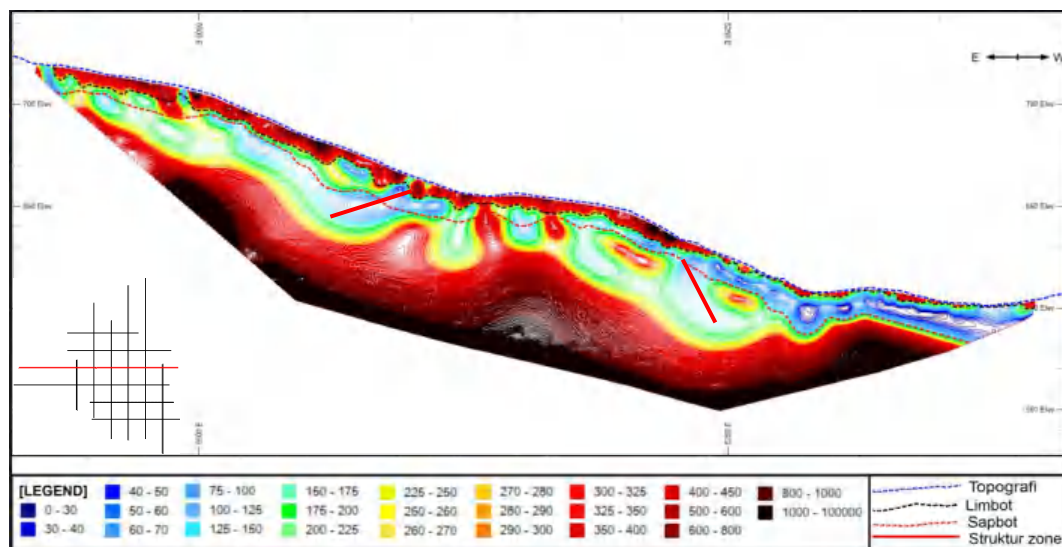
Pada gambar 4.11 garis putus-putus berwarna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan N02 memiliki nilai resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai 250 Ωm -770 Ωm . Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 20 Ωm -360 Ωm . Zona



bedrock memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 120 Ωm -950 Ωm . Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Adapun nilai resistivitas yang sangat tinggi di zona limonit dan saprolit mengindikasikan adanya kandungan silika dan boulder.

9. Lintasan N03

Lintasan N03 memiliki panjang 553 meter dan membentang dari arah timur-barat dengan spasi elektroda 7 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.12 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga >900 Ωm dengan penetrasi kedalaman 73 meter.



Gambar 4.12 Batas profil nikel laterit lintasan N03

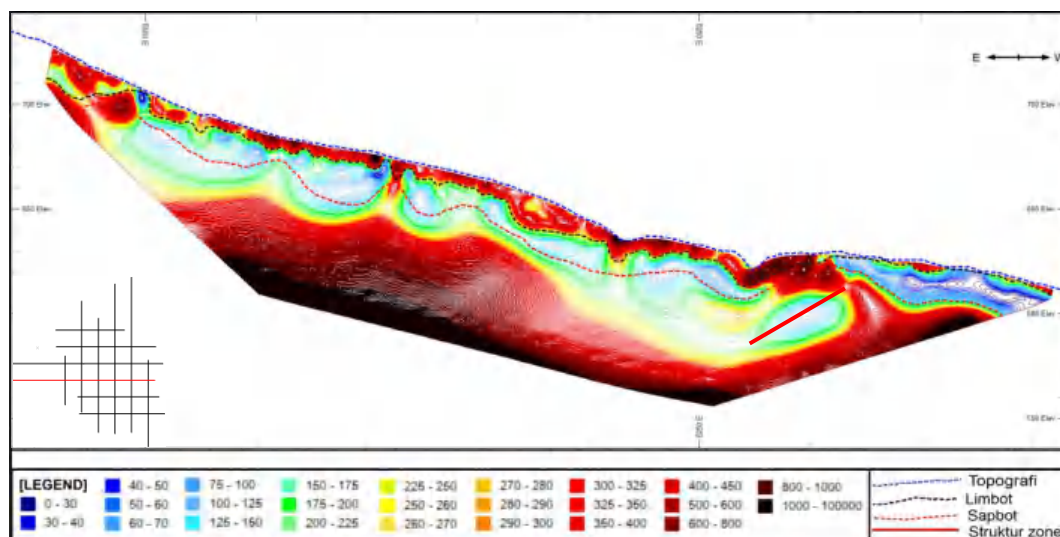
Gambar 4.12 menampilkan batas profile nikel laterit yang dilambangkan oleh garis putus-putus berwarna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus warna menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan N03 memiliki nilai



resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai 250 Ωm -740 Ωm . Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 30 Ωm -260 Ωm . Zona *bedrock* memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 150 Ωm -900 Ωm . Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Sedangkan nilai resistivitas yang sangat tinggi di zona limonit dan saprolit mengindikasikan adanya kandungan silika dan *boulder*.

10. Lintasan N04

Lintasan N04 membentang dari arah timur-barat dengan panjang 553 meter dengan spasi elektroda 7 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.13 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga >900 Ωm dengan penetrasi kedalaman 73 meter.



Gambar 4.13 Batas profil nikel laterit lintasan N04

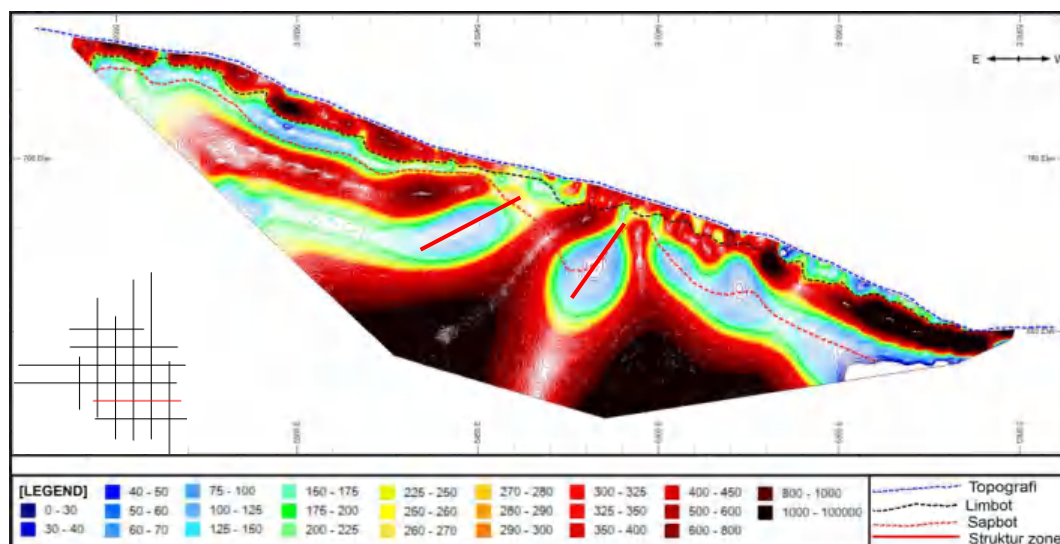


us-putus berwarna biru pada gambar 4.13 menunjukkan batas topografi, n garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis us warna merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan N04

memiliki nilai resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai 250 Ωm -680 Ωm . Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 30 Ωm -250 Ωm . Zona *bedrock* memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 150 Ωm -980 Ωm . Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Sedangkan nilai resistivitas yang sangat tinggi di zona limonit dan saprolit mengindikasikan adanya kandungan silika dan *boulder*.

11. Lintasan N05

Lintasan N05 membentang dari arah timur-barat sepanjang 315 meter dengan spasi elektroda 5 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.14 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga >900 Ωm dengan penetrasi kedalaman 52 meter.



Gambar 4.14 Batas profil nikel laterit lintasan N05

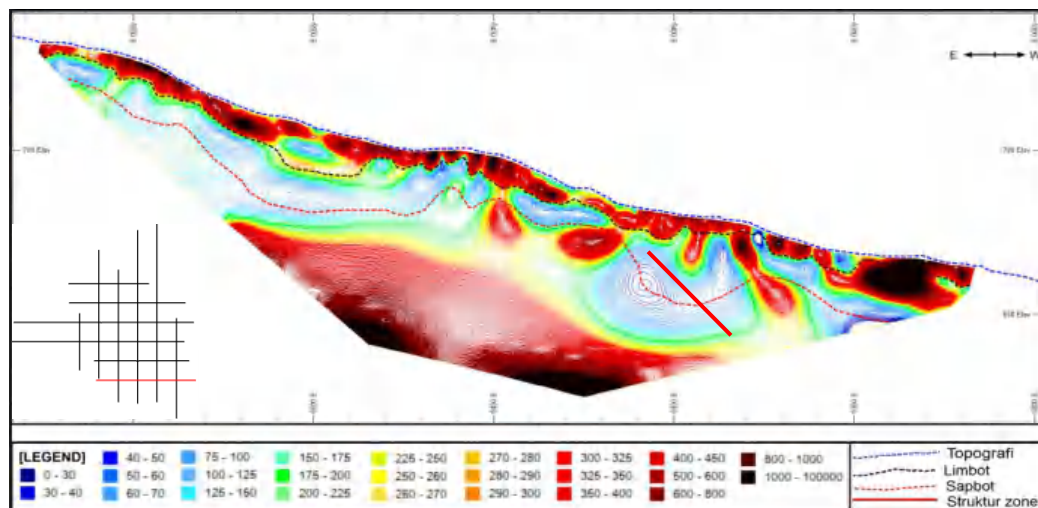


4.14 menampilkan garis putus-putus berwarna biru yang menunjukkan , garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis us warna merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan N05

memiliki nilai resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai 200 Ωm -700 Ωm . Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 30 Ωm -480 Ωm . Zona *bedrock* memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 150 Ωm -880 Ωm . Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Sedangkan nilai resistivitas yang sangat tinggi di zona limonit dan saprolit mengindikasikan adanya kandungan silika dan *boulder*.

12. Lintasan N06

Lintasan N06 membentang dari arah timur-barat sepanjang 315 meter dengan spasi elektroda 5 meter. Hasil pengukuran dilapangan diolah hingga menghasilkan penampang 2D seperti gambar 4.15 yang memiliki variasi nilai resistivitas bawah permukaan 10 Ωm hingga >900 Ωm dengan penetrasi kedalaman 52 meter.



Gambar 4.15 Batas profil nikel laterit lintasan N06

Pada gambar 4.15 garis putus-putus berwarna biru menunjukkan topografi, garis putus-putus warna hitam menunjukkan limonit *bottom*, dan garis putus-putus merah menunjukkan saprolite *bottom*. Zona limonit lintasan N06 memiliki

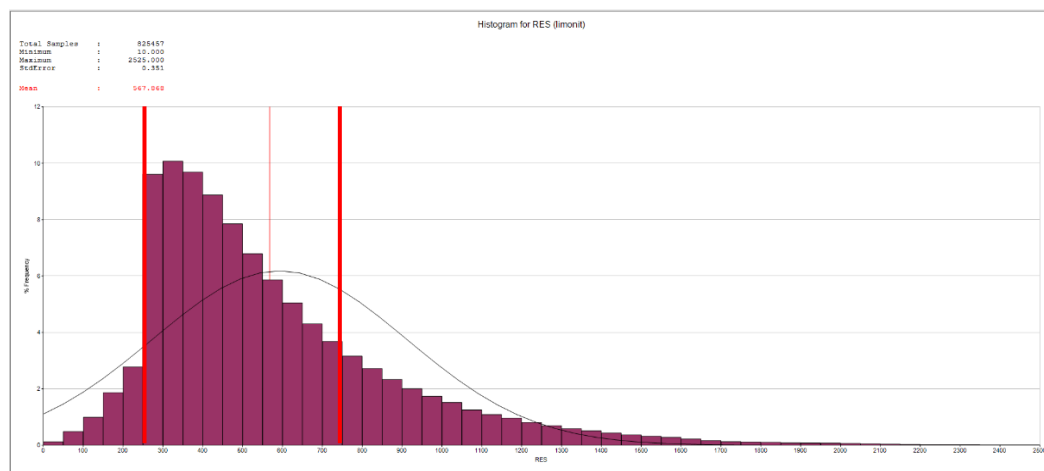


nilai resistivitas *medium to high* dengan rentan nilai 240 Ωm -720 Ωm . Zona saprolite memiliki resistivitas *low to medium* dengan rentan nilai 30 Ωm -480 Ωm . Zona *bedrock* memiliki resistivitas *low to high* dengan rentan nilai 150 Ωm -900 Ωm . Nilai resistivitas rendah di zona *bedrock* diakibatkan karena adanya struktur rekahan pada batuan dasar yang memungkinkan air masuk ke celah batuan sehingga bersifat konduktif. Pada zona limonit dan saprolit terdapat nilai resistivitas sangat tinggi yang mengindikasikan adanya kandungan silika dan *boulder*.

IV. 3 Analisis Nilai Resistivitas Profil Nikel Laterit

Hasil interpretasi 12 lintasan ERT menghasilkan 3 zona profile nikel laterit yang masing-masing dianalisis untuk mengetahui trend nilai resistivitas pada zona limonit, saprolit dan *bedrock*.

- **Zona limonit**



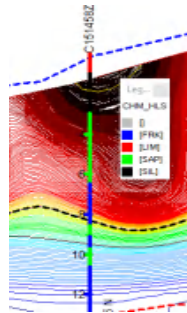
Gambar 4.16 Histogram nilai resistivitas zona limonit

Nilai resistivitas zona limonit dari 12 lintasan ERT ditampilkan pada histogram



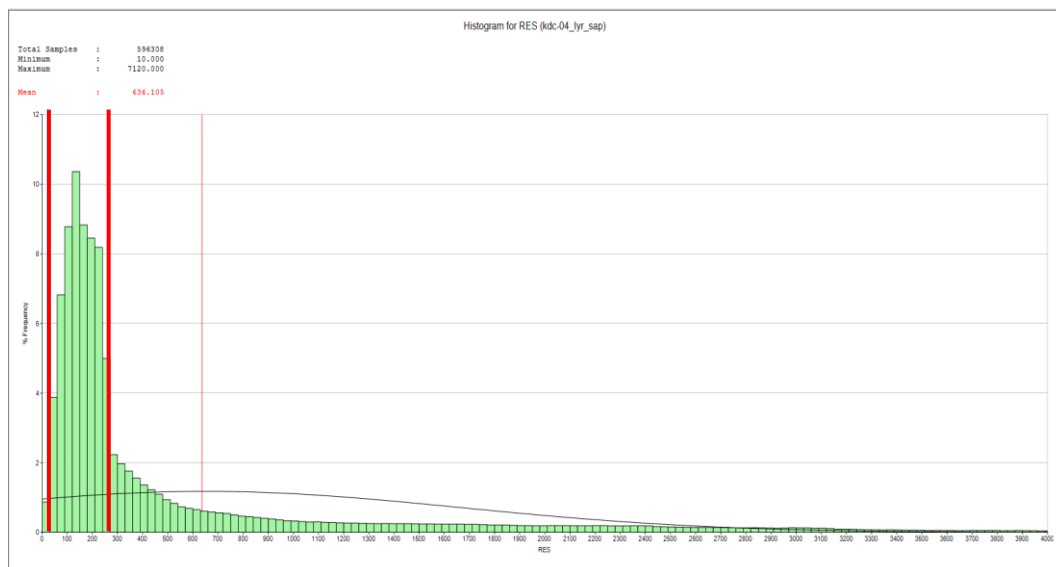
ilai minimum 10 Ωm dan maksimum 2525 Ωm seperti pada gambar 4.16. entan nilai ini tidak seluruhnya menggambarkan nilai resistivitas zona arena adanya beberapa faktor, salah satunya ketersediaan silika yang

menyebabkan nilai resistivitas yang sangat tinggi, seperti yang ditunjukkan oleh data bor pada gambar 4.17. Trend nilai resistivitas ditentukan dari histogram yang menunjukkan frekuensi nilai resistivitas yang tinggi. Oleh karena itu nilai resistivitas yang diperoleh untuk zona limonit daerah penelitian adalah 250 Ω m-750 Ω m.



Gambar 4.17 kandungan silika di zona limonit

- **Zona Saprolit**



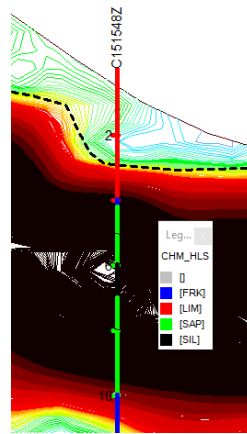
Gambar 4.18 Histogram nilai resistivitas zona saprolit

Gambar 4.18 menampilkan histogram nilai resistivitas zona saprolit dari 12 lintasan ERT dengan nilai minimum 10 Ω m dan maksimum 7120 Ω m. Namun rentan nilai



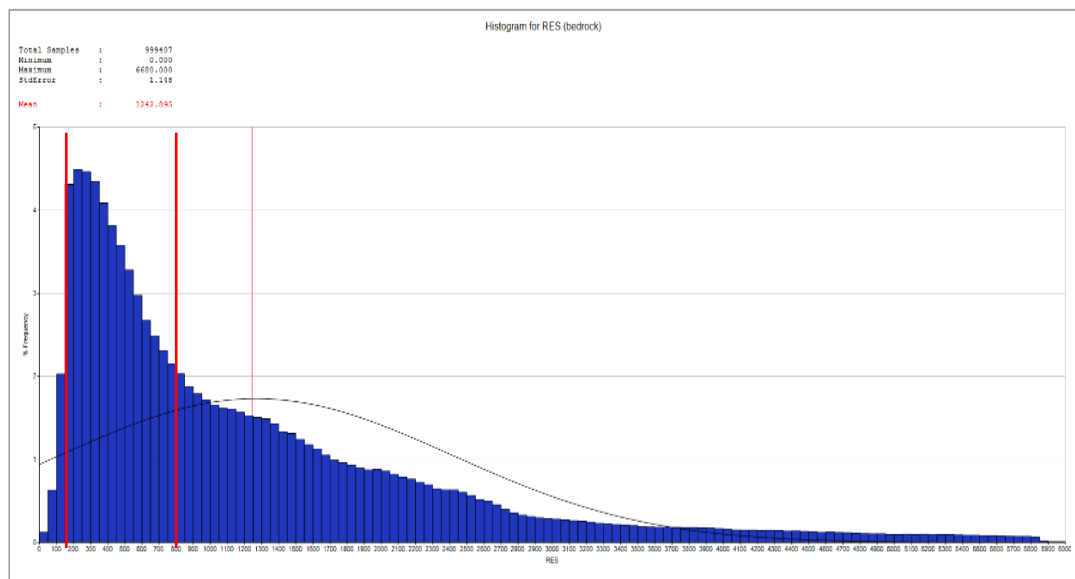
seluruhnya menggambarkan nilai resistivitas zona saprolit karena adanya faktor seperti ketersediaan boulder dan silika yang menyebabkan nilai resistivitas yang sangat tinggi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.19.

Berdasarkan histogram pada gambar 4.18 diperoleh nilai resistivitas zona saprolit daerah penelitian adalah 30 Ω m-350 Ω m.



Gambar 4.19 kandungan silika di zona saprolit

- **Zona Bedrock**

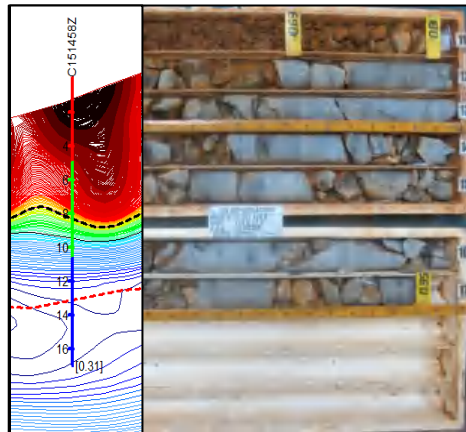


Gambar 4.20 Histogram nilai resistivitas zona *bedrock*

Gambar 4.20 menampilkan histogram nilai resistivitas zona *bedrock* dari 12 lintasan ERT dengan nilai minimum 0 Ω m dan maksimum 6680 Ω m. Nilai resistivitas yang

ada *bedrock* dipengaruhi adanya struktur seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.21. Dengan demikian diperoleh rentang nilai resistivitas zona *bedrock* daerah penelitian adalah 150 Ω m-800 Ω m.



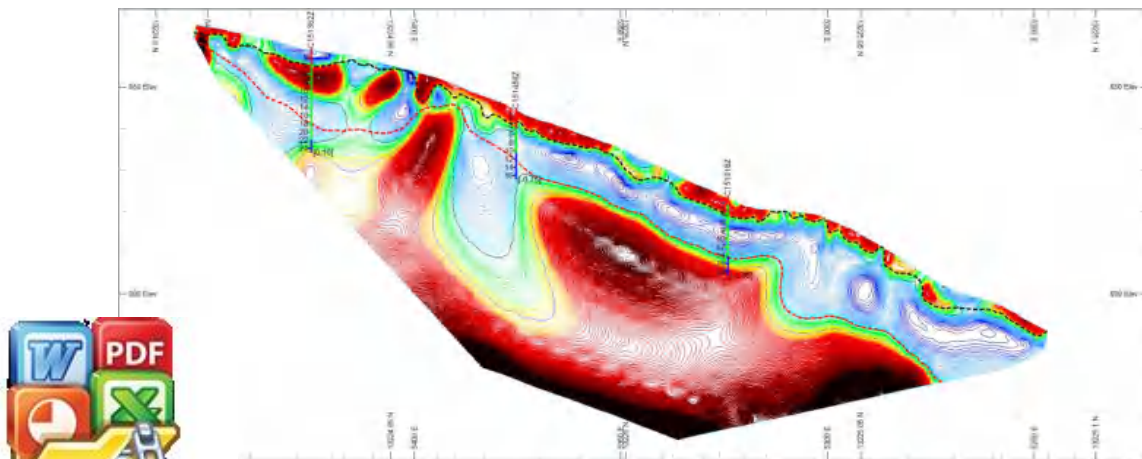


Gambar 4.21 struktur di zona bedrock

IV. 4 Penentuan Kedalaman Profile Nikel Laterit

Hasil interpretasi profil nikel laterit berdasarkan nilai resistivitas, di *overlay* dengan data bor untuk melihat perbandingan kedalam profile nikel laterit berdasarkan interpretasi ERT dan berdasarkan data bor, serta melihat data bor yang mengalami *over drill* dan *under drill* terhadap data resistivitas. Penentuan *over drill* dan *under drill* dilihat dari EOH antara bor aktual dan bor bayangan yang menunjukkan kedalaman profil laterit berdasarkan resistivitas di titik bor yang ada.

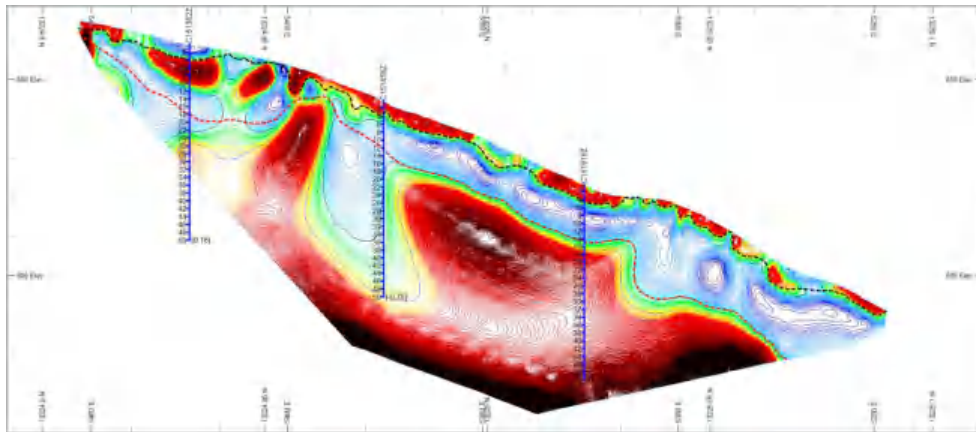
Berikut ini ditampilkan contoh lintasan ERT, yaitu lintasan N01 yang dioverlay dengan data bor. Overlay keseluruhan lintasan akan ditampilkan pada lampiran 4.



Gambar 4. 22 Overlay lintasan N01 dan Data Bor aktual



Gambar 4.22 menunjukkan penampang resistivitas lintasan E02 yang dioverlay dengan data bor aktual. Pada lintasan tersebut terdapat 3 titik bor dengan jarak antar titik bor 50 meter. Pada titik bor C151362Z, limonit *bottom* berada pada kedalaman 4 meter, saprolit *bottom* pada kedalaman 22 meter, dan EOH pada kedalaman 25 meter. Pada titik bor C151458Z, limonit *bottom* berada pada kedalaman 5 meter, saprolit *bottom* pada kedalaman 10 meter, dan EOH pada kedalaman 17 meter. Pada titik bor C151918Z, limonit *bottom* berada pada kedalaman 2 meter, saprolit *bottom* pada kedalaman 14 meter, dan EOH pada kedalaman 19 meter.



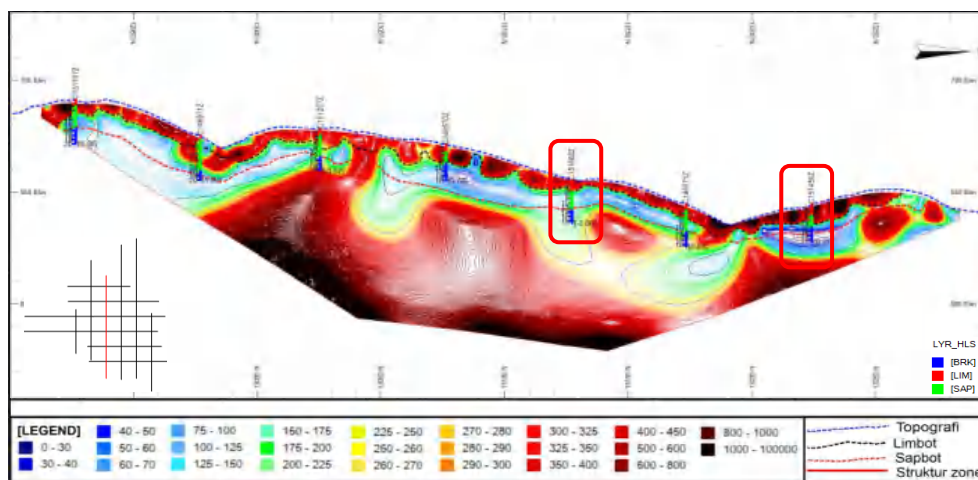
Gambar 4. 23 Overlay lintasan N01 dan Data Bor bayangan

Untuk mengetahui kedalaman profile nikel laterit berdasarkan interpretasi resistivitas dibuatkan bor bayangan sesuai dengan titik bor aktual, seperti yang ditampilkan pada gambar 4.23. Pada titik bor C151362Z saprolit *bottom* berada pada kedalaman 4 meter, limonit *bottom* pada kedalaman 18 meter, dan EOH ditentukan dengan menambahkan 2 meter pada saprolit *bottem* sehingga EOH sedalam 20 meter. Pada titik bor C151458Z saprolit *bottom* berada pada kedalaman limonit *bottom* pada kedalaman 12 meter, dan EOH pada kedalaman 14 da titik bor C151918Z saprolit *bottom* berada pada kedalaman 4 meter, *ottom* pada kedalaman 14 meter, dan EOH pada kedalaman 16 meter.



IV.4.1 Penentuan *Over Drill*

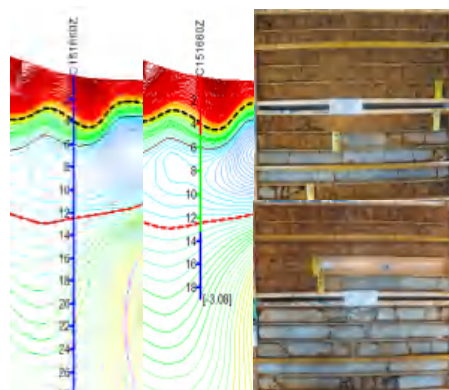
Over drill terjadi saat pengeboran terus dilakukan pada zona *bedrock* sedalam 5 meter untuk memastikan bahwa telah mencapai zona *bedrock* karena tidak adanya gambaran awal saat melakukan pengeboran. *Over drill* menyebabkan kelebihan biaya pada proses pengeboran. Berikut ini contoh data bor yang *over drill* terhadap data resistivitas yang berada pada lintasan E04.



Gambar 4.24 *Overlay* lintasan E04 dan data bor

Pada gambar 4.24, penampang 2D lintasan E04 *overlay* dengan 7 data bor dengan jumlah titik bor yang *over drill* sebanyak 6 titik bor. Berikut ini contoh bor yang mengalami *over drill* yaitu:

- **Titik Bor C151660Z**

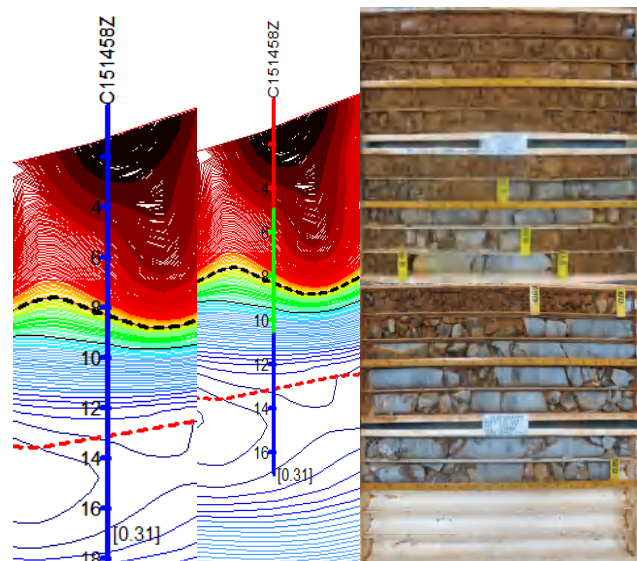


Gambar 4.25 Titik Bor C151660Z



Gambar 4.25 menampilkan perbandingan kedalaman interpretasi ERT dan interpretasi data bor pada titik bor C151660Z. Pada titik bor C151660Z limonit *bottom* berdasarkan interpretasi ERT berada pada kedalaman 4 meter, sedangkan berdasarkan data bor, limonit *bottom* berada pada kedalaman 5 meter. Saprolit *bottom* berdasarkan interpretasi ERT berada pada kedalaman 12 meter, sedangkan berdasarkan data bor limonit *bottom* berada pada kedalaman 13 meter. Penentuan *End of hole* (EOH) dari interpretasi ERT dilakukan dengan mengambil kedalaman saprolite *bottom* ditambah 2 meter, sehingga EOH interpretasi ERT adalah 14 meter, sedangkan EOH data bor aktual adalah 19 meter. Hal ini menunjukkan titik bor C151660Z mengalami *over drill* sedalam 5 meter.

- **Titik Bor C151458Z**



Gambar 4.26 Titik Bor C151458Z

Berdasarkan gambar 4.26, pada titik bor C151458Z limonit *bottom* interpretasi ERT

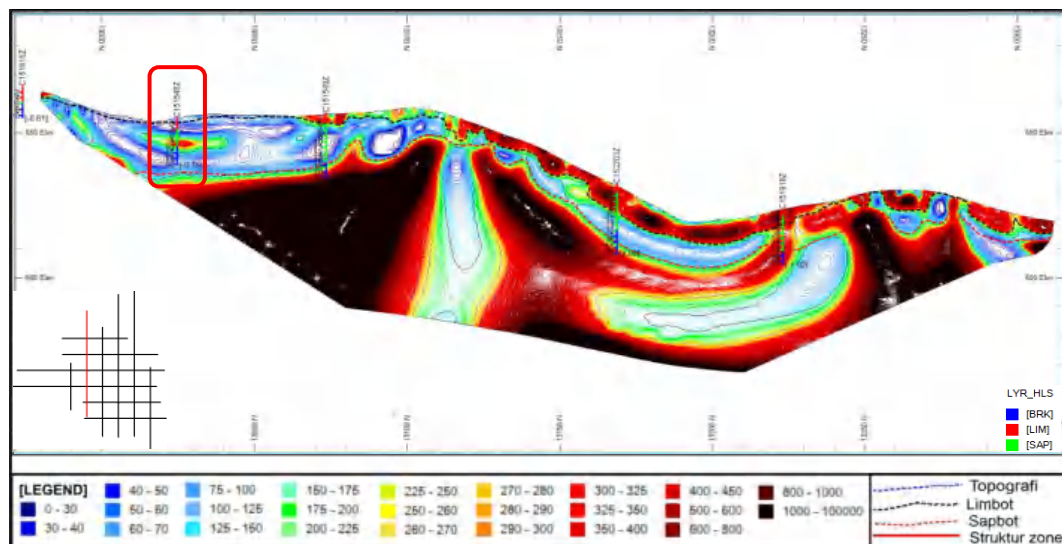


ada kedalaman 8 meter, sedangkan berdasarkan data bor berada pada kedalaman 5 meter. Saprolit *bottom* berdasarkan interpretasi ERT berada pada

kedalaman 13 meter, sedangkan berdasarkan data bor berada pada kedalaman 11 meter. *End of hole* (EOH) interpretasi resistivitas adalah 15 meter, sedangkan EOH titik bor aktual adalah 17 meter. Hal ini menunjukkan titik bor C151458Z mengalami *over drill* sedalam 2 meter.

IV.4.2 Penentuan *Under Drill*

Under drill terjadi saat pengeboran dihentikan ketika mengenai batuan masif pada zona saprolit karena menganggap telah mencapai *bedrock*. Namun berdasarkan interpretasi resistivitas batuan tersebut merupakan *boulder* yang berada pada zona saprolite. *Under drill* menyebabkan kehilangan data sehingga dapat menyebabkan penentuan profil nikel laterit tidak akurat. Berikut ini contoh data bor yang *under drill* terhadap data ERT yang berada pada lintasan E03.



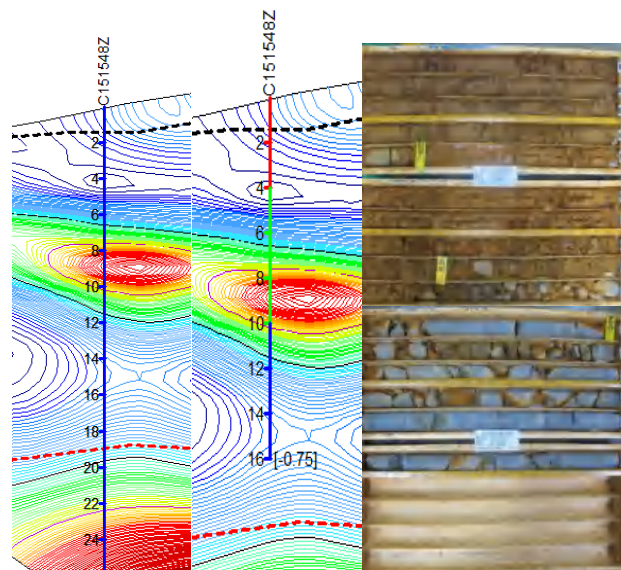
Gambar 4.27 *Overlay* lintasan E03 dan data bor

Pada gambar 4.27, penampang 2D lintasan E03 *overlay* dengan 4 data bor dengan

ata bor yang *under drill* sebanyak 1 titik bor, yaitu titik bor C151548Z.



- **Titik Bor C151548Z**



Gambar 4.28 Titik Bor C151548Z

Pada titik bor C151548Z yang terlihat pada gambar 4.28, limonit *bottom* interpretasi ERT berada pada kedalaman 2 meter, sedangkan berdasarkan data bor berada pada kedalaman 4 meter. Saprolit *bottom* berdasarkan interpretasi ERT berada pada kedalaman 19 meter, sedangkan berdasarkan data bor berada pada kedalaman 10 meter. EOH interpretasi resistivitas berada pada kedalaman 21 meter, sedangkan EOH titik bor aktual adalah 16 meter. Hal ini menunjukkan titik bor C151548Z mengalami *under drill* sedalam 3 meter.

IV.4.3 Perbandingan Interpretasi ERT dan Interpretasi Data Bor

Dilakukan analisis perbandingan profil nikel laterit berdasarkan interpretasi ERT dan interpretasi data bor, untuk melihat perbedaan kedalaman limonit *bottom*, saprolite *bottom*, dan *end of hole* dari kedua interpretasi. Perbandingan kedalaman

ottom ditampilkan pada tabel 4.1 berikut.



Tabel 4. 1 Perbandingan kedalaman limonit *bottom* berdasarkan interpretasi ERT dan interpretasi data bor

No	BHID	Line	LIMBOT_RES	LIMBOT_LYR	DIFF(LYR-RES)	Error	Note
1	C151661Z	e02	1	2	1	0.50	Match
2	C146778Z	e02	8	4	4	1.00	No
3	C151363Z	e02	3	3	0	0.00	Match
4	C151548Z	e03	2	4	2	0.50	Match
5	C151549Z	e03	4	4	0	0.00	Match
6	C152203Z	e03	5	3	2	0.67	Match
7	C151918Z	e03	4	2	2	1.00	Match
8	C151737Z	e04	6	3	3	1.00	No
9	C146971Z	e04	5	2	3	1.50	No
10	C151257Z	e04	4	2	2	1.00	Match
11	C146570Z	e04	6	4	2	0.50	Match
12	C151660Z	e04	4	5	1	0.20	Match
13	C146571Z	e04	6	3	3	1.00	No
14	C151458Z	e04	8	5	3	0.60	No
15	C151361Z	e05	2	6	4	0.67	No
16	C151259Z	e05	9	10	1	0.10	Match
17	C152202Z	e05	6	2	4	2.00	No
18	C151258Z	e05	4	2	2	1.00	Match
19	C368088	e05	4	2	2	1.00	Match
20	C151362Z	e05	6	4	2	0.50	Match
21	C151459Z	e05	2	1	1	1.00	Match
22	C368089	e06	8	11	3	0.27	No
23	C357174Z	e06	9	11	2	0.18	Match
24	C146774Z	e06	8	8	0	0.00	Match
25	C151260Z	e06	5	5	0	0.00	Match
26	C146973Z	e06	4	2	2	1.00	Match
27	C151917Z	e06	8	14	6	0.43	No
28	C146572Z	e06	1	1	0	0.00	Match
29	C146974Z	n02	2	4	2	0.50	Match

Perhitungan selisih kedalam limonit *bottom* berdasarkan data ERT dan data bor dilakukan untuk melihat seberapa akurat hasil interpretasi resistivitas terhadap data

ih \pm 2 meter dianggap *matching* terhadap data bor sedangkan selisih yang 2 meter dianggap tidak *matching*. Dari 29 data bor yang *overlap* terhadap



lintasan ERT sebanyak 20 data bor yang *matching*, dan 9 data bor yang tidak *matching* seperti yang ditampilkan pada tabel 4.1.

Tabel 4. 2 Perbandingan kedalaman saprolit *bottom* berdasarkan interpretasi ERT dan interpretasi data bor

No	BHID	Line	SAPBOT_RES	SAPBOT_LYR	DIFF(LYR-RES)	Error	Note
1	C151661Z	e02	8	10	2	0.20	Match
2	C146778Z	e02	16	15	1	0.07	Match
3	C151363Z	e02	7	5	2	0.40	Match
4	C151548Z	e03	19	10	9	0.90	No
5	C151549Z	e03	18	17	1	0.06	Match
6	C152203Z	e03	20	16	4	0.25	No
7	C151918Z	e03	14	14	0	0.00	Match
8	C151737Z	e04	12	12	0	0.00	Match
9	C146971Z	e04	18	16	2	0.13	Match
10	C151257Z	e04	12	12	0	0.00	Match
11	C146570Z	e04	20	8	12	1.50	No
12	C151660Z	e04	12	13	1	0.08	Match
13	C146571Z	e04	12	12	0	0.00	Match
14	C151458Z	e04	13	11	2	0.18	Match
15	C151361Z	e05	10	12	2	0.17	Match
16	C151259Z	e05	30	30	0	0.00	Match
17	C152202Z	e05	16	26	10	0.38	No
18	C151258Z	e05	10	10	0	0.00	Match
19	C368088	e05	18	16	2	0.13	Match
20	C151362Z	e05	16	22	6	0.27	No
21	C151459Z	e05	13	6	7	1.17	No
22	C368089	e06	19	22	3	0.14	No
23	C357174Z	e06	18	14	4	0.29	No
24	C146774Z	e06	17	16	1	0.06	Match
25	C151260Z	e06	12	9	3	0.33	No
26	C146973Z	e06	12	5	7	1.40	No
27	C151917Z	e06	23	23	0	0.00	Match
	46572Z	e06	11	11	0	0.00	Match
	46974Z	n02	9	8	1	0.13	Match



Pada interpretasi batas saprolit, dari 29 data bor yang *overlap* terhadap lintasan ERT sebanyak 19 data bor yang *matching*, dan 10 data bor yang tidak *matching* seperti yang ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.3 Perbandingan kedalaman End of Hole (EOH) berdasarkan interpretasi ERT dan interpretasi data bor

No	BHID	Line	EOH_RES	EOH_LYR	DIFF(LYR-RES)	Error	Note
1	C151661Z	e02	10	16	6	0.38	Over drill
2	C146778Z	e02	18	20	2	0.10	Over drill
3	C151363Z	e02	9	11	2	0.18	Over drill
4	C151548Z	e03	21	16	5	0.31	Under drill
5	C151549Z	e03	20	22	2	0.09	Over drill
6	C152203Z	e03	22	24	2	0.08	Over drill
7	C151918Z	e03	16	19	3	0.16	Over drill
8	C151737Z	e04	14	20	6	0.30	Over drill
9	C146971Z	e04	20	20	0	0.00	Match
10	C151257Z	e04	14	19	5	0.26	Over drill
11	C146570Z	e04	22	16	6	0.38	Under drill
12	C151660Z	e04	14	19	5	0.26	Over drill
13	C146571Z	e04	14	19	5	0.26	Over drill
14	C151458Z	e04	15	17	2	0.12	Over drill
15	C151361Z	e05	12	18	6	0.33	Over drill
16	C151259Z	e05	32	34	2	0.06	Over drill
17	C152202Z	e05	18	32	14	0.44	Over drill
18	C151258Z	e05	12	25	13	0.52	Over drill
19	C368088	e05	20	25	5	0.20	Over drill
20	C151362Z	e05	18	23	5	0.22	Over drill
21	C151459Z	e05	15	15	0	0.00	Match
22	C368089	e06	21	27	6	0.22	Over drill
23	C357174Z	e06	20	21	1	0.05	Over drill
24	C146774Z	e06	19	25	6	0.24	Over drill
25	C151260Z	e06	14	15	1	0.07	Over drill
26	C146973Z	e06	14	13	1	0.08	Under drill
27	C151917Z	e06	25	27	2	0.07	Over drill
	16572Z	e06	13	17	4	0.24	Over drill
	16974Z	n02	11	15	4	0.27	Over drill



Perhitungan selisih kedalam EOH berdasarkan data resistivitas dan data bor dilakukan untuk melihat titik bor yang *over drill* dan *under drill*. Penentuan EOH berdasarkan interpretasi resistivitas dilakukan dengan menambah saprolite *bottom* sedalam 2 meter. Dari 29 titik bor yang *overlap* terhadap lintasan ERT sebanyak 2 titik bor yang *matching*, 3 titik bor yang *under drill* dan sebanyak 24 titik bor yang *over drill* seperti yang ditampilkan pada tabel 4.3

IV.4.4 Perbandingan Biaya Pengeboran

Biaya pengeboran daerah Sorowako sebesar 40 USD per meter. Sedangkan biaya pengukuran ERT sebesar 2 USD per meter. Panjang lintasan ERT untuk 12 lintasan ditampilkan pada tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Panjang lintasan ERT

No	ID Line	Panjang (m)
1	E02	250
2	E03	395
3	E04	441
4	E05	553
5	E06	553
6	E07	315
7	N01	315
8	N02	395
9	N03	553
10	N04	553
11	N05	315
12	N06	315
Jumlah		4953

Total panjang lintasan ERT sebesar 4953 meter, sehingga biaya pengukuran ERT:

$$\text{Biaya ERT} = \text{total panjang} \times \text{biaya ERT}$$

$$= 4953 \times 2$$

$$= 9906$$

aka akuisisi data ERT sebesar 9.906 USD



Kedalaman pengeboran aktual untuk 29 titik bor ditampilkan pada tabel 4.5, dengan jumlah kedalaman pengeboran 590 meter.

Tabel 4.5 Kedalaman pengeboran aktual

No	BHID	EOH_LYR (m)
1	C151661Z	16
2	C146778Z	20
3	C151363Z	11
4	C151548Z	16
5	C151549Z	22
6	C152203Z	24
7	C151918Z	19
8	C151737Z	20
9	C146971Z	20
10	C151257Z	19
11	C146570Z	16
12	C151660Z	19
13	C146571Z	19
14	C151458Z	17
15	C151361Z	18
16	C151259Z	34
17	C152202Z	32
18	C151258Z	25
19	C368088	25
20	C151362Z	23
21	C151459Z	15
22	C368089	27
23	C357174Z	21
24	C146774Z	25
25	C151260Z	15
26	C146973Z	13
27	C151917Z	27
28	C146572Z	17
29	C146974Z	15
Jumlah		590



alaman titik bor aktual sebesar 590 meter, dengan biaya pengeboran 40 meter sehingga biaya pengeboran aktual keseluruhan adalah:

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya drill}_{act} &= \text{total kedalaman} \times \text{biaya drilling} \\
 &= 590 \times 40 \\
 &= 23600
 \end{aligned}$$

Jadi biaya pengeboran aktual sebesar 23.600 USD.

Adapun kedalaman pengeboran dengan adanya *guidance* dari data ERT ditampilkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Kedalaman pengeboran berdasarkan data ERT

No	BHID	EOH_RES (m)
1	C151661Z	10
2	C146778Z	18
3	C151363Z	9
4	C151548Z	21
5	C151549Z	20
6	C152203Z	22
7	C151918Z	16
8	C151737Z	14
9	C146971Z	20
10	C151257Z	14
11	C146570Z	22
12	C151660Z	14
13	C146571Z	14
14	C151458Z	15
15	C151361Z	12
16	C151259Z	32
17	C152202Z	18
18	C151258Z	12
19	C368088	20
20	C151362Z	18
21	C151459Z	15
22	C368089	21
23	C357174Z	20
24	C146774Z	19
25	C151260Z	14
26	C146973Z	14
27	C151917Z	25
28	C146572Z	13
29	C146974Z	11
Jumlah		493



Total kedalaman titik bor berdasarkan data ERT sebesar 493 meter, dengan biaya pengeboran per meter sebesar 40 USD, sehingga biaya pengeboran keseluruhan adalah:

$$\begin{aligned} \text{Biaya drill}_{RES} &= \text{total kedalaman} \times \text{biaya drilling} \\ &= 493 \times 40 \\ &= 19720 \end{aligned}$$

Jadi, biaya pengeboran dengan adanya *guidance* dari data ERT adalah 19.720 USD.

Perbedaan biaya pengeboran aktual dan pengeboran berdasarkan ERT yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Reduce Cost} &= \text{Biaya drilling aktual} - \text{biaya drilling berdasarkan ERT} \\ &= 23600 - 19720 \\ &= 3880 \end{aligned}$$

Biaya yang bisa dikurangi dengan menjadikan data ERT sebagai *guidance* dalam melakukan pengeboran pada daerah penelitian dengan jumlah data bor sebanyak 29 adalah sebesar 3.880 USD. Hal ini membuktikan bahwa data ERT selain dapat digunakan untuk mengikat data bor dalam menentukan profile nikel laterit juga dapat digunakan sebagai panduan dalam pengeboran dan membantu mengoptimalkan pengeboran agar tidak terjadi kelebihan biaya yang tidak perlu.

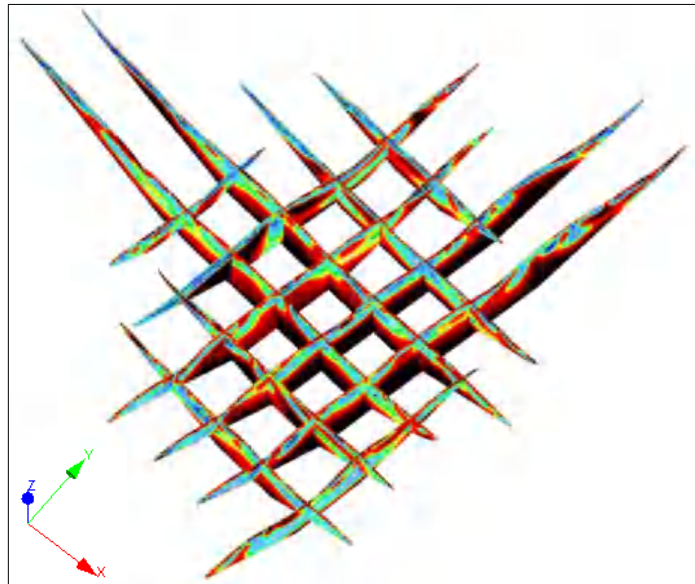
IV. 5 Perhitungan Volume

Hasil interpretasi profile nikel laterit dapat digunakan untuk menghitung volume zona limonit dan saprolit. Penampang resistivitas dipotong berdasarkan *boundary*

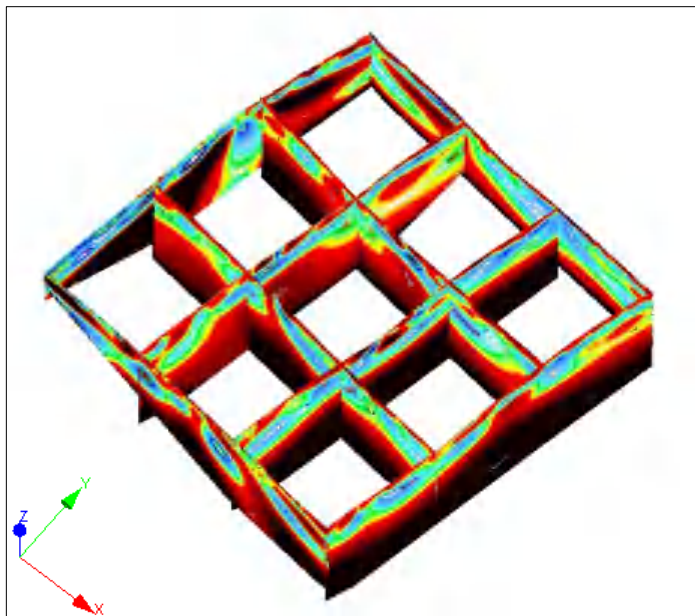
persegi yang mewakili lintasan ERT yang *overlay* dengan titik bor agar



daerah perhitungan volume mencakup titik bor di setiap ujung lintasan sehingga interpretasi ERT dan interpretasi data bor memiliki luasan area yang sama.



Gambar 4.29 *Cross section* semua lintasan

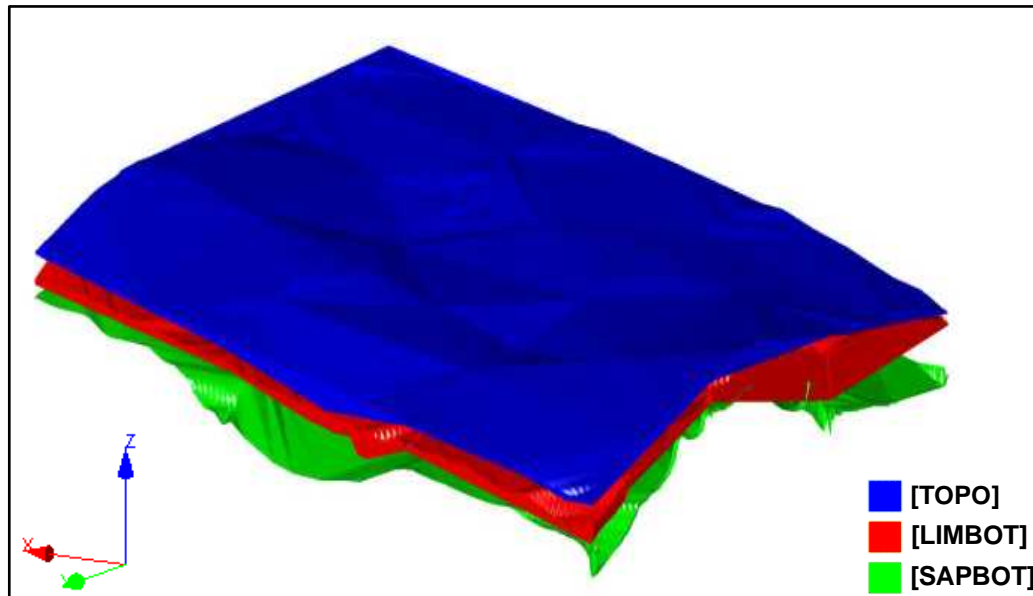


Gambar 4.30 Area perhitungan volume

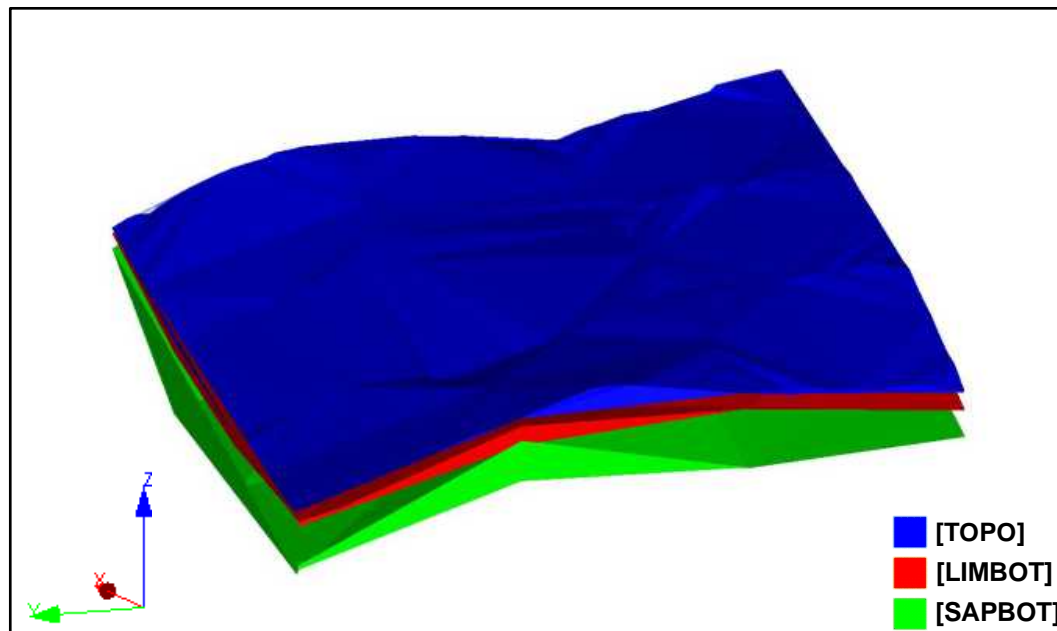


4.29 merupakan *cross section* semua lintasan, sedangkan gambar 4.30 in area yang telah dipotong dengan luas area 22.742 m^2 . Selanjutny, hasil

interpretasi limonit *bottom*, saprolite *bottom*, dan topografi masing-masing dibuatkan *wireframe* untuk menghitung ketebalan profil nikel laterit.



Gambar 4.31 Wireframe interpretasi ERT



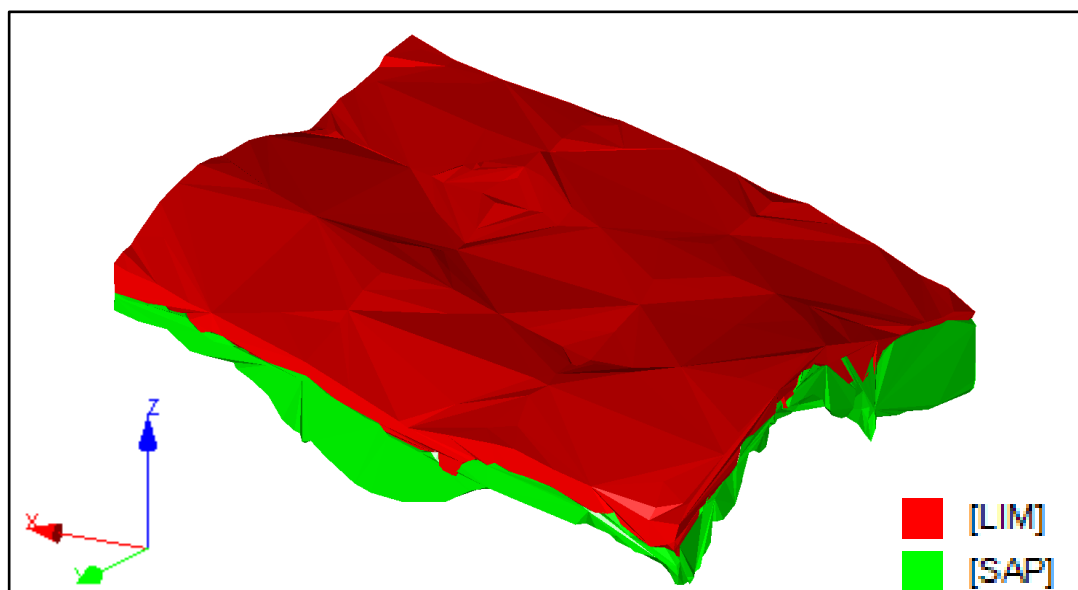
Gambar 4.32 Wireframe interpretasi data bor



4.31 merupakan *wireframe* topografi, limonit *bottom*, dan saprolit bottom an interpretasi ERT. Sedangkan gambar 4.32 merupakan *wireframe*, limonit *bottom*, dan saprolit bottom berdasarkan interpretasi data bor.

Berdasarkan gambar tersebut, warna biru merupakan *wireframe* topografi, warna merah merupakan *wireframe* limonit *bottom*, dan warna hijau merupakan *wireframe* saprolit *bottom*.

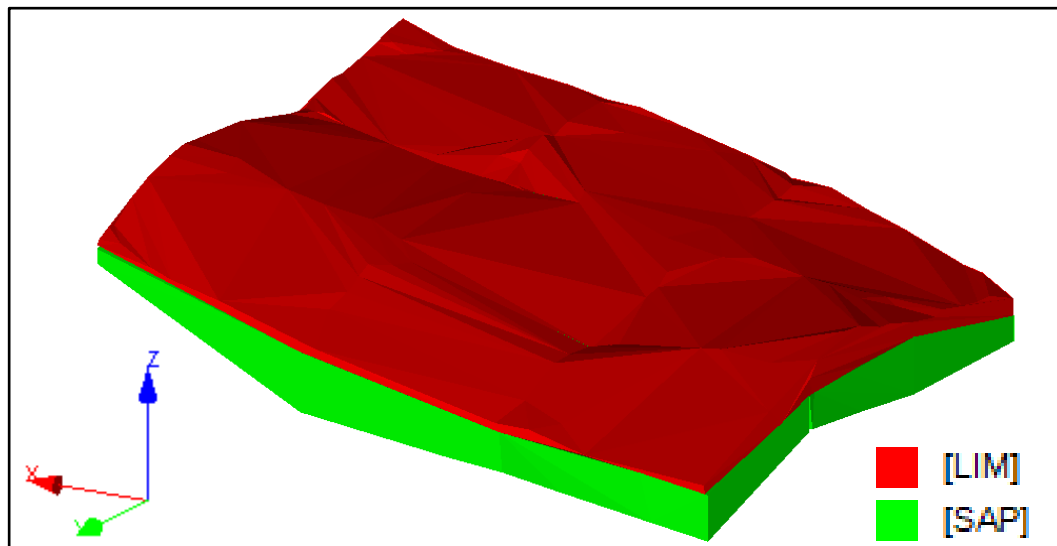
Dari *wireframe* ini kemudian dilakukan *cut and fill* pada software datamine untuk memperoleh volume limonit dan saprolit. Volume limonit diperoleh dari *cut and fill* antara *wireframe* topografi dan *wireframe* limonit *bottom*. Sedangkan volume saprolit diperoleh dari *cut and fill* antara *wireframe* limonit *bottom* dan *wireframe* saprolit *bottom*.



Gambar 4.33 Hasil *Cut and Fill* interpretasi ERT

Gambar 4.33 merupakan hasil *cut and fill* dari interpretasi ERT. Berdasarkan gambar tersebut, warna merah menunjukkan zona limonit dengan ketebalan rata-rata 5,6 meter dan volume sebesar 127.152 m^3 . Sedangkan warna hijau menunjukkan zona saprolit dengan ketebalan rata-rata 10,6 meter dan volume 40.406 m^2 .





Gambar 4.34 Hasil Cut and Fill Interpretasi Data Bor

Hasil *cut and fill* dari interpretasi data bor ditampilkan pada gambar 4.34. Zona limonit yang dilambangkan oleh warna merah memiliki ketebalan rata-rata 4,7 meter dan volume sebesar 106.742 m^3 . Sedangkan zona saprolit yang dilambangkan oleh warna hijau memiliki ketebalan rata-rata 10,4 meter dan volume sebesar 238.775 m^3 .

Dari hasil perhitungan volume diperoleh bahwa volume profil nikel laterit berdasarkan interpretasi ERT lebih besar dibandingkan interpretasi data bor. Zona limonit interpretasi ERT memiliki volume 20.410 m^3 lebih besar dibandingkan interpretasi data bor. Kondisi yang sama terjadi pada zona saprolit, dimana volume saprolit berdasarkan interpretasi ERT memiliki volume 1.631 m^3 yang lebih besar dibandingkan interpretasi data bor.



BAB V

PENUTUP

V. 1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Profil nikel laterit terdiri dari zona limonit, saprolit dan *bedrock*. Zona limonit daerah penelitian memiliki rentan nilai resistivitas 250 Ωm -750 Ωm . Adapun zona saprolit memiliki nilai resistivitas 30 Ωm -270 Ωm , sedangkan zona *bedrock* memiliki nilai resistivitas 150 Ωm -800 Ωm .
2. Data ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) dapat digunakan *guidance* dalam proses pengeboran untuk menghindari terjadinya *over drill* dan *under drill* agar pengeboran lebih optimal, terutama dalam hal biaya. Biaya ERT pada daerah penelitian yang terdiri dari 12 lintasan dengan total panjang 4953meter adalah 9.906 USD. Biaya pengeboran 29 titik bor berdasarkan rekomendasi interpretasi resistivitas sebesar 23.600 USD, sedangkan biaya pengeboran aktual sebesar 19.720 USD. Sehingga biaya yang bisa direduce ketika data ERT dijadikan *guidance* dalam pengeboran sebesar 3.380 USD untuk 29 titik bor.
3. Zona limonit interpretasi ERT memiliki volume sebesar 127.152 m^3 , sedangkan berdasarkan interpretasi data bor memiliki volume sebesar 106.742 m^3 . Adapun zona saprolit interpretasi ERT memiliki volume sebesar 240.406 m^2 sedangkan berdasarkan interpretasi data bor memiliki volume 238.775 m^3 .



V. 2 Saran

Adapun saran pada penelitian ini adalah:

1. Untuk meningkatkan kepercayaan dalam melakukan interpretasi, diperlukan pemahaman terkait kondisi geologi daerah penelitian, dan memahami karakteristik *geoelectrical* profil nikel laterit.
2. Salah satu yang mempengaruhi pembacaan resistivitas adalah struktur, sehingga diperlukan interpretasi struktur dan menentukan arah kelurusan struktur untuk membantu dalam proses interpretasi profil nikel laterit.



DAFTAR PUSTAKA

- Afriandi, D. (2015). Pemodelan Dan Estimasi Sumberdaya Nikel Laterit Daerah “X” Menggunakan Software Datamine Studio 3 Pada PT. Vale Indonesia Luwu Timur Sulawesi Selatan. *Jurnal Geomine*, 2(1).
- Ahmad, W. (2009). *Fundamentals of Chemistry, Mineralogy, Weathering Processes, Formation and Exploration*. PT.Vale Inco: Sorowako.
- Aizebeokhai, A. P., & Oyeyemi, K. D. (2014). The use of the multiple-gradient array for geoelectrical resistivity and induced polarization imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 111, 364-376.
- Attanayake, J., Chen, Y., Henderson, R. & Zhao, Z. (2013). Imaging Drumlin Architecture With Electrical Resistivity. *Journal Of Geography And Geology*, 5(4), Pp.1-8.
- Broto, S. & Afifah, R.S. (2008). Pengolahan Data Geolistrik Dengan Metode Schlumberger. *Teknik*, 29(2), Pp.120-128.
- Cai, J. T., Ruan, B. Y., Zhao, G. Z., & Zhu, G. P. (2007). Two-Dimensional Modeling of Complex Resistivity Using Finite Element Method. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(6), 1615-1624.
- Cowan, E. J., Spragg, K. J., & Everitt, M. R. (2011, August). Wireframe-free geological modelling—An oxymoron or a value proposition. In *Eighth International Mining Geology Conference* (pp. 247-260). QueenstownMelbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2006). Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4(2), 113-123.
- Fitrianto, T. N., Supriyadi, S., Mukromin, T. M., & Taufiq, U. A. (2017). Pencitraan 3D Data Geolistrik Resistivitas dengan Rockworks Berdasarkan Hasil Inversi *Res2DInv* untuk Mengetahui Persebaran Batuan Andesit di Desa Bapangsari Kecamatan Bagelen Kabupaten Purworejo. *Jurnal Fisika*, 7(2).
- Guellala, R., Inoubli, M.H. & Amri, F. (2011). New Elements On The Hairech Metamorphic Massif Structure (Northwest Tunisia). Geoelectrical Prospecting Contribution. *Journal Of Geography And Geology*, 3(1), Pp.160-170.
- A. & Tanjung, H.K. (2022). Survey Zona Lapuk Menggunakan Metode eolistrik Resistivitas Pada Kilometer 37 Medan Berastagi. *Jurnal Sains an Teknologi Istp*, 17(2), Pp.118-129.



- Harimei, B., Arif, S. & Lantu. (2019). Analisis Bawah Permukaan Pada Daerah Perencanaan Pelabuhan Dengan Menggunakan Metode Geolistrik Di Kecamatan Sanga-Sanga Kalimantan Timur. *Jurnal Geoelebes*, 3(1), Pp.1-12.
- Hernandi, D., Ardiyanto, P., Hakim, M., Hidayat, I., & Noor, M. E. S. (2017). Ni Laterite Electrical Resistivity Tomography (ERT) Geological Model.
- Loke, M.H. (2004). Tutorial: 2-D And 3-D Electrical Imaging Surveys.
- Pain, C. C., Herwanger, J. V., Worthington, M. H., & Oliveira, C. R. D. (2002). Effective multidimensional resistivity inversion using finite-element techniques. *Geophysical Journal International*, 151(3), 710-728.
- Pangestu, Y.P. & Zulfian, Z. (2020). Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Sekitar Daerah Jembatan Kuning di Desa Korek Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner-Schlumberger. *Prisma Fisika*, 8(1), Pp.79-84.
- Plaza, A., & Rivara, M. C. (2002). On the adjacencies of triangular meshes based on skeleton-regular partitions. *Journal of computational and applied mathematics*, 140(1-2), 673-693.
- Prameswari, F.W., Bahri, A.S. & Parnadi, W. (2012). Analisa Resistivitas Batuan Dengan Menggunakan Parameter Dar Zarrouk Dan Konsep Anisotropi. *Jurnal Sains Dan Seni Its*, 1(1), Pp.B15-B20.
- Pratama, I.E., Muhtar, I.J., Syamsuddin, S. & Aswad, S. (2019). Identifikasi Batuan Dasar Daerah Pantai Lumpue Kota Parepare Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner. *Jurnal Geoelebes*, 3(1), Pp.47-50.
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons.
- Santoso, B., Wijatmoko, B. & Supriyana, E. (2017). Kajian Nikel Laterit Dengan Metode Electrical Resistivity Tomography di Daerah Batu Putih, Kolaka Utara Sulawesi Tenggara. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 7(01), Pp.25-31.
- Setyanta, B. & Setiadi, I. (2006). Kompleks Batuan Ultramafik Meratus Sebagai Bagian Dari Ofiolit Kerak Samudera Ditinjau Dari Aspek Geomagnetik Dan aya Berat. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 16(6), Pp.335-348.



P. P., & Ferrari, R. L. (1996). *Finite elements for electrical engineers*. Cambridge university press.

- Siregar, M. (2014). *Manual Book Main Geology*. PT.Vale Indonesia: Sorowako.
- Susilo, A., Juwono, A.M., Fitriah, F., Puspita, M.B., Hasan, M.F.R., Hisyam, F. & Suryo, E.A. (2022). *Teori Dan Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas*. Universitas Brawijaya Press.
- Syamsuddin & Lantu. (2009). *Buku Ajar Laporan Modul Pembelajaran Berbasis Scl Metode Geolistrik Dan Geoelektromagnetik*. Universitas Hasanuddin
- Syamsuddin. (2007). Penentuan Struktur Bawah Permukaan Bumi Dangkal Dengan Menggunakan Metoda Geolistrik Tahanan Jenis 2d (Studi Kasus Potensi Tanah Longsor Di Panawangan, Ciamis). Tesis, Institut Teknologi Bandung.
- Syukri, M. (2020). *Dasar-Dasar Metode Geolistrik*. Syiah Kuala University Press.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. & Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Tsourlos, P. (1995). *Modelling, interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data* (Doctoral dissertation, University of York).
- United States Geology Survey (USGS). (2022). *Nickel Statistics and Information* [Data set]. Diakses dari <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information>.
- Vachirastienchai, C., Boonchaisuk, S., & Siripunvaraporn, W. (2010). A hybrid finite difference–finite element method to incorporate topography for 2D direct current (DC) resistivity modeling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 183(3-4), 426-434.
- Vebrianto, S. (2016). *Eksplorasi Metode Geolistrik*. Universitas Brawijaya Press.
- Xiong, B., & Ruan, B. Y. (2002). A numerical simulation of 2-D geoelectric section with biquadratic change of potential for resistivity sounding by the finite element method. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(2), 288-300.
- Yasu, R.M. & Hadi, C.F. (2021). Pengaruh Tegangan Terhadap Besar Kuat Arus Listrik Pada Persamaan Hukum Ohm. *Journal Zetroem*, 3(1), Pp.34-36.



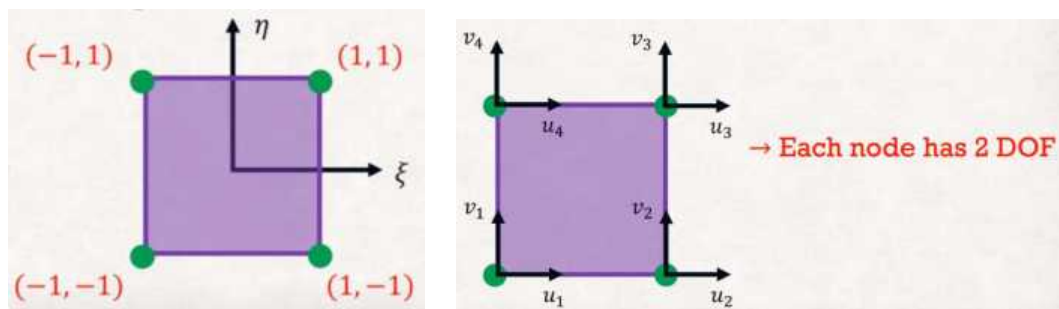
LAMPIRAN



Lampiran 1. Penjabaran Persamaan

Persamaan Forward Modelling Menggunakan Finite Element 4 Node

Dalam finite element bilinear domain akan dibagi menjadi element segi empat yang memiliki 4 node di setiap element, node tersebut berda di masing-masing sudut element. Untuk penomoran node biasanya dimulai dari sudut kiri bawah kemudian berlawanan arah jarum jam, seperti pada gambar 1.



Gambar 1(a) menunjukkan element dengan 4 node dalam system koordinat alami, dimana titik asal berada dipusat elemen $(0,0)$, arah koordinat horizontal diwakili oleh ξ (X_i) dan arah koordinat vertikal diwakili oleh η (eta). ξ positif ke kanan dan negative ke kiri, η positif ke atas dan negative ke bawah. Sehingga diperoleh koordinat alami pada setiap node seperti pada gambar 1(a).

Setiap node memiliki 2 dof (arah perpindahan/derajat kebebasan) yaitu arah vertikal (v) dan arah horizontal (u) seperti pada gambar 1(b), sehingga dalam pendekatan linear 2D untuk perpindahan nodal (u dan v) dan shape function (N) dinyatakan sebagai berikut:

$$u_{2D} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 N_1 & u_2 N_2 & u_3 N_3 & u_4 N_4 \\ v_1 N_1 & v_2 N_2 & v_3 N_3 & v_4 N_4 \end{bmatrix}$$

Shape Function (Fungsi Bentuk)

Setiap node memiliki shape function yang berbeda-beda, sehingga pada elemen dengan 4 node akan diperoleh 4 shape function juga. Untuk menghitung menghitung shape function setiap node dapat digunakan persamaan Polinomial

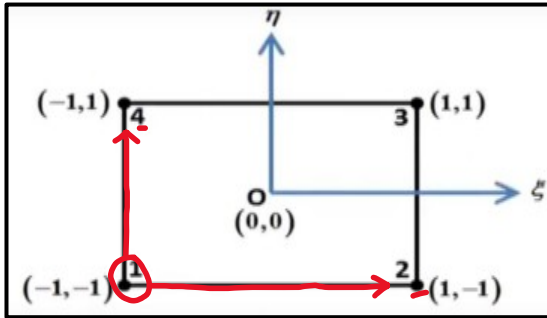
2D berikut:

$$N_k = \frac{\xi - \xi_m}{\xi_k - \xi_m} \times \frac{\eta - \eta_m}{\eta_k - \eta_m}$$



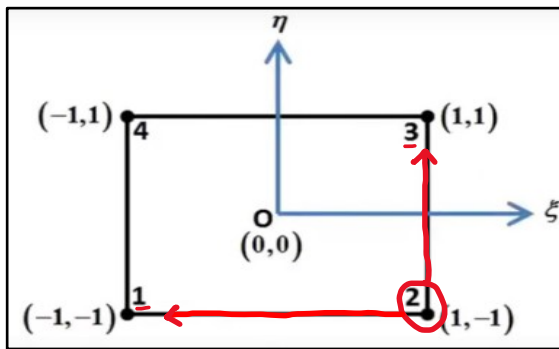
Dengan k adalah titik node, dan m adalah titik node yang terhubung dengan node yang dicari.

- Shape function node 1



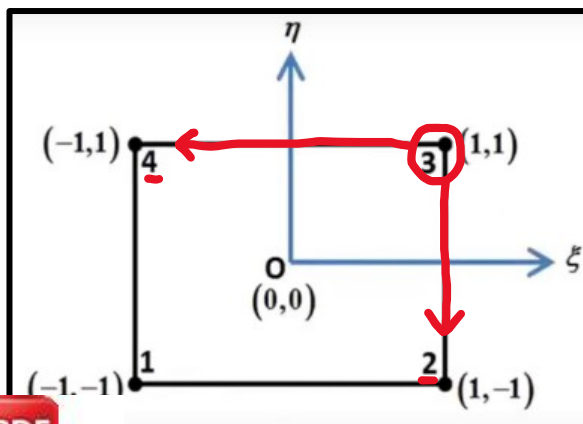
$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{\xi - \xi_2}{\xi_1 - \xi_2} \times \frac{\eta - \eta_4}{\eta_1 - \eta_4} \\
 &= \frac{\xi - 1}{-1 - 1} \times \frac{\eta - 1}{-1 - 1} \\
 &= \frac{-(1 - \xi)}{-2} \times \frac{-(1 - \eta)}{-2} \\
 N_1 &= \frac{(1 - \xi)(1 - \eta)}{4}
 \end{aligned}$$

- Shape function node 2



$$\begin{aligned}
 N_2 &= \frac{\xi - \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} \times \frac{\eta - \eta_3}{\eta_2 - \eta_3} \\
 &= \frac{\xi - (-1)}{1 - (-1)} \times \frac{\eta - 1}{-1 - 1} \\
 &= \frac{\xi + 1}{1 + 1} \times \frac{\eta - 1}{-1 - 1} \\
 &= \frac{(1 + \xi)}{2} \times \frac{-(1 - \eta)}{-2} \\
 N_2 &= \frac{(1 + \xi)(1 - \eta)}{4}
 \end{aligned}$$

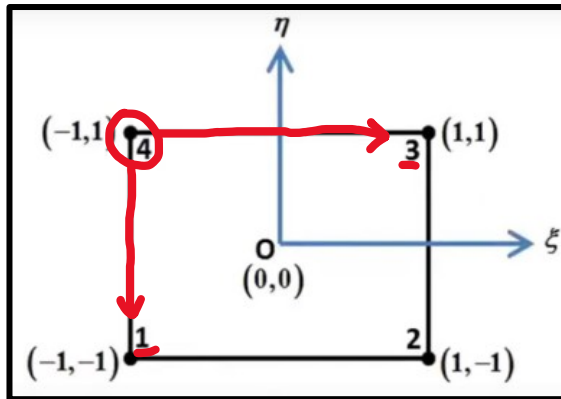
- Shape function node 3



$$\begin{aligned}
 N_3 &= \frac{\xi - \xi_4}{\xi_3 - \xi_4} \times \frac{\eta - \eta_2}{\eta_3 - \eta_2} \\
 &= \frac{\xi - (-1)}{1 - (-1)} \times \frac{\eta - (-1)}{1 - (-1)} \\
 &= \frac{\xi + 1}{1 + 1} \times \frac{\eta + 1}{1 + 1} \\
 &= \frac{(1 + \xi)}{2} \times \frac{(1 + \eta)}{2} \\
 N_3 &= \frac{(1 + \xi)(1 + \eta)}{4}
 \end{aligned}$$



- Shape function node 4



$$\begin{aligned}
 N_4 &= \frac{\xi - \xi_3}{\xi_4 - \xi_3} \times \frac{\eta - \eta_1}{\eta_4 - \eta_1} \\
 &= \frac{\xi - 1}{-1 - 1} \times \frac{\eta - (-1)}{1 - (-1)} \\
 &= \frac{\xi - 1}{-2} \times \frac{\eta + 1}{2} \\
 &= \frac{-(1 - \xi)}{-2} \times \frac{(1 + \eta)}{2} \\
 N_4 &= \frac{(1 - \xi)(1 + \eta)}{4}
 \end{aligned}$$

Shape function matrix

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix}$$

Dari shape function dapat dihitung matrix [B]:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \end{bmatrix}$$

Selesaikan setiap turunan pada matriks [B] dengan mensubstitusikan Shape function setiap node.

- Untuk $\frac{\partial N_1}{\partial \xi}$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N_1}{\partial \xi} &= \frac{\frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)}{\partial \xi} \\
 &= \frac{\frac{1}{4}(1 - \eta - \xi + \xi\eta)}{\partial \xi} \\
 &= \frac{1}{4}(0 - 0 - 1 + \eta) \\
 &= \frac{1}{4}(-1 + \eta)
 \end{aligned}$$



- Untuk $\frac{\partial N_1}{\partial \eta}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_1}{\partial \eta} &= \frac{\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)}{\partial \eta} \\ &= \frac{\frac{1}{4}(1-\eta-\xi+\xi\eta)}{\partial \eta} \\ &= \frac{1}{4}(0-1-0+\xi) \\ &= \frac{1}{4}(-1+\xi)\end{aligned}$$

- Untuk $\frac{\partial N_2}{\partial \xi}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_2}{\partial \xi} &= \frac{\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)}{\partial \xi} \\ &= \frac{\frac{1}{4}(1-\eta+\xi-\xi\eta)}{\partial \xi} \\ &= \frac{1}{4}(0-0+1-\eta) \\ &= \frac{1}{4}(1-\eta)\end{aligned}$$

- Untuk $\frac{\partial N_2}{\partial \eta}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_2}{\partial \eta} &= \frac{\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)}{\partial \eta} \\ &= \frac{\frac{1}{4}(1-\eta+\xi-\xi\eta)}{\partial \eta} \\ &= \frac{1}{4}(0-1+0-\xi) \\ &= \frac{1}{4}(-1-\xi)\end{aligned}$$

- Untuk $\frac{\partial N_3}{\partial \xi}$

$$\frac{\partial N_3}{\partial \xi} = \frac{\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)}{\partial \xi}$$



$$\begin{aligned}
&= \frac{\frac{1}{4}(1 + \eta + \xi + \xi\eta)}{\partial \xi} \\
&= \frac{1}{4}(0 + 0 + 1 + \eta) \\
&= \frac{1}{4}(1 + \eta)
\end{aligned}$$

- Untuk $\frac{\partial N_3}{\partial \eta}$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_3}{\partial \eta} &= \frac{\frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta)}{\partial \eta} \\
&= \frac{\frac{1}{4}(1 + \eta + \xi + \xi\eta)}{\partial \eta} \\
&= \frac{1}{4}(0 + 1 + 0 + \xi) \\
&= \frac{1}{4}(1 + \xi)
\end{aligned}$$

- Untuk $\frac{\partial N_4}{\partial \xi}$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_4}{\partial \xi} &= \frac{\frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)}{\partial \xi} \\
&= \frac{\frac{1}{4}(1 + \eta - \xi - \xi\eta)}{\partial \xi} \\
&= \frac{1}{4}(0 + 0 - 1 - \eta) \\
&= \frac{1}{4}(-1 - \eta)
\end{aligned}$$

- Untuk $\frac{\partial N_4}{\partial \eta}$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_4}{\partial \eta} &= \frac{\frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)}{\partial \eta} \\
&= \frac{\frac{1}{4}(1 + \eta - \xi - \xi\eta)}{\partial \eta} \\
&= \frac{1}{4}(1 - \xi)
\end{aligned}$$



Masukkan ke dalam matriks [B], sehingga diperoleh matriks [B] sebagai berikut:

$$[B] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (-1+\eta) & 0 & (1-\eta) & 0 & (1+\eta) & 0 & (-1-\eta) & 0 \\ 0 & (-1+\xi) & 0 & (-1-\xi) & 0 & (1+\xi) & 0 & (1-\xi) \\ (-1+\xi) & (-1+\eta) & (-1-\xi) & (1-\eta) & (1+\xi) & (1+\eta) & (1-\xi) & (-1-\eta) \end{bmatrix}$$

$$[B] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (-1+\eta) & 0 & (1-\eta) & 0 & (1+\eta) & 0 & (-1-\eta) & 0 \\ 0 & (-1+\xi) & 0 & (-1-\xi) & 0 & (1+\xi) & 0 & (1-\xi) \end{bmatrix}$$

$$[C] = \frac{1}{4} [(-1+\xi) \quad (-1+\eta) \quad (-1-\xi) \quad (1-\eta) \quad (1+\xi) \quad (1+\eta) \quad (1-\xi) \quad (-1-\eta)]$$

Dan transpose matriks $[B]^T$ diperoleh:

$$[B]^T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (-1+\eta) & 0 & (-1+\xi) \\ 0 & (-1+\xi) & (-1+\eta) \\ (1-\eta) & 0 & (-1-\xi) \\ 0 & (-1-\xi) & (1-\eta) \\ (1+\eta) & 0 & (1+\xi) \\ 0 & (1+\xi) & (1+\eta) \\ (-1-\eta) & 0 & (1-\xi) \\ 0 & (1-\xi) & (-1-\eta) \end{bmatrix}$$

$$[C]^T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (-1+\xi) \\ (-1+\eta) \\ (-1-\xi) \\ (1-\eta) \\ (1+\xi) \\ (1+\eta) \\ (1-\xi) \\ (-1-\eta) \end{bmatrix}$$

Matriks B menghubungkan regangan dengan perpindahan node, dimana setiap baris matriks mewakili komponen string. Baris pertama mewakili regangan pada arah horizontal, baris kedua mewakili regangan dalam arah vertikal, dan baris ketiga merupakan regangan geser.

Penerapan Finite Element Dalam Potensial Arus Pada Metode Geolistrik

Persamaan potensial dengan adanya sumber arus diberikan oleh:

$$\nabla(\sigma \cdot \nabla U) = \nabla J$$



1 sumber arus

yataannya, arus dialirkan melalui probe yang terbatas, namun untuk tujuan

pemodelan, arus dianggap berasal dari sumber titik. Oleh karena itu, sumber arus ∇J dapat dijelaskan oleh fungsi delta Dirac dan arus titik I (Coggon, 1971). Jika A titik sumber arus, maka suku sumber adalah:

$$\nabla J = I\delta(A)$$

Maka

$$\nabla(\sigma \cdot \nabla U) = I\delta(A)$$

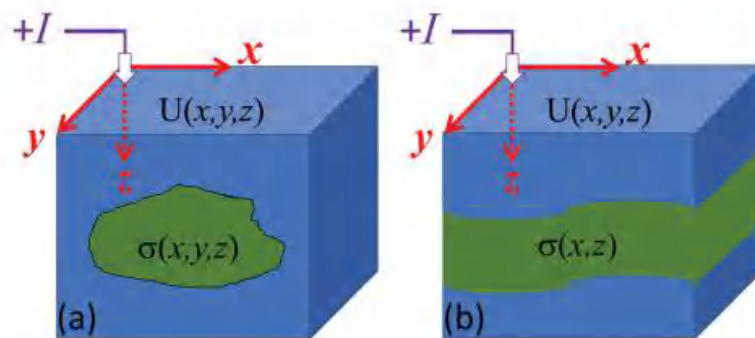


Figure 2. Sketch of (a) a 2D and (b) a 3D geological model defined by conductivity $\sigma(x, z)$ and $\sigma(x, y, z)$, respectively.

Secara umum, konduktivitas $\sigma(x) = \sigma(x, y, z)$ berubah dengan tiga koordinat sehingga mendefinisikan model geologi 3D, dan potensial listrik $U = U(x, y, z)$ menjadifungsi 3D dari injeksi arus yang diberikan $I\delta(A)$ dan konduktivitas $\sigma(x, y, z)$, seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 2a.

$$\nabla(\sigma_{(x,y,z)} \cdot \nabla U_{(x,y,z)}) = I\delta(A)$$

Jika konduktivitas adalah konstan pada koordinat z , yaitu $\sigma(x) = \sigma(x, y)$, ini mendefinisikan model geologi 2D (Gambar 2b), tetapi potensial listrik $U(x, y, z)$ masih merupakan fungsi 3D dari koordinat akibat injeksi arus titik $I\delta(A)$. Dengan menerapkan transformasi Fourier cosinus $Fc\{\}$ pada koordinat z dari Persamaan (5)

$$U_{(x,y,k)} = \int_0^\infty U_{(x,y,z)} \cos(kz) dz$$

Sehingga potensialnya menjadi

$$\sigma_{(x,y)} \nabla^2 U + \sigma_{(x,y)} k^2 U = I\delta(A)$$

menggunakan fungsi Bassel dan dengan pendekatan batas tak hingga, potensial listrik pada penampang geolistrik 2D diberikan oleh:

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



Daerah domain Ω didiskritisasi dengan elemen segi empat seperti gambar. Jumlah node total adalah n , maka integral domain Ω didekomposisi menjadi integral untuk setiap elemen e .

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

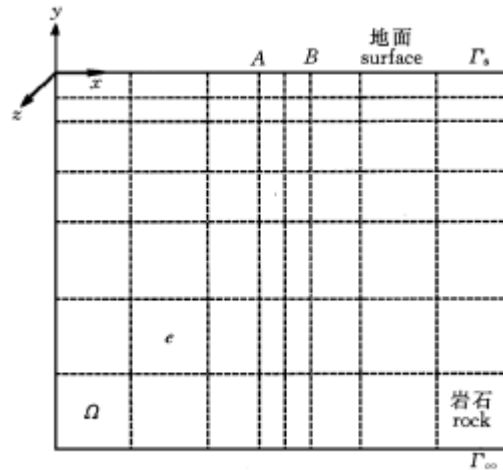


Fig. 1 Division of region Ω

Selesaikan persamaan $F(U)$ setiap suku masing-masing.

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

1. Suku pertama

$$\int_e \frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 d\Omega = \int_e \frac{1}{2} \sigma \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy$$

Turunan partial V terhadap x

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial x} U_i = \left(\frac{\partial N}{\partial x} \right)^T U_e = U_e^T \left(\frac{\partial N}{\partial x} \right)$$

Dengan

$$U_e = (U_1, \dots, U_4)^T$$

Dan

$$\frac{\partial N}{\partial x} = \left(\frac{\partial N_1}{\partial x}, \dots, \frac{\partial N_4}{\partial x} \right)^T$$

sehingga



$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 = U_e^T \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^T U_e$$

Dengan cara yang sama untuk turunan terhadap sumbu z, diperoleh

$$\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2 = U_e^T \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^T U_e$$

Substitusi ke persamaan

$$\begin{aligned} \int_e \frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 d\Omega &= \int_e \frac{1}{2} \sigma \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2 \right] dx dy \\ &= \int_e \frac{1}{2} \sigma \left[U_e^T \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^T U_e + U_e^T \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^T U_e \right] dx dy \\ &= \frac{1}{2} U_e^T K_{1e} U_e \end{aligned}$$

Dimana

$$K_{1e} = (k_{1ij}), \quad k_{ij}(i, j) = 1, \dots, 4$$

Dan

$$\begin{aligned} K_{e1} &= \int_e \sum_{i=1}^4 \sigma \left(\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^T \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^T \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right) \right) dx dy \\ &= \sum_{i=1}^4 \left\{ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \sigma \left(\left(\frac{\partial N}{\partial \xi}\right)^T \left(\frac{\partial N}{\partial \xi}\right) + \left(\frac{\partial N}{\partial \eta}\right)^T \left(\frac{\partial N}{\partial \eta}\right) \right) d\xi d\eta \right\} \\ &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \sigma \left(\left(\frac{\partial N}{\partial \xi}\right)^T \left(\frac{\partial N}{\partial \xi}\right) + \left(\frac{\partial N}{\partial \eta}\right)^T \left(\frac{\partial N}{\partial \eta}\right) \right) d\xi d\eta \\ &= \sigma \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [B] d\xi d\eta \end{aligned}$$



$$\left[\begin{array}{cc} (-1+\eta) & 0 \\ 0 & (-1+\xi) \\ (1-\eta) & 0 \\ 0 & (-1-\xi) \\ (1+\eta) & 0 \\ 0 & (1+\xi) \\ (-1-\eta) & 0 \\ 0 & (1-\xi) \end{array} \right]^2 \left[\begin{array}{cccccccc} (-1+\eta) & 0 & (1-\eta) & 0 & (1+\eta) & 0 & (-1-\eta) & 0 \\ 0 & (-1+\xi) & 0 & (-1-\xi) & 0 & (1+\xi) & 0 & (1-\xi) \end{array} \right] d\xi d\eta$$

Perkalian matriks ini akan menghasilkan matriks 8x8 yang mewakili luasan area element.

$$\underline{k} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccccccc} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & k_{17} & k_{18} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} & k_{27} & k_{28} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} & k_{37} & k_{38} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} & k_{47} & k_{48} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} & k_{57} & k_{58} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} & k_{67} & k_{68} \\ k_{71} & k_{72} & k_{73} & k_{74} & k_{75} & k_{76} & k_{77} & k_{78} \\ k_{81} & k_{82} & k_{83} & k_{84} & k_{85} & k_{86} & k_{87} & k_{88} \end{array} \right] \begin{array}{l} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{array} \end{array}$$

Seperti yg telah dibahas pada shape function element segiempat, dimana diperoleh matrix shape function sebagai berikut.

Shape function matrix

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix}$$

Dari matriks ini dapat dihitung regangan (turunan matriks) pada arah horizontal dan vertikal, baris pertama mewakili arah horizontal dan baris kedua mewakili arah vertikal yang dimisalkan dengan matriks B

[B]

$$= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (-1 + \eta) & 0 & (1 - \eta) & 0 & (1 + \eta) & 0 & (-1 - \eta) & 0 \\ 0 & (-1 + \xi) & 0 & (-1 - \xi) & 0 & (1 + \xi) & 0 & (1 - \xi) \end{bmatrix}$$

Untuk transpose matriks diperoleh:

$$[B]^T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (-1 + \eta) & 0 \\ 0 & (-1 + \xi) \\ (1 - \eta) & 0 \\ 0 & (-1 - \xi) \\ (1 + \eta) & 0 \\ 0 & (1 + \xi) \\ (-1 - \eta) & 0 \\ 0 & (1 - \xi) \end{bmatrix}$$



2. Suku Kedua

$$\int_e \frac{1}{2} \sigma k^2 U^2 d\Omega = \frac{1}{2} U_e^T \left\{ \int_e \sum_{l=1}^4 N_l \sigma_l (k^2 N^T N) dx dy \right\} U_e = \frac{1}{2} U_e^T K_{e2} U_e$$

$$K_{e2} = \int_e \sum_{l=1}^4 N_l \sigma_l (k^2 N^T N) dx dy$$

$$K_{e2} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [C]^T [C] d\xi d\eta$$

K_{e2}

$$= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 k^2 \left(\frac{1}{4}\right)^2 \begin{bmatrix} (-1+\xi) \\ (-1+\eta) \\ (-1-\xi) \\ (1-\eta) \\ (1+\xi) \\ (1+\eta) \\ (1-\xi) \\ (-1-\eta) \end{bmatrix} [(-1+\xi) \quad (-1+\eta) \quad (-1-\xi) \quad (1-\eta) \quad (1+\xi) \quad (1+\eta) \quad (1-\xi) \quad (-1-\eta)] d\xi d\eta$$

	u_1	v_1	u_2	v_2	u_3	v_3	u_4	v_4	
$\underline{k} =$	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}	k_{16}	k_{17}	k_{18}	u_1
	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{25}	k_{26}	k_{27}	k_{28}	v_1
	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}	k_{35}	k_{36}	k_{37}	k_{38}	u_2
	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{44}	k_{45}	k_{46}	k_{47}	k_{48}	v_2
	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	k_{55}	k_{56}	k_{57}	k_{58}	u_3
	k_{61}	k_{62}	k_{63}	k_{64}	k_{65}	k_{66}	k_{67}	k_{68}	v_3
	k_{71}	k_{72}	k_{73}	k_{74}	k_{75}	k_{76}	k_{77}	k_{78}	u_4
	k_{81}	k_{82}	k_{83}	k_{84}	k_{85}	k_{86}	k_{87}	k_{88}	v_4

3. Suku ketiga

$$\int_e I \delta(A) U d\Omega = \frac{1}{2} I U_A = U^T P$$

Dengan $P = \left(0 \dots \frac{1}{2} U_A \dots 0 \right)^T$

P adalah vektor kolom yang bernilai 0 kecuali pada titik catu daya yaitu 1/2



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

$$\begin{aligned}
 F(U) &= \frac{1}{2} U_e^T K_{1e} U_e + \frac{1}{2} V_e^T K_{e2} U_e - U^T P \\
 &= U^T K U - U^T P \\
 &= K U - P
 \end{aligned}$$

dimana $K = k_{e1} + k_{e2}$

Dengan $F(U) = 0$, maka

$$K U - P = 0$$

$$K U = P$$

Dengan K adalah matriks orde 8×8 yang merupakan penjumlahan dari $(k_{e1} + k_{e2})$, U adalah vektor kolom yang merupakan potensial listrik dari semua titik element dalam domain wave-number.

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

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

Dimana M adalah posisi titik observasi, k_i adalah bilangan gelombang, dan g_i adalah koefisien pembobotan, yang ditunjukkan oleh tabel berikut.

Table 1 k_i and g_i parameters of Fourier inverse transform

i	1	2	3	4	5
k_i	0.00268	0.02419	0.09621	0.33991	1.26051
g_i	0.00565	0.02406	0.07849	0.27409	1.09590

Untuk posisi elektroda arus tertentu resistivitas semu dapat dihitung dengan persamaan:

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

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 .



Lampiran 2. Data Bor

a) Data Collar

BHID	FROM	TO	NITOT	LYR	LYRCHMIS	MATERIAL
C146272Z	0	1	0.986	LIM	LIM	LIM
C146272Z	1	2	1.068	LIM	LIM	LIM
C146272Z	2	3	1.244	LIM	LIM	LIM
C146272Z	3	4	1.269	LIM	LIM	LIM
C146272Z	4	4.3	0.425	SAP	SAP	BLD
C146272Z	4.3	5	1.717	SAP	SAP	SAP
C146272Z	5	6	1.746	SAP	SAP	SAP
C146272Z	6	6.35	1.782	SAP	SAP	SAP
C146272Z	6.35	7	0.34	SAP	FRK	BLD
C146272Z	7	8	0.434	SAP	FRK	BLD
C146272Z	8	8.45	2.333	SAP	SAP	SAP
C146272Z	8.45	8.8	0.795	SAP	FRK	BLD
C146272Z	8.8	9	1.143	SAP	SIL	SAP
C146272Z	9	9.82	0.398358	SAP	FRK	BLD
C146272Z	9.82	10	2.15	SAP	SAP	SAP
C146272Z	10	11	0.728488	BRK	FRK	BRK
C146272Z	11	12	0.333553	BRK	FRK	BRK
C146272Z	12	13	0.28	BRK	FRK	BRK
C146272Z	13	14	0.347452	BRK	FRK	BRK
C146272Z	14	15	0.278432	BRK	FRK	BRK
C146273Z	0	1	1.046	LIM	LIM	LIM
C146273Z	1	2	1.168	LIM	LIM	LIM
C146273Z	2	2.52	1.118	LIM	LIM	LIM
C146273Z	2.52	3	0.545	LIM	SIL	SAP
C146273Z	3	4	0.578	LIM	SIL	SAP
C146273Z	4	4.55	0.484	LIM	SIL	SAP
C146273Z	4.55	5	0.427	BRK	FRK	BRK
C146273Z	5	6	0.345	BRK	FRK	BRK
C146273Z	6	7	0.312	BRK	FRK	BRK
C146273Z	7	8	0.417	BRK	FRK	BRK
C146273Z	8	9	0.356021	BRK	FRK	BRK
C146273Z	9	10	0.440109	BRK	FRK	BRK
C146274Z	0	1	0.858	SAP	SAP	LIM
Z	1	2	1.119	SAP	SIL	LIM
Z	2	3	0.868	SAP	SIL	SAP
Z	3	3.72	0.936	SAP	SIL	SAP
Z	3.72	4	0.267	SAP	FRK	BLD



BHID	FROM	TO	NITOT	LYR	LYRCHMIS	MATERIAL
C146274Z	4	5	1.054	SAP	SIL	SAP
C146274Z	5	5.6	1.992	SAP	SIL	SAP
C146274Z	5.6	6	0.708521	SAP	FRK	BRK
C146274Z	6	7	0.751444	SAP	FRK	BRK
C146274Z	7	8	0.772734	SAP	FRK	BRK
C146274Z	8	9	1.382283	SAP	SAP	BRK
C146274Z	9	10	1.767437	SAP	SAP	BRK
C146274Z	10	11	0.813308	BRK	SAP	BRK
C146274Z	11	12	0.898149	BRK	SAP	BRK
C146274Z	12	13	0.312	BRK	FRK	BRK
C146487Z	0	1	0.848	LIM	LIM	LIM
C146487Z	1	2	0.81	LIM	LIM	LIM
C146487Z	2	3	0.805	LIM	LIM	LIM
C146487Z	3	3.26	0.275	SAP	FRK	BLD
C146487Z	3.26	3.66	0.842	SAP	SAP	LIM
C146487Z	3.66	4	0.273	SAP	FRK	BLD
C146487Z	4	4.47	0.298	SAP	FRK	BLD
C146487Z	4.47	5	0.769	SAP	SIL	SAP
C146487Z	5	6	1.266	SAP	SAP	SAP
C146487Z	6	7	1.458	SAP	SAP	SAP
C146487Z	7	8	1.509	SAP	SAP	SAP
C146487Z	8	9	0.272	SAP	FRK	BLD
C146487Z	9	9.45	1.674	SAP	SAP	SAP
C146487Z	9.45	10	0.271	BRK	FRK	BRK
C146487Z	10	11	0.271	BRK	FRK	BRK
C146487Z	11	12	0.276	BRK	FRK	BRK
C146487Z	12	13	0.284	BRK	FRK	BRK
C146487Z	13	14	0.286	BRK	FRK	BRK
C146487Z	14	15	0.275	BRK	FRK	BRK
C146570Z	0	1	1.162	LIM	LIM	LIM
C146570Z	1	2		LIM	SAP	LIM
C146570Z	2	3	1.923	LIM	LIM	LIM
C146570Z	3	3.71	2.053	LIM	LIM	LIM
C146570Z	3.71	4	0.247	SAP	FRK	BLD
C146570Z	4	4.83	0.249	SAP	FRK	BLD
C146570Z	4.83	5	2.011	SAP	SAP	SAP
Z	5	6	2.521	SAP	SIL	SAP
Z	6	7	2.382	SAP	SIL	SAP
Z	7	7.32	0.458	SAP	SIL	BLD
Z	7.32	8	0.741	SAP	SIL	SAP



BHID	FROM	TO	NITOT	LYR	LYRCHMIS	MATERIAL
C146570Z	8	8.5	0.598	SAP	SIL	SAP
C146570Z	8.5	9	0.369	BRK	SIL	BRK
C146570Z	9	10	0.295944	BRK	FRK	BRK
C146570Z	10	11	0.282	BRK	FRK	BRK
C146570Z	11	12	0.248	BRK	FRK	BRK
C146570Z	12	13	0.302	BRK	FRK	BRK
C146570Z	13	14	0.242	BRK	FRK	BRK
C146570Z	14	15	0.251	BRK	FRK	BRK
C146570Z	15	16	0.265	BRK	FRK	BRK
C146571Z	0	1	1.117	LIM	LIM	LIM
C146571Z	1	2	1.153	LIM	LIM	LIM
C146571Z	2	2.75	1.169	LIM	LIM	LIM
C146571Z	2.75	3	0.276	SAP	FRK	BLD
C146571Z	3	4	0.268699	SAP	FRK	BLD
C146571Z	4	5	0.272	SAP	FRK	BLD
C146571Z	5	6	0.266	SAP	FRK	BLD
C146571Z	6	6.17	0.305	SAP	FRK	BLD
C146571Z	6.17	7	1.493	SAP	SAP	SAP
C146571Z	7	8	1.573784	SAP	SAP	SAP
C146571Z	8	8.78	1.74	SAP	SAP	SAP
C146571Z	8.78	9	0.351	SAP	FRK	BLD
C146571Z	9	9.8	0.326	SAP	FRK	BLD
C146571Z	9.8	10	1.301	SAP	SAP	SAP
C146571Z	10	11	1.002	SAP	SIL	SAP
C146571Z	11	12	2.571	SAP	SIL	SAP
C146571Z	12	12.44	1.073696	SAP	SIL	SAP
C146571Z	12.44	13	0.288	BRK	FRK	BRK
C146571Z	13	14	0.28	BRK	FRK	BRK
C146571Z	14	15	0.277	BRK	FRK	BRK
C146571Z	15	16	0.261	BRK	FRK	BRK
C146571Z	16	17	0.261	BRK	FRK	BRK
C146571Z	17	18	0.711	BRK	FRK	BRK
C146571Z	18	19	0.37	BRK	FRK	BRK
C146572Z	0	0.83	1.153	LIM	LIM	LIM
C146572Z	0.83	1	0.315	SAP	FRK	BLD
C146572Z	1	1.52	0.268404	SAP	FRK	BLD
Z	1.52	1.8	0.694	SAP	SAP	SAP
Z	1.8	2	0.327	SAP	FRK	BLD
Z	2	2.77	0.27	SAP	FRK	BLD
Z	2.77	3	2.222	SAP	SAP	SAP



BHID	FROM	TO	NITOT	LYR	LYRCHMIS	MATERIAL
C146572Z	3	3.15	1.68	SAP	SAP	SAP
C146572Z	3.15	3.47	0.563	SAP	FRK	BLD
C146572Z	3.47	4	1.239	SAP	SAP	SAP
C146572Z	4	5	1.082	SAP	SIL	SAP
C146572Z	5	5.61	0.367	SAP	FRK	BLD
C146572Z	5.61	6	1.049	SAP	SIL	SAP
C146572Z	6	6.31	1.396	SAP	SAP	SAP
C146572Z	6.31	7	0.535736	SAP	FRK	BLD
C146572Z	7	7.65	0.544832	SAP	FRK	BLD
C146572Z	7.65	8	1.737	SAP	SAP	SAP
C146572Z	8	8.18	1.391	SAP	SIL	SAP
C146572Z	8.18	8.74	0.6946	SAP	SIL	SAP
C146572Z	8.74	9	1.536	SAP	SAP	SAP
C146572Z	9	9.78	1.581	SAP	SAP	SAP
C146572Z	9.78	10	0.466	SAP	FRK	BLD
C146572Z	10	10.34	0.402	SAP	FRK	BLD
C146572Z	10.34	11	1.446	SAP	SIL	SAP
C146572Z	11	11.6	0.87426	SAP	SIL	SAP
C146572Z	11.6	12	0.424477	BRK	FRK	BRK
C146572Z	12	13	0.362991	BRK	FRK	BRK
C146572Z	13	14	0.360452	BRK	FRK	BRK
C146572Z	14	15	0.367509	BRK	FRK	BRK
C146572Z	15	16	0.36543	BRK	FRK	BRK
C146572Z	16	17	0.355115	BRK	FRK	BRK
C146669Z	0	1	0.81	LIM	LIM	LIM
C146669Z	1	2	1.218	LIM	LIM	LIM
C146669Z	2	3	1.176	LIM	LIM	LIM
C146669Z	3	4	1.109	LIM	SIL	LIM
C146669Z	4	5	0.955	SAP	SAP	SAP
C146669Z	5	6	0.318	BRK	FRK	BLD
C146669Z	6	7	0.389	BRK	FRK	BLD
C146669Z	7	7.5	0.699	BRK	SIL	SAP
C146669Z	7.5	8	0.52	BRK	SIL	BLD
C146669Z	8	9	0.325	BRK	FRK	BLD
C146669Z	9	9.75	0.523	BRK	FRK	BLD
C146669Z	9.75	10	0.616	BRK	SIL	SAP
Z	10	10.3	0.374	BRK	SIL	BLD
Z	10.3	11	1.184244	BRK	SIL	SAP
Z	11	12	0.711541	BRK	SIL	BRK
Z	12	12.47	0.621404	BRK	SIL	BRK



BHID	FROM	TO	NITOT	LYR	LYRCHMIS	MATERIAL
C146669Z	12.47	13	0.453	BRK	FRK	BRK
C146669Z	13	14	0.53244	BRK	FRK	BRK
C146669Z	14	15	0.432243	BRK	FRK	BRK
C146669Z	15	16	0.839	BRK	SIL	BRK
C146669Z	16	17	0.305	BRK	FRK	BRK
C146774Z	0	1	1.167	LIM	LIM	LIM
C146774Z	1	2	1.269	LIM	LIM	LIM
C146774Z	2	3	1.325	LIM	LIM	LIM
C146774Z	3	4	1.265	LIM	LIM	LIM
C146774Z	4	5	1.421	LIM	LIM	LIM
C146774Z	5	6	1.426	LIM	LIM	LIM
C146774Z	6	7	1.11	LIM	LIM	LIM
C146774Z	7	8	1.38	LIM	LIM	LIM
C146774Z	8	9	1.325	LIM	SIL	SAP
C146774Z	9	10	1.681	SAP	SAP	SAP
C146774Z	10	11	1.251	SAP	SIL	SAP
C146774Z	11	12	0.783049	SAP	SIL	SAP
C146774Z	12	13	1.811	SAP	SIL	SAP
C146774Z	13	13.36	1.549	SAP	SIL	SAP
C146774Z	13.36	14	1.333907	SAP	SIL	BLD
C146774Z	14	14.4	1.331	SAP	SIL	SAP
C146774Z	14.4	15	1.803166	SAP	SIL	BLD
C146774Z	15	15.62	1.882	SAP	SAP	SAP
C146774Z	15.62	16	1.298554	SAP	SAP	BLD
C146774Z	16	17	0.71	BRK	FRK	BLD
C146774Z	17	18	0.284	BRK	FRK	BLD
C146774Z	18	19	0.417	BRK	FRK	BLD
C146774Z	19	20	0.766	BRK	FRK	BLD
C146774Z	20	20.48	1.005056	BRK	SAP	SAP
C146774Z	20.48	21	0.311	BRK	FRK	BRK
C146774Z	21	22	0.287173	BRK	FRK	BRK
C146774Z	22	23	0.359752	BRK	FRK	BRK
C146774Z	23	24	0.679925	BRK	FRK	BRK
C146774Z	24	25	0.285852	BRK	FRK	BRK



b) Data Assay

BHID	XCOLLAR	YCOLLAR	ZCOLLAR	DEPTH
C146272Z	5587.184	13012.57	737.5454	15
C146273Z	5538.049	13061.63	726.1844	10
C146274Z	5638.766	13214.05	710.3632	13
C146487Z	5275.418	12975.37	652.0641	15
C146570Z	5375.782	13076.56	671.3317	16
C146571Z	5375.593	13173.55	644.5791	19
C146572Z	5474.494	13274.1	666.3276	17
C146669Z	5477.77	12878.23	721.3428	17
C146774Z	5474.827	13075.12	695.0123	25
C146778Z	5272.822	13072.79	637.5264	20
C146971Z	5376.603	12977.25	675.4505	20
C146973Z	5474.901	13173.44	679.5405	13
C146974Z	5277.244	13175.73	618.7766	15
C147057Z	5587.736	13113.26	727.5659	20
C147058Z	5537.565	13112.77	719.3813	17
C147637Z	5687.124	13212.56	712.5399	37
C147943Z	5537.121	12862.7	740.8911	16
C147944ZB	5535.274	12961.79	724.3851	36
C147945Z	5588.572	13208.97	706.3107	18
C147946Z	5539.244	13161.62	698.2079	11
C148213Z	5587.82	13062.35	743.1836	32
C148214ZB	5536.496	13013.09	729.6551	28
C148601Z	5537.186	12912.7	744.3964	25
C148603Z	5588.397	13162.24	718.0483	38
C148607Z	5634.915	13237.07	700.3938	19
C151257Z	5374.333	13025.71	678.3755	19
C151258Z	5425.428	13124.91	676.0983	25
C151259Z	5425.157	13024.61	694.1263	34
C151260Z	5474.567	13124.8	695.7452	15
C151361Z	5426.687	12977.64	687.2636	18
C151362Z	5424.858	13225.1	659.1723	25
C151363Z	5274.064	13128.3	633.9598	11
C151364Z	5330.918	13124.06	654.0371	12
C151458Z	5375.314	13224.22	644.6483	17
Z	5425.661	13274.4	659.3582	15
Z	5324.259	13024.78	654.951	16
Z	5324.582	13073.47	656.6475	22
Z	5371.927	13127.39	655.2101	19

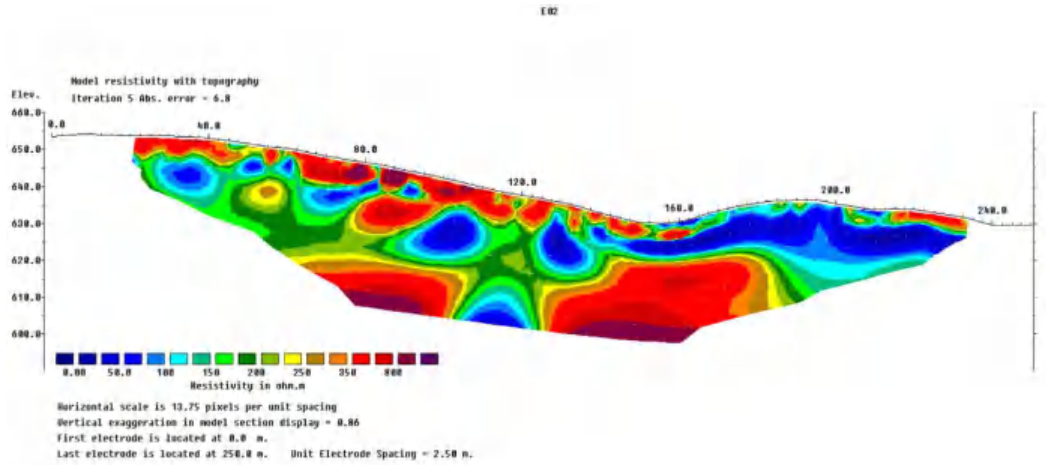


BHID	XCOLLAR	YCOLLAR	ZCOLLAR	DEPTH
C151661Z	5275.045	13024.77	651.2063	16
C151662Z	5228.556	13025.53	642.8531	28
C151737Z	5375.687	12926.64	691.5417	20
C151916Z	5324.394	12974.13	665.9146	11
C151917Z	5474.873	13224.8	670.3762	27
C151918Z	5323.986	13223.36	623.4567	19
C152103Z	5422.159	12882.51	696.7902	27
C152104Z	5425.319	12925.54	709.4743	30
C152202Z	5425.19	13074.78	681.7341	32
C152203Z	5329.997	13168.97	632.2109	24
C357174Z	5475.27	13024.89	709.254	21
C357175Z	5475.515	12922.71	725.1442	30
C368088	5424.734	13174.73	659.4573	25
C368089	5475.324	12975.05	700.3823	27

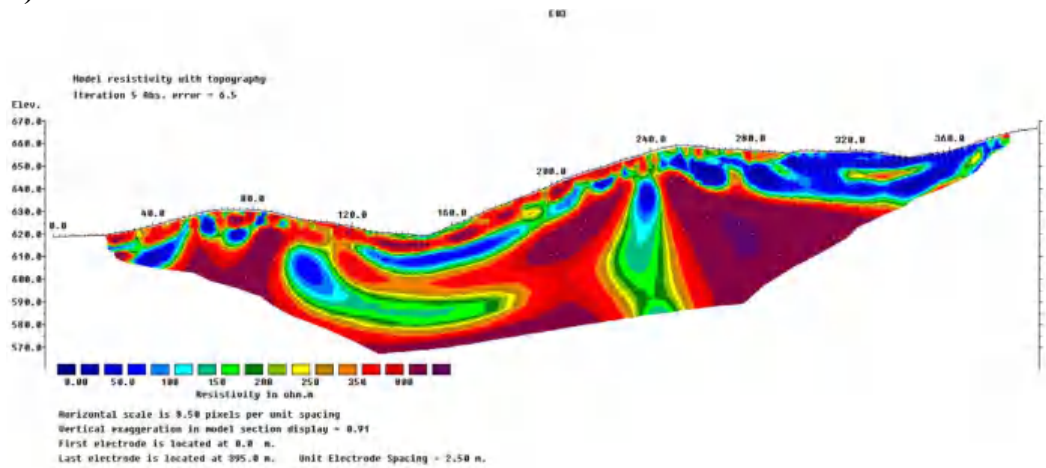


Lampiran 3. Hasil Inversi Data ERT

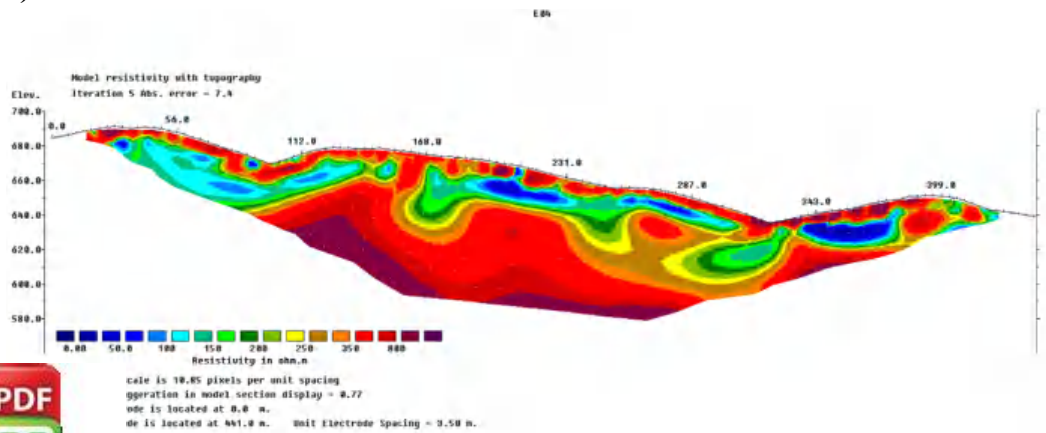
a) Lintasan E02



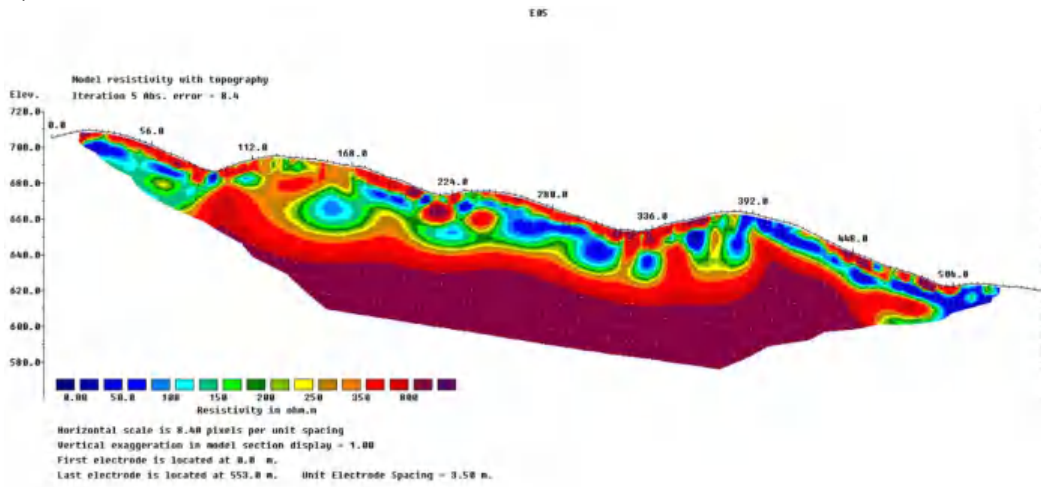
b) Lintasan E03



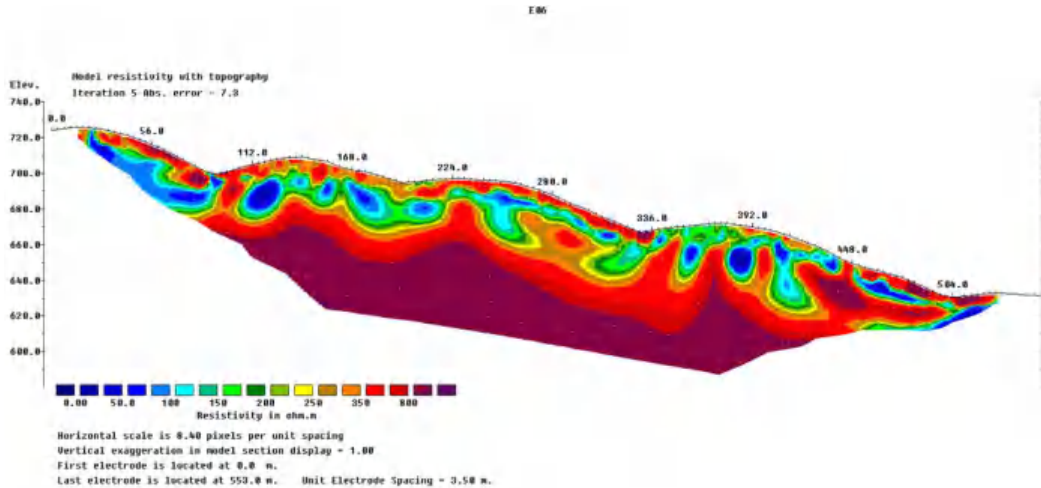
c) Lintasan E04



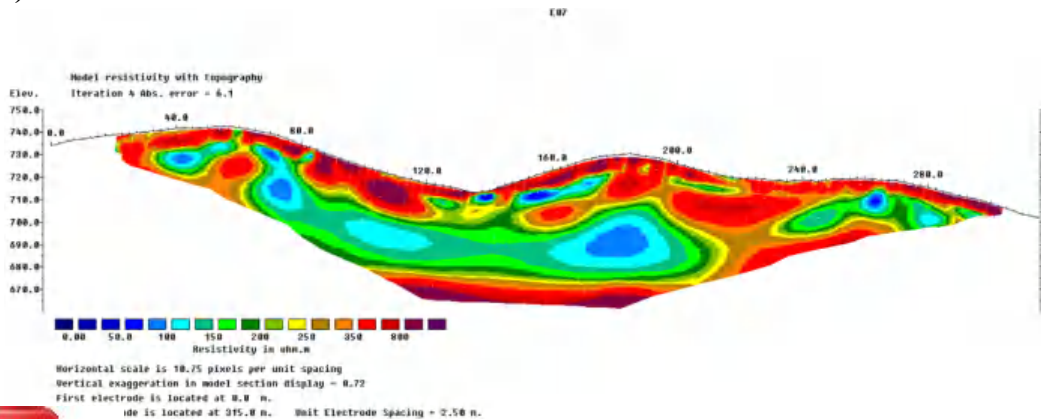
d) Lintasan E05



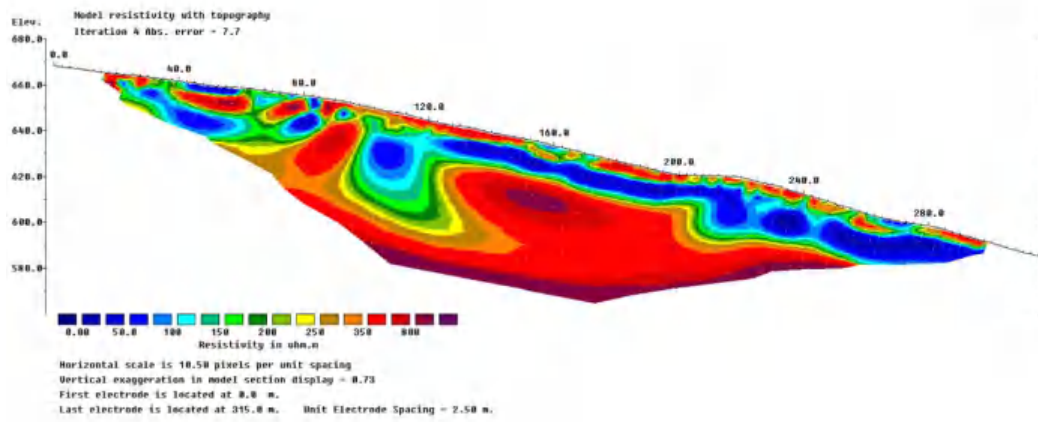
e) Lintasan E06



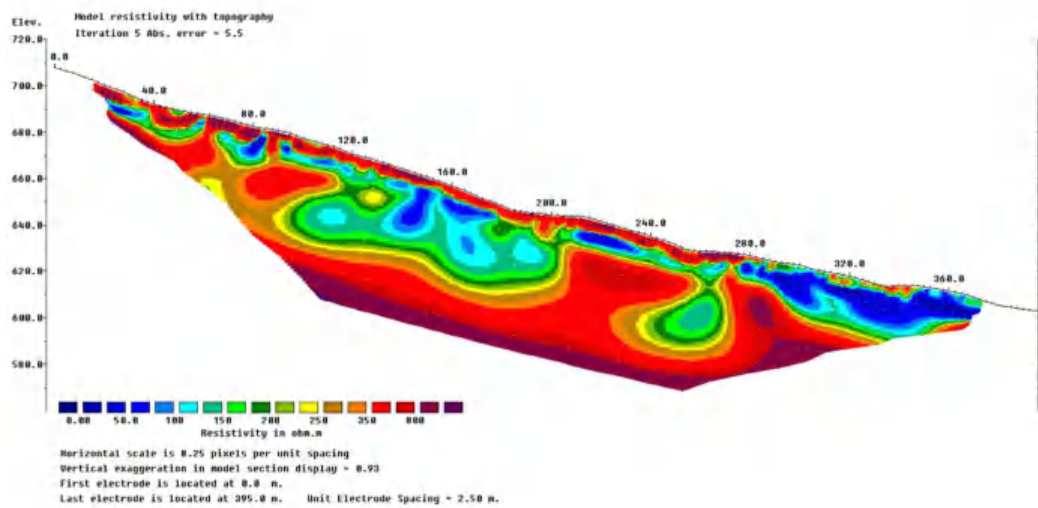
f) Lintasan E07



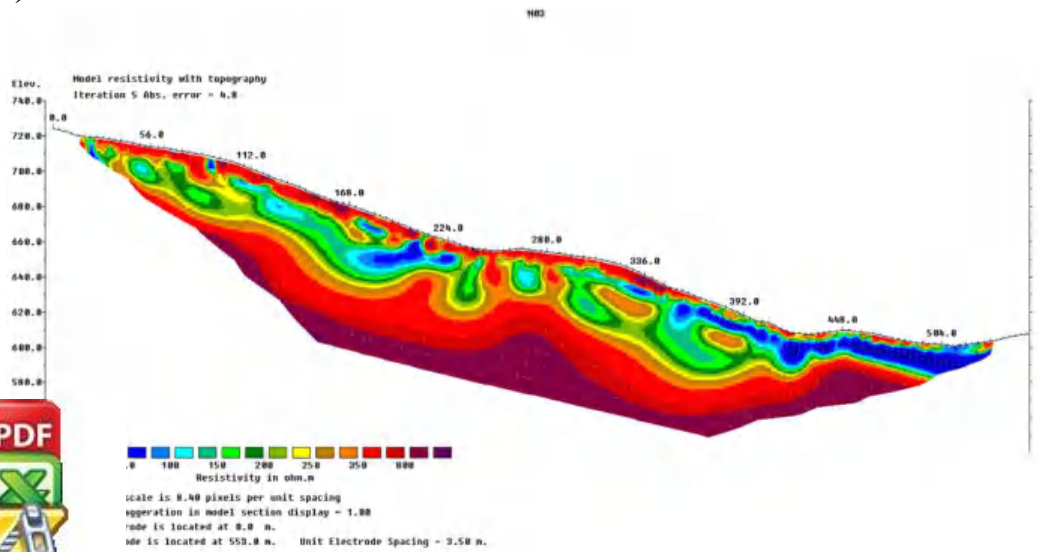
g) Lintasan N01



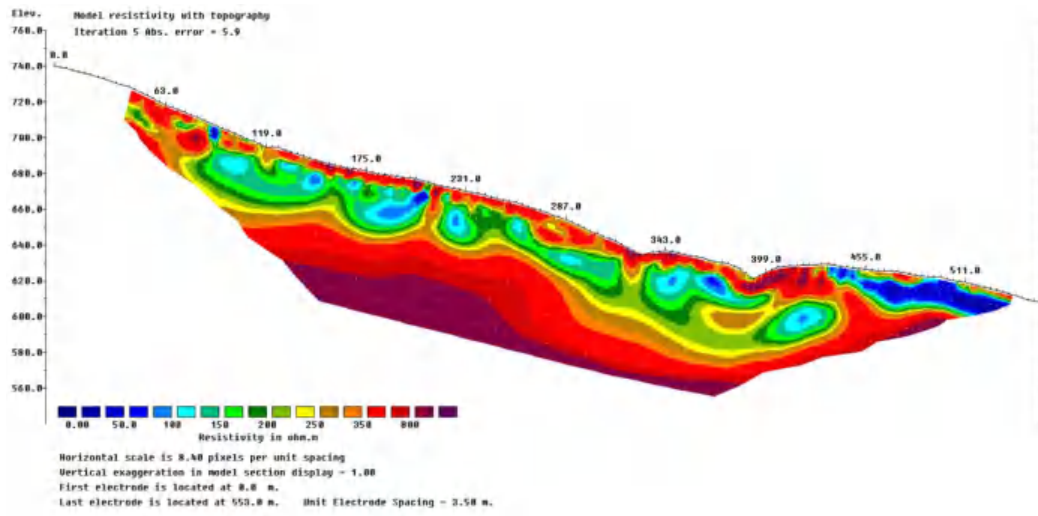
h) Lintasan N02



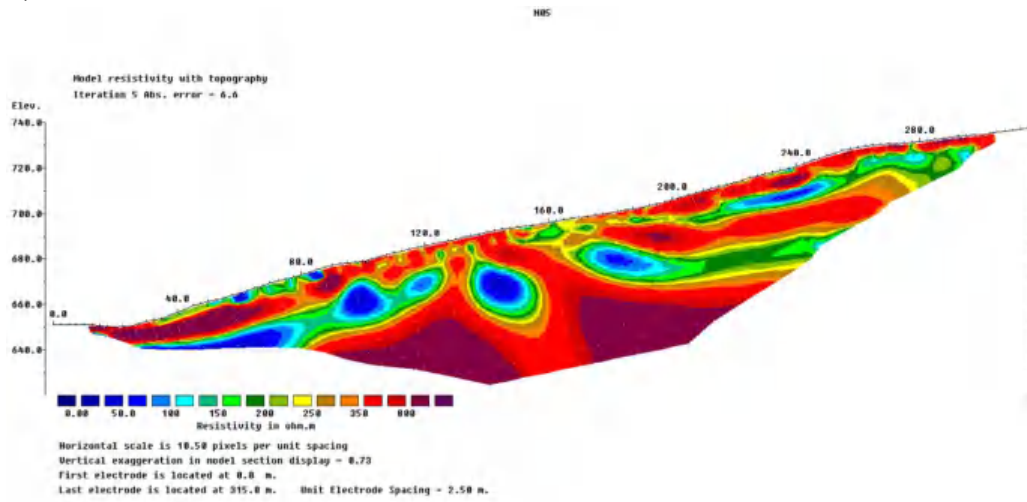
i) Lintasan N03



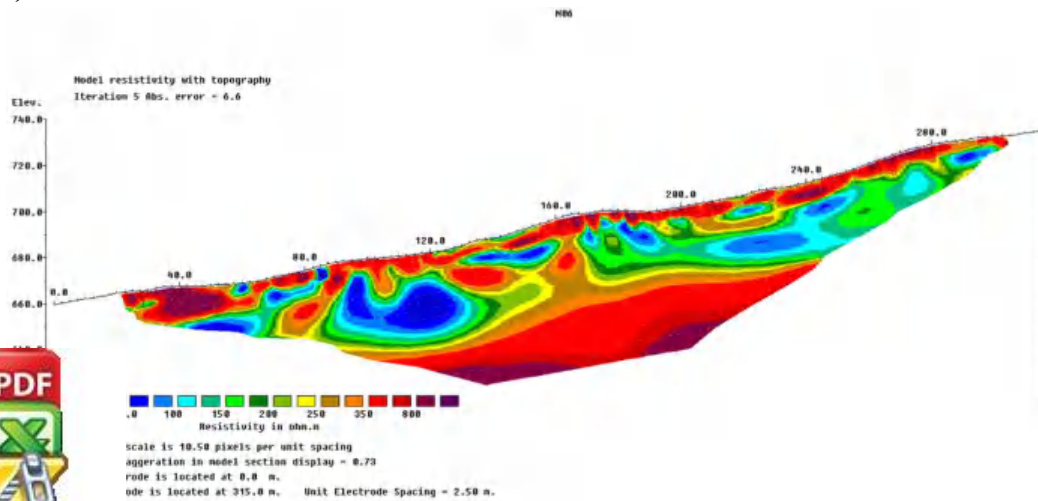
j) Lintasan N04



k) Lintasan N05

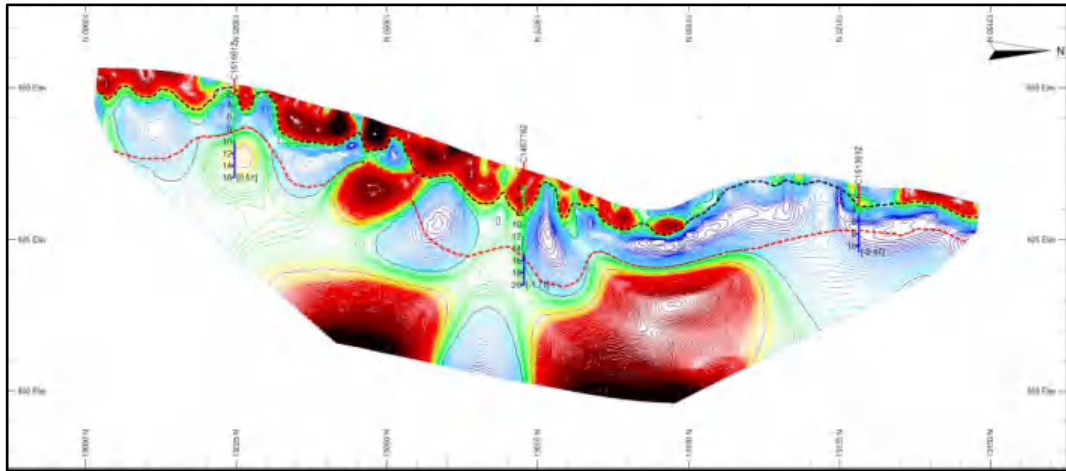


l) Lintasan N06

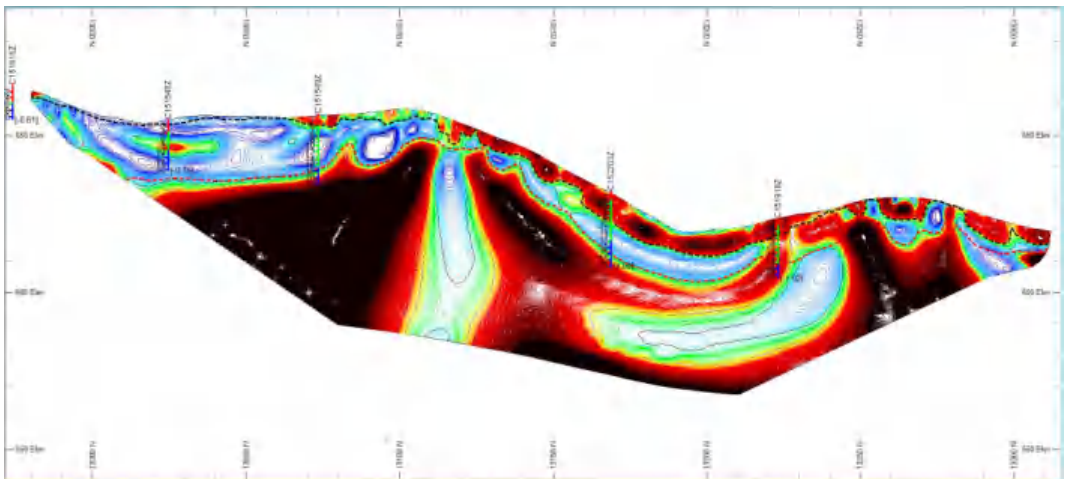


Lampiran 4. *Overlay* Interpretasi ERT dan Data Bor

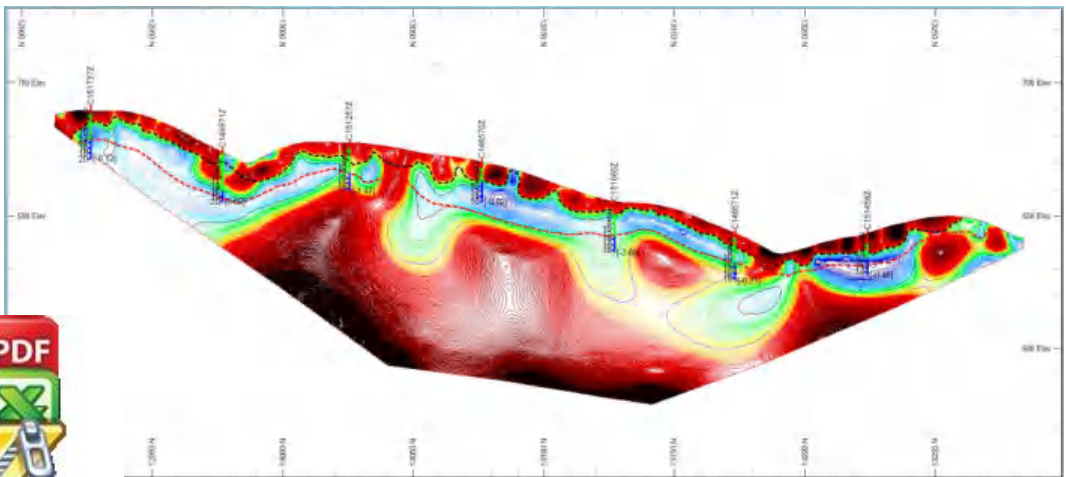
a) Lintasan E02



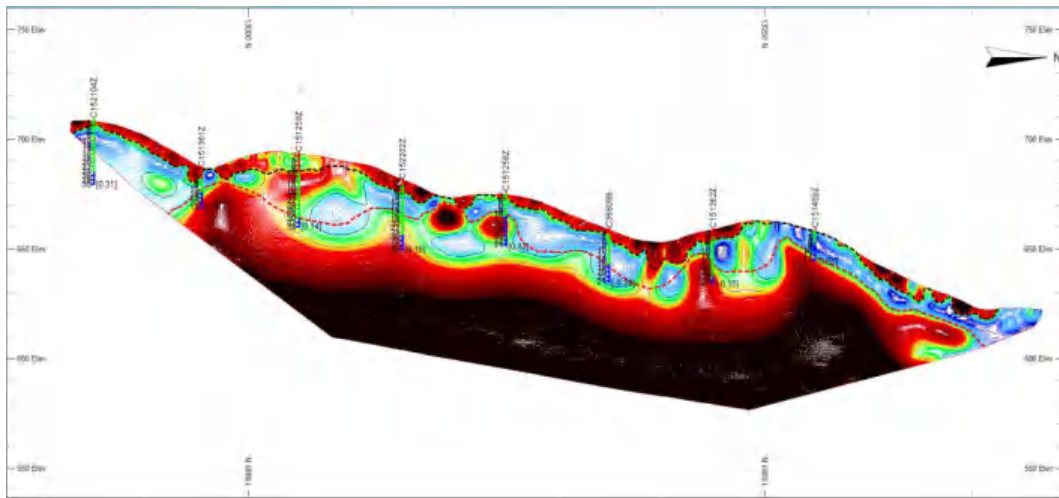
b) Lintasan E03



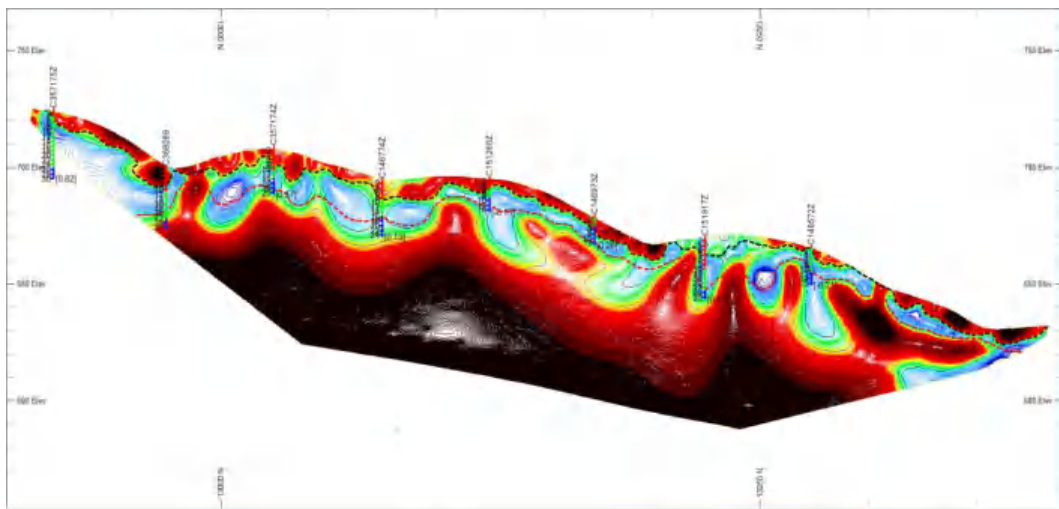
c) Lintasan E04



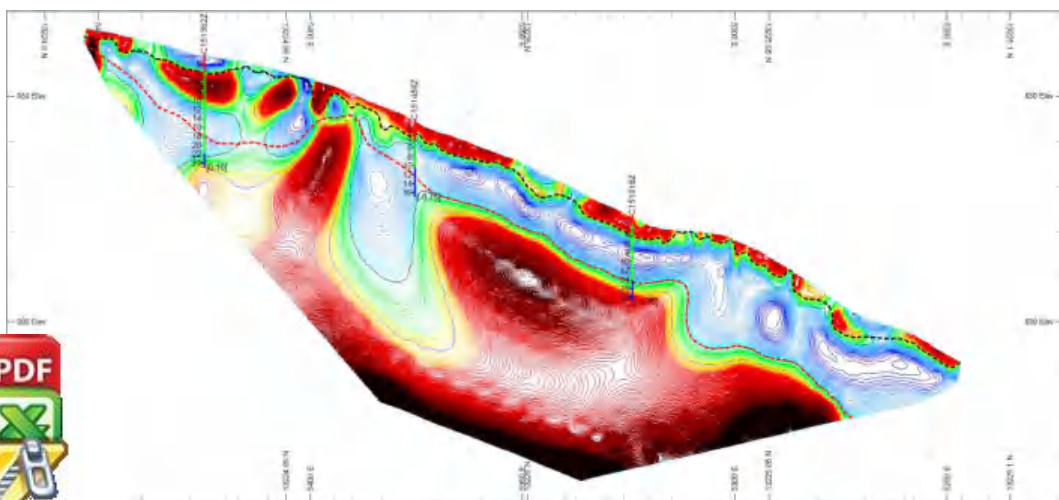
d) Lintasan E05



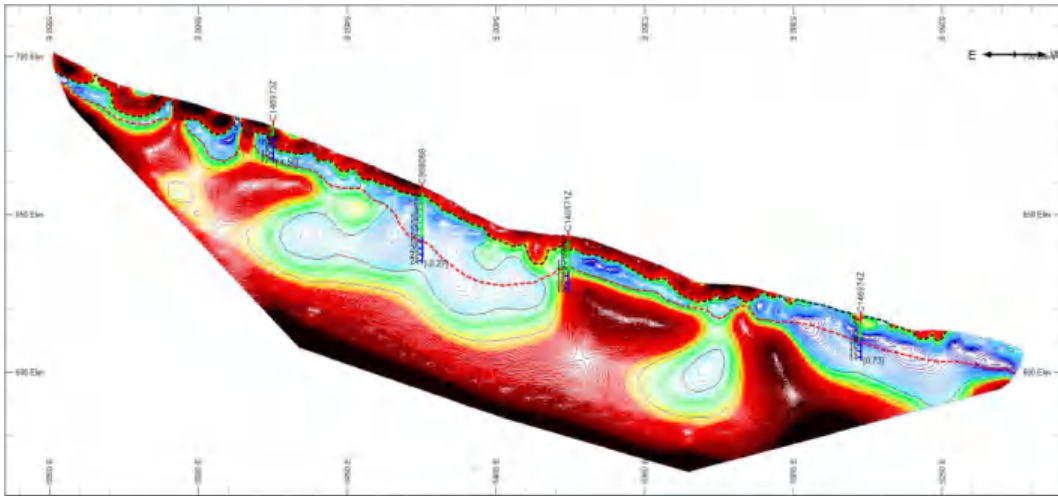
e) Lintasan E06



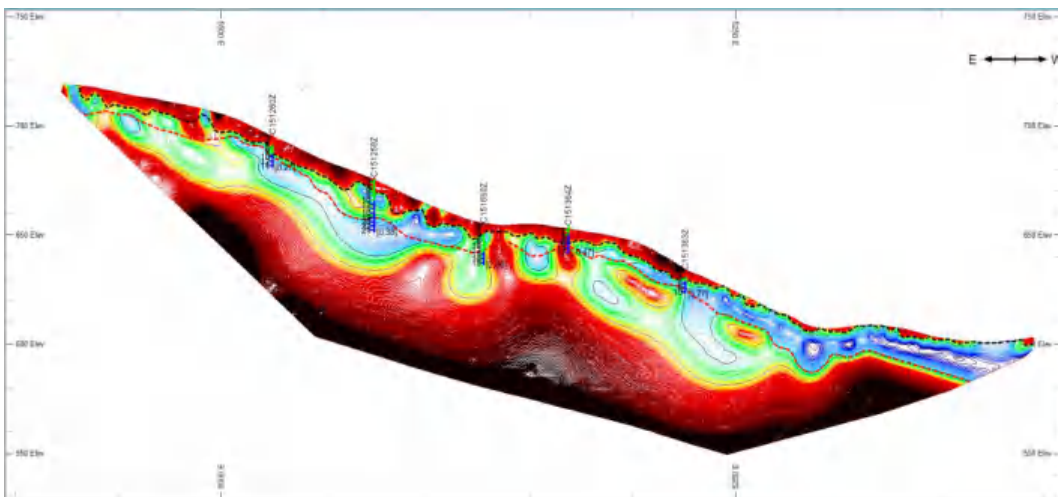
f) Lintasan N01



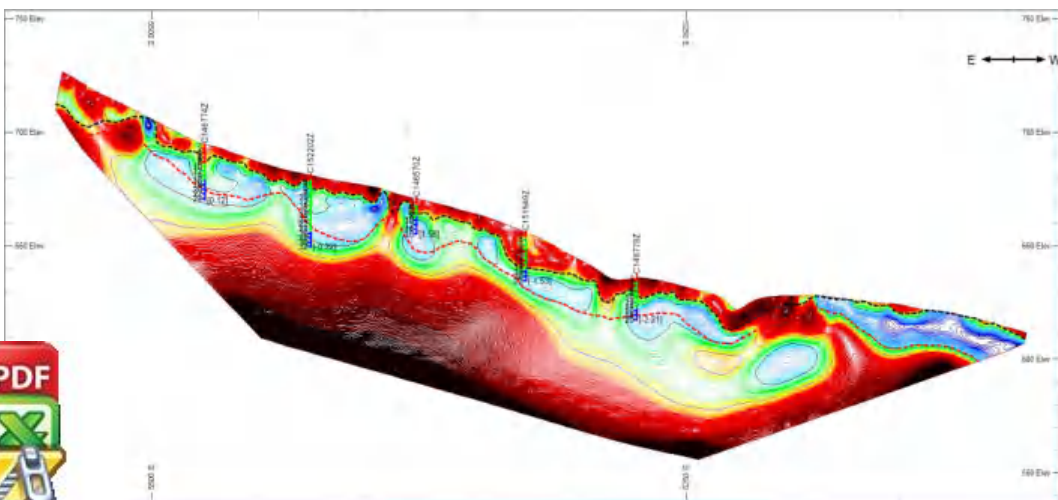
g) Lintasan N02



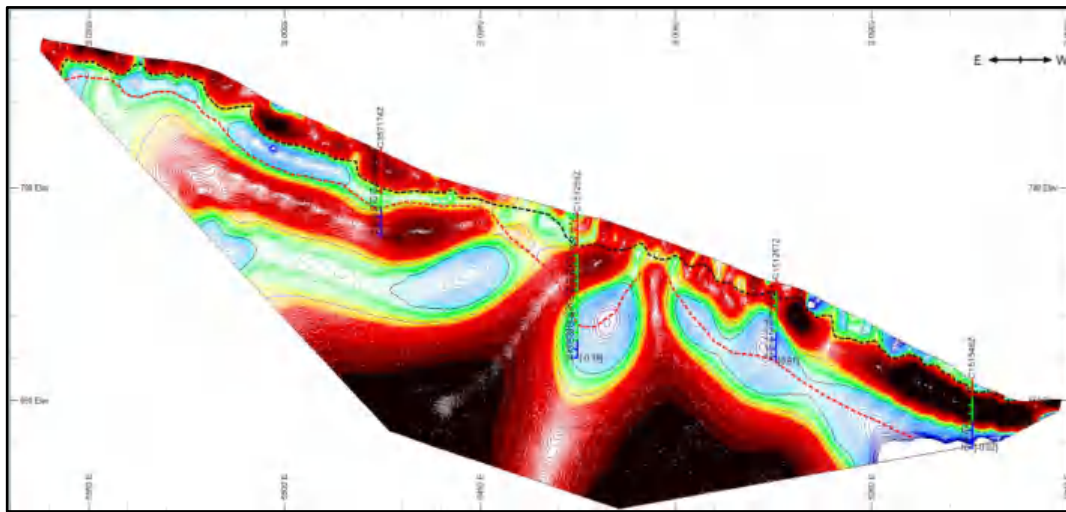
h) Lintasan N03



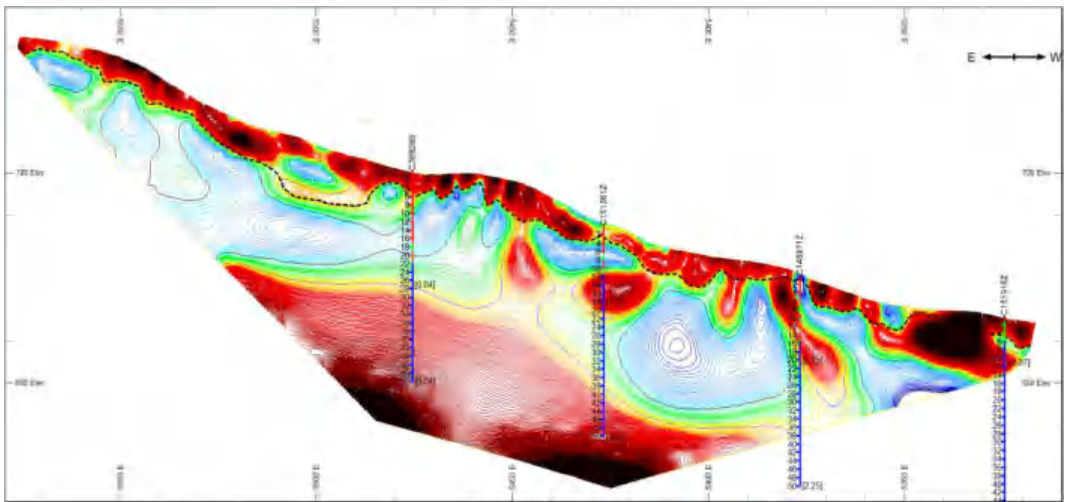
i) Lintasan N04



j) Lintasan N05



k) Lintasan N06



Lampiran 5. Dokumentasi Kegiatan





Optimized using
trial version
www.balesio.com