



**ESTIMASI PERGESERAN STATIK DATA
MAGNETOTELURIK 2D MENGGUNAKAN
METODE *CO-KRIGING***

SKRIPSI

Oleh

Yulia Kusumawardani

NIM 131810201074

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER**

2017



**ESTIMASI PERGESERAN STATIK DATA
MAGNETOTELURIK 2D MENGGUNAKAN
METODE *CO-KRIGING***

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Fisika (S-1)
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

Yulia Kusumawardani

NIM 131810201074

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER**

2017

PERSEMBAHAN

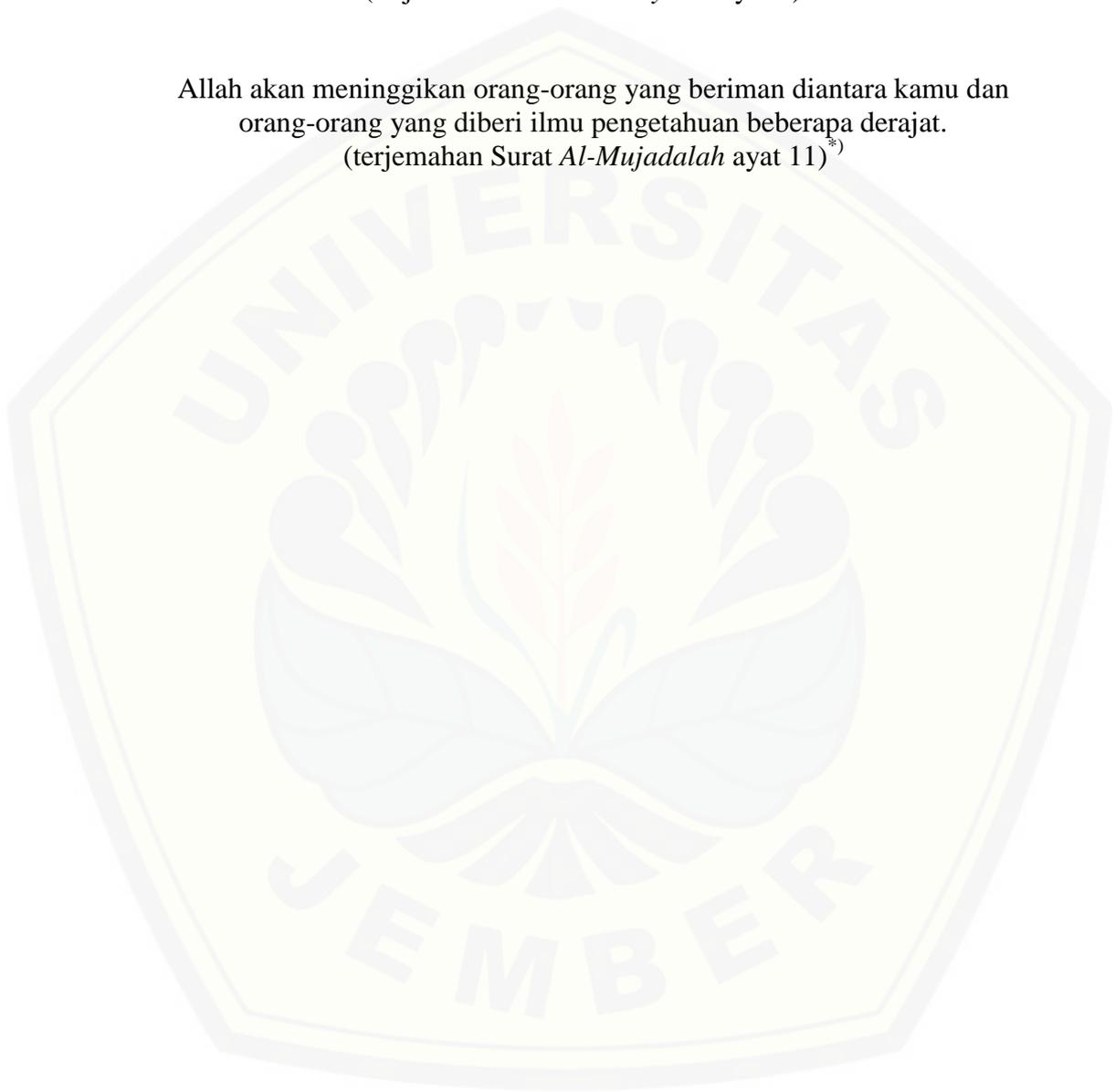
Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Siti Nasi'ah dan ayahanda Tumiran yang tercinta;
2. Adikku Afif Pranan Mulyana;
3. Teman-temanku Amalia Kurnia, Ismia Khilmi, Lilis Fitria, Imroatus Soleha, Septia Listiani, Yuyun Tri Mulyani, Yuningtias Nely, Tri Oktafiani, Siti Fatimatun Nazah, Melia Feni Fisanti, Subhan, Siti Nurfaida, Ayu Khasanis dan Muhammad Agam S.R;
4. Teman-temanku mahasiswa Fisika angkatan 2013;
5. Kakak-kakakku Lutfi Halimatus Sa'diyah, Rini Puji, Ajeng Yulia dan Miftahul Jannah
6. Adik-adik kos elisa Syella Amilia, Yasinta, Defi Maulida, Rahmania, Nia, Anggik, dan Grace Parkilaran;
7. Guru-guru sejak taman kanak-kanak sampai perguruan tinggi;
8. Almamater Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

MOTO

Sesungguhnya setelah kesulitan ada kemudahan
(terjemahan Surat *Al-Insyiroh* ayat 6)^{*)}

Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman diantara kamu dan
orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat.
(terjemahan Surat *Al-Mujadalah* ayat 11)^{*)}



^{*)} Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *AlQur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Yulia Kusumawardani

NIM : 131810201074

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Estimasi Pergeseran Statik Data Magnetotelurik 2D Menggunakan Metode *Co-kriging*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Dengan demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Oktober 2017

Yang menyatakan,

Yulia Kusumawardani

NIM 131810201074

SKRIPSI

**ESTIMASI PERGESERAN STATIK DATA
MAGNETOTELURIK 2D MENGGUNAKAN
METODE *CO-KRIGING***

Oleh

Yulia Kusumawardani
NIM 131810201074

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Supriyadi, S.Si., M.Si

Dosen Pembimbing Anggota : Nurul Priyantari, S.Si., M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul “Estimasi Pergeseran Statik Data Magnetotelurik 2D Menggunakan Metode *Co-kriging*” karya Yulia Kusumawardani telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I

Supriyadi, S.Si., M.Si

Nurul Priyantari, S.Si., M.Si

NIP 198204242006041003

NIP 197003271997022001

Anggota II

Anggota III

Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si

Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D

NIP. 196912251999031001

NIP. 197202101998021001

Mengesahkan

Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D

NIP 196102041987111001

RINGKASAN

Estimasi Pergeseran Statik Data Magnetotelurik Menggunakan Metode Co-Kriging; Yulia Kusumawardani; 131810201074; 67 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

Geofisika merupakan ilmu yang mempelajari prinsip-prinsip fisika untuk meneliti bumi dan struktur bawah permukaan. Kegiatan penyelidikan yang dilakukan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan bumi menggunakan teknologi geofisika disebut eksplorasi geofisika. Salah satu metode eksplorasi geofisika adalah metode elektromagnetik. Metode elektromagnetik yang paling sering digunakan yaitu metode magnetotelurik (MT). Metode MT merupakan metode pasif yang memanfaatkan nilai resistivitas bawah permukaan bumi menggunakan gelombang elektromagnetik alami yang bersumber dari *magnetosphere* maupun *ionosphere*. Data yang diperoleh dalam metode MT berupa medan magnet dan medan listrik, yang digunakan untuk memperoleh nilai impedansi. Komponen yang dibentuk dari impedansi didefinisikan sebagai resistivitas semu dan fasa impedansi untuk masing-masing modus TE (*Transverse Electric*) dan TM (*Transverse Magnetic*). Tujuan penelitian ini adalah mempelajari sifat semivariogram resistivitas semu dan fasa impedansi, *cross semivariogram* dan *static shift* resistivitas semu data magnetotelurik 2D baik pada modus TE maupun TM.

Perbedaan nilai kurva resistivitas semu dan fasa impedansi untuk masing-masing modus TE dan TM menunjukkan adanya pergeseran statik yang dapat mengakibatkan interpretasi data magnetotelurik menjadi ambigu. Pergeseran statik disebabkan oleh kontras multi-dimensi yang memiliki kedalaman kurang dari kedalaman penetrasi sebenarnya dari medan elektromagnetik. Salah satu penyebab terjadinya pergeseran statik adalah topografi bumi seperti adanya bukit dan lembah. Oleh karena itu, pergeseran statik pada data magnetotelurik perlu dilakukan koreksi untuk mengurangi bahkan menghilangkan efek statik pada kurva TE dan TM. Koreksi pergeseran statik dapat dilakukan dengan metode TDEM (*Time Domain Electromagnetic*) dan tahanan jenis *sounding*. Namun, koreksi ini memerlukan pengukuran data di lapangan yang membutuhkan waktu relatif lama dan biaya yang tidak sedikit. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengefisienkan waktu dan biaya yaitu metode *co-kriging*.

Metode *co-kriging* adalah sebuah metode untuk mengestimasi suatu variabel yang meminimalkan kesalahan estimasi dengan memanfaatkan korelasi silang antara beberapa variabel. Langkah awal sebelum menggunakan metode *co-kriging* perlu dilakukan estimasi kurva semivariogram teoritis model *spherical* pada masing-masing data resistivitas semu dan fasa impedansi untuk memperoleh komponen *sill*, *range*, dan *nugget effect*. Ketiga komponen tersebut akan digunakan dalam langkah selanjutnya yaitu *cross semivariogram* resistivitas semu untuk masing-masing modus TE dan TM. Kemudian dilakukan estimasi geostatistik oleh *co-kriging* untuk mengestimasi resistivitas semu menggunakan

fasa impedansi sebagai variabel primer dan resistivitas semu sebagai variabel sekunder. Pergeseran statik resistivitas semu diperoleh dari selisih antara resistivitas semu awal dengan resistivitas semu hasil estimasi *co-kriging*.

Berdasarkan penelitian, estimasi pergeseran statik data MT 2D yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pergeseran statik terjadi pada semua data, baik data lapang maupun data sintetis dengan model topografi bukit dan lembah. Estimasi pergeseran statik dianalisis berdasarkan kurva semivariogram model *spherical* fasa impedansi dan resistivitas semu yang menghasilkan 3 komponen yaitu *nugget effect*, *sill* dan *range*. *Range* pada model topografi bukit dan lembah memiliki nilai *range* data lebih besar dibandingkan dengan nilai *range* pada frekuensi besar. Hal ini diduga disebabkan pengaruh frekuensi terhadap penetrasi kedalaman. Semakin kecil frekuensi yang digunakan semakin besar jangkauan kedalamannya dan sebaliknya semakin besar frekuensi yang digunakan semakin kecil jangkauan kedalamannya. Jika diaplikasikan pada data lapang, *range* pada data lapang tidak memiliki trend, hal ini dikarenakan *range* pada data lapang tidak dipengaruhi oleh frekuensi. Nilai *sill* pada data sintetis berupa model topografi bukit dan lembah serta data lapang memiliki trend dimana *sill* pada data resistivitas semu lebih besar dibandingkan dengan *sill* pada kurva fasa impedansi. Hal ini dikarenakan data resistivitas semu memiliki variansi data yang cukup besar antara 100-1000 Ω m. Sedangkan, pada data fasa impedansi memiliki variansi data dari 0-90°. Pergeseran statik yang terjadi pada data lapang dan data sintetis memiliki perilaku yang sama, di mana pergeseran statik pada modus TM lebih besar dibandingkan dengan modus TE. Hal ini dikarenakan pada modus TM mampu menembus lapisan permukaan bumi dengan resistivitas yang berbeda.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Estimasi Pergeseran Statik Data Magnetotelurik 2D Menggunakan Metode *Co-Kriging*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan pengarahan berbagai pihak. Karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Nurul Priyantari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota, yang telah meluangkan waktu untuk pembimbingan skripsi;
2. Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si, selaku Dosen Penguji I dan Nurul Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D, selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktunya untuk memberi kritik dan saran skripsi ini;
3. Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. Segenap Dosen dan karyawan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.;

Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan di bidang Fisika.

Jember, Oktober 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Metode Magnetotelurik	6
2.2 <i>Transfer Magnetic</i> (TM)	13
2.3 <i>Transfer Electric</i> (TE)	14
2.4 Pergeseran Statik	15
2.4.1 Heterogenitas Dekat Permukaan.....	16
2.4.2 Topografi	17
2.5 Variogram dan Semivariogram	18
2.6 Koreksi Pergeseran Statik	24
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Rancangan Penelitian	28
3.2 Jenis dan Sumber Data	29
3.3 Variabel Penelitian	30

3.3.1 Variabel Bebas	30
3.3.2 Variabel Terikat	30
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah	31
3.5 Prosedur Penelitian	33
3.5.1 Pembuatan Program	32
3.5.2 Semivariogram dan <i>Cross Semivariogram</i>	34
3.5.3 Persamaan <i>Co-Kriging</i>	34
3.6 Metode Analisa	34
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Data Sintetik	37
4.1.1 Analisis Kurva Semivariogram pada Model Bukit dengan Ketinggian 500 m Modus TE untuk Frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz	37
4.1.2 Analisis Kurva Semivariogram pada Model Bukit dengan Ketinggian 500 m Modus TM untuk Frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz	42
4.1.3 Analisis Kurva Semivariogram pada Model Lembah dengan Kedalaman 500 m Modus TE untuk Frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz.....	47
4.1.4 Analisis Kurva Semivariogram pada Model Lembah dengan Kedalaman 500 m Modus TM untuk Frekuensi	
4.2 Data Lapang	55
4.2.1 Analisis Kurva Semivariogram Modus TE pada Frekuensi 0,293 Hz dan 115 Hz.....	55
4.2.2 Analisis Kurva Semivariogram Modus TM pada Frekuensi 0,293 Hz dan 115 Hz.....	59
BAB 5. PENUTUP.....	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR TABEL

	Halaman
4.1 Komponen semivariogram modus TE untuk model bukit dengan ketinggian 500 m pada frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz	39
4.2 Komponen semivariogram modus TM untuk model bukit dengan ketinggian 500 m pada frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz	44
4.3 Komponen semivariogram modus TE pada lembah dengan kedalaman 500 m pada frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz.....	48
4.4 Komponen semivariogram modus TM pada lembah dengan ketinggian 500 m pada frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz.....	52
4.5 Komponen semivariogram modus TE untuk data lapang pada frekuensi 0,293 Hz dan 115 Hz	57
4.6 Komponen semivariogram modus TM untuk data lapang pada frekuensi 0,293 Hz dan 115 Hz	61

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Skema terjadinya magnetotelurik	6
2.2 Modus <i>transverse magnetic</i> (TM) atau disebut <i>H-polarization</i>	13
2.3 Modus <i>transverse electric</i> (TE) atau disebut <i>E-polarization</i>	14
2.4 Distorsi medan listrik akibat pergeseran statik	16
2.5 Distorsi arus akibat pergeseran statik	16
2.6 Penjalaran medan listrik pada model topografi	17
2.7 Semivariogram	19
2.8 <i>Spherical Model</i>	21
2.9 Model <i>eksponensial</i>	22
2.10 Model semivariogram teoritis	23
2.11 <i>Cross-Validation</i> untuk Kriging, <i>Co-kriging</i> dan regresi linear	26
3.1 Rancangan penelitian	27
3.2 Diagram alir penelitian	30
4.1 (a) Kurva semivariogram fasa impedansi (b) Kurva semivariogram resistivitas semu modus TE untuk model bukit dengan ketinggian 500 m pada frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz	37
4.2 (a) Kurva <i>cross semivariogram</i> untuk frekuensi 0,1 Hz (b) Kurva <i>cross semivariogram</i> untuk frekuensi 10 Hz antara fasa impedansi dengan resistivitas semu modus TE untuk model bukit dengan ketinggian 500 m	38
4.3 (a) Estimasi pergeseran statik pada frekuensi 0,1 Hz (b) Estimasi pergeseran statik pada frekuensi 10 Hz modus TE untuk model bukit dengan ketinggian 500	40
4.4 (a) Kurva semivariogram fasa impedansi (b) Kurva semivariogram resistivitas semu modus TM untuk model bukit dengan ketinggian 500 m pada frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz	41

4.5	(a) Kurva <i>cross semivariogram</i> pada frekuensi 0,1 Hz (b) Kurva <i>cross semivariogram</i> pada frekuensi 10 Hz antara resistivitas semu dengan fasa impedansi untuk model bukit dengan ketinggian 500 m untuk modus TM.....	43
4.6	(a) Estimasi pergeseran statik pada frekuensi 0,1 Hz (b) Estimasi pergeseran statik pada frekuensi 10 Hz modus TM untuk model bukit dengan ketinggian 500 m.....	44
4.7	(a) Kurva semivariogram fasa impedansi (b) Kurva semivariogram resistivitas semu modus TE untuk model bukit dengan ketinggian 500 m pada frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz	46
4.8	(a) Kurva <i>cross semivariogram</i> pada frekuensi 0,1 Hz (b) Kurva <i>cross semivariogram</i> pada frekuensi 10 Hz fasa impedansi dan resistivitas semu untuk model bukit dengan ketinggian 500 m modus TE	47
4.9	(a) Estimasi pergeseran statik untuk frekuensi 0,1 Hz (b) Estimasi pergeseran statik untuk frekuensi 10 Hz modus TE untuk model bukit dengan ketinggian 500 m.....	49
4.10	(a) Kurva semivariogram fasa impedansi (b) Kurva semivariogram resistivitas semu modus TM untuk model bukit dengan ketinggian 500 m pada frekuensi 0,1 Hz dan 10 Hz	50
4.11	(a) Kurva <i>cross semivariogram</i> pada frekuensi 0,1 Hz (b) Kurva <i>cross semivariogram</i> pada frekuensi 10 Hz resistivitas semu dan fasa impedansi untuk model bukit dengan ketinggian 500 m modus TM	51
4.12	(a) Estimasi pergeseran statik untuk frekuensi 0,1 Hz (b) Estimasi pergeseran statik untuk frekuensi 10 Hz untuk model bukit dengan ketinggian 500 m modus TM.....	53
4.13	(a) Kurva semivariogram fasa impedansi (b) Kurva semivariogram resistivitas semu untuk data lapang pada frekuensi 0,293 Hz dan 115 Hz	55
4.14	(a) Kurva <i>cross semivariogram</i> untuk frekuensi 0,293 Hz (b) Kurva <i>cross semivariogram</i> untuk frekuensi 115 Hz fasa impedansi dan resistivitas semu untuk data lapang modus TE.....	56

4.15 (a) Estimasi pergeseran statik untuk frekuensi 0,293 Hz (b) Estimasi pergeseran statik untuk frekuensi 115 Hz untuk data lapang modus TE...	58
4.16 (a) Kurva semivariogram fasa impedansi (b) Kurva semivariogram resistivitas semu modus TM untuk data lapang pada frekuensi 0,293 Hz dan 115 Hz	59
4.17 (a) Kurva <i>cross semivariogram</i> untuk frekuensi 0,293 Hz (b) Kurva <i>cross semivariogram</i> untuk frekuensi 115 Hz antara fasa impedansi dan resistivitas semu untuk data lapang modus TM.....	60
4.18 (a) Estimasi pergeseran statik untuk frekuensi 0,293 Hz (b) Estimasi pergeseran statik untuk frekuensi 115 Hz untuk data lapang pada modus TM	61

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Geofisika adalah ilmu yang mempelajari prinsip-prinsip fisika untuk meneliti bumi yang terkait dengan astronomi, meteorologi dan fisika ionosfer. Selain itu geofisika merupakan ilmu yang dapat digunakan untuk meneliti struktur bawah permukaan bumi berupa material padat maupun cair (Reynold, 1997). Eksplorasi geofisika merupakan kegiatan penyelidikan yang dilakukan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan bumi menggunakan teknologi geofisika yang menerapkan teori atau konsep fisika (Simpson dan Bohr, 2005). Penelitian geofisika dapat dimanfaatkan untuk meneliti struktur dan komposisi batuan bawah permukaan bumi yang melibatkan pendataan di atas permukaan bumi dari parameter-parameter fisika yang dimiliki oleh batuan di dalam bumi. Berdasarkan data-data tersebut dapat ditafsirkan bagaimana sifat dan kondisi di bawah permukaan bumi, baik secara vertikal maupun horizontal (Sarkowi, 2010). Beberapa metode yang digunakan dalam eksplorasi geofisika yaitu metode geomagnetik, metode seismik, metode geolistrik, metode gaya berat, dan metode elektromagnetik. Salah satu metode elektromagnetik yang populer adalah metode magnetotelurik (MT), dimana metode ini banyak dimanfaatkan untuk eksplorasi panas bumi.

Metode magnetotelurik merupakan metode pasif yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik alami yang bersumber dari lapisan *magnetosphere* ataupun *ionosphere*, untuk mengetahui nilai resistivitas bawah permukaan bumi (Vozoff, 1991; Jiracek *et al.*, 1995). Metode magnetotelurik dapat digunakan untuk memetakan nilai resistivitas bawah permukaan bumi dari kedalaman ratusan hingga ribuan kilometer (Simpson dan Bahr, 2005). Metode magnetotelurik pertama kali diperkenalkan oleh Tikhonov (1950) dan Cagniard (1953), dimana metode ini melibatkan fluktuasi medan magnet dan medan listrik yang berubah-ubah terhadap waktu. Konsep dasar magnetotelurik yang dikemukakan oleh Tikhonov (1950) menyatakan bahwa turunan terhadap waktu

dari medan magnet (\vec{H}) sebanding dengan komponen tegak lurus medan listrik (\vec{E}) pada frekuensi rendah. Sedangkan Cagniard (1953) dalam Zhdanov (2002) mengembangkan hubungan antara medan listrik (E_x) dan medan magnet (H_y) pada permukaan dari medium berlapis dengan sumber gelombang bidang. Eksplorasi geofisika menggunakan metode magnetotelurik dapat diaplikasikan untuk mengidentifikasi sistem panas bumi.

Metode magnetotelurik menggunakan data medan magnet (\vec{H}) dan medan listrik (\vec{E}) untuk memperoleh nilai impedansi. Dari nilai impedansi tersebut dapat diperoleh kurva resistivitas semu dan fasa impedansi untuk masing-masing modus TE dan modus TM. Menurut Simpson dan Bahr (2005), TE (*Transverse Electric*) tidak memiliki komponen medan listrik pada arah penjarannya sedangkan TM (*Transverse Magnetic*) tidak memiliki medan magnet dalam arah penjarannya. Kurva pada modus TE maupun TM mudah mengalami distorsi yang disebabkan oleh adanya perbedaan nilai resistivitas. Kondisi tersebut mengakibatkan adanya pergeseran statik atau *static shift* pada data magnetotelurik. Pergeseran statik tersebut berupa pergeseran pada kurva fasa impedansi dan resistivitas semu pada arah vertikal. Pergeseran statik yang terjadi mengakibatkan kesalahan interpretasi data magnetotelurik pada kedalaman dan resistivitas bawah permukaan bumi.

Pergeseran statik terjadi karena adanya heterogenitas dekat permukaan dan topografi bumi yang berupa bukit ataupun lembah yang memberikan efek resistif dan efek konduktif. Selain itu, lokasi dekat dengan batas *geoelectrical* yang akan mempengaruhi kestabilan medan listrik yang merambat di bawah permukaan (Utaminingsih, 2010). Oleh karena itu, pergeseran statik pada data magnetotelurik perlu dilakukan koreksi untuk mengurangi bahkan menghilangkan efek-efek statik pada kurva TE dan TM. Koreksi pergeseran statik dapat dilakukan dengan beberapa metode antara lain, metode TDEM (*Time Domain Electromagnetic*) dan metode tahanan jenis *sounding*. Namun, koreksi TDEM dan tahanan jenis *sounding* memerlukan pengukuran data di lapangan, dimana pengukuran ini tidak mudah dan memerlukan biaya yang besar. Untuk itu, diperlukan terobosan metode

untuk melakukan estimasi pergeseran statik yang efisien, baik dalam waktu maupun biaya. Metode tersebut adalah metode *co-kriging*.

Co-kriging adalah sebuah metode untuk mengestimasi suatu variabel yang meminimalkan kesalahan estimasi dengan memanfaatkan korelasi silang antara beberapa variabel (Isaaks dan Srivastava, 1989). *Co-kriging* biasa disebut juga sebagai *cross corelation* (korelasi silang) antara 2 variabel yang berbeda, namun secara spasial masih berhubungan. Penelitian mengenai metode *co-kriging* banyak diaplikasikan untuk estimasi minyak bumi, gas bumi, dan material yang ada di bawah permukaan bumi. Romaji *et al.*, (2016) melakukan estimasi produksi minyak bumi dan gas bumi di Kalimantan Utara menggunakan metode *co-kriging*. Sedangkan Susila, (tanpa tahun) melakukan estimasi pencemaran udara oleh debu dan gas NO₂ di udara Kalimantan Selatan. *Co-kriging* juga dapat digunakan untuk mengoreksi pergeseran statik data magnetotelurik resistivitas semu 2D. Hal utama yang perlu dilakukan sebelum pengoreksian adalah estimasi model semivariogram dan *cross semivariogram* antara fasa impedansi dan resistivitas semu. Kemudian dilakukan estimasi model geostatistik oleh *co-kriging* untuk mengestimasi resistivitas semu menggunakan pengukuran fasa impedansi dan resistivitas semu (Tournier *et al.*, 2007).

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Tournier *et al.*, (2007), menerapkan metode *co-kriging* untuk mengestimasi nilai resistivitas semu pada data sintetik COPROD-2S2 (2D) dan data survei magnetotelurik dari Tenerife, Kepulauan Canary. Sedangkan Utaminingsih (2010) melakukan koreksi pergeseran statik data magnetotelurik 2D menggunakan metode geostatistik (*co-kriging*) pada data sintetik dengan lapisan pertama 300 Ω m, lapisan kedua 100 Ω m dan data COPROD2 di lapangan Kanada dengan 35 stasiun sepanjang 300 km. Model yang digunakan pada penelitian Tournier dan Utaminingsih menggunakan semivariogram teoritis model gaussian. Oleh karena itu, pergeseran statik data magnetotelurik menggunakan metode *co-kriging* perlu dikaji lebih lanjut untuk memastikan bahwa metode ini dapat diaplikasikan untuk pengoreksian data resistivitas semu dengan koreksi silang antara dua data yang berbeda. Pada penelitian ini, dilakukan estimasi pergeseran statik pada data sintetik dan data

lapang X antara resistivitas semu dan fasa impedansi. Koreksi ini dilakukan dengan mengkaji sifat variogram dari fasa impedansi dan resistivitas semu untuk masing-masing modus TE dan TM, lalu dilakukan *cross semivariogram* antara kedua variabel, baik pada kurva TE maupun TM. Pada penelitian ini digunakan model semivariogram teoritis *spherical*, dimana model ini paling sering digunakan dalam *fitting data*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang kegiatan penelitian yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, perumusan masalah dalam penelitian ini dapat dipecah menjadi dua bagian yaitu:

1. Bagaimanakah sifat semivariogram data magnetotelurik 2D resistivitas semu dan fasa impedansi pada masing masing modus TE dan TM pada model semivariogram *spherical*.
2. Bagaimanakah hasil *cross semivariogram* resistivitas semu dan fasa impedansi sehingga diperoleh nilai *static shift* (pergeseran statis) resistivitas semu pada modus TE dan modus TM.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mempelajari sifat semivariogram data magnetotelurik 2D resistivitas semu dan fasa impedansi untuk kurva masing-masing modus TE dan TM. Selanjutnya, berdasarkan karakteristik semivariogram resistivitas semu dan fasa impedansi untuk kurva masing-masing modus TE dan TM maka dilakukan *cross semivariogram* antara data magnetotelurik 2D resistivitas semu dan fasa impedansi. Dari hasil *cross semivariogram* dan estimasi menggunakan metode *co-kriging* akan diperoleh nilai *static shift* pada kurva resistivitas semu untuk masing-masing modus TE dan TM.

1.4 Manfaat Penelitian

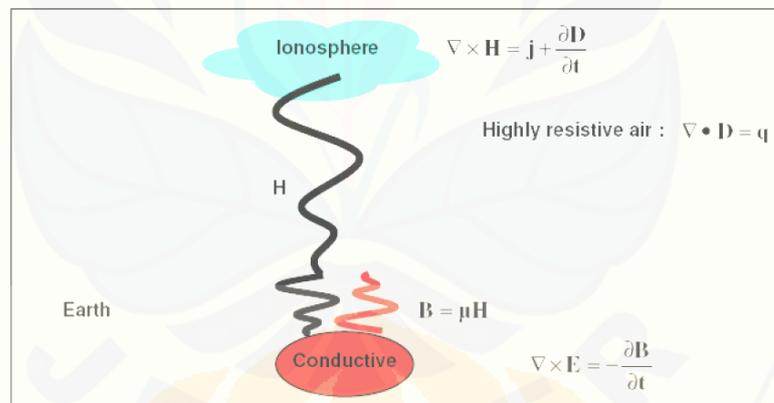
Manfaat penelitian ini adalah mengkaji karakteristik semivariogram pada kasus kurva resistivitas semu dan fasa impedansi data magnetotelurik 2D modus TE dan modus TM berdasarkan model semivariogram teoritis *spherical*. Karakteristik yang diperoleh dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan *cross semivariogram* antara resistivitas semu dan fasa impedansi yang selanjutnya diperoleh *static shift* pada kurva resistivitas semu. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memperkuat dasar pijakan penggunaan *co-kriging* dalam koreksi *static shift* data magnetotelurik dalam penelitian skala lapangan.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Metode Magnetotelurik

Magnetotelurik merupakan metode pasif yang memanfaatkan nilai resistivitas bawah permukaan bumi dengan menggunakan gelombang elektromagnetik alami yang bersumber dari lapisan *magnetosphere* ataupun *ionosphere* (Vozoff, 1991; Jiracek *et al.*, 1995). Arus dari *magnetosphere* atau *ionosphere* diinduksikan ke dalam bumi yang mengakibatkan perambatan gelombang elektromagnetik secara konduktif dan tegak lurus, hal ini dikarenakan adanya sifat udara yang resistif yang menjadi medium perambatan gelombang (Utaminingsih, 2010). Metode ini melibatkan pengukuran fluktuasi medan magnet dan medan listrik alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi dan dapat digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan bawah permukaan bumi dari kedalaman 10 hingga ratusan kilometer (Simpson dan Bahr, 2005).



Gambar 2.1 Skema terjadinya magnetotelurik
(Sumber: Arumsari, 2007)

Gambar 2.1 menjelaskan bahwa gelombang elektromagnetik yang masuk ke bumi memiliki nilai konduktivitas yang relatif lebih besar jika dibandingkan dengan konduktivitas udara, yang menyebabkan pembelokan secara vertikal kedua medan (elektrik dan magnetik) yang ditransmisikan ke dalam bumi. Gelombang elektromagnetik yang ditransmisikan ke dalam bumi berinteraksi dengan medium

yang memiliki nilai resistivitas tertentu. Hasil dari interaksi tersebut mengakibatkan terjadinya induksi yang menyebabkan terbentuknya arus *telluric* dan medan magnetik sekunder yang nantinya akan diukur dipermukaan bumi (Sulistyo, 2011)

Magnetotelurik menggunakan frekuensi dengan kisaran 10^{-5} - 10^3 Hz. Menurut Naidu (2012), sinyal gelombang elektromagnetik dikelompokkan menjadi dua sumber :

1. Frekuensi rendah (umumnya kurang dari 1 Hz), sumber sinyal berasal dari interaksi angin matahari dengan medan magnet bumi. Angin matahari memancarkan aliran ion menuju ke luar angkasa dan berinteraksi dengan medan magnet bumi sehingga menghasilkan energi elektromagnetik yang menembus bumi.
2. Frekuensi tinggi (umumnya lebih dari 1 Hz), sebagian besar energi berasal dari fenomena listrik di atmosfer seperti badai. Pada saat badai melintasi bumi dalam pandu gelombang antara permukaan bumi dan ionosfer, sebagian energi elektromagnetik yang dihasilkan menembus ke dalam bumi.

Metode magnetotelurik memanfaatkan fenomena alam arus telurik (*telluric current*). Arus telurik merupakan arus bawah permukaan bumi yang dibangkitkan oleh interaksi antara plasma yang dipancarkan matahari dengan medan magnetik bumi. Parameter terukur adalah variasi medan listrik dan medan magnet yang diukur secara bersamaan, maka perbandingan impedansi kompleks dapat digunakan untuk mendeskripsikan penetrasi gelombang elektromagnetik ke dalam bumi (Vozooof, 1991).

Persamaan dasar tentang metode magnetotelurik dapat dikaitkan dengan persamaan Maxwell yang menggambarkan perilaku gelombang elektromagnetik. Bentuk diferensial persamaan Maxwell antara medan listrik dan medan magnet adalah sebagai berikut :

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \eta_f \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

dimana \vec{B} adalah induksi medan magnet (Wbm^{-2} atau tesla), \vec{E} adalah medan listrik (Vm^{-1}), \vec{H} adalah intensitas magnetik (Am^{-1}), \vec{D} adalah perpindahan dielektrik (Cm^{-2}), \vec{J} adalah rapat arus listrik yang disebabkan oleh muatan bebas (Am^{-2}) dan η_f adalah rapat muatan listrik yang disebabkan oleh muatan bebas (Cm^{-3}) (Simpson dan Bahr, 2005).

Persamaan (2.2) merupakan persamaan Hukum Gauss yang menyatakan bahwa fluks elektrik pada suatu ruang sebanding dengan muatan total yang ada dalam ruang tersebut. Sedangkan persamaan (2.1) identik dengan persamaan (2.2) yang berlaku untuk medan magnet, namun tidak ada muatan magnetik yang tidak berpasangan (*monopole*). Persamaan (2.3) merupakan turunan dari hukum Faraday yang menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik menyebabkan medan listrik dengan gaya gerak listrik berlawanan dengan variasi fluks magnetik yang menyebabkannya. Persamaan (2.4) menyatakan bahwa medan magnet timbul akibat fluks total arus listrik yang disebabkan oleh arus konduksi dan arus perpindahan (Nabighian, 1997). Untuk kasus linear, medium isotropik, hubungan antara intensitas medan dengan fluks adalah :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

dimana σ adalah konduktivitas listrik (Ω^{-1}), ϵ_0 merupakan permitivitas listrik dalam vakum (F/m) dengan nilai $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, μ_0 merupakan permeabilitas magnetik dalam vakum (H/m) dengan nilai $\mu_0 = 1,2566 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ (Griffits, 1999).

Menurut Telford (2004), persamaan (2.3) dan (2.4) dapat disederhanakan dengan mensubstitusikan persamaan (2.5), (2.6) dan (2.7) ke dalam persamaan (2.3) dan (2.4). sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.9)$$

Pemisahan variabel \vec{E} dan \vec{H} pada persamaan (2.8) dan (2.9) dapat dilakukan dengan menggunakan operasi *curl* serta mensubstitusikan besaran-besaran yang telah diketahui sehingga,

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan \vec{E} dan \vec{H} terhadap posisi dan waktu. Medan listrik dan medan magnet dari gelombang elektromagnetik dapat direpresentasikan dalam bentuk fungsi sinusoidal maka,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos(kx - \omega t) \quad (2.13)$$

dalam bentuk eksponensial dan domain frekuensi yang bergantung terhadap waktu maka persamaan diatas menjadi

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i(kx - \omega t)} = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.14)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{-i(kx - \omega t)} = \vec{H}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.15)$$

Apabila persamaan (2.14) dan (2.15) (domain frekuensi yang bergantung terhadap waktu) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.8) dan (2.9) dan selanjutnya didiferensialkan secara parsial maka akan diperoleh :

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\mu \left[\frac{\partial(\vec{H}_0 e^{i\omega t})}{\partial t} \right] + -\vec{H} \left[\frac{\partial \mu}{\partial t} \right] \\ &= -\mu \left[\frac{\partial(\vec{H}_0 e^{i\omega t})}{\partial t} \right] + 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\mu \left[\left(e^{i\omega t} \frac{\partial \vec{H}_0}{\partial t} \right) + \left(\vec{H}_0 \frac{\partial (e^{i\omega t})}{\partial t} \right) \right] \\
&= -i\mu\omega(\vec{H}_0 e^{i\omega t}) = -i\mu\omega\vec{H}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{H} &= \left[\varepsilon \left(\frac{\partial(\vec{E}_0 e^{i\omega t})}{\partial t} \right) + \vec{H}_0 \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \right] + \sigma \vec{E} \\
&= \left[\varepsilon \left(\frac{\partial(\vec{E}_0 e^{i\omega t})}{\partial t} \right) + \vec{H} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \right] + \sigma \vec{E} \\
&= \varepsilon \left[\left(e^{i\omega t} \frac{\partial(\vec{E}_0)}{\partial t} \right) + \left(\vec{E}_0 \frac{\partial (e^{i\omega t})}{\partial t} \right) \right] + \sigma \vec{E} \\
&= i\varepsilon\omega(\vec{E}_0 e^{i\omega t}) + \sigma \vec{E} \\
&= (i\varepsilon\omega + \sigma)\vec{E}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Persamaan (2.16) dan (2.17) diatas dapat disederhanakan dengan membuat saling lepas antara variabel medan magnet dan medan listrik maka,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \times (-i\mu\omega\vec{H}) = -i\mu\omega(\nabla \times \vec{H}) \tag{2.18}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \times (i\varepsilon\omega + \sigma)\vec{E} = (i\varepsilon\omega + \sigma)(\nabla \times \vec{E}) \tag{2.19}$$

Apabila persamaan (2.16) dan (2.17) disubstitusikan ke persamaan diatas, maka

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -i\mu\omega(i\varepsilon\omega + \sigma)\vec{E} = (\varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\omega\sigma)\vec{E} \tag{2.20}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = (i\varepsilon\omega + \sigma)(-i\mu\omega\vec{H}) = (\varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\omega\sigma)\vec{H} \tag{2.21}$$

dan dengan operasi curl menggunakan identitas vektor

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$$

Untuk bumi yang diasumsikan sebagai medium homogen maka $(\nabla \times \vec{A}) = 0$ (Griffith, 1999). Sehingga persamaan (2.20) dan (2.21) menjadi,

$$\begin{aligned}
\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} &= (\varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\omega\sigma)\vec{E} \\
\nabla^2 \vec{E} + (\varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\omega\sigma)\vec{E} &= 0
\end{aligned} \tag{2.22}$$

$$\begin{aligned}
\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &= (\varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\omega\sigma)\vec{E} \\
\nabla^2 \vec{H} + (\varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\omega\sigma)\vec{H} &= 0
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Jika dinyatakan dalam suatu persamaan Helmholtz, dimana

$$k^2 = \varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\omega\sigma$$

Maka diperoleh persamaan

$$\nabla^2 \vec{E} - k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.24)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - k^2 \vec{H} = 0 \quad (2.25)$$

(Telford, 2004).

Medan elektromagnetik alami bumi dalam metode magnetotelurik digunakan sebagai sumber medan. Penerima merekam medan listrik dan medan magnet secara bergantian pada arah horizontal maupun tegak lurus pada permukaan bumi. Variasi amplitudo dan fase dari sinyal yang diterima dapat diinterpretasikan untuk menggambarkan struktur resistivitas bawah permukaan menggunakan impedansi magnetotelurik (Zhdanov, 2009).

Metode magnetotelurik menggunakan frekuensi gelombang rendah yaitu sebesar 10^{-4} Hz – 10^4 Hz atau $<10^4$ Hz (Dobrin dan Savit, 1988), sehingga perlu dilakukan asumsi apoksimasi keadaan kuasi statik $\varepsilon\mu\omega^2 \ll i\mu\omega\sigma$ dengan waktu tempuh gelombang diabaikan. Suku yang terdapat arus perpindahan (ε) dapat diabaikan terhadap suku yang mengandung arus konduksi (σ), maka didapatkan

$$k^2 \cong i\mu\omega\sigma$$

k merupakan bilangan gelombang. Persamaan (2.22) dan (2.23) untuk metode magnetotelurik menjadi

$$\nabla^2 \vec{E} - i\mu\omega\sigma \vec{E} = 0 \quad (2.26)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - i\mu\omega \vec{H} = 0 \quad (2.27)$$

Kedalaman dengan amplitudo bidang gelombang elektromagnetik akan mereduksi menjadi $1/e$ dari amplitudo permukaannya (jarak pelemahan gelombang) disebut dengan *skin depth* (Jiracek, Tanpa tahun). *Skin depth* berbanding terbalik dengan frekuensi dan dengan demikian frekuensi rendah akan menembus lebih dalam ke dalam bumi, persamaan *skin depth* adalah sebagai berikut :

$$\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-\frac{1}{2}} \cong 0,503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (km), \quad (2.28)$$

dimana σ adalah konduktivitas listrik (Ω^{-1}), f adalah frekuensi (Hz), dan μ adalah permeabilitas magnetik (H/m) (Unsworth, 2007).

Metode magnetotelurik melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami dalam arah tegak lurus pada permukaan bumi. Komponen ortogonal medan listrik dan horizontal magnetik dihubungkan melalui tensor impedansi kompleks, Z :

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x / \mu_0 \\ B_y / \mu_0 \end{pmatrix} \text{ atau } \vec{E} = Z\vec{B} / \mu_0 \quad (2.29)$$

Z merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari dua bagian yaitu real dan imajiner (Simpson dan Bahr, 1995).

Resistivitas semu (*apparent resistivity*) merupakan resistivitas yang terukur pada permukaan bumi. Jika resistivitas pada permukaan bumi dianggap seragam maka $\rho_a = \rho_1$. Persamaan umum dari resistivitas semu adalah;

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|^2 \quad (2.30)$$

Resistivitas yang terukur dapat dipertimbangkan sebagai resistivitas rata-rata diatas permukaan bumi yang memiliki jari-jari yang sama dengan *skin depth* (Vozoff, 1991). Konsep yang digunakan dalam metode magnetotelurik menggunakan sumber alami dari gelombang elektromagnetik berfrekuensi kecil. Semakin jauh penetrasi kedalamannya maka semakin kecil pula frekuensi yang harus digunakan (Xiao, 2004).

Impedansi magnetotelurik kompleks dapat diekspresikan menggunakan resistivitas semu ρ_a^{mn} dan fase ϕ_{mn} sehingga;

$$Z_{mn} = \left(\rho_a^{mn} \mu_0 \omega \right)^{\frac{1}{2}} e^{[j\phi_{mn}]} \quad (2.31)$$

dimana m dan n dapat menjadi x dan y , yaitu pengukuran arah, $j = \sqrt{-1}$, μ_0 adalah permeabilitas magnetik dalam ruang bebas (H/m), dan ω adalah frekuensi sudut (rad/s), ($\omega = 2\pi f$, dengan f adalah frekuensi (Hz)) (Tournerie *et al.*, 2007)

Selanjutnya adalah fasa impedansi, dimana pengukuran medan listrik dan medan magnet sangat berkaitan dengan impedansi. Menurut Naidu (2012),

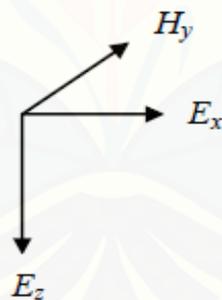
impedansi merupakan perbandingan antara medan listrik dan medan magnet. Secara eksplisit, hubungan linier antara medan listrik, medan magnet, dan impedansi dapat dirumuskan

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} [Z_{xy}(\omega)] = \tan^{-1} \left[\frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right] \quad (2.32)$$

Fasa impedansi $\phi_{xy}(\omega)$ adalah sudut fase antara $E_x(\omega)$ dan $H_y(\omega)$. Untuk sebuah penjaran gelombang elektromagnetik pada ruang bebas E_x dan H_y akan menjadi $\phi(\omega) = 0$.

2.2 *Transfer Magnetic (TM)*

Modus *transverse magnetic (TM)* atau *H-polarization* tidak memiliki komponen medan magnet pada arah penjarannya atau medan magnet sejajar dengan arah struktur utamanya. Sedangkan medan listriknya menunjukkan pada arah x dan z (Unsworth, 2007).



Gambar 2.2 Modus *transverse magnetic (TM)* atau disebut *H-polarization* (sumber: Unsworth, 2007)

Modus TM memiliki medan listrik tegak lurus terhadap sumbu y invarian terdiri dari komponen medan H_y, E_x dan E_z dengan impedansi $Z_{TM} = Z_{xy}$ yang dihitung berdasarkan E_x dan H_y , dan dengan resistivitas semu $\rho_{xy} = \rho_{TM}$, komponen medannya merupakan penjumlahan dari H_y

$$E_x = -\rho \frac{\partial}{\partial z} H_y \quad (2.33)$$

$$E_z = \rho \frac{\partial}{\partial x} H_y \quad (2.34)$$

dan persamaan Helmholtz-nya adalah

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} H_y + \frac{\partial^2}{\partial x^2} H_y + k^2 H_y = 0 \quad (2.35)$$

dengan impedansi

$$Z_{xy} = Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.36)$$

dan resistivitas semu pada mode TM adalah

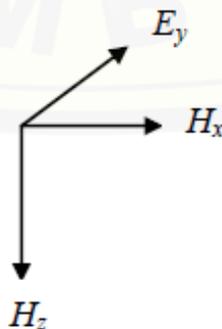
$$\rho_{xy} = \rho_{TM} = \frac{1}{\mu\omega} |Z_{TM}|^2 \quad (2.37)$$

(Jiracek, tanpa tahun).

Pada modus TM arus listrik mengalir melalui batas-batas pada resistivitas yang berbeda, yang menyebabkan muatan listrik semakin kuat di permukaan. Sedangkan modus TE lebih sensitif sepanjang struktur utama konduktor. Pada lokasi permukaan diantara daerah yang memiliki resistivitas yang berbeda modus TM lebih efektif dibandingkan dengan modus TE (Xiao, 2004).

2.3 Transverse Electric (TE)

Modus *transverse electric* (TE) dan *E-polarization* tidak memiliki medan listrik pada arah penjarannya atau medan listrik sejajar dengan arah struktur utamanya. Sedangkan medan magnetnya menunjukkan pada arah x dan z . (Unsworth, 2007).



Gambar 2.3 Modus *Transverse Electric* (TE) atau disebut *E-Polarization* (sumber: Unsworth, 2007)

Modus TE memiliki medan listrik paralel terhadap sumbu y invarian terdiri dari komponen medan E_y, H_x dan H_z dengan impedansi $Z_{TE} = Z_{yx}$ yang dihitung berdasarkan E_y dan H_x dan dengan resistivitas semu $\rho_{yx} = \rho_{TE}$, komponen medannya merupakan penjumlahan dari E_y ,

$$H_x = \frac{1}{i\mu\omega} \frac{\partial}{\partial z} E_y \quad (2.38)$$

$$H_z = -\frac{1}{i\mu\omega} \frac{\partial}{\partial x} E_y \quad (2.39)$$

dan persamaan Helmholtz-nya adalah

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_y + \frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y + k^2 E_y = 0 \quad (2.40)$$

dengan impedansi Z_{TE}

$$Z_{yx} = Z_{TE} = -\frac{E_y}{H_x} \quad (2.41)$$

dan resistivitas semu pada mode TE adalah

$$\rho_{yx} = \rho_{TE} = \frac{1}{\mu\omega} |Z_{TE}|^2 \quad (2.42)$$

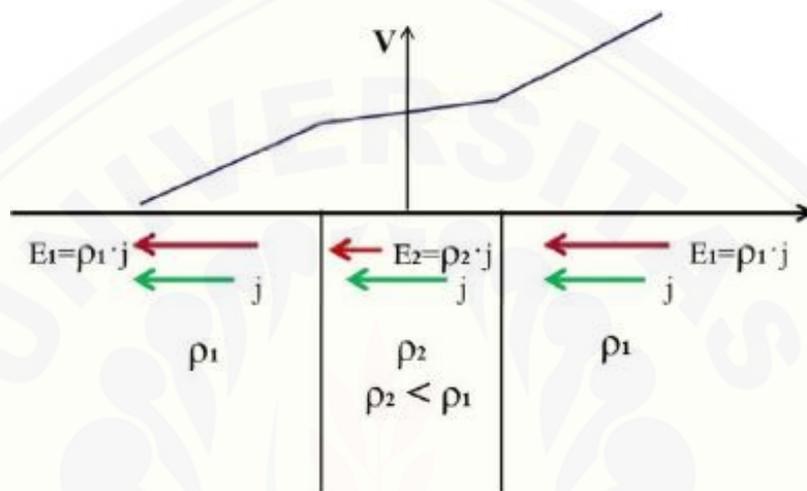
(Jiracek, tanpa tahun).

2.4 Pergeseran Statik

Aplikasi metode magnetotelurik tidak lepas dari adanya gangguan yang mempengaruhi keakuratan data. Kondisi gangguan tersebut dapat mengakibatkan kesalahan interpretasi data magnetotelurik yang diindikasikan dengan adanya pergeseran statik pada kurva TE dan TM data magnetotelurik (Jiracek, 1988). Efek pergeseran statik hanya terjadi pada arus *galvanic*. Beberapa kategori medium yang mengalami pergeseran statik akibat adanya perbedaan nilai resistivitas yakni pada kondisi sebagai berikut :

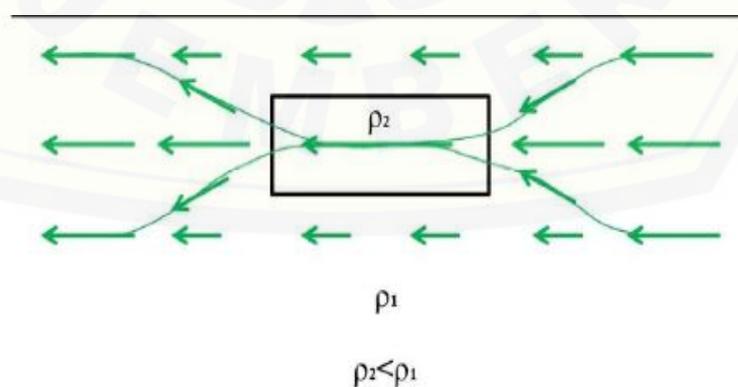
2.4.1 Heterogenitas Dekat Permukaan

Pergeseran statis yang disebabkan oleh heterogenitas resistivitas dekat permukaan dapat dianggap timbul dari dua fenomena: 1) distorsi medan listrik karena ketergantungan medan listrik (*voltage gradient*) pada resistivitas material dimana perbedaan tegangan itu diukur, 2) distorsi arus listrik (Arnason, 2015).



Gambar 2.4 Distorsi medan listrik akibat pergeseran statis (Sumber: Arnason, 2015)

Pada Gambar 2.4 menunjukkan variasi tegangan pada medan listrik (kemiringan kurva tegangan) pada permukaan ketika rapat arus mengalir secara konstan melalui resistivitas yang berbeda (Arnason, 2015).

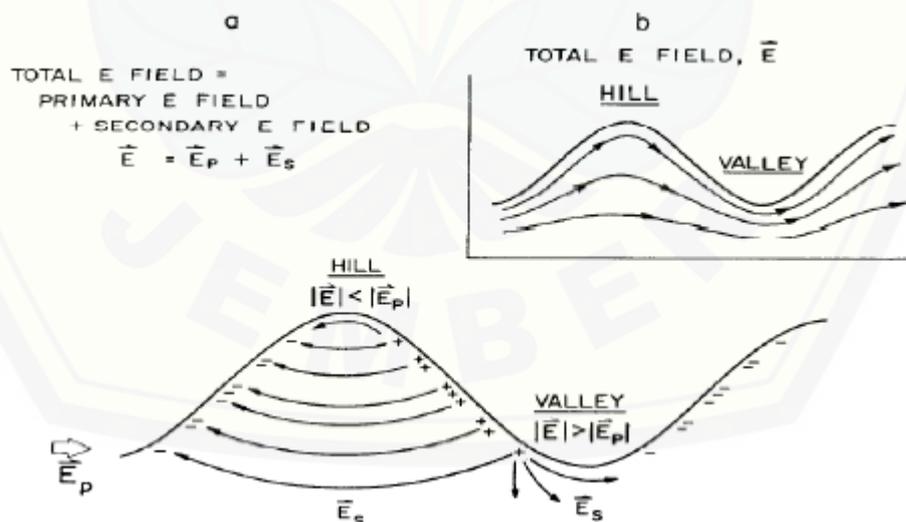


Gambar 2.5 Distorsi arus akibat pergeseran statis (Sumber: Mwakirani *et al.*, 2012)

Gambar 2.5 menjelaskan bahwa ketika arus mengalir pada permukaan bumi dengan anomali resistivitas lokal, maka arus akan dibelokkan. Jika anomali resistivitas lebih rendah daripada sekitarnya, arus dibelokkan (dihubungkan) ke dalam anomali dan jika resistivitas lebih tinggi, arus ditolak keluar anomali. Jika anomali tertutup oleh permukaan, ini akan mempengaruhi rapat arus di permukaan yang disebabkan oleh medan listrik dan resistivitas semu (Arnason, 2015).

2.4.2 Topografi

Efek topografi dapat mempengaruhi data hasil pengukuran metode magnetotelurik di dekat topografi tinggi (bukit) maupun topografi rendah (lembah). Pergeseran statik di daerah lembah yang curam akan lebih besar dibandingkan dengan yang dangkal. Sedangkan pergeseran statik pada daerah bukit yang rendah, akan lebih besar daripada pergeseran statik pada daerah bukit yang tinggi (Utaminingsih, 2006). Efek resistif akan cenderung terjadi pada daerah lembah, sedangkan efek konduktif terjadi pada daerah bukit.



Gambar 2.6 Penjalaran medan listrik pada model topografi (Sumber : Jiracek, 1988)

Gambar 2.6, mengilustrasikan efek galvanik untuk bukit dan lembah 2-D secara ideal. Efek galvanik dalam 2-D terjadi ketika medan listrik utama tegak lurus terhadap tren topografi. Gambar 2.6a, menunjukkan bahwa tidak ada muatan dipuncak bukit dan didasar lembah. Konsentrasi muatan maksimum terjadi ketika kemiringan permukaan terbesar. Seperti yang terjadi pada kasus inhomogenitas permukaan. Sedangkan pada gambar 2.6b, terdapat medan listrik terbatas yang menuju ke gelombang permukaan di ruang bebas. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa medan listrik berkurang pada topografi tinggi (bukit) dan meningkat pada topografi rendah (lembah) dikarenakan efek galvanik. Selain itu, pada gambar 2.6a juga menunjukkan adanya tangensial permukaan (Jiracek, 1988).

2.5 Variogram dan Semivariogram

Pada data spasial, dua buah nilai spasial yang letaknya berdekatan memiliki kecenderungan lebih besar untuk bernilai sama dibandingkan dengan dua buah nilai spasial yang letaknya berjauhan, oleh karena itu untuk melakukan estimasi pada data spasial diperlukan perangkat statistik. Pada geostatistika terdapat suatu perangkat dasar untuk pemodelan dan autokorelasi spasial dari variabel yang teregionisasi yang biasa dikenal dengan semivariogram. Semivariogram sendiri adalah setengah dari variogram. Variogram adalah ukuran variansi yang berfungsi untuk menentukan dimana nilai-nilai data pengamatan tidak saling bergantung atau tidak ada korelasinya yang disebabkan bertambahnya jarak data yang diambil. Sedangkan semivariogram digunakan untuk mengukur korelasi spasial berupa variansi error pada lokasi u dan lokasi $u+h$ (Cressie, 1993). Terdapat dua jenis variogram yaitu variogram eksperimental dan variogram teoritis.

Variogram eksperimental adalah variogram yang diperoleh dari data yang diamati atau data hasil pengukuran yang ada di lapangan. Variogram eksperimental dibuat berdasarkan nilai korelasi spasial antara dua buah variabel yang dipisahkan oleh suatu jarak tertentu sebesar h (Aini, 2015). Fungsi variogram sebagai berikut :

$$2\gamma(h) = \text{var}(Z(u) - Z(u + h)) \quad (2.43)$$

Karena pada stationeritas terdapat sifat $E[Z(u)] = E[Z(u + h)]$, maka persamaan (2.42) menjadi :

$$2\gamma(h) = E[Z(u) - Z(u + h)]^2 \quad (2.44)$$

Dari persamaan (2.43) diperoleh rumus praktis dari semivariogram eksperimental yang ditaksirkan sebagai berikut :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(u_i) - Z(u_i + h)]^2 \quad (2.45)$$

dengan:

$2\gamma(h)$: nilai variogram dengan jarak h

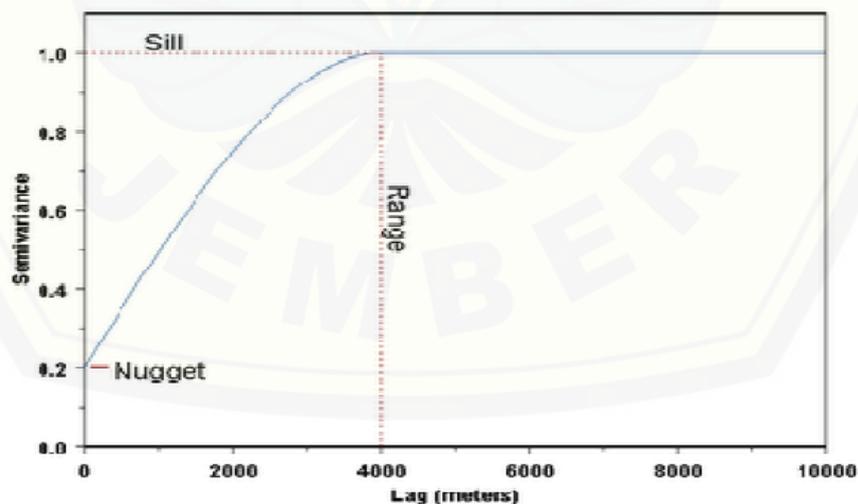
$\gamma(h)$: nilai semivariogram dengan jarak h

u_i : lokasi-lokasi sampel

$Z(u_i)$: nilai/data terkait posisi u_i

$N(h)$: banyaknya pasangan data/posisi $(u_i, u_i + h)$ berjarak h

(Cressie, 1993).



Gambar 2.7 Semivariogram (Sumber : Dorsel dan Breche, 1997)

Adapun komponen dalam semivariogram adalah sebagai berikut :

1) *Range*

Menurut Dorsel dan Breche (1997), *range* adalah jarak antara lokasi-lokasi dimana pengamatan-pengamatannya terlihat independen, yakni ragamnya tidak mengalami kenaikan. Dalam praktek, *range* akan mempengaruhi korelasi spasialnya, atau dengan kata lain *range* merupakan jarak (h) dimana nilai mencapai *sill*.

2) *Sill*

Sill adalah masa stabil suatu variogram yang mencapai *range*-nya (Isaaks dan Srivastava, 1989). Artinya tidak terjadi peningkatan data secara signifikan atau nilai sama dengan nilai variansi data tersebut.

3) *Nugget Effect*

Kediskontinuan pada pusat variogram terhadap garis vertikal yang melompat dari nilai 0 pada pusat ke nilai variogram pada pemisahan jarak terkecil disebut dengan *nugget effect* (Issaks dan Srivastava, 1989). Menurut Cressie (1993), $\gamma(-h) = \gamma(h)$ dan $\gamma(0) = 0$. Jika $\gamma(h) \rightarrow c_0 > 0$ atau $h \rightarrow 0$, sehingga c_0 disebut sebagai *nugget effect*. *Nugget effect* dapat berupa kesalahan sistematis, kesalahan membaca alat, dan kesalahan sampling.

Untuk analisis lebih lanjut variogram atau semivariogram eksperimental harus diganti dengan variogram teoritis yang memiliki bentuk kurva paling mendekati variogram eksperimental. Terdapat dua macam variogram teoritis, yaitu variogram isotropi dan variogram anisotropi. Variogram isotropi merupakan variogram yang bergantung pada jarak saja. Sedangkan variogram anisotropi bergantung pada jarak dan arah.

Model-model dari semivariogram adalah sebagai berikut :

1) Model *Spherical*

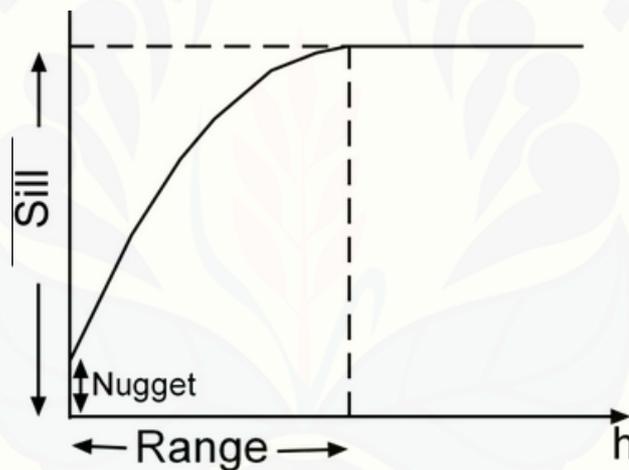
Model *spherical* adalah model yang paling sering digunakan. Bentuk persamaan bakunya adalah sebagai berikut :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \left(\frac{h}{2a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ C & h > a \end{cases} \quad (2.46)$$

dengan :

- h adalah jarak lokasi antar sampel
- C adalah *sill*, yaitu nilai variogram untuk jarak pada saat besarnya konstan.
- a adalah *range*, yaitu jarak pada saat nilai variogram mencapai *sill*

Model ini memiliki ekspresi eksponensial sederhana dan memiliki bentuk yang cocok dengan apa yang sering diamati. Grafik akan linear ketika sudah mencapai kestabilan (Amstrong, 1998).



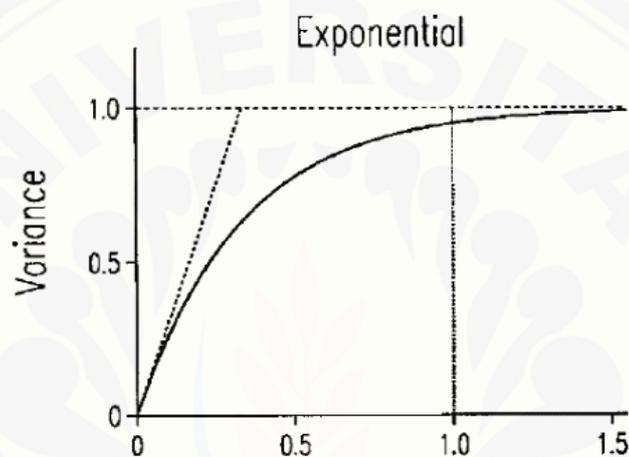
Gambar 2.8 *Spherical Model* (Sumber: Amstrong, 1988)

2) Model eksponensial

Model eksponensial mengalami peningkatan yang sangat curam dan mencapai nilai *sill* secara asimtotik, dirumuskan sebagai berikut :

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (2.47)$$

Fungsi dari model eksponensial adalah negatif, dimana model ini juga banyak digunakan dalam geostatistika. Dengan C adalah *sill* dan a adalah parameter jarak (*range*) (Kitanidis, 1997). Model eksponensial tidak memiliki jangkauan yang terbatas. Namun demikian, untuk tujuan praktis akan lebih mudah untuk menetapkan jangkauan efektif. Jangkauan efektif biasanya diambil sebagai jarak dimana γ sama dengan 95% dari variasi sill. Kemiringan pada titik asal sama dengan c/r (Webster dan Oliver, 2007).



Gambar 2.9 Model eksponensial (Sumber : Webster dan Oliver, 2007)

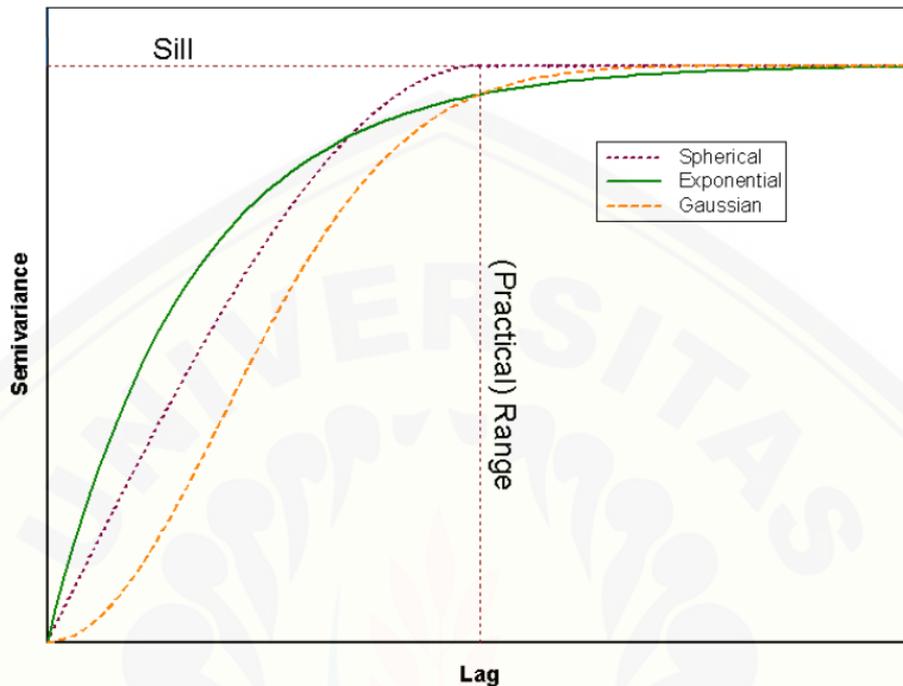
3) Model Gaussian

Model Gaussian merupakan bentuk kuadrat dari model eksponensial sehingga menghasilkan bentuk parabolik pada jarak dekat dan dirumuskan sebagai berikut :

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right)^2 \right] \quad (2.48)$$

Dengan c adalah *sill* dan a adalah parameter jarak (*range*). Model gaussian mengalami peningkatan dan mencapai *sill* secara asimtotik dan dapat dianggap mendekati rentang nilai efektif sekitar $\sqrt{3}r$ dimana variasi *sill* mencapai 95%. Kelemahan dari model gaussian adalah nilai efektif tersebut mendekati daerah asal dengan gradien sama dengan nol dengan variasi acak dua kali terdiferensialkan (Webster dan Oliver, 2007).

Adapun bentuk gambar ketiga model semivariogram teoritis adalah sebagai berikut :



Gambar 2.10 Model semivariogram teoritis (Sumber : Isaaks dan Srivastava, 1989)

2.6 Koreksi Pergeseran Statik

2.6.1 Co-Kriging

Co-kriging merupakan perluasan dari *kriging*. *Kriging* adalah suatu teknik perhitungan untuk estimasi dari suatu variabel terregional yang menggunakan pendekatan bahwa data yang dianalisis dianggap sebagai suatu realisasi dari suatu variabel acak (Alfiana, 2005). *Co-kriging* dapat dikatakan sebuah metode interpolasi dan ekstrapolasi yang biasa disebut *cross correlation* (korelasi silang) antara 2 variabel yang berbeda, akan tetapi secara spasial berhubungan.

Menurut Isaaks dan Srivastava (1989), *co-kriging* adalah sebuah metode untuk mengestimasi suatu variabel yang meminimalkan kesalahan estimasi dengan memanfaatkan korelasi silang antara beberapa variabel. Nilai estimasi *co-kriging* merupakan kombinasi linear dari kedua variabel yang diberikan oleh :

$$\hat{u}_0 = \sum_{i=1}^n a_i u_i + \sum_{j=1}^m b_j v_j \quad (2.49)$$

\hat{u}_0 adalah estimasi U pada lokasi 0; u_1, \dots, u_n adalah data dari variabel pertama pada n lokasi yang berdekatan; v_1, \dots, v_m adalah data dari variabel kedua pada m lokasi yang berdekatan; a_1, \dots, a_n dan b_1, \dots, b_m adalah pembobot dari *co-kriging* yang harus ditentukan. Adapapun kesalahan estimasi *co-kriging* didefinisikan sebagai berikut :

$$R = \hat{U}_0 - U_0 = \sum_{i=1}^n a_i U_i + \sum_{j=1}^m b_j V_j - U_0 \quad (2.50)$$

dimana U_1, \dots, U_n adalah variabel random yang mewakili variabel U pada n lokasi yang berdekatan dan V_1, \dots, V_m adalah variabel random yang mewakili variabel V pada m lokasi yang berdekatan. Persamaan (2.49) dapat diekspresikan dalam bentuk matrik dengan notasi

$$R = w^t Z \quad (2.51)$$

dimana $w^t = (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m, -1)$ dan $Z^t = (U_1, \dots, U_n, V_1, \dots, V_m, U_0)$. Persamaan untuk variasi kombinasi linear variabel acak di definisikan sebagai :

$$Var(R) = w^t C_z w \quad (2.52)$$

dimana C_z adalah kovarians matrik untuk Z .

Untuk menentukan persamaan *co-kriging* pada data magnetotelurik, terlebih dahulu menguraikan persamaan magnetotelurik pada persamaan (2.30). Kemudian persamaan (2.30), dapat didefinisikan sebagai variabel kompleks z sebagai berikut:

$$z = \log(Z) - 0,5 \log(\mu_0 \omega) = 0,5 \log(\rho_a) + j\phi \quad (2.53)$$

dengan menyederhanakan $r_a = \log(\rho_a)$ dan $z = 0,5r_a + j\phi$. Untuk setiap periodenya dapat diekspresikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$z(x, y) = 0,5r_a^{obs}(x, y) + j\phi^{obs}(x, y) \quad (2.54)$$

dimana *obs* adalah data observasi atau yang teramati. Karena pergeseran statik dapat direpresentasikan untuk setiap titik, maka :

$$r_a^{obs} = r_a^{true} + s + \epsilon_r \quad (2.55)$$

dimana s adalah logaritmik dari pergeseran statik yang disebabkan oleh resistivitas permukaan dan bergantung pada resistivitas sesungguhnya. Sedangkan ϵ_r adalah error dari resistivitas observasi yang telah ditetapkan. Apabila variabel kompleks diubah menjadi $z=u+jv$ dengan asumsi u adalah resistivitas semu dan v adalah fasa impedansi, maka fungsi kompleks *co-kriging* dapat diperoleh :

$$z_0 = \mu_0 + v_0 = \sum_{k=1}^n (\mu_{1k} \mu_k + \eta_{1k} v_k) + j \sum_{k=1}^n (\mu_{2k} \mu_k + \eta_{2k} v_k) \quad (2.56)$$

dengan mengetahui bahwa:

$\sum_{k=1}^n (\mu_{1k} \mu_k + \eta_{1k} v_k) =$ komponen ρ dan $\sum_{k=1}^n (\mu_{2k} \mu_k + \eta_{2k} v_k) =$ komponen fase (Tournerie *et al.*, 2007).

Metode *co-kriging* merupakan metode *kriging* yang menghasilkan estimator yang bersifat BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*). Disebut *linear* karena estimasi yang dihasilkan berdasar kombinasi linear dari data yang dipakai, *unbiased* karena hasil yang didapat diharapkan memiliki *error* sama dengan nol dan disebut *best* karena untuk meminimalkan varians.

BLUE untuk μ_0 diperoleh dengan meminimalkan error $\sigma_e^2 = \text{var}[u_0 - \tilde{u}_0]$ dimana penyelesaiannya menggunakan metode Lagrange. Adapapun sistem persamaannya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^n \mu_{1p} \text{Cov}(\mu_k, \mu_p) + \sum_{p=1}^n \eta_{1p} \text{Cov}(\mu_k, v_p) + \lambda_{1r} &= \text{Cov}(\mu_0, \mu_k) \\ \sum_{p=1}^n \mu_{1p} \text{Cov}(\mu_k, \mu_p) + \sum_{p=1}^n \eta_{1p} \text{Cov}(\mu_k, v_p) + \lambda_{1i} &= \text{Cov}(\mu_0, v_k) \end{aligned} \quad (2.57)$$

dengan

$$\sum_{p=1}^n \mu_{1p} = 1 \quad \text{dan} \quad \sum_{p=1}^n \eta_{1p} = 0$$

dimana Cov adalah fungsi kovarian dan λ_{1r} dan λ_{1i} adalah pengali Lagrange (Weckernagel, 1995). Pada metode *co-kriging* C_{uv} (kovariansi) didefinisikan menjadi :

$$C_{uv}(h) = \text{Cov}(u(r), v(r+h)) \quad (2.58)$$

dengan r adalah posisi dan h merupakan jarak (Tournerie *et al.*, 2007).

Model kovarians merupakan estimasi dari data yang diasumsikan stationeritas pada orde kedua. Oleh karena itu, *cross-covariance* didefinisikan sebagai,

$$C_{uv}(h) = E[(u(r) - m_u)(v(r+h) - m_v)]. \quad (2.59)$$

dengan $m_u = E[u(r)]$ dan $m_v = E[v(r)]$. m pada persamaan tersebut adalah mean. Kemudian diasumsikan bahwa *cross-covariance* adalah simetris, maka *cross semivariogram* dapat didefinisikan sebagai

$$\gamma_{uv}(h) = \frac{1}{2} E[(u(r+h) - u(r))(v(r+h) - v(r))]. \quad (2.60)$$

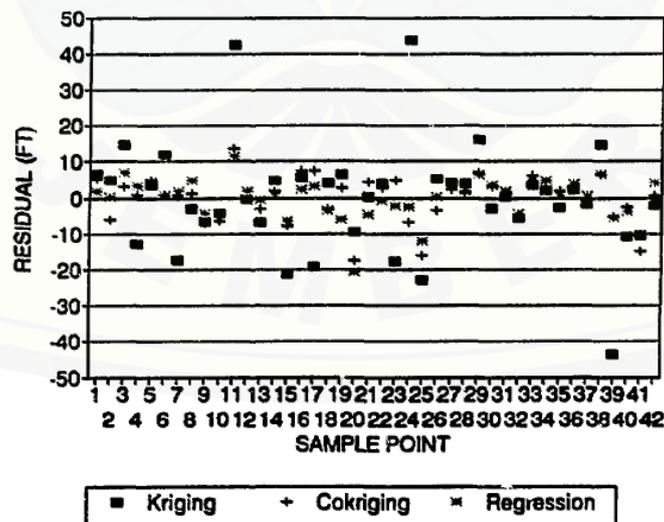
Untuk menghitung kovarians data digunakan hubungan sebagai berikut :

$$\gamma_{uv}(h) = C_{uv}(0) - C_{uv}(h). \quad (2.61)$$

Varigram eksperimental dan *cross semivariogram* dapat digunakan untuk menghitung data berbeda dengan jarak konstan menggunakan persamaan berikut:

$$\gamma_{uv}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)|H_{ij}=h} (u_i - u_j)(v_i - v_j) \quad (2.62)$$

dimana u_i adalah resistivitas semu dan v_i adalah fasa impedansi (Nyquist *et al.*, 2008)

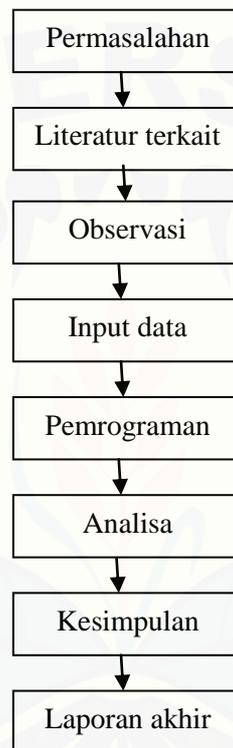


Gambar 2.11 *Cross-Validation* untuk Kriging, Co-Kriging dan regresi Linear (Sumber : Nyquist, 2008)

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian merupakan suatu proses pengumpulan, dan analisis data penelitian. Rancangan penelitian disebut juga sebagai keseluruhan kegiatan yang dilakukan oleh peneliti. Rancangan penelitian terstruktur sebagaimana skema berikut :



Gambar 3.1 Rancangan Penelitian

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan yang akan diteliti. Permasalahan tersebut terkait dengan pergeseran statik data magnetotelurik 2D kurva resistivitas semu dan fasa impedansi masing-masing modulus TE dan TM. Dari permasalahan tersebut dilakukan studi pustaka dengan mempelajari beberapa materi seperti magnetotelurik, pergeseran statis, modulus TE dan TM, semivariogram, *cross semivariogram*, dan *co-kriging*. Selanjutnya dilakukan tahap observasi dengan mempelajari jurnal, buku, skripsi dari berbagai literatur yang terkait. Input pada data pemrograman diperoleh dari data sintetik

hasil *running* seperti yang dilakukan oleh Sa'diyah (2016). Data-data sintetik tersebut berupa *latitude*, *longitude*, fasa impedansi dan resistivitas semu. Penelitian ini merupakan penelitian dalam ranah fisika komputasi. Oleh karena itu, persamaan atau formula yang digunakan dikonversi ke dalam bahasa pemrograman yang kemudian menghasilkan semivariogram kurva resistivitas semu dan fasa impedansi untuk masing-masing modulus TE dan TM. Kemudian dilakukan analisis terhadap semivariogram kurva resistivitas semu dan fasa impedansi untuk masing-masing modulus TE dan TM. Setelah dihasilkan semivariogram kurva fasa impedansi dan resistivitas semu modulus TE dan TM, kedua besaran ini digunakan untuk memperoleh *cross semivariogram* resistivitas semu. *Cross semivariogram* diperoleh dengan mengalikan silang antara kedua besaran fasa impedansi dan resistivitas semu. Hasil pengalihan silang kedua variabel ini menghasilkan kurva *cross semivariogram* resistivitas semu. Komponen yang dimiliki oleh kurva *cross semivariogram* akan menghasilkan *static shift*, dimana *static shift* diperoleh dari selisih antara resistivitas semu awal dengan resistivitas semu hasil estimasi *co-kriging*. Setelah didapatkan model semivariogram, *cross semivariogram* dan *static shift* resistivitas semu untuk kurva masing-masing modulus TE dan TM, dilakukan analisis secara kuantitatif. Hasil analisa tersebut kemudian disimpulkan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan. Pada tahap akhir rancangan penelitian dibuat laporan akhir yang ditulis secara sistematis.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif karena diperoleh dari hasil perhitungan numerik. Begitu pula dengan jenis data yang digunakan merupakan data kuantitatif berupa angka dan dapat dihitung. Data pada penelitian ini diperoleh dari model bumi seperti dalam penelitian Sa'diyah (2016) dan data lapangan X. Data-data tersebut adalah data resistivitas semu, fasa impedansi, *latitude*, *longitude*, dan frekuensi. Kelima data-data tersebut diolah untuk menghasilkan data baru pada kurva semivariogram dan *cross semivariogram*. Dari kurva variogram atau semivariogram, kurva variogram dapat diperoleh data berupa *nugget effect*, *sill*, *range* dan *static shift* resistivitas semu hasil *co-kriging*.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ditentukan untuk menghindari penafsiran ganda. Variabel ini menjadi input dalam proses running data maupun output setelah pemodelan dilakukan. Variabel-variabel tersebut dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu variabel bebas dan variabel terikat yang akan dijabarkan sebagai berikut :

3.3.1 Variabel bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini antara lain :

- a. Frekuensi (f), merupakan banyaknya gelombang yang terjadi tiap waktu (detik). Frekuensi yang digunakan adalah 0,1 Hz dan 10 Hz untuk data sintetis. 0,293 Hz dan 115 Hz untuk data lapangan X
- b. *Lattitude* dan *longitude*, merupakan suatu besaran yang menunjukkan posisi pada sumbu x dan sumbu y.
- d. Resistivitas semu (ρ), merupakan resistivitas di permukaan bumi.
- e. Fasa impedansi (φ), merupakan sudut fase antara medan listrik dengan medan magnet.

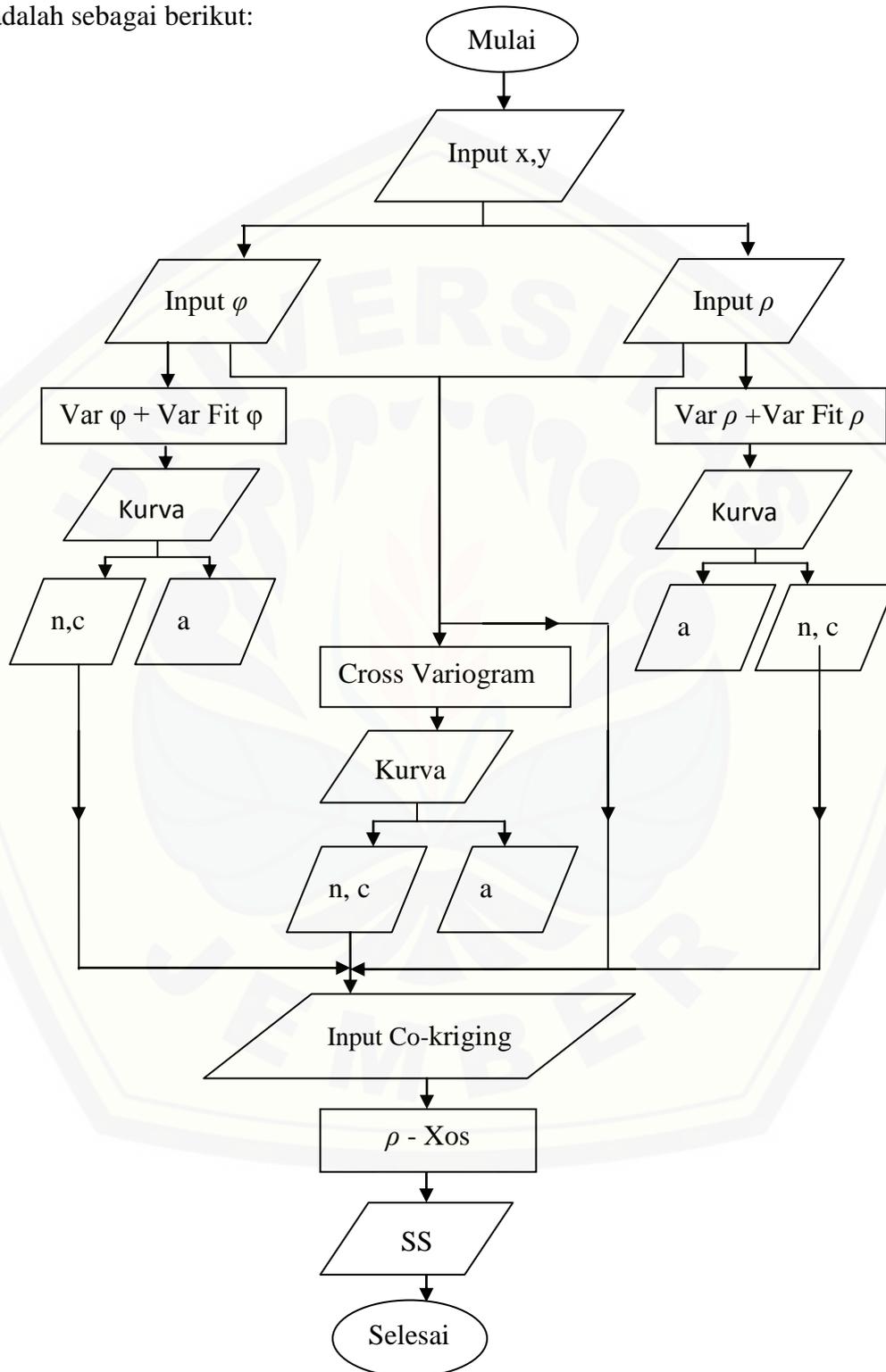
3.3.2 Variabel terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah :

- a. *Sill* (C), merupakan titik jenuh dimana data atau sampel yang didapatkan tidak memiliki korelasi.
- b. *Nugget effect*, merupakan kediskontinuan pada pusat variogram terhadap garis vertikal yang melompat dari nilai 0 pada pusat ke nilai variogram pada pemisahan jarak terkecil
- c. *Range* (a), merupakan titik jarak dimana variogram memiliki korelasi yang sama
- d. Resistivitas semu hasil estimasi co-kriging.
- e. *Static shift*, merupakan hasil selisih antara resistivitas semu awal dengan resistivitas semu hasil estimasi *co-kriging*.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Tahapan-tahapan pemecahan masalah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

Langkah awal yang dilakukan dalam pemecahan masalah adalah melakukan input data. Input data tersebut berupa *latitude*, *longitude*, resistivitas semu modulus TE dan TM, dan fasa impedansi modulus TE dan TM. Setelah itu, dilakukan perhitungan variogram eksperimental pada data resistivitas semu dan fasa impedansi untuk masing-masing modulus TE dan TM. Kemudian dilakukan pemilihan semivariogram teoritis dengan bentuk kurva yang paling mendekati variogram eksperimental. Dalam hal ini digunakan model semivariogram *spherical*. Model *spherical* akan menghasilkan bentuk kurva dengan persamaan (2.45). Untuk memperoleh kurva semivariogram kedua besaran fasa impedansi dan resistivitas semu, dilakukan proses variogram dan variogram fit pada kedua besaran tersebut untuk masing-masing modulus TE dan TM. Dari kurva yang telah dihasilkan akan diperoleh komponen-komponen yang berfungsi untuk melihat sebaran data, komponen tersebut meliputi *nugget effect*, *sill*, dan *range*. Ketiga komponen tersebut terdapat pada kurva semivariogram fasa impedansi dan resistivitas semu masing-masing modulus TE dan TM. Setelah diperoleh kurva semivariogram untuk kedua besaran, dilakukan *cross correlation* antara kedua besaran tersebut yaitu, fasa impedansi dan resistivitas semu. Data yang diinputkan pada *cross semivariogram* adalah *latitude*, *longitude*, fasa impedansi, resistivitas semu, dan *range* dari fasa impedansi. Dari data yang diinputkan akan diperoleh kurva *cross semivariogram* yang menghasilkan *nugget effect*, *sill* dan *range*. Kemudian dilakukan proses *co-kriging* dengan menginputkan sebagian data dari hasil kurva semivariogram fasa impedansi, resistivitas semu, dan *cross semivariogram* resistivitas semu. Data-data tersebut adalah *latitude*, *longitude*, fasa impedansi, resistivitas semu, model *spherical*, dan *sill*. *Sill* dalam input data *co-kriging* terdiri dari beberapa data hasil kurva semivariogram dan *cross semivariogram*. Data dalam komponen *sill* meliputi *nugget effect* dan *sill* dari kurva semivariogram fasa impedansi dan resistivitas semu, serta *nugget effect* dan *sill* dari kurva *cross semivariogram*. Setelah data-data tersebut diinputkan maka, dilakukan proses *co-kriging*. Proses ini akan menghasilkan X_{os} yang merupakan nilai resistivitas semu hasil dari *co-kriging*. Setelah diperoleh X_{os} akan dihasilkan

output berupa *static shift*. *Static shift* diperoleh dari selisih antara resistivitas semu dengan resistivitas awal semu hasil *co-kriging*.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian estimasi pergeseran statis data magnetotelurik 2D resistivitas semu dan fasa impedansi, antara lain :

3.5.1 Pembuatan Program

Aplikasi metode magnetotelurik sering mengalami distorsi yang menyebabkan adanya pergeseran statik pada data magnetotelurik. Pergeseran statik ini terjadi pada kurva masing-masing modus baik TE maupun TM. Pergeseran statik dapat menyebabkan interpretasi data menjadi ambigu. Oleh karena itu, diperlukan metode estimasi pergeseran statik data magnetotelurik. Estimasi dilakukan untuk menghilangkan pergeseran pada kurva TE maupun TM.

Metode umum yang digunakan adalah metode TDEM, dimana metode ini relatif tidak terpengaruhi anomali konduktivitas lokal dekat permukaan. Selain itu, untuk memperoleh data TDEM, diperlukan pengukuran dilapangan yang menghabiskan biaya tidak sedikit (Utaminingsih, 2010). Untuk efisiensi estimasi pergeseran statik data magnetotelurik 2D, maka dilakukan pembuatan program estimasi pergeseran statik yang dituangkan dalam persamaan *co-kriging* pada program numerik, dengan memperhitungkan sifat semivariogram kurva resistivitas semu dan fasa impedansi masing-masing modus TE dan TM. Selain itu, kurva *cross semivariogram* juga diperhitungkan, dimana kurva ini akan menghasilkan kurva *cross semivariogram* resistivitas semu. Terdapat beberapa bagian program dalam metode *co-kriging* yaitu, variogram, variogram fit dan *static shift*. Variogram merupakan program yang berfungsi untuk memperhitungkan variogram eksperimental dari berbagai macam dimensi. Variogram ini akan menghasilkan bentuk kurva yang menunjukkan titik-titik data dari sebuah penelitian. Variogram fit merupakan program yang melakukan kuadrat terkecil sesuai dengan berbagai variasi variogram teoritis kedalam variogram eksperimental. Di dalam variogram fit terdapat beberapa pilihan

seperti model *bounded* (model *spherical*) dan model *unbounded* (model *eksponensial*). Variogram fit akan menunjukkan kurva, di mana kurva tersebut akan menghasilkan komponen-komponen dalam variogram.

3.5.2 Semivariogram dan *Cross Semivariogram*

Semivariogram merupakan setengah dari variogram yang disimbolkan dengan $\gamma(h)$ pada persamaan (2.45). Variogram sendiri merupakan suatu fungsi vektor yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kemiripan/variabilitas antara 2 contoh yang terpisah pada jarak tertentu. Semivariogram ini berfungsi untuk menunjukkan korelasi spasial. Komponen-komponen yang penting dalam semivariogram ditunjukkan pada gambar 2.6, dimana pada gambar tersebut merupakan kurva semivariogram yang menunjukkan adanya *nugget effect*, *sill* dan *range*. Pada penelitian ini digunakan model semivariogram paling sederhana yaitu model *spherical* yang ditunjukkan pada persamaan (2.46) berikut ini :

$$\gamma(h) = C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \left(\frac{h}{2a} \right)^3 \right]$$

Langkah awal yang dilakukan dalam penghitungan kurva semivariogram adalah membuat semivariogram fasa impedansi. Setelah itu dilakukan pembuatan semivariogram resistivitas semu. Selanjutnya dari kedua variabel fasa impedansi dan resistivitas semu dilakukan *cross semivariogram*.

3.5.3 Persaman *Co-kriging*

Co-kriging merupakan perluasan dari kriging. *Co-kriging* adalah suatu teknik khusus dalam interpolasi dengan memakai dua variabel berbeda, akan tetapi kedua variabel tersebut secara spasial masih berhubungan. Variabel yang ingin diketahui nilainya disebut sebagai variabel utama, sedangkan variabel yang digunakan untuk mengestimasi disebut co variabel. Pada penelitian ini variabel utama adalah resistivitas semu, sedangkan co variabel adalah fasa impedansi. Untuk mengestimasi besaran resistivitas semu digunakan persamaan *co-kriging*.

Penghitungan nilai *co-kriging* adalah sama antara $r_a^{cok} = r_a^{obs}$. Sehingga nilai *co-kriging* dapat dihitung berdasarkan persamaan :

$$s = r_a^{obs} - r_a^{cok} = \log[\rho_a^{obs}] - \log[\rho_a^{cok}] \quad (3.2)$$

3.6 Metode Analisa

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan variasi terhadap nilai frekuensi, dimana pemilihan frekuensi akan mempengaruhi bentuk kurva semivariogram. Nilai masing-masing frekuensi akan menghasilkan kurva semivariogram resistivitas semu dan fasa impedansi untuk masing-masing modus TE dan TM yang berbeda-beda. Selain itu, dari nilai masing-masing frekuensi akan menghasilkan kurva *cross semivariogram* resistivitas semu yang menghasilkan beberapa data, seperti *nugget effect*, *sill*, dan *range*, yang akan dianalisis lebih lanjut. Variasi nilai *sill* dan *range* untuk model bukit, lembah dan data lapang baik modus TE maupun modus TM, serta pengaruh frekuensi berfungsi berfungsi untuk melihat seberapa besar data tersebut tidak lagi memiliki korelasi. Analisis data juga dilakukan pada nilai resistivitas semu hasil penghitungan *co-kriging*. Nilai resistivitas semu ini akan mengikuti trend dari nilai fasa impedansi. Hal ini dikarenakan fasa impedansi merupakan co-variabel dari estimasi nilai resistivitas semu sebelum dilakukan penghitungan sistem *co-kriging*.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian mengenai estimasi pergeseran statik data magnetotelurik 2D menggunakan metode *co-kriging* memberikan kesimpulan, sebagai berikut :

1. Data magnetotelurik model topografi lembah dan bukit serta data lapangan memiliki semivarians resistivitas semu lebih besar dibandingkan dengan semivarians fasa impedansi baik pada modus TE maupun modus TM. *Range* untuk data sintetis pada frekuensi rendah lebih besar daripada dependensi data pada frekuensi yang besar dikarenakan pada pada frekuensi besar tidak mampu menembus lapisan yang lebih dalam. Sedangkan pada data lapangan *X range* tidak dipengaruhi oleh frekuensi atau tidak memiliki trend.
2. Pergeseran statik untuk model topografi bukit dan lembah pada modus TM lebih besar dibandingkan dengan pergeseran statik pada modus TE. Jika diaplikasikan pada data lapangan pergeseran statik yang terjadi memiliki trend yang sama yaitu pergeseran statik pada modus TM lebih besar dibandingkan dengan modus TE.

5.2 Saran

Metode geostatistik dalam penelitian ini memiliki keunggulan di mana penggunaannya tidak melakukan pengukuran di lapangan. Namun pada penelitian ini, metode *co-kriging* masih terbatas. Oleh karena itu, terdapat beberapa saran sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan estimasi pergeseran statik dengan menggunakan model semivariogram teoritis yang berbeda yaitu *gaussian* dan *eksponensial*.
2. Perlu dilakukan koreksi pergeseran statik lebih lanjut dengan variasi model topografi yang lebih realistis.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfiana, A.N. 2005. Metode Ordinary Kriging Pada Geostatistika. *Skripsi*. Yogyakarta : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta.
- Amstrong, M. 1998. *Basic Linear Geostatistics*. Germany: Springer.
- Aini, N. E. N. 2015. Metode *Robust Kriging* dan Penerapannya Pada Data Geostatistika. *Skripsi*. Yogyakarta: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta.
- Arnason, K. 2015. The Static Shift Problem in MT Soundings. *Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia 19-25 April 2015*. 2.
- Arumsari. 2007. Model Geofisika Prospek Geothermal “Metta” Berdasarkan Studi Magnetotelurik. *Skripsi*. Departemen Fisika: Universitas Indonesia.
- Cagniard, L. 1953. Basic Theory of The Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics*. 30:605-635.
- Cressie, N. 1993. *Statistics for Spatial Data*. United States of America: John Wiley and Sons.
- Dobrin, B. M. dan Savit, H.C. 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting Fourth Edition*. Sinagpore: McGraw-Hill.
- Dorsel, D. dan Breche, L. T. 1997. *Kriging, Environmental Sampling and Monitoring Primer*, Virginia: John Wiley and Sons.
- Griffiths, D. J. 1999. *Introduction to Electrodynamics 3rd*. USA: Practice-Hall.
- Isaaks, E.H. dan Srivastava, R.M. 1989. *Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.

- Jiracek, G.R., Haak, V., dan Olse, K.H., 1995. *Practical Magnetotellurics in a Continental Rift Environment, in Continental Rifts*. New York : Elsevire.
- Jiracek, G. R. (tanpa tahun). *The Magnetotelluric Methods*. San Diego: San Diego State University.
- Jiracek, G. R. 1988. *Near-surface and Topographic Distortion in Electromagnetic Induction*. San Diego: San Diego State University.
- Kitanidis, P.K. 1997. *Introduction to Geostatistics: Application in Hydrogeology*. New York: Cambridge University Press.
- Mwakirani, R., Simiyu, C. dan Gichira, J. 2012. *Application of Transient Elevation Electromagnetics in Static Shift Correction for Magnetotellurics Data Case Study: Paka Geothermal Prospect in Kenya*. GRC.
- Nabighian, M. N. 1997. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-theory Volume 1*. USA: Society of Exploration Geophysics.
- Naidu, G. D. 2012. *Magnetotellurics: Basic Theoretical Concepts*. Berlin Heidelberg :Springer-Verlag.
- Nyquist, J.E., W.E. Doll, R. K. Davis, dan R. A. Hopkins. 1996. *Cokriging Surface Topography and Seismic Refraction Data for Bedrock Topography*.
- Reynolds, J.M., 1997. *An Introduction Applied and Environmental Geophysics*. England: John Wiley and Sons Inc.
- Romaji, O.E., Latra, N. I., dan Sutikno. 2016. Estimasi Produksi Minyak dan Gas Bumi di Kalimantan Utara Menggunakan Metode *Co-Kriging*. *Jurnal Sains dan Seni ITS Vol. 5 No. 2 (2016) 2337-3520*. Surabaya: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Sa'diyah, L. H. 2016. Pengaruh Topografi Terhadap Pergeseran Statik Pada Kurva Resistivitas Semu dan Fasa Impedansi dalam Pemodelan Magnetotelurik 2D. *Skripsi*. Jember: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.
- Sarkowi, M. 2010. *Pengantar Teknik Geofisika*. Lampung: UNILA.
- Simpson, F., dan Bahr, K. 2005. *Practical Magnetotelluric*. UK, Cambridge: Syndicate Press.
- Sulistyo, A. 2011. Koreksi Pergeseran Statik Data Magnetotelurik (MT) Menggunakan Metode Geostatistik, Perata-rataan, dan Time Domain Electromagnetic. *Skripsi*. Depok: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.
- Susila, M. R. tanpa tahun. Estimasi Pencemaran Udara oleh Debu dan Gas NO₂ di Udara Kalimantan Selatan Menggunakan Co-kriging. *Jurnal Geostatistik*. Surabaya: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Telford, M. W., Geldart, P. L. dan Sheriff, E. R. 2004. *Applied Geophysics Second Edition*. New York : Cambridge University.
- Tikhonov, A. N. 1950. The Determination of The Electrical of Deep Layers of The Earth's Crust. *Geophysics*. Dokl Acad Nauk. 73: 295-297.
- Tournerie, B., Chouteau, M., dan Marcotte, D. 2007. *Magnetotelluric Static Shift: Estimation and Removal Using The Cokriging Method*: Canada.
- Unsworth, M. 2007. *Magnetotelluric*. Canada: University of Albetra.
- Utaminingsih, N. 2010. Koreksi Pergeseran Statik Data Magnetotelurik (MT) Menggunakan Metode Geostatik pada Data Sintetik dan Data Riil. *Skripsi*. Depok: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Vozoff, K., 1991. *The Magnetotelluric Method, in Electromagnetic Method in Applied Geophysics. Application.* soc Explor Geophys: Tulsa Okla.

Webster, R dan Oliver, A.M. 2007. *Geostatistics for Environmental Scientist. Second Edition.* United States of America: John Wiley & Sons Inc.

Weckernagel, H. 1995. *Multivariate Geostatistics, An Introduction with Application.* Berlin: Springer.

Xiao, Wien. 2004. *Magnetotelluric Exploration in The Rocky Mountain Foothills.* Canada: University of Alberta.

Zhdanov, M., 2002. *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems.* Amsterdam: Elsevier.

Zhdanov, M., 2009. *Geophysical Electromagnetic Theory and Method.* Amsterdam : Elsevier.