

**SKRIPSI GEOFISIKA**

**Studi Zona Intrusi Air Laut Pada Kawasan Karst Baruga,  
Bantimurung Kabupaten Maros**

**Disusun dan Diajukan Oleh:**

**MUH. FARID WAJEDY**

**H061171008**



**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2021**

**HALAMAN JUDUL**

**Studi Zona Intrusi Air Laut Pada Kawasan Karst Baruga,  
Bantimurung Kabupaten Maros**

**SKRIPSI**

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains  
Pada Departemen Geofisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Hasanuddin*

**OLEH:**

**MUH. FARID WAJEDY**

**H061171008**

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

**2021**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**Studi Zona Intrusi Air Laut Pada Kawasan Karst Baruga, Bantimurung  
Kabupaten Maros**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**MUH. FARID WAJEDY**

**H061171008**

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

Pada tanggal 5 Maret 2021

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

**Pembimbing Utama**

**Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, M.T. Surv.**  
NIP. 196406161989031006

**Pembimbing Pertama**

**Muh. Fawzy Ismullah Massinai, S.Si, MT.**  
NIP. 199111092019031010

**Ketua Program Studi,**

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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muh. Farid Wajedy  
Nim : H061171008  
Program Studi : Geofisika  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**“Studi Zona Intrusi Air Laut Pada Kawasan Karst Baruga, Bantimurung  
Kabupaten Maros”**

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, 5 Maret 2021

Yang menyatakan



**MUH. FARID WAJEDY**

## **SARI BACAAN**

Permasalahan utama yang dihadapi pada daerah dekat dengan pantai adalah adanya intrusi air laut ke dalam akuifer air tanah yang mempengaruhi kualitas air tanah itu sendiri. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keterdapatannya intrusi air laut di Desa Baruga, Kecamatan Bantimurung, Kabupaten Maros. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode geolistrik resistivitas dan menggunakan perhitungan persamaan Ghyben-Herzberg untuk menentukan kedalaman zona intrusi air laut.

**Kata Kunci:** Resistivitas, Wenner-Schlumberger, Intrusi Air laut

## **ABSTRACT**

The main problem faced in areas close to the coast is the intrusion of sea water into the groundwater aquifer which affects the quality of the groundwater itself. This study aims to determine the presence of sea water intrusion in Baruga Village, Bantimurung District, Maros Regency. The method used in this research is the geoelectric resistivity method and uses the calculation of the Ghyben-Herzberg equation to determine the depth of the seawater intrusion zone.

**Keywords:** Resistivity, Wenner-Schlumberger, Seawater Intrusion

## KATA PENGANTAR

*Bismillahirrahmanirrahim*, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi ini bisa diselesaikan dengan judul **Studi Zona Intrusi Air Laut Pada Kawasan Karst Baruga, Bantimurung Kabupaten Maros** yang merupakan suatu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Terima kasih saya ucapkan kepada kedua orangtua saya, **Sakariah** dan **Hj. Farida**, serta saudara saya **Muh. Aslam**, **Uswatun Hasanah** dan **Khaerunnisa**, serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan dan motivasi sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Selain itu, ucapan terima kasih juga diberikan kepada:

1. Bapak **Dr. Ir. Muhammad Altin Massinai, MT. Surv** selaku dosen pembimbing utama skripsi ini sekaligus sebagai Penasehat Akademik yang selalu memberikan masukan serta motivasi selama saya duduk di bangku perkuliahan maupun pada saat proses penulisan skripsi ini.
2. Bapak **Muh. Fawzy Ismullah Massinai, S. Si, MT.** selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan masukan-masukan serta ilmunya dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Erfan Syamsuddin, M. Si** dan Bapak **Ir. Bambang Harimei Soeprapto, M. Si** selaku penguji yang telah memberikan masukan dan koreksi dalam penulisan skripsi ini.

4. Seluruh Dosen dan Staf Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin yang telah banyak memberikan ilmu serta motivasi.
5. Teman seperjuanganku dalam menulis Skripsi **Faishal Saini, Melsi Reata** dan **Dewi Shafira**
6. Seluruh teman – teman **Geofisika17** yang selalu membantu selama kuliah.
7. Seluruh pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca maupun penulis. Penulis telah mengerahkan segala kemampuan dalam proses penyusunan skripsi ini hingga selesai. Namun sebagai manusia biasa yang memiliki kekurangan, penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna karena kesempurnaan hanya milik Allah SWT.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>ii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>SARI BACAAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
I.1    Latar Belakang.....	1
I.2    Rumusan Masalah .....	1
I.3    Ruang Lingkup .....	2
I.4    Tujuan Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
II.1    Geologi Regional Bagian Barat Sulawesi Selatan.....	4
II.2    Tatanan Geologi Kabupaten Maros.....	6
II.3    Jenis-jenis Tanah Kabupaten Maros.....	8
II.4    Intrusi Air Laut.....	10
II.5    Metode Geolistrik Resistivitas .....	12
II.5.1    Potensial Pada Media Homogen .....	12
II.5.2    Elektroda Arus Tunggal di Dalam Bumi .....	13
II.5.3    Elektroda Arus Tunggal di Permukaan .....	14
II.5.4    Dua Elektroda Arus di Permukaan.....	16
II.6    Konfigurasi Wenner-Schlumberger.....	17
II.7    Resistivitas Batuan .....	18
II.8    Teori Dasar Inversi .....	19
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>25</b>
III.1    Lokasi Penelitian .....	25
III.2    Alat dan Bahan .....	25
III.2.1    Alat Akuisi Data Geolistrik.....	25

III.2.2	Alat dan Bahan Pengolahan Data.....	26
III.3	Prosedur Pengambilan Data .....	26
III.4	Pengolahan Data.....	27
III.4.1	Pengolahan data Geolistrik .....	27
III.4.2	Pengolahan Pasang Surut.....	27
III.5	Bagan Alir Penelitian .....	28
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>29</b>
IV.1	Hasil dan Pembahasan.....	29
IV.1.1	Perhitungan Ghyben-Herzberg.....	29
IV.1.2	Geolistrik Resistivitas.....	29
<b>BAB V</b>	<b>PENUTUP.....</b>	<b>32</b>
V.1	Kesimpulan.....	32
V.2	Saran.....	32
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>.....</b>	<b>32</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>.....</b>	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar II.1</b> Peta Geologi Sulawesi Selatan .....	4
<b>Gambar II.2</b> Peta Geologi Kabupaten Maros .....	7
<b>Gambar II.3</b> Peta Jenis Tanah Kabuptan Maros.....	9
<b>Gambar II.4</b> Hubungan air tawar dan air asin .....	10
<b>Gambar II.5</b> Sumber Arus di Dalam Bumi .....	14
<b>Gambar II.6</b> Sumber Arus di Permukaan.....	15
<b>Gambar II.7</b> Dua Elektroda Arus dan Potensial di Permukaan.....	16
<b>Gambar II.8</b> Konfigurasi Elektroda.....	17
<b>Gambar III.1</b> Peta Lokasi Penelitian.....	25
<b>Gambar III.2</b> Bagan Alir Penelitian .....	28
<b>Gambar IV.1</b> Grafik <i>Interface</i> Air Tawar dan Air Asin.....	29
<b>Gambar IV.2</b> Peta Lintasan Pengukuran .....	30
<b>Gambar IV.3</b> Penampang Resistivitas Lintasan 1 .....	30
<b>Gambar IV.4</b> Penampang Resistivitas Lintasan 2 .....	31

## DAFTAR TABEL

<b>Table 2.1</b> Resistivitas Batuan .....	19
--	----

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Air tanah merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat penting bagi kehidupan manusia. Air tanah sebagai media kebutuhan sehari-hari pemanfaatannya akan semakin meningkat seiring berjalannya waktu (Massinai et al., 2020). Salah satu penyebab terjadinya kekurangan air adalah pengambilan air tanah secara berlebihan dan terus menerus mengakibatkan produktifitas akuifer dikalahkan oleh produksi air tanah itu sendiri (Wardhana dkk., 2017).

Pada daerah pinggir pantai yang melakukan proses pengambilan air tanah secara berlebihan akan menimbulkan masalah baru yaitu adanya intrusi air laut ke dalam akuifer yang mempengaruhi kualitas air tanah itu sendiri (Susilawati dkk., 2018). Intrusi air laut merupakan proses menyusupnya air laut secara perlahan menggantikan posisi air tanah. Dengan massa jenis yang tinggi air asin akan berada di bawah air tanah yang bersifat tawar. Hal tersebut terjadi karena air asin memiliki kandungan mineral yang lebih banyak dari air tawar (Jusmi & Bakri, 2020).

Adanya intrusi air laut yang terjadi di suatu daerah juga dapat dimanfaatkan. Sebagaimana masyarakat di Dusun Batunapara, Desa Baruga, Kecamatan Bantimurung, Kabupaten Maros memanfaatkan intrusi air laut untuk memenuhi kebutuhan air asin tambak – nya yang selalu kekurangan pasokan air asin.

Dalam mendeteksi adanya intrusi air laut pada suatu daerah biasanya dilakukan pengukuran geofisika. Salah satu metode geofisika yang efektif dalam mendeteksi

intrusi air laut adalah metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT). Metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) adalah metode geofisika yang digunakan untuk mempelajari resistivitas batuan. Prinsip dasar dari metode resistivitas yaitu menginjeksi listrik ke dalam bumi dan mengukur respon bumi melalui nilai beda potensial yang dihasilkan. Nilai beda potensial yang didapatkan akan diinversikan untuk mendapatkan nilai resistivitas dan dibuat penampang 2D. Sehingga dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai resistivitas baik secara vertikal maupun horizontal (Hutabarat dkk., 2016).

Penelitian mengenai intrusi air laut sebelumnya telah dilakukan oleh Kazakis et al. pada tahun 2016. Adapun hasil yang dicapai adalah intrusi air laut akuifer pada daerah pesisir yang terdiri dari lempung, pasir, kerikil, dan batupasir menggunakan metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT). Nilai resistivitas pada akuifer air asin yang terdiri dari material pasir dan kerikil berkisar 0.1 – 15  $\Omega\text{m}$  sedangkan lempung mempunyai resistivitas 1 - 10  $\Omega\text{m}$  (Kazakis et al., 2016).

## **I.2 Rumusan Masalah**

Bagaimana keterdapatannya intrusi air laut di Desa Baruga, Kecamatan Bantimurung, Kabupaten Maros?

## **I.3 Ruang Lingkup**

Adapun ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada proses pengambilan data primer, pengolahan data, interpretasi data resistivitas untuk mengidentifikasi zona intrusi air laut. Pengolahan data yang dilakukan berupa nilai resistivitas yang kemudian menghasilkan penampang bawah permukaan 2-D berdasarkan nilai resistivitas.

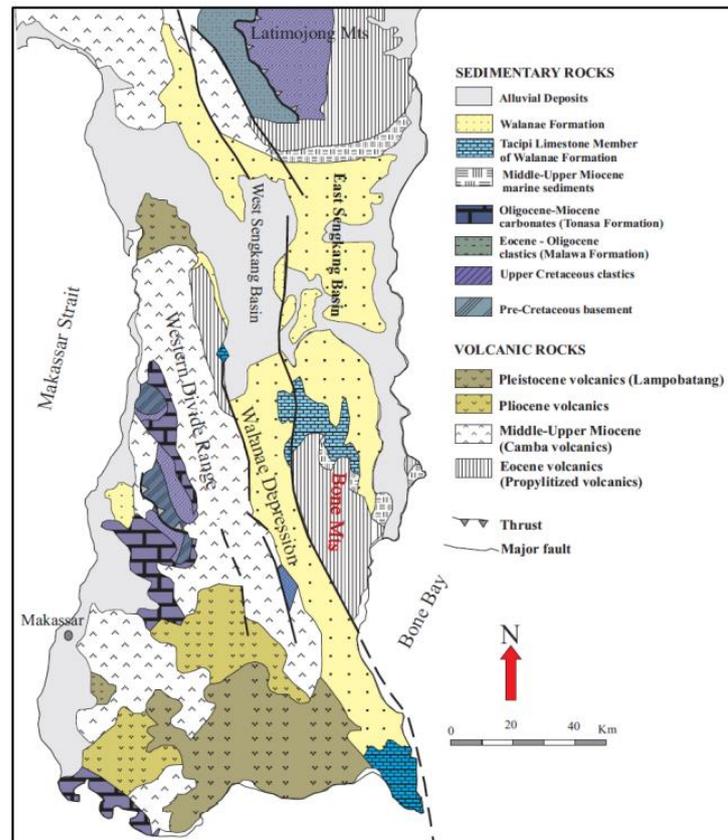
#### **I.4 Tujuan Penelitian**

Mengetahui keterdapatn intrusi air laut di Desa Baruga, Kecamatan Bantimurung, Kabupaten Maros.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II.1 Geologi Regional Bagian Barat Sulawesi Selatan



**Gambar II.1** Peta Geologi Sulawesi Selatan (Sompotan, 2012)

Geologi regional wilayah bagian timur dan barat Sulawesi Selatan berbeda, kedua wilayah ini dibatasi atau dipisahkan oleh Sesar Walanae. Pada masa Mesozoikum, *basement* yang kompleks terdapat di dua wilayah, pertama terdapat di wilayah bagian barat Sulawesi Selatan yang tidak jauh dari Bantimala dan di wilayah Barru yang mana terdiri atas batuan metamorf, sedimen, dan batuan ultramafik. Terdapatnya batuan metamorf yang memiliki kemiripan dengan batuan metamorf yang terdapat di Pulau Jawa, Pegunungan Meratus di Kalimantan Selatan dan

batuan di Sulawesi Tengah memperlihatkan bahwa *basement* kompleks Sulawesi Selatan bisa jadi merupakan bagian fragmen yang pecah akibat akresi kompleks yang cukup besar pada awal *Cretaceous*.

Sedimen di masa akhir *Cretaceous* meliputi Formasi Balangbaru dan Marada yang berada di bagian wilayah barat dan timur Sulawesi Selatan, pada Formasi Balangbaru sedimen-sedimennya tidak selaras dengan kompleks *basement*nya, formasi ini tersusun dari batuan *sandstone* dan *silty-shale*, *pebbly sandstone*, breksi dan konglomerat.

Batuan vulkanik berusia Paleosen terdapat di wilayah bagian timur Sulawesi Selatan dan tidak selaras dengan Formasi Balangbaru. Di wilayah Bantimala batuan vulkanik ini disebut Bua. Formasi ini tersusun dari lava dan endapan piroklastik andesit dengan komposisi *trachy-andesit* dengan sisipan *limestone* dan *shale*.

Formasi Mallawa tersusun dari *arcosic*, *sandstone*, *siltstone*, *claystone*, napal dan konglomerat dan diselingi lapisan *limestone* dan batubara. Formasi ini berada di bagian barat Sulawesi Selatan dan tidak selaras dengan Formasi Balangbaru. Formasi Mallawa diduga diendapkan dari laut dangkal hingga *marginal*.

Formasi batugamping Tonasa terdiri dari batugamping yang selaras dengan Formasi Mallawa. Formasi Tonasa berumur Eosen sampai pertengahan Miosen. Formasi Mallawa dan Tonasa tersebar di wilayah bagian barat Sulawesi Selatan, yang mana kedua formasi ini tidak tersingkap di wilayah bagian timur Sesar Walanae kecuali Formasi batugamping Tonasa beranggotakan batugamping yang tersingkap.

Formasi Salo Kalupang terletak di bagian timur Sulawesi Selatan yang terdiri atas *sandstone, shale, dan claystone interbedded* dengan batuan vulkanik konglomerat, breksi, tufa, *limestone*, dan napal. Formasi ini diperkirakan berumur *Eosen* hingga akhir *Oligosen*.

Pegunungan Bone berdasarkan anomaly *high gravity* dan *Mid Ocean Ridge Basalts* (MORB) diindikasikan sebagai bagian *ophiolite*, Formasi Bone diindikasikan terdiri dari *wackstone* bioklastika dan butiran *packstones foraminifera planktonic*.

Formasi Camba terletak di bagian barat Sesar Walanae yang mana bagian teratas dari formasi ini tersusun atas breksi vulkanik, konglomerat, lava, dan tuf *interbedded* dengan sedimen *marine*, diduga batuan vulkanik Camba berumur akhir Miosen (Sompotan, 2012).

## **II.2 Tatanan Geologi Kabupaten Maros**

Satuan geomorfologi yang terdapat di Kabupaten Maros (Gambar II.2) terbagi atas 4, yaitu (KLHS Kab. Maros, 2011):

### **1. Satuan Pegunungan Vulkanik**

Satuan Pegunungan Vulkanik Kabupaten Maros terdapat di wilayah utara, timur, dan tengah puncak tertinggi Bulu Lekke dengan luas 30% dari luas Kabupaten Maros. Hal tersebut dapat dilihat dari kenampakan relief topografi yang tinggi, tekstur topografi yang kasar, kemiringan terjal, dan batuan penyunnya terdiri dari batuan gunungapi vulkanik.

### **2. Satuan Intrusi dan Sedimen**

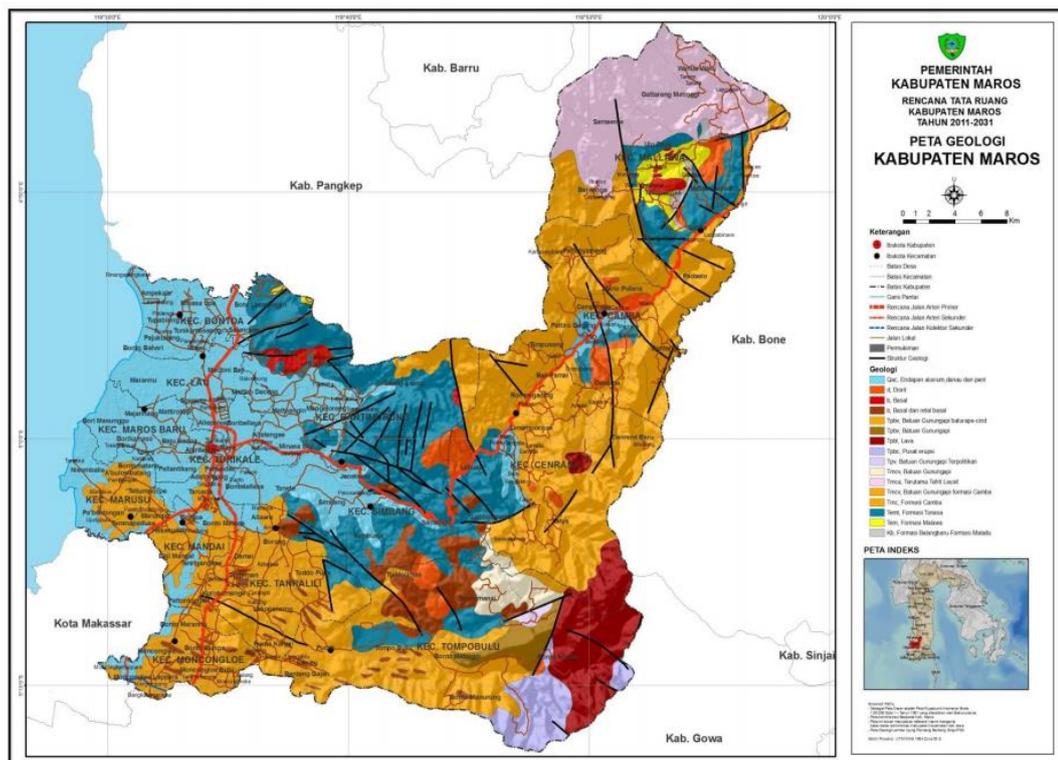
Satuan geomorfologi ini menyebar secara setempat-setempat di Kabupaten Maros dengan luas 15% dari luas kabupaten Maros yang tersusun dari batuan vulkanik, batuan sedimen, dan batuan intrusi.

### 3. Satuan Perbukitan Karst

Perbukitan karst ini tersebar cukup luas di wilayah bagian tengah dan timur laut Kabupaten Maros yang meliputi Kecamatan Bontoa, Bantimurung, Simba, Tanralili, Mallawa, dan Camba. Ciri khas dari satuan geomorfologi ini bertekstur kasar dengan batugamping sebagai batuan penyusun utamanya.

### 4. Satuan Pedataran Alluvium

Tersebar di wilayah bagian barat Kabupaten Maros yang mengarah utara-selatan dengan luas 25% dari luas Kabupaten Maros, dengan ciri bentuk morfologi topografi datar, tekstur halus, relief rendah, dengan batuan dasar endapan alluvium.



**Gambar II.2** Peta Geologi Kabupaten Maros (KLHS Kab. Maros, 2011)

### **II.3 Jenis-jenis Tanah Kabupaten Maros**

Jenis tanah Kabupaten Maros (Gambar II.3) dapat dikelompokkan kedalam 4 kelas, yaitu (KLHS Kab. Maros, 2011):

#### **1. Alluvium Muda**

Endapan alluvial di Kabupaten Maros berumur sekitar Kuartar (Resen) yang menempati wilayah dengan ketinggian 0-60 meter, sudut kemiringan <3% dengan tekstur beraneka ragam mulai dari lempung, lanau, pasir, lumpur, kerikil, dan kerakal. Luas penyebaran dari endapan alluvial ini berkisar 14,20% (229,91 km<sup>2</sup>) dari luas Kabupaten Maros. Terdapat di beberapa kecamatan seperti Kecamatan Lau, Bontoa, Turikale, Moncongloe, Marusu, Mandai, Camba, Tompobulu, Tanralili, dan Bantimurung.

#### **2. Rigosol**

Tanah rigosol merupakan tanah hasil pelapukan batuan gunungapi yang menempati wilayah perbukitan vulkanik dengan ketinggian 110 - 1540 meter dengan sudut kemiringan >15%. Tanah rigosol ini dapat dicirikan dengan warna fisik coklat hingga kemerah-merahan. Luas penyebarannya sekitar 26,50% (429,06 km<sup>2</sup>) dari luas Kabupaten Maros dan terdapat di Kecamatan Cenrana, Camba, Mallawa, dan Tompobulu.

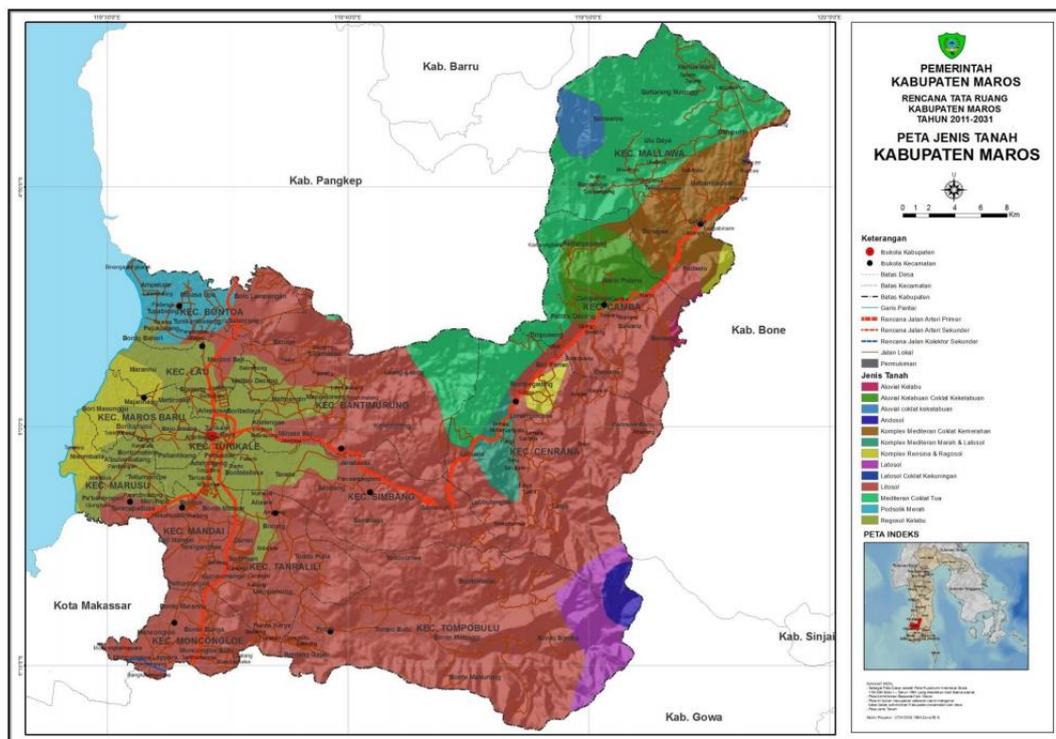
#### **3. Litosol**

Tanah litosol adalah tanah yang berasal dari hasil pelapukan batuan beku dan batuan sedimen yang menempati wilayah perbukitan intrusi dengan ketinggian 3 -150 meter dengan kemiringan lereng <70%. Luas Penyebaran 37,60% atau 608, 79 km<sup>2</sup> dari Luas Kabupaten Maros. Tanah ini dicirikan

dengan kenampakan fisik berwarna coklat kemerahan dan terdapat di Kecamatan Mallawa, Camba, Bantimurung, Simbang, Tompobulu, Mandai, Tanralili, dan Cenrana.

#### 4. Mediteran

Adalah suatu jenis tanah yang berasal dari pelapukan batugamping yang berada di wilayah perbukitan karst yang mempunyai ketinggian 8-740 meter, sudut kemiringan lereng >70%, dengan luas penyebaran 21,70% atau 351,35 km<sup>2</sup> yang meliputi Kecamatan Mallawa, Camba, Bantimurung, Simbang, Tompobulu, Bontoa, Tanralili.

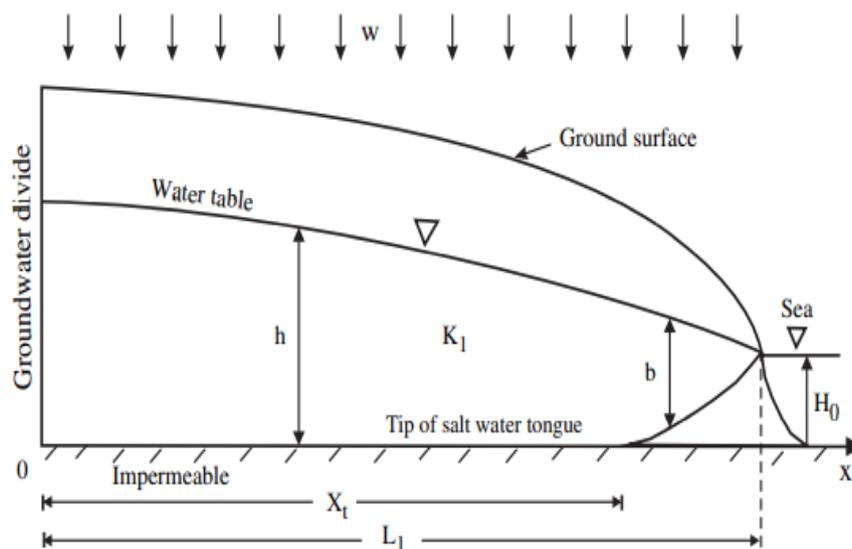


**Gambar II.3** Peta Jenis Tanah Kabuptan Maros (KLHS Kab. Maros, 2011)

Dilihat dari geologi regional Kabupaten Maros, secara khusus daerah yang berada dekat dengan pantai sangat rawan terjadi intrusi air laut. Hal ini dapat dilihat dari batuan penyusunnya yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik.

## II.4 Intrusi Air Laut

Intrusi air laut adalah suatu proses masuknya air laut dalam akuifer menggantikan kedudukan air tawar. Pada keadaan yang statis, air tawar selalu berada di atas air asin pada daerah yang dekat dengan pantai, hal itu disebabkan karena densitas air asin lebih besar dibandingkan air tawar sebagaimana yang ditunjukkan Gambar II. 4 berikut (Astutik dkk, 2016):



**Gambar II.4** Hubungan air tawar dan air asin (Guo & Jiao, 2007)

Dalam keadaan mempertimbangkan aliran air tanah dapat dihasilkan dari pengisian dari air hujan, dengan menggunakan asumsi Dupuit dan persamaan dari Ghyben-Herzberg solusi analitik untuk menghitung tinggi muka air tanah dapat dihasilkan sebagai berikut (Guo & Jiao, 2007):

$$h = \sqrt{\frac{w}{K}(L^2 - x^2) + \frac{\rho_s}{\rho_f} H_0^2} \quad (2.1)$$

Dengan:

$w$  = Laju infiltrasi (m/s)

$H_0$  = Ketinggian air laut dari lapisan *impermeable* (m)

$K$  = Konduktivitas hidrolik (m/s)

$L$  = Jarak bibir pantai dengan *groundwater divide* (m)

$x$  = Jarak lokasi pengukuran dengan *salt water tongue* (m)

$h$  = Ketinggian muka air tawar (m)

Dengan mendapatkan ketinggian air tawar maka didapatkan *interface* antara air tawar dan air asin dapat didekati dengan persamaan Ghyben-Hezberg sebagai berikut (Guo & Jiao, 2007):

$$Z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} (h - H_0) \quad (2.2)$$

Dengan:

$Z$  = Kedalaman *interface* air tawar dan air asin diukur dari MSL (m)

$h$  = Ketinggian muka air tawar (m)

$\rho_f$  = Densitas air tawar ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_s$  = Densitas air asin ( $\text{kg/m}^3$ )

$H_0$  = Ketinggian air laut dari lapisan *impermeable* (m)

Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya intrusi air laut adalah (Susilawati dkk., 2018):

1. Penurunan muka air tanah
2. Pemompaan air tanah yang berlebihan
3. Masuknya air laut melalui sungai, dan kanal

Salah satu metode geofisika yang sangat sensitif dalam mengidentifikasi zona intrusi air laut adalah metode geolistrik resistivitas.

## II.5 Metode Geolistrik Resistivitas

### II.5.1 Potensial Pada Media Homogen

Arus listrik dalam batuan dapat mengalir apabila batuan tersebut memiliki elektron bebas, aliran listrik yang mengalir dalam batuan akan dipengaruhi oleh karakteristik batuan masing-masing batuan. Salah satu karakteristik batuan ialah resistivitas atau tahanan jenis. Resistivitas atau tahanan jenis adalah suatu parameter yang menunjukkan daya hambat yang dimiliki oleh suatu material pada saat dialirkan listrik.

Pada medium homogen isotropik ketika dialiri arus listrik, yang mana  $\delta A$  merupakan elemen permukaan dengan  $J$  adalah rapat arus, maka arus yang masuk pada  $\delta A$  merupakan  $\vec{J} \cdot \vec{\delta A}$ . Rapat arus dan medan listrik dapat dihubungkan oleh hukum Ohm sebagai berikut (Telford et al., 1990):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.3)$$

Dengan:

$E$  = Medan Listrik (Volt/m)

$\sigma$  = Konduktivitas (S/m)

$J$  = Rapat Arus ( $A/m^2$ )

Medan listrik adalah gradien dari potensial:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (2.4)$$

Persamaan rapat arus didistribusikan maka didapatkan:

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

Jika arusnya stasioner maka :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (2.6)$$

Sehingga,

$$\vec{\nabla}(\sigma \cdot \vec{\nabla}V) = 0 \quad (2.7)$$

$$\vec{\nabla}\sigma \cdot \vec{\nabla}V + \sigma \vec{\nabla}^2V = 0 \quad (2.8)$$

Apabila  $\sigma$  konstan, maka persamaan diatas akan memenuhi persamaan Laplace potensial harmonik:

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

### II.5.2 Elektroda Arus Tunggal di Dalam Bumi

Pada model homogen isotropis yang mana elektroda arus ditanam di dalam bumi yang berfungsi sebagai sumber injeksi arus listrik ke segala arah dalam bumi (Gambar II.5). Pada setiap titik equipotensial dalam bumi yang membentuk permukaan bola yang mempunyai jari-jari  $r$ . sehingga arus yang keluar melalui luas permukaan bola dengan jari-jari  $r$  yaitu (Telford et al., 1990):

$$I = 4\pi r^2 J \quad (2.10)$$

$$I = -4\pi r^2 \sigma \frac{dV}{dr} \quad (2.11)$$

$$I = -4\pi \sigma A \quad (2.12)$$

Persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut :

$$A = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (2.13)$$

Sehingga diperoleh :

$$\rho = \frac{4\pi r V}{I} \quad (2.14)$$

Atau

$$V = \left(\frac{I\rho}{4\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (2.15)$$

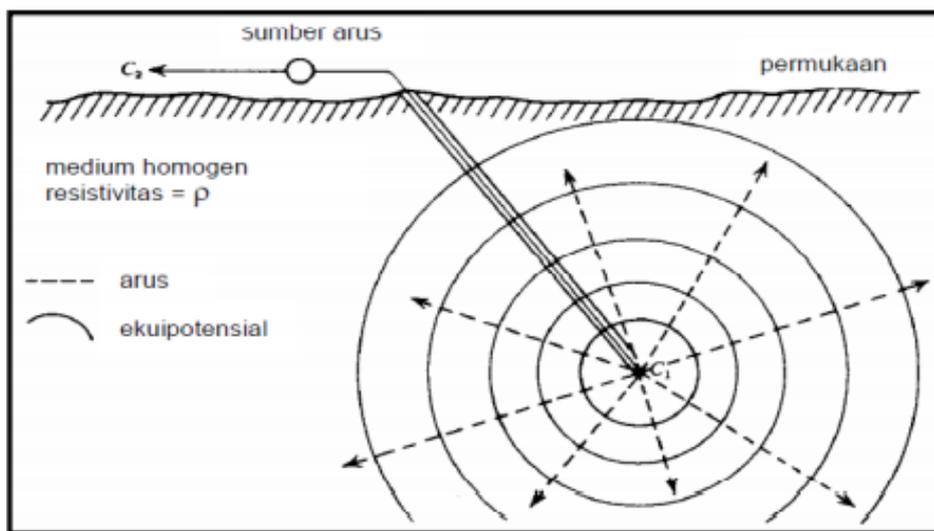
Dengan,

$\rho$  = Resistivitas (ohm. m)

$I$  = Kuat Arus Listrik (Ampere)

$V$  = Potensial Listrik (Volt)

$A$  = Konstanta



**Gambar II.5** Sumber Arus di Dalam Bumi (Telford et al., 1990)

### II.5.3 Elektroda Arus Tunggal di Permukaan

Jika elektroda arus berada di permukaan pada media homogen isotropik (Gambar II.6) dan nilai konduktivitas udara sama dengan nol, maka setiap titik equipotensial yang dihasilkan membentuk permukaan setengah bola sehingga (Telford et al., 1990):

$$I = 2\pi r^2 J \quad (2.16)$$

$$I = -2\pi r^2 \sigma \frac{dV}{dr} \quad (2.17)$$

$$I = -2\pi \sigma A \quad (2.18)$$

Dengan demikian,

$$A = -\left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \quad (2.19)$$

Maka didapatkan:

$$V = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (2.20)$$

Atau

$$\rho = \frac{2\pi rV}{I} \quad (2.21)$$

$V$  = Potensial Listrik (Volt)

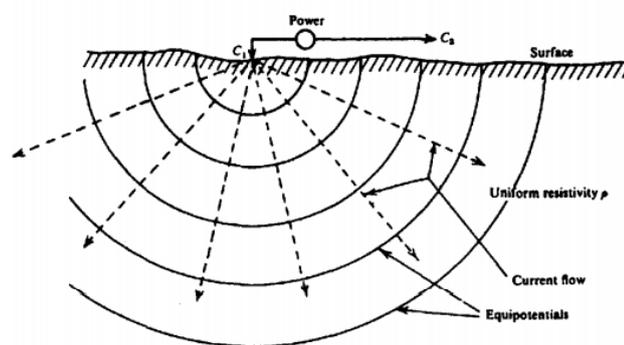
$\rho$  = Resistivitas (Ohm.m)

$I$  = Kuat Arus Listrik (Ampere)

$A$  = Konstanta

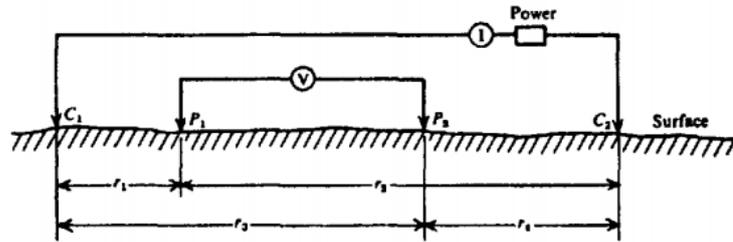
$J$  = Rapat Arus ( $A/m^2$ )

$\sigma$  = Konduktivitas (S/m)



**Gambar II.6** Sumber Arus di Permukaan (Telford et al., 1990)

## II.5.4 Dua Elektroda Arus di Permukaan



**Gambar II.7** Dua Elektroda Arus dan Potensial di Permukaan (Telford et al., 1990)

Ketika jarak antara dua elektroda arus dibatasi di permukaan, maka besarnya nilai potensial di permukaan dipengaruhi oleh kedua elektroda arus tersebut. Potensial akibat  $C_1$  pada  $P_1$  adalah (Telford et al., 1990):

$$V_1 = \frac{A_1}{r_1} \quad (2.22)$$

Dengan

$$A_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.23)$$

Karena arus di kedua elektroda itu sama dan berlawanan arah, nilai potensial di  $P_1$  akibat  $C_2$  adalah:

$$V_2 = \frac{A_2}{r_2} \quad (2.24)$$

Dengan

$$A_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.25)$$

$$A_2 = -A_1 \quad (2.26)$$

Maka

$$V_1 + V_2 = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (2.27)$$

Dengan memasukkan elektroda potensial kedua P<sub>2</sub> maka dapat mengukur beda potensial antara P<sub>1</sub> dan P<sub>2</sub> sebagai berikut :

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

$\Delta V$  = Beda Potensial (Volt)

$I$  = Kuat Arus Listrik (Ampere)

$\rho$  = Resistivitas (Ohm.m)

$r_1$  = Jarak Antara C<sub>1</sub> dan P<sub>1</sub> (Meter)

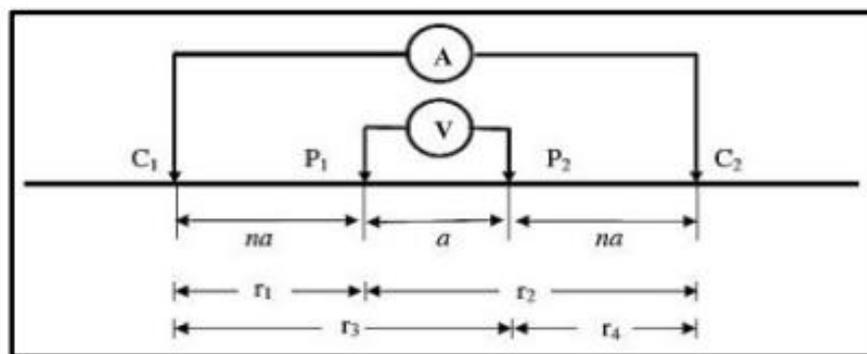
$r_2$  = Jarak Antara C<sub>2</sub> dan P<sub>1</sub> (Meter)

$r_3$  = Jarak Antara C<sub>1</sub> dan P<sub>2</sub> (Meter)

$r_4$  = Jarak Antara C<sub>2</sub> dan P<sub>2</sub> (Meter)

## II.6 Konfigurasi Wenner-Schlumberger

Pada saat melakukan akuisisi data di lapangan konfigurasi elektroda yang digunakan adalah konfigurasi *Wenner-Schlumberger*, yang jarak antara elektroda arus C dengan potensial P dipisahkan jarak sepanjang  $na$ , sedangkan jarak antara elektroda potensial satu P<sub>1</sub> dan potensial dua P<sub>2</sub> dipisahkan dengan jarak sebesar  $a$  sebagaimana ilustrasi Gambar II.8 berikut:



**Gambar II.8** Konfigurasi Elektroda (Loke, 2004)

Rumus untuk menghitung faktor geometri berdasarkan Gambar II.8 di atas yaitu (Loke, 2004):

$$K = \pi n (n + 1) a \quad (2.29)$$

K merupakan faktor geometri yang bergantung pada susun elektroda, sehingga nilai resistivitas semu dapat dihitung dengan rumus (Loke, 2004):

$$\rho = \pi n (n + 1) a \frac{\Delta V}{I} \quad (2.30)$$

Kelebihan konfigurasi Wenner-Schlumberger (Kementrian PUPR, 2019):

1. Resolusi vertikal dan horizontal yang baik.
2. Mampu mendeteksi adanya non-homogenitas.

Kekurangan konfigurasi Wenner-Schlumberger:

1. Pembacaan tegangan pada elektroda MN lebih kecil pada saat jarak AB yang relatif jauh, sehingga memerlukan multimeter yang memiliki karakteristik *high impedance* dengan akurasi tinggi.
2. Memerlukan peralatan pengirim arus DC yang tinggi untuk mengatasi pembacaan tegangan MN yang kecil

## II.7 Resistivitas Batuan

Batuan merupakan salah satu material yang terdapat di bumi yang mempunyai beberapa sifat fisik, salah satunya adalah sifat kelistrikan. Sifat kelistrikan adalah respon yang dimiliki suatu material pada saat dialiri listrik (Tabel 2.1). Sifat kelistrikan material dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan nilai resistivitasnya (Telford et al., 1990) :

1. Konduktor, rentan nilai resistivitas  $10^{-8} \Omega\text{m} - 1 \Omega\text{m}$
2. Semi konduktor, rentan nilai resistivitas  $1 \Omega\text{m} - 10^7 \Omega\text{m}$

3. Isolator, rentan nilai resistivitas  $>10^7 \Omega\text{m}$

**Table 2.1** Resistivitas Batuan (Telford et al., 1990)

<b>Material</b>	<b>Resistivitas (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>
Udara ( <i>Air</i> )	~
Garam Batu ( <i>Rock salt</i> )	30 - $1 \times 10^{13}$
Granit ( <i>Granite</i> )	200 - $1 \times 10^4$
Andesit ( <i>Andesite</i> )	$1.7 \times 10^2$ - $45 \times 10^4$
Basal ( <i>Basalt</i> )	200 - $1 \times 10^5$
Gamping ( <i>Limestone</i> )	500 - $1 \times 10^4$
Batu pasir ( <i>Sandstone</i> )	200 – 8000
Batu serpih ( <i>Shales</i> )	20 – 2000
Pasir ( <i>Sand</i> )	1 – 1000
Lempung ( <i>Clay</i> )	1 – 100
Air tanah ( <i>Ground water</i> )	0.5 – 300
Air asin ( <i>Sea water</i> )	0.2
Kerikil kering ( <i>Dry gravel</i> )	600 - $1 \times 10^4$
Aluvium ( <i>Alluvium</i> )	10 – 800
Kerikil ( <i>Gravel</i> )	100 – 600

## II.8 Teori Dasar Inversi

Pada dasarnya permasalahan geofisika adalah inversi, karena geofisikawan dituntut untuk membuat perkiraan mengenai model dan parameter model dari pengamatan data lapangan (Grandis, 2009). Model yang dicari dalam inversi geofisika berupa model yang memberikan respon yang serupa dengan nilai terukur. Model tersebut

adalah representasi matematis yang ideal dari bagian bumi. Model memiliki seperangkat parameter model yang merupakan besaran fisik yang diperkirakan dari data lapangan (Loke, 2004).

Semua metode inversi pada dasarnya mencoba menentukan model untuk bawah permukaan yang responnya mendekati data yang diukur. Pada metode berbasis sel yang digunakan pada program *RES2DINV* parameter model merupakan nilai resistivitas sel model, sedangkan data yang diukur adalah nilai resistivitas semu.

Pada Metode optimasi, model awal dimodifikasi secara iteratif sehingga perbedaan antara respon model dan nilai data yang diamati berkurang. Data yang terukur dapat ditulis sebagai vektor kolom  $y$  (Loke, 2004):

$$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (2.31)$$

$m$  merupakan banyaknya pengukuran. Respon model  $y_0$  dapat ditulis :

$$y_0 = \text{col}(y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0m}) \quad (2.32)$$

Nilai resistivitas yang digunakan adalah logaritma nilai resistivitas semu untuk data yang diamati dan respon model. Parameter model dapat dituliskan sebagai berikut:

$$x = \text{col}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.33)$$

Dengan  $n$  adalah banyaknya parameter model. Perbedaan antara data pengukuran dengan respon model adalah:

$$\Delta y = y - y_0 \quad (2.34)$$

Metode optimasi *least-square*, model awal dimodifikasi sedemikian rupa sehingga jumlah kuadrat error  $E$  dari perbedaan antara respon model dengan data hasil pengukuran dapat diperkecil.

$$E = \Delta y^t \Delta y \quad (2.35)$$

Persamaan Gauss-Newton untuk menentukan perubahan dalam parameter model yang dapat mengurangi kesalahan jumlah kuadrat.

$$\Delta x_i = [G^T G]^{-1} G^T \Delta y \quad (2.36)$$

Dengan  $\Delta x$  Perubahan Parameter Model dan  $G$  adalah matrix Jacobi dari turunan parsial. Elemen matrix Jacobi diberikan persamaan:

$$G_{ij} = \frac{\partial y_{oi}}{\partial x_j} \quad (2.37)$$

Perubahan parameter model ke -i yang disebabkan oleh perubahan parameter model ke-j. Model baru diperoleh dari perhitungan perubahan parameter model, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$x_{k+1} = \Delta x_k + x_k \quad (2.38)$$

Pada pengaplikasiannya persamaan kuadrat terkecil sederhana (persamaan 2.36) jarang digunakan secara independent dalam inversi geofisika. Dalam beberapa keadaan, matrix  $[G^T G]$  mungkin bernilai tunggal, sehingga persamaan kuadrat terkecil tidak memiliki solusi untuk  $\Delta x_i$ . Masalah umum lainnya adalah hasil perkalian matrix  $[G^T G]$  hampir tunggal (Loke, 2004).

Hal ini dapat terjadi jika model awal yang buruk dan sangat berbeda dengan model yang digunakan. Perubahan parameter yang dihitung menggunakan persamaan 2.36 akan memiliki komponen yang besar sehingga model baru yang didapatkan nilainya

tidak akan realistis. Salah satu metode umum untuk menghindari masalah ini adalah modifikasi Marquardt-Levenberg pada persamaan Gauss-Newton sebagai berikut:

$$\Delta x_i = [G^T G + \lambda I]^{-1} G^T \Delta y \quad (2.39)$$

Dengan  $I$  adalah matrix identitas, faktor  $\lambda$  disebut sebagai *Marquardt* atau *damping*. Faktor *damping* secara efektif membatasi rentang nilai komponen perubahan parameter  $\Delta x_i$ .

Metode Gauss-Newton pada saat perhitungan berupaya meminimalkan jumlah kuadrat dari vektor perbedaan. Sedangkan modifikasi metode Marquardt-Levenberg berupaya meminimalkan kombinasi besarnya vektor perbedaan dan parameter perubahan vektor. Metode ini telah berhasil digunakan dalam inversi data resistivitas *sounding* yang terdiri dari lapisan-lapisan kecil. Namun jika jumlah parameter model besar, yang terdiri dari sejumlah sel kecil, model ini dapat memiliki distribusi resistivitas yang tidak menentu pada daerah dengan nilai resistivitas rendah atau tinggi sehingga tidak merepresentasikan kondisi sebenarnya.

Persamaan Gauss-Newton dimodifikasi lebih lanjut guna meminimalkan variasi spasial pada parameter model sehingga didapatkan metode kuadrat terkecil *smoothness-constraint* sebagai berikut (Loke, 2004):

$$\Delta x_i = [G^T G + \lambda F]^{-1} G^T \Delta y \quad (2.40)$$

Dengan

$$F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z \quad (2.41)$$

Dan  $C_x$ ,  $C_y$  dan  $C_z$  merupakan matrix (*smoothing matrices*) pada arah x, y, z dan  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  dan  $\alpha_z$  adalah suatu besaran nilai smoothness *filter* yang diberikan pada arah x, y, z.

Persamaan 2.40 juga mencoba meminimalkan kuadrat dari perubahan spasial dari nilai resistivitas model. Metode ini sebenarnya adalah metode optimasi *smoothness-constrained* normalisasi  $l_2$ . Metode ini cenderung menghasilkan model dengan variasi nilai resistivitas yang halus. Pendekatan ini dapat diterima jika resistivitas bawah permukaan sebenarnya bervariasi secara halus dan bergradasi (Loke, 2004). Pada beberapa kasus, geologi bawah permukaan terdiri dari beberapa wilayah yang secara internal berada pada daerah yang hampir homogen tetapi dengan batas-batas tajam antar daerah yang berbeda. Untuk kasus seperti ini, rumus inversi persamaan 2.40 dapat dimodifikasi sehingga meminimalkan perubahan absolut nilai resistivitas model.

Secara umum metode ini disebut dengan metode optimasi normalisasi *smoothness-constrained* (*norm smoothness-constrained optimization method*) atau lebih dikenal sebagai metode inversi blok. Salah satu metode sederhana untuk menerapkan metode optimasi  $l_1$  dengan menggunakan formula kuadrat terkecil adalah metode kuadrat terkecil iterasi reweighted. Persamaan 2.40 dapat dimodifikasi sebagai berikut (Loke, 2004):

$$\Delta x_i = [G^T G + \lambda F_R]^{-1} G^T \Delta y \quad (2.42)$$

Dengan

$$F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z \quad (2.43)$$

$R_m$  merupakan *weighting matrices* sehingga elemen-elemen yang berbeda dari data *misfit* dan model *roughness* diberikan bobot yang sama dalam proses inversi. Persamaan 2.42 memberikan metode yang dapat dimodifikasi lebih lanjut jika diperlukan termasuk informasi geologi bawah permukaan, sebagai contoh jika diketahui bahwa variasi resistivitas bawah permukaan kemungkinan akan terbatas pada wilayah tertentu maka nilai  $\lambda$  dapat dimodifikasi sedemikian rupa sehingga perubahan yang signifikan dapat diterima pada kondisi wilayah tersebut (Loke, 2004)