



TUGAS AKHIR - SF 141501

**INTEGRASI METODE *SELF POTENTIAL* DAN
RESISTIVITAS UNTUK IDENTIFIKASI REMBESAN AIR PADA
TANGGUL LUMPUR SIDOARJO (LUSI)**

Masyithah Noor Wasillah
NRP 1112100013

Dosen Pembimbing
Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.
Dr. Sungkono M.Si

DEPARTEMEN FISIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - SF 141501

**INTEGRASI METODE *SELF POTENTIAL* DAN
RESISTIVITAS UNTUK IDENTIFIKASI REMBESAN AIR
PADA TANGGUL LUMPUR SIDOARJO (LUSI)**

**Masyithah Noor Wasillah
NRP 1112100013**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.
Dr. Sungkono M.Si**

**DEPARTEMEN FISIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - SF 141501

**INTEGRATED SELF POTENTIAL AND RESISTIVITY
METHODS FOR IDENTIFYING SEEPAGE IN THE LUMPUR
SIDOARJO (LUSI) EMBANKMENT**

**Masyithah Noor Wasillah
NRP 1112100013**

**Advisor
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.
Dr. Sungkono M.Si**

**Department of Physics
Faculty of Mathematics and Science
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

**INTEGRASI METODE *SELF POTENSIAL* DAN
RESISTIVITAS UNTUK IDENTIFIKASI REMBESAN AIR
PADA TANGGUL LUMPUR SIDOARJO (LUSI)**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Studi Geofisika
Program Studi S-1 Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

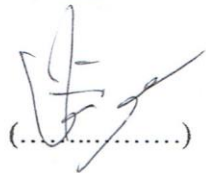
**Masyithah Noor Wasillah
1112 100 013**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.

()

2. Dr. Sungkono

()



INTEGRASI METODE *SELF POTENTIAL* DAN RESISTIVITAS UNTUK IDENTIFIKASI REMBESAN AIR PADA TANGGUL LUMPUR SIDOARJO (LUSI)

Penulis : Masyithah Noor Wasillah
NRP : 1112100013
Departemen : Fisika FMIPA ITS
Pembimbing : Prof.Dr.rer.nat. Bagus JayaSantosa, S.U.
Dr. Sungkono M.Si

Abstrak

Tanggul LUSI telah berulang kali mengalami kegagalan yang mengakibatkan tanggul tersebut runtuh (collapse). Salah satu penyebab runtuhnya tanggul ialah adanya saturasi air pada tanggul melalui retakan atau pori-pori pada tanggul. Oleh karena itu perlu dilakukan identifikasi zona rembesan akibat retakan pada tanggul. Identifikasi penyebab kegagalan tanggul LUSI ini menggunakan metode Self Potential dan resistivitas yang tidak merusak lingkungan sekitar tanggul. Data yang diperoleh kemudian diolah dengan tujuan untuk mengidentifikasi rembesan air pada tanggul LUSI. Hasil dari penelitian ini menunjukkan terdapat beberapa kemungkinan adanya retakan yang mengakibatkan rembesan pada tanggul yang diukur pada kedalaman sekitar 5-50m.

Kata kunci : *Inversi, Resistivitas, Self Potential*

INTEGRATED SELF POTENTIAL AND RESISTIVITY METHODS FOR IDENTIFYING SEEPAGE IN THE LUMPUR SIDOARJO (LUSI) EMBANKMENT

Autor : Masyithah Noor Wasillah
NRP : 1112100013
Departement : Fisika FMIPA ITS
Advisor : Prof.Dr.rer.nat. Bagus JayaSantosa, S.U.
Dr. Sungkono

Abstract

There has been several failures in the LUSI embankment that causing the embankment to be collapse. The cause of this incidence might be because of the presence of water saturation through fractures and pores in the embankment. Therefore, seepage identification is a very important thing to do in order to estimate the seepage zones due to fractures and pores in the embankment. Geophysical method has an important role in mapping seepage paths and monitoring the embankment. Self Potential and resistivity method are non-destructive technique that can be used in embankment monitoring. The data are obtained then processed in order to identify the seepage in the LUSI emabankment. The result of this research shows that there are several possible fractures as the cause of seepage in the LUSI emabakment at estimated depth of 5m-50m.

Kata kunci : Inversion, Resistivity, Self Potential

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis ucapkan kepada ALLAH SWT karena atas berkah, rahmat, dan petunjukNya atas iman, islam, dan ikhsan yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir (TA) ini dengan optimal dan tanpa suatu kendala apapun. Tugas Akhir (TA) ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan strata satu d Fisika ITS. Tugas Akhir dengan judul :

“Integrasi Metode Self Potential dan Resistivitas Untuk Identifikasi Rembesan Air Pada Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI)”

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang membantu penyusunan laporan Tugas Akhir (TA) dan proses penelitiannya.

1. Prof. Dr. rer. nat Bagus Jaya Santosa, S.U dan Dr.Sungkono selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan, saran dan motivasi selama proses penelitian dan penyusunan laporan.
2. Bapak Dr. Yono Hadi P., M. Eng. dan Dr. rer. nat. Eko Minarto selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA ITS yang telah memberikan kemudahan sarana kepada penulis selama kuliah sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Keluarga tercinta, Ibunda Iin Indristuti, Ayahanda Dwi Mudji Yuwono dan kakak Aliefa Maulidia yang selalu memberikan dukungan, semangat, didikan nasehat, kasih sayang dan doa restu kepada penulis.
4. Prasetya D yang selalu memberikan dukungan, motivasi serta hiburan bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Saudara beda ayah ibu Dina, Sucy, Vara, Oland, Kopeng, Danik, Panjol, Papi, Ramda, Dekki, Yogik yang selalu setia

mendengar keluh kesah dan memberikan motivasi bagi penulis.

6. Geng rumpik Nana, Deril, Yusro, Risjo, Eky terimakasih atas informasi kekinian yang diberikan kepada penulis.
7. Pejuang 115 Norma, Haiyin, Veny, Fikri, Ratri yang telah membantu penulis selama perjuangan menyelesaikan t=Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman seperjuangan bidang minat fisika bumi 2012 Zumro, Cahla, Indri, Lina, ChiChi, Dyah, Rina, Fandy, Adi, Yayan, Samsul, Dira, Meli, dll.
9. Keluarga besar Fisika 2012 terima kasih atas pelajaran kehidupan dan kebersamaan selama masa kuliah yang tidak akan pernah dilupakan.
10. Keluarga Lab Geofisika (Semua Alumni, Pak kis, Mas Nanang, Mas Wildan, Mas Reks, Mas Kafi, Mas Wisnu, Oman, Dani, Getek, Aer, Pambayun, Safitri dll) terimakasih atas fasilitas dan sharing ilmunya.
11. Mas Alwi dan Mbak Yekti yang membantu penulis selama pengambilan data Tugas Akhir ini.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan ini masih terdapat kesalahan. Mohon kritik dan saran pembaca guna menyempurnakan laporan ini. Akhir kata semoga laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak. Amiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Permasalahan.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kondisi Geologi Tanggul LUSI.....	5
2.2 Kestabilan Tanggul	6
2.3 Metode Geolistrik Tahanan Jenis (Resistivitas).....	7
2.3.1 Teori Kelistrikan Batuan.....	10

2.3.2 Sifat Kelistrikan Batuan	10
2.3.3 Potensial Listrik Batuan	11
2.3.4 Potensial Pada Bumi.....	12
2.3.5 Konfigurasi Wenner-Schlumberger	16
2.3.6 Konsep Resistivitas Semu	16
2.4 Metode Self Potential	17
2.5 Pemodelan Ke Depan (<i>Forward Modelling</i>).....	20
2.5.1 Pemodelan Ke Depan Metode Resistivitas 2D .	21
2.5.2 Pemodelan Ke depan Metode <i>Self Potential</i>	23
2.6 Inversi (<i>Inverse Modeling</i>)	24
2.6.1 Inversi Metode Resistivitas 2D	25
2.6.2 Inversi Self Potential	26
2.7 Noise Assisted MEMD (NA-MEMD)	29
BAB III METODOLOGI	31
3.1 Alur Penelitian.....	31
3.2 Studi Literatur.....	32
3.3 Akuisisi Data Metode Resistivitas dan <i>Self Potential</i> ..	32
3.4 Pengolahan Data Metode Resistivitas	33
3.5 Filtering Data <i>Self Potential</i>	33
3.6 Inversi data <i>Self Potential</i>	33
3.7 Analisa Hasil	34
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Analisa Data Metode Resistivitas	35
4.1.1 Akuisisi Data Lapangan	35

4.1.2 Hasil Analisa Data Pengukuran Lapangan.....	36
4.2 Analisa Data Metode <i>Self Potential</i>	38
4.2.1 Akuisisi Data Lapangan	38
4.2.2 <i>Filtering</i> Data Menggunakan <i>Reference Correction</i> , Koreksi Harian dan NA-MEMD	40
4.2.3 Hasil Inversi <i>Self Potential</i> dengan Algoritma <i>Very Fast Simulated Annealing</i> (VFSA).....	42
4.3 Hasil Interpretasi Data Resistivitas dan <i>Self Potential</i> pada Setiap Lintasan Pengukuran	45
4.3.1 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 1 (Ptabendo)	46
4.3.2 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 2 (P75A).....	49
4.3.3 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 3 (P76-77)	51
4.3.4 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 4 (P78-79)	53
4.3.5 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 5 (P79-82)	55
4.4 Hasil Interpretasi Zona Rembesan Pada Tanggul LUSI	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	61
5. 1 Kesimpulan	61
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lokasi semburan lumpur panas Sidoarjo	5
Gambar 2.2 Jenis Kegagalan Tanggul	7
Gambar 2.3 Sumber arus tunggal di permukaan medium isotropis.....	13
Gambar 2.4 Susunan Elektroda Ganda di Permukaan	15
Gambar 2.5 Pengaturan elektroda konfigurasi <i>Wenner-Schlumberger</i>	16
Gambar 2.6 Resistivitas Semu (<i>apparent resistivity</i>)	17
Gambar 2.7 Skema Pengukuran Fixed Base	19
Gambar 2.8 Skema Lep Frog	20
Gambar 2.9 Model anomali <i>inclined sheet</i>	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian	31
Gambar 3.2 Lintasan Pengukuran	32
Gambar 4.1 Kondisi tanggul pada lintasan 1.....	36
Gambar 4.2 Resistivitas 2D hasil inversi data resistivitas yang terukur pada lintasan 1	38
Gambar 4.3 Data pengukuran Self Potential pada lintasan 1	39
Gambar 4.4 Hasil dekomposisi data Self Potential pada lintasan 1 Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) menggunakan metode NA-MEMD.	41
Gambar 4.5 Hasil penjumlahan IMF data <i>Self Potential</i> pada lintasan 1 Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) menggunakan metode NA-MEMD.....	42
Gambar 4.6 (a)Fitting kurva data observasi dengan data perhitungan; (b)Citra rekaman yang terdeteksi melalui proses inversi data <i>Self Potential</i> pada lintasan 1 Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI).....	44
Gambar 4.7 Rata-rata <i>error</i> untuk setiap iterasi pada lintasan 1.....	45
Gambar 4.8 Bagian tanggul pada lintasan 1 yang kering	47
Gambar 4.9 Hasil pengolahan data resistivitas dan <i>Self Potential</i> pada lintasan 1	48

Gambar 4.10 Kondisi tanggul pada saat pengambil data lintasan 2	49
Gambar 4.11 Hasil pengolahan data resistivitas dan <i>Self Potential</i> pada lintasan 2.....	50
Gambar 4.12 Kondisi tanggul pada saat pengambil data lintasan 3	51
Gambar 4.13 Hasil pengolahan data resistivitas dan <i>Self Potential</i> pada lintasan 3	52
Gambar 4.14 Kondisi tanggul pada saat pengambil data lintasan 4	53
Gambar 4.15 Hasil pengolahan data resistivitas dan <i>Self Potential</i> pada lintasan 4.....	54
Gambar 4.16 Kondisi tanggul pada saat pengambil data lintasan 5	56
Gambar 4.17 Hasil pengolahan data resistivitas dan <i>Self Potential</i> pada lintasan 5.....	57
Gambar 4.17 Zona rembesan pada tanggul LUSI	57

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai resistivitas metrial di bumi	9
--	---

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	67
LAMPIRAN B.....	75
LAMPIRAN C.....	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semburan lumpur panas Sidoarjo adalah peristiwa menyemburnya lumpur panas di lokasi pengeboran PT Lapindo Brantas di Desa Renokenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo. Semburan lumpur panas di Sidoarjo ini tergolong peristiwa besar. Sejak awal semburan lumpur pada tanggal 29 Mei 2006 di lokasi pengeboran Lapindo Brantas, dalam kurun waktu satu tahun telah menggenangi daerah di wilayah Kecamatan Porong, Kecamatan Tanggulangin dan Kecamatan Jabon, kurang lebih mencapai seluas 5 km² (Sudarsono dan Sujarwo, 2008). Semburan lumpur ini telah menggenangi kawasan permukiman, pertanian, dan perindustrian di tiga kecamatan di sekitarnya, serta mempengaruhi aktivitas perekonomian di Jawa Timur.

Beberapa metode telah diterapkan oleh para ahli untuk menginvestigasi struktur bawah permukaan bumi, salah satunya untuk identifikasi tanggul, seperti metode resistivitas (Johansson dan Dahlin, 1996), *Self Potential* (Revil et al, 2007), seismik (Chunhsien et al, 2005; Deidda dan Ranieri, 2005), *ground penetrating radar* (Di Prinzio et al, 2010) dan *Very Low Frequency Electromagnetic* (Sungkono et al, 2014). Metode geolistrik merupakan metode geofisika yang digunakan untuk mempelajari sifat aliran listrik di dalam bumi dan bagaimana cara mendeteksinya di permukaan bumi. Metode ini banyak digunakan untuk menyelidiki keadaan bawah permukaan dengan memanfaatkan sifat-sifat kelistrikan suatu batuan.

Untuk mengidentifikasi rembesan pada tanggul, perlu dilakukan monitoring secara berkala. Identifikasi rembesan dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti metode resistivitas dan *self potential* (SP). Metode geolistrik tahanan jenis (*resistivity method*) merupakan salah satu jenis metode geolistrik yang menggunakan konsep perambatan arus listrik pada suatu media

yang diasumsikan homogen isotropis. Metode ini dilakukan dengan cara menginjeksikan arus listrik ke dalam bumi melalui elektroda kemudian perbedaan beda potensial yang terukur akan menggambarkan sebaran nilai tahanan jenis di bawah permukaan bumi. Metode *Self Potential* (SP) merupakan salah satu metode geofisika yang prinsip kerjanya adalah mengukur tegangan statis alam (*static natural voltage*) yang berada pada titik-titik di permukaan tanah. Metode *Self Potential* merupakan metode pasif dalam bidang geofisika karena untuk mendapatkan informasi bawah tanah melalui pengukuran tanpa menginjeksi arus listrik melalui permukaan tanah.

Metode *Self Potential* pada umumnya menghasilkan interpretasi kualitatif dan hasil yang diperoleh ialah penampang 1 dimensi, oleh karena itu perlu adanya metode pembanding. Metode Resistivitas digunakan sebagai metode pembanding karena metode ini menghasilkan interpretasi kuantitatif dan mampu menganalisa adanya rembesan pada tanggul melalui anomali resistivitasnya. Anomali ini kemudian digunakan untuk interpretasi data *Self Potential* untuk menentukan zona rembesan pada tanggul. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan kombinasi dua metode yaitu metode geolistrik tahanan jenis (*resistivity*) dan metode *Self Potential* agar didapatkan hasil interpretasi bawah permukaan yang lebih akurat. Dengan hasil yang lebih akurat maka rembesan pada tanggul dapat diidentifikasi secara tepat.

1.2 Perumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini yaitu bagaimana hasil identifikasi rembesan air pada tanggul LUSI dengan menggunakan metode geolistrik tahanan jenis (*resistivity*) dan metode *self potential*.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Metode optimasi dalam proses inversi menggunakan *Very Fast Simulated Annealing* (VFSA)
2. Data yang digunakan merupakan data resistivitas dan *self potential* di tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) Jawa timur di titik Ptabendo, P75A, P76-77, P78-79, P79-82.
3. *Software* yang digunakan ialah MATLAB R2010a.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan di atas, maka tujuan dari penelitian ini ialah untuk melakukan identifikasi rembesan air pada tanggul LUSI dengan menggunakan metode geolistrik tahanan jenis (resistivitas) dan metode *self potential*.

1.5 Manfaat penelitian

Manfaat penelitian ini adalah memberi informasi mengenai penggunaan metode geolistrik tahanan jenis (resistivitas) dan metode *self potential* dalam mengidentifikasi rembesan pada tanggul dan penerapan optimasi global VFSA.

1.6 Sistematika Penulisan

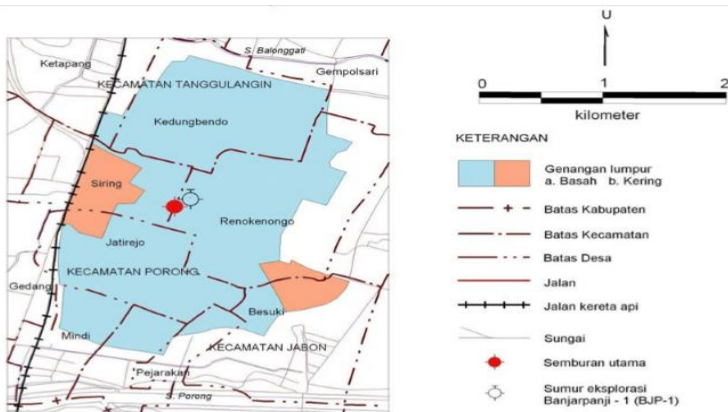
Penulisan Tugas Akhir (TA) ini terdiri dari abstrak yang berisi gambaran umum dari penelitian ini. Bab I pendahuluan yang memuat latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan. Bab II tinjauan pustaka berisi tentang dasar-dasar teori yang digunakan sebagai acuan dari penelitian, Bab III metodologi penelitian, Bab IV hasil penelitian dan pembahasannya, dan Bab V kesimpulan dan saran.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Geologi Tanggul LUSI

Semburan lumpur panas di kecamatan Porong Kabupaten Sidoarjo merupakan suatu peristiwa besar. Semburan lumpur terjadi sejak tanggal 29 Mei 2006 hingga saat ini. *Volume* lumpur yang keluar ke permukaan sejak pertama kali sampai tahun 2007 terus mengalami peningkatan. Semburan pertama yang merupakan semburan utama hingga saat ini masih aktif menyemburkan lumpur panas dengan volume yang sangat besar (Gambar 2.1). Erupsi lumpur yang terjadi di kabupaten Sidoarjo sampai saat ini telah berlangsung lebih dari 10 tahun (Sungkono *et al*, 2014). Lumpur tersebut tersusun dari kerikil, pasir, lanau serta lempung plastis dan air. Material tersebut berasal dari batuan fasies lempung Formasi Pucangan atau Formasi Lidah berumur Plistosen dari kedalaman 750 hingga 1900 meter (Sudarsono dan Sujarwo, 2008). Menurut Ibrahim, dkk (2010) lumpur atau mud vulcano tersebut yang terbentuk sejak jutaan tahun lalu (5 juta tahun) tersebut dapat menyembur ke permukaan hingga kini dikarenakan tekanan tektonik.



Gambar 2.1 Lokasi semburan lumpur panas Sidoarjo (Sudarsono dan Sujarwo, 2008)

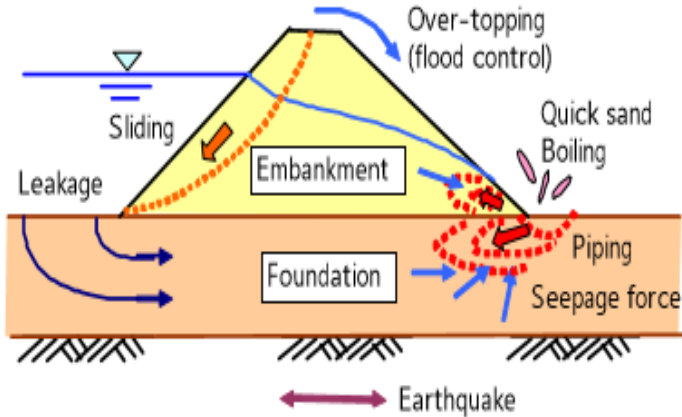
2.2 Kestabilan Tanggul

Tanggul merupakan suatu bidang yang berbentuk seperti tembok miring atau tegak lurus baik alami maupun buatan yang berfungsi untuk menahan air. Tanggul dibedakan menjadi dua macam yaitu *Earth Fill* dan *Rock Fill*. *Earth Fill* merupakan tanggul yang dibuat dari material material di daerah tersebut kemudian material tersebut dipadatkan. Sedangkan *Rock Fill* dibuat dibuat dari material yang ada di sekitar daerah tersebut dan juga material lain dalam bentuk beton. Berdasarkan proses terbentuknya tanggul dibedakan menjadi tiga jenis yaitu tanggul alami, tanggul buatan dan tanggul komposit (Fell *et al*, 2005).

Tanggul LUSI merupakan tanggul buatan dengan komposisi alami yang dipadatkan (*earth fill*). Tanggul ini dibangun untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan oleh erupsi lumpur. Tanggul LUSI sangat rentan terhadap kegagalan-kegagalan yang dapat menyebabkan *collapse*.

Menurut (Sungkono, 2016) terdapat tiga hal yang menyebabkan ketidakstabilan pada tanggul LUSI antara lain: deformasi secara vertical dan horizontal, erupsi fluida dalam jumlah yang cukup besar dan likuifaksi pada tanggul seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Deformasi merupakan perubahan bentuk atau ukuran dari suatu objek baik secara vertikal maupun horizontal. Deformasi pada tanggul dapat menyebabkan retakan pada tanggul akibat dari pergerakan tanggul secara terus menerus. Lumpur yang dikeluarkan dalam jumlah yang besar mengakibatkan terjadinya limpasan (*overtopping*) sehingga terjadi rembesan fluida pada tanggul (*seepage*). Fluida tersebut akan berusaha menembus lapisan tanah sehingga terjadi penurunan tanah atau pasir (*sand boiling*), pasir yang lepas akibat saturasi fluida tersebut dinamakan dengan pasir hisap (*quick sand*). Penurunan tanah (*sand boiling*) dan *quick sand* mengakibatkan suatu getaran gempa yang menjalar pada tanggul sehingga terjadi proses likuifaksi atau berkurangnya kekuatan dan

kekakuan tanggul tersebut. Selain itu akibat dari erupsi fluida tersebut dapat mengakibatkan longsor (*sliding*).



Gambar 2.2 Jenis Kegagalan tanggul (Narita K, 2000).

Tanggul LUSI sangat rentan terhadap kegagalan sehingga dapat menimbulkan keruntuhan (*collapse*). Apabila tanggul mengalami keruntuhan maka akan berdampak buruk bagi lingkungan sekitar. Oleh karena itu perlu dilakukan monitoring secara berkala terkait kestabilan tanggul tersebut. Metode Geofisika dapat digunakan untuk mengetahui tingkat kestabilan tanggul. Metode ini dipilih karena merupakan metode *non destructive* dan hasilnya akurat. Beberapa hal yang perlu diperhatikan ketika mengevaluasi tanggul yaitu, perlu pemahaman secara fisis terhadap permasalahan tanggul serta mengetahui tahapan dalam proses evaluasi.

2.3 Metode Geolistrik Tahanan Jenis (Resistivitas)

Metode geolistrik tahanan jenis (resistivitas) merupakan salah satu jenis dari metode geolistrik yang banyak digunakan untuk mengetahui dan mempelajari keadaan bawah permukaan dengan cara mengetahui sifat aliran listrik pada batuan di bawah permukaan bumi. Metode resistivitas umumnya digunakan untuk

eksplorasi dangkal pada radius sekitar 300-500m di bawah permukaan. Pada metode ini, arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua elektroda arus. Injeksi arus ke dalam bumi akan menimbulkan beda potensial diantara dua titik. Beda potensial yang terjadi diukur melalui dua elektroda potensial. Hasil pengukuran arus dan beda potensial untuk setiap jarak elektroda yang berbeda diperoleh variasi harga tahanan jenis pada lapisan dibawah titik ukur (*sounding point*) (Santoso, 2002).

Metode resistivitas baik untuk memetakan kondisi bawah permukaan, sehingga dapat diketahui struktur lapisan dan sesarnya. Hal ini dikarenakan lapisan tanah dan batuan dapat mengalirkan arus listrik sehingga dapat dianalisa berdasarkan sifat kelistrikannya (Syamsuddin, 2012). Data yang dihasilkan umumnya lebih akurat, efektif dan efisien jika dibandingkan dengan metode eksplorasi yang lain.

Cara kerja metode ini dapat dianalogikan dengan rangkaian listrik, dimana saat arus dari suatu sumber dialirkan ke suatu beban listrik maka besarnya resistansi (Ω) dapat diperkirakan melalui besarnya beda potensial sumber dan besarnya arus yang mengalir. Pada metode ini nilai resistansi tidak dapat digunakan dalam penentuan jenis material di bawah permukaan bumi. Oleh karena itu digunakan besaran resistivitas. Resistivitas (tahanan jenis) merupakan kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik. Apabila suatu bahan memiliki nilai resistivitas yang tinggi maka bahan tersebut sukar dalam menghantarkan arus listrik, begitu pula sebaliknya. Resistivitas berbeda dengan resistansi. Perbedaan keduanya yaitu resistansi tidak hanya bergantung pada bahan itu sendiri tetapi juga bergantung pada faktor geometri atau bentuk bahan tersebut, sedangkan resistivitas tidak bergantung pada faktor geometri.

Resistivitas dari tiap material menunjukkan variasi nilai yang berbeda-beda, mulai dari material yang memiliki nilai resistivitas tinggi hingga material yang memiliki nilai resistivitas rendah. Besar resistivitas material dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Nilai resistivitas metrial di bumi (Telford *et al*, 1990)

No	Material	Resistivitas (Ωm)
1	Udara	0
2	Pirit	0.01-800.000
3	Kwarsa	500-800.000
4	Garam batu	30×10^{13}
5	Granit	200-140
6	Andesit	$170-45 \times 10^4$
7	Basal	200-100.000
8	Gimping	500-10.000
9	Batu pasir	200-8.000
10	Batu Tulis	20-11
11	Pasir	1-1.000
12	Lempung	1-00
13	Air Tanah	0.5-300
14	Air Asin	0.2
15	Magnetic	0.01-1000
16	Kerikil Kering	600-10.000
17	Alluvium	10-800
18	Kerikil	100-600
19	Kalsit	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$

Menurut (Telford *et al*, 1990), berdasarkan harga resistivitas listriknya batuan dan mineral dapat dikelompokkan menjadi tiga yaitu:

1. Konduktor baik : $10^{-8} < \rho < 1 \Omega\text{m}$
2. Konduktor pertengahan : $1 < \rho < 10^7 \Omega\text{m}$
3. Isolator : $\rho > 10^7 \Omega\text{m}$

Nilai batuan atau mineral tidak selalu sama. Batuan yang sama belum tentu memiliki nilai resistivitas yang sama sebaliknya batuan yang berbeda dapat memiliki nilai resistivitas yang sama. Nilai resistivitas yang terukur pada batuan tersebut dapat dipengaruhi oleh densitas, porositas, ukuran dan bentuk pori-pori

penyusun batuan, kandungan air dan suhu. Namun faktor yang sangat mempengaruhi nilai resistivitas pada batuan ialah pergerakan ion-ion bermuatan dalam pori-pori fluida. Untuk setiap jenis batuan pada akuifer yang terdiri atas material lepas mempunyai harga tahanan jenis yang lebih kecil apabila kandungan air tanahnya semakin membesar. Air tanah secara umum berisi campuran terlarut yang dapat menambah kemampuannya dalam menghantarkan arus listrik.

2.3.1 Teori Kelistrikan Batuan

Setiap batuan memiliki sifat-sifat kelistrikan yang berbeda. Perbedaan sifat-sifat batuan tersebut merupakan karakteristik dari batuan yang dipengaruhi oleh media penyusun batuan tersebut. Listrik yang ada pada batuan berasal dari alam yang akan muncul ketika diberi gangguan dari luar misalnya dengan penginjeksian arus listrik. Hal ini menyebabkan muatan penyusun batuan tersebut mengalami ketidakstabilan (Dobrin, 1981).

2.3.2 Sifat Kelistrikan Batuan

Setiap batuan memiliki karakteristik tersendiri terutama dalam sifat kelistrikannya. Salah satu sifat dari batuan ialah resistivitas (tahanan jenis). Batuan dianggap sebagai medium listrik seperti pada kawat penghantar listrik, sehingga mempunyai nilai resistivitas. Resistivitas batuan adalah hambatan dari batuan tersebut terhadap aliran listrik. Batuan juga memiliki sifat konduktor, yang disebabkan oleh ikatan kovalen antar ion batuan tersebut. Menurut Telford (1990) aliran listrik dan mineral di dalam batuan dan mineral digolongkan menjadi tiga macam, yaitu konduksi secara elektronik, konduksi secara elektrolitik dan konduksi secara dielektrik.

a. Konduksi secara elektronik

Batuan yang mengalami konduksi secara elektronik pada umumnya tersusun atas mineral logam. Konduksi secara elektronik terjadi jika batuan tersebut memiliki banyak elektron

bebas. Elektron bebas tersebut bergerak bebas sehingga terjadi tumbukan dengan atom logam.

b. Konduksi secara elektrolitik

Konduksi secara elektrolitik terjadi jika suatu batuan bersifat *porous* terisi oleh fluida yang memiliki ion bebas sehingga mengakibatkan batuan tersebut menjadi konduktor elektrolitik. Molekul fluida bersifat polar dan memiliki medan listrik yang kuat sehingga mampu memecah molekul garam yang terlarut menjadi ion positif dan negatif. Ion-ion tersebut selanjutnya akan membawa muatan listrik. Apabila kandungan fluida di dalam batuan bertambah banyak maka konduktivitasnya akan semakin besar.

c. Konduksi secara dielektrik

Konduksi secara dielektrik terjadi pada batuan yang memiliki sedikit elektron bebas bahkan tidak memiliki elektron bebas. Elektron dalam batuan tersebut tersebar secara acak. Pemberian arus listrik akan menimbulkan medan listrik yang menyebabkan elektron dalam batuan berpindah dan berkumpul terpisah dalam inti sehingga terjadi polarisasi.

2.3.3 Potensial Listrik Batuan

Potensial listrik batuan atau potensial alam terjadi akibat aktivitas elektrokimia dan mekanis. Aktivitas tersebut terjadi karena keberadaan air tanah. Air tanah merupakan faktor pengontrol dari semua peristiwa di dalam tanah yang berhubungan juga dengan pelapukan dari tubuh mineral, variasi sifat batuan, aktivitas biolistrik dari tanaman dan bahan organik, proses korosi, gradien termal, tekanan dan sebagainya (Telford *et al.*, 1990).

Potensial alami yang terdapat di dalam bumi terbagi dalam dua komponen yaitu, komponen yang konstan tidak memiliki arah dan komponen yang selalu berubah-ubah terhadap waktu. Komponen yang konstan di dalam bumi disebabkan oleh proses elektrokimia yang terjadi di dalam bumi sedangkan komponen yang berubah-ubah disebabkan oleh adanya proses yang menimbulkan perbedaan potensial dari arus bolak balik yang

diinduksikan oleh petir (alami) dan perbedaan medan magnet bumi yang dipengaruhi oleh curah hujan yang tinggi (Reynold, 1997).

Potensial alam dibagi menjadi 4 kelompok, antara lain:

a. Potensial Elektrokinetik

Potensial Elektrokinetik disebabkan oleh adanya aliran fluida yang melewati medium berpori sehingga terjadi pertukaran ion antara ion fluida dan partikel dalam tanah. Efek dari aliran ini akan memicu penyebab terjadinya anomali.

b. Potensial Difusi

Potensial Difusi terjadi akibat perbedaan mobilitas anion dan kation dalam larutan yang memiliki konsentrasi berbeda.

c. Potensial *Nernst*

Potensial *Nernst* terjadi apabila dua logam identik yang dimasukkan ke dalam larutan homogen dan konsentrasi larutan pada dua elektroda tersebut berbeda.

d. Potensial Mineralisasi

Potensial mineralisasi timbul apabila dua elektroda logam dimasukkan ke dalam larutan homogen. Nilai dari potensial ini paling besar jika dibandingkan dengan ketiga jenis potensial sebelumnya. Zona yang menimbulkan potensial ini terletak pada zona yang banyak mengandung *sulfide*, grafit dan *magnetic*.

2.3.4 Potensial Pada Bumi

Lapisan pada bumi diasumsikan sebagai medium homogen isotropis. Hal tersebut merupakan pendekatan dalam menentukan resistivitas pada lapisan-lapisan bumi. Aliran arus di dalam bumi didasarkan pada Hukum Kekekalan Muatan yang dapat ditulis sebagai (Syamsuddin, 2007):

$$\Delta \cdot \bar{J} = - \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.1)$$

dengan J adalah rapat arus (A/m^2) dan q adalah rapat muatan (C/m^3). Persamaan (2.1) juga dikenal sebagai persamaan kontinuitas. Apabila arus stasioner (tetap) maka Persamaan (2.1) menjadi :

$$\Delta \cdot J = 0 \quad (2.2)$$

Hubungan antara rapat arus J , intensitas medan listrik E (V/m) dan resistivitas ρ dinyatakan dalam hukum Ohm yang menyebutkan bahwa besarnya rapat arus J akan sebanding dengan besarnya medan listrik E yang dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut:

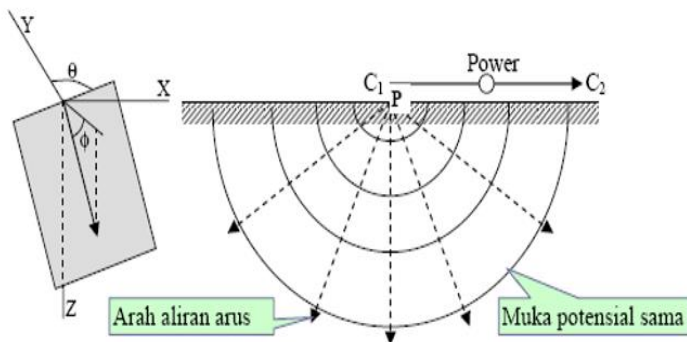
$$J = \frac{1}{\rho} E = - \frac{1}{\rho} \Delta V \quad (2.3)$$

V menyatakan potensial listrik (volts). Untuk medium homogen isotropis ρ konstan sehingga konduktifitas σ juga konstan sehingga $\nabla \sigma = 0$, sehingga diperoleh persamaan Laplace sebagai berikut:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) merupakan persamaan dalam teori geolistrik tahanan jenis sehingga distribusi potensial listrik untuk arus searah pada medium homogen isotropis memenuhi persamaan Laplace.

Misalkan arus I diinjeksikan ke dalam permukaan bumi yang homogen dan isotropis melalui sebuah elektroda pada titik P di permukaan maka arus tersebut akan tersebar ke semua arah dengan besar yang sama seperti pada Gambar (2.3)



Gambar 2.3 Sumber arus tunggal di permukaan medium isotropis (Loke, 2004)

Ruang yang dilalui oleh arus I merupakan ruang setengah bola ($2\pi r^2$), maka potensial V di suatu titik yang berjarak r dari sumber ialah:

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \rho J \quad (2.5)$$

$$J = \frac{1}{2\pi r^2} \quad (2.6)$$

Besar V pada jarak r adalah:

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.7)$$

Atau dapat ditulis:

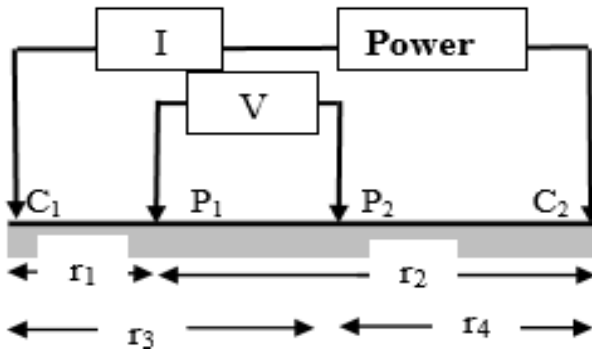
$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (2.8)$$

Pada umumnya metode resistivitas menggunakan dua buah elektroda yaitu elektroda arus dan elektroda potensial. Pengukuran beda potensial antara dua titik elektroda potensial merupakan superposisi atau penjumlahan potensial akibat arus yang diinjeksikan pada kedua elektroda arus (Firdaus, 2016). Persamaan beda potensial yang diperoleh dapat ditulis sebagai berikut:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.9)$$

dimana r_1 dan r_2 merupakan jarak dari titik P ke elektroda satu dan dua (Bhattacharya *and* Patra, 1968). Pada pengukuran metode resistivitas ini digunakan empat buah elektroda seperti Gambar 2.2 Sehingga Persamaan (2.9) menjadi:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right) \quad (2.10)$$



Gambar 2.4 Susunan Elektroda Ganda di Permukaan (Telford, 1990)

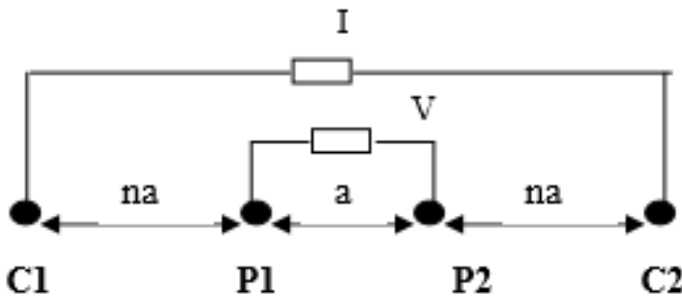
Terdapat beberapa konfigurasi elektroda atau susunan elektroda potensial dan arus yang digunakan. Letak elektroda potensial dan elektroda arus akan berpengaruh terhadap nilai medan listrik yang diukur. Besar faktor perbedaan akibat susunan elektroda yang digunakan disebut dengan Faktor Geometri (K). Nilai K ditunjukkan dalam persamaan sebagai berikut:

$$K = 2\pi \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right)^{-1} \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) merupakan persamaan umum dari faktor geometri, untuk setiap konfigurasi yang memiliki nilai r (jarak) yang berbeda-beda. Terdapat beberapa jenis konfigurasi elektroda dengan faktor geometri dalam metode geolistrik tahanan jenis antara lain konfigurasi *Wenner*, konfigurasi *Schlumberger*, konfigurasi *Wenner-Schlumberger*, konfigurasi pole-pole dan konfigurasi dipole-dipole.

2.3.5 Konfigurasi Wenner-Schlumberger

Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* merupakan metode gabungan antara konfigurasi *wenner* dan konfigurasi *Schlumberger*. Aturan spasi dalam konfigurasi ini menggunakan aturan spasi yang konstan dengan catatan faktor “n” untuk konfigurasi ini adalah perbandingan jarak antara elektroda C1-P1 maupun C2-P2 dengan spasi antara P1-P2 ditunjukkan pada Gambar (2.3). Apabila jarak antara elektroda P1-P2 adalah a maka jarak antara elektroda arus C1-C2 adalah $2na+a$ (Sakka, 2001).



Gambar 2.5 Pengaturan elektroda konfigurasi *Wenner-Schlumberger* (Sakka, 2001)

Faktor geometri (K) pada konfigurasi *Wenner-Schlumberger* adalah:

$$K = n(n+1)\pi a \quad (2.10)$$

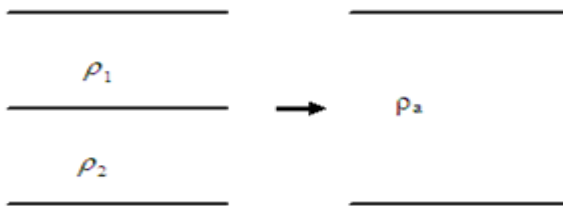
dengan a adalah jarak antara elektroda P1-P2.

2.3.6 Konsep Resistivitas Semu

Pada Metode resistivitas hasil yang diperoleh akibat injeksi arus yang diberikan kedalam bumi berupa nilai tahanan jenis. Metode resistivitas menggunakan asumsi bahwa bumi bersifat homogen isotropis. Dengan adanya asumsi ini maka resistivitas yang terukur merupakan nilai resistivitas yang sebenarnya. Pada kenyataannya bumi terdiri atas lapisan-lapisan sehingga nilai resistivitas pada setiap lapisan berbeda. Maka nilai resistivitas yang terukur bukan merupakan resistivitas untuk satu

lapisan melainkan resistivitas yang mewakili seluruh lapisan, nilai dari resistivitas ini dikenal dengan resistivitas semu.

Resistivitas semu merupakan resistivitas pengganti bukan resistivitas yang sebenarnya, akan tetapi resistivitas semu merupakan tahanan jenis pengganti dari semua anomaly bawah permukaan. Oleh karena itu resistivitas semu (ρ_a) merupakan subjek interpretasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Taib, 1999). Resistivitas semu mempresentasikan resistivitas dari suatu medium fiktif homogen yang ekuivalen dengan medium berlapis yang ditinjau. Untuk memperoleh nilai resistivitas tiap lapisan perlu dilakukan proses inversi (Bhattacharya *and* Patra, 1968)



Gambar 2.6 Resistivitas semu (*apparent resistivity*)

2.4 Metode Self Potential

Metode *Self Potential* pertama kali ditemukan pada tahun 1930 oleh Robert Fox. Percobaan yang dilakukannya dengan menggunakan elektroda tembaga yang dihubungkan ke sebuah galvanometer untuk mendeteksi lapisan *coppre* sulfida. Metode ini merupakan metode yang sederhana karena dalam pelaksanaannya hanya memerlukan alat ukur tegangan dan dua elektroda khusus (*porous pot electrode*). Metode *Self Potential* merupakan metode geolistrik pasif karena metode ini dilakukan tanpa menginjeksi arus listrik lewat permukaan tanah (Revil, 2013). Pengukuran potensial dilakukan secara alamiah antara dua titik di permukaan tanah. Aktivitas elektrokimia dan mekanik adalah penyebab dari *Self Potential*.

Pada mulanya metode *Self Potential* digunakan untuk menentukan daerah yang mengandung mineral logam.

Selanjutnya metode ini digunakan untuk mencari mineral logam yang terkait dengan sulfida, grafit, dan magnetit. Berdasarkan hal ini, para ahli geofisika mengungkapkan mekanisme potensial diri pada daerah mineral. Mekanisme polarisasi listrik spontan pada daerah mineral dapat dipahami dari teori dikembangkan oleh *Sato* dan *Mooney* pada tahun 1960. Mereka mengatakan bahwa di dalam tubuh mineral terjadi reaksi setengah sel elektrokimia, dimana anodanya berada di bawah permukaan air tanah. Pada anoda terjadi reaksi oksidasi sehingga anoda merupakan sumber arus sulfida yang berada di bawah tanah. Sulfida mengalami oksidasi dan reduksi yang akibat reaksi H_2O dan O_2 di dalam tanah (*Raharjo and Sebah, 2011*). Faktor utama yang mempengaruhi potensial diri secara umum adalah air yang terkandung dalam tanah. Potensial diproduksi oleh aliran air tanah, dengan berperan sebagai elektrolit dan pelarut dari mineral yang berbeda.

Metode *Self Potential* dapat diaplikasikan untuk mendeteksi adanya retakan pada tanggul yang disebabkan oleh rembesan air dengan tanah pada sebuah tanggul (*Hidayatullah, 2016*). Metode *Self Potential* menghasilkan sebuah anomali yang disebabkan oleh saturasi air pada tanggul. Pendeteksian adanya anomali didasarkan pada potensial listrik yang dihasilkan oleh aliran fluida medium berpori (*porous*). Proses ini dikenal dengan kopling elektromagnetik. Anomali *Self Potential* dihasilkan dari perbedaan temperatur, tekanan atau konsentrasi kimia di bumi. Besarnya *amplitude* anomali juga bergantung pada koefisien *cross coupling* yang berhubungan dengan aliran air tanah, panas atau bahan-bahan yang dapat menimbulkan potensial resistivitas listrik dari struktur bumi (*Telford et al, 1990*).

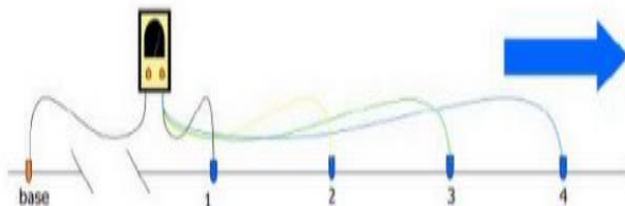
Apabila sebuah elektroda ditancapkan ke tanah, maka resultan gaya elektrokimia pada bidang kontak antara elektroda dengan ion dalam akan membentuk potensial palsu (*spurious*) meski tidak ada arus yang melaluinya. Potensial palsu ini mempunyai nilai berbeda-beda bergantung dari waktu pengambilan data, dan tempat pengambilan data, sehingga faktor

koreksinya akan sangat sulit untuk di cari. Konsekuensinya diperlukan yang bersifat non polarisasi, sehingga nilai potensialnya tidak dipengaruhi oleh arus yang melewatinya. Elektroda semacam ini dapat didesain dari logam penghantar yang dicelupkan ke dalam larutan jenuhnya, misalnya logam Cu dalam larutan CuSO_4 , logam Zn dalam larutan ZnSO_4 dan sebagainya. Logam dan larutan tersebut dikemas dalam sebuah *container* berbentuk pot berpori (*porous pot*). Penggunaan pot berpori dimaksudkan agar larutan dapat merembes secara perlahan sehingga membuat kontak dengan tanah (Telford and Geldart, 1990).

Pengukuran *Self Potential* dapat dilakukan dengan menggunakan dua cara yaitu:

1. *Fixed Base Porouspot*

Pengukuran beda potensial dengan cara *fixed base porouspot* dilakukan dengan cara salah satu *porouspot* tetap dan satu *porouspot* yang lain bergerak di sepanjang titik yang telah ditentukan. Pengukuran dengan teknik ini akan mendapatkan nilai 'potensial' langsung di titik ukur.

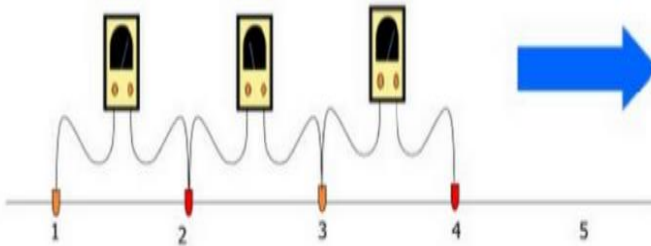


Gambar 2.7 Skema Pengukuran Fixed Base (Hartantyo, 2012)

2. *Leap Frog*

Pengukuran dilakukan dengan cara saling melompati antar *porouspot* dengan posisi dan spasi yang telah ditentukan dalam bentuk lintasan. Akibat perubahan arah medan listrik yang diukur (akibat pemakaian kutub positif dan negatif yang berkebalikan), maka akan diperoleh nilai beda potensial yang saling berkebalikan

tanda antar satu dipol dengan dipol selanjutnya. Pengukuran dengan teknik ini akan mendapatkan nilai beda potensial yang berbeda antar dua elektroda, sehingga menghitung nilai potensial di titik-titik ukur harus melibatkan titik ukur disampingnya.



Gambar 2.8 Skema Lep Frog (Hartantyo, 2012)

Pada penelitian ini metode yang digunakan ialah *Fixed Base Station*. Kelebihan dari metode ini ialah untuk meminimalkan faktor kesalahan dalam akuisisi data. Namun pada metode *fixed base station* kabel yang digunakan sangatlah panjang, hal inilah yang menjadi kelemahan dalam metode ini (Davydov, 1961).

2.5 Pemodelan Ke Depan (*Forward Modelling*)

Pengukuran dengan menggunakan metode geofisika sebagian besar memiliki tujuan untuk memperkirakan kondisi di bawah permukaan bumi. Data yang diperoleh dari pengukuran merupakan suatu respon dari keadaan di bawah permukaan bumi yang timbul dari sifat fisis seperti resistivitas yang berhubungan dengan keadaan geologi di bawah permukaan bumi. Agar data geofisika menjadi lebih sederhana maka dibuat suatu pemodelan.

Dalam pemodelan, terdapat dua istilah yaitu model dan parameter model. Menurut (Grandis, 2009) model dalam geofisika adalah obyek yang menyatakan suatu besaran atau parameter fisis yang bervariasi terhadap posisi (*spacial variation*), sehingga suatu model dapat dinyatakan oleh suatu parameter model yang terdiri dari parameter fisis yang menggambarkan

distribusi spasial dari parameter fisis tersebut. Pada umumnya pemodelan dibagi menjadi dua yaitu pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan ke belakang (*inverse modelling*). Menurut (Grandis, 2009) pemodelan ke depan merupakan proses perhitungan data yang secara teoritis akan teramati di permukaan bumi apabila diketahui nilai parameter model bawah permukaan.

Dalam pemodelan ke depan (*forward modelling*), pemodelan dilakukan untuk mendekati model yang didapatkan dari hasil inversi terhadap data sintetik. Data sintetik yang digunakan dalam pemodelan tersebut didapat dari hasil perhitungan secara teoritis menggunakan persamaan matematis yang diturunkan berdasarkan konsep fisika dari permasalahan yang ditinjau. Menurut (Grandis, 2009) dalam proses pendekatan antara respon model dengan data lapangan dapat dilakukan dengan proses coba-coba dengan mengubah nilai parameter model.

2.5.1 Pemodelan Ke Depan Metode Resistivitas 2D

Pemodelan ke depan (*forward modelling*) metode resistivitas 2D digunakan untuk menggambarkan nilai potensial pada tiap titik sebagai fungsi dari konduktivitas. Jika arus kontinyu yang mengalir pada suatu medium homogen isotropis dengan rapat arus (J) dan kuat medan listrik (E) dalam ruang dua dimensi, maka sesuai hukum Ohm persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$J(x, z) = \sigma(x, z) E(x, z) \quad (2.11)$$

dimana σ adalah konduktivitas medium $\frac{1}{\rho}$, dan E merupakan vektor medan listrik (Volt/m) yang merupakan bagian dari gradient skalar potensial listrik sehingga dapat dinyatakan sebagai:

$$E(x, z) = -\nabla\phi(x, z) \quad (2.12)$$

dengan $\phi(x, z)$ merupakan potensial listrik, kemudian Persamaan (2.12) disubstitusikan kedalam Hukum Gauss $\nabla E(x, z) = \frac{1}{\varepsilon_0} q$, sehingga didapatkan Persamaan Poisson:

$$\nabla^2 \phi(x, z) = -\frac{1}{\varepsilon_0} q(x, z) \quad (2.13)$$

Fungsi delta Diract yang berhubungan dengan persamaan kontinuitas untuk sebuah titik pada ruang dua dimensi dan dalam selang waktu t dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot [\sigma E] = -\nabla[\sigma(x, z)\nabla\phi(x, z)] \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial}{\partial t} q(x, z)\delta(x)\delta(y) \quad (2.15)$$

Nilai resistivitas yang diperoleh pada pengambilan data bukanlah merupakan data resistivitas yang sebenarnya. Untuk menghasilkan data resistivitas yang sebenarnya diperlukan pemecahan untuk solusi persamaan berikut (Dey A, 1979):

$$\nabla \cdot J = \frac{I}{\Delta V} \delta(x - x_s)\delta(z - z_s) = I[\delta(r - r_+) - \delta(r - r_-)] \quad (2.16)$$

Dengan I ialah input arus untuk dipole, r_+ dan r_- merupakan lokasi dari sumber arus positif atau negatif dan $\delta(r - r_+)$ adalah fungsi delta diract yang berpusat pada lokasi sumber arus. Penyelesaian Persamaan (2.16) dapat diselesaikan dengan mnggunakan *finite element method* (FEM) sehingga persamaannya menjadi:

$$[D \cdot S(\sigma) \cdot G]u = A(\sigma)u = q \quad (2.17)$$

D dan G merupakan matriks yang merepresentasikan divergensi dan operator gradient dalam permasalahan ruang dua dimensi, $S(\sigma)$ merupakan matriks diagonal yang berisi informasi nilai konduktifitas, u adalah vektor yang berisi nilai potensial, $A(\sigma)$ merupakan operator matriks pemodelan ke depan, dan q adalah vektor yang berisi lokasi sumber positif dan negatif. Dari Persamaan (2.17) jika beda potensial diberikan oleh model

konduktivitas, penyelesaian Persamaan (2.17) dapat ditulis menjadi:

$$u = A(\sigma)^{-1}q \quad (2.18)$$

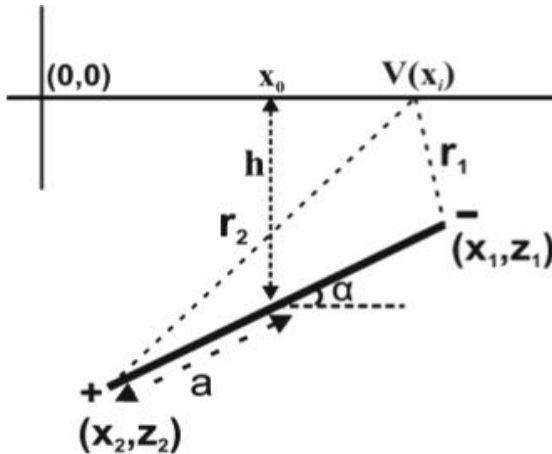
Persamaan (2.18) merupakan hasil yang menunjukkan potensial dalam ruang 2-D. Namun karena data yang diperoleh dari pengukuran merupakan data beda potensial, maka digunakan matriks proyeksi Q untuk menyeleksi titik-titik data. Persamaan pemodelan ke depan menggunakan *finite element method* (FEM) untuk menghitung resistivitas semu dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$d = Qu = QA(\sigma)^{-1}q \quad (2.19)$$

2.5.2 Pemodelan Ke depan Metode *Self Potential*

Pada percobaan *Self Potential* penentuan suatu anomali yang disebabkan oleh mineral di bawah permukaan bumi dapat didekati menggunakan beberapa asumsi pemodelan sederhana seperti bola, silinder vertical atau horizontal dan *inclined sheet*. Untuk menentukan rembesan yang terjadi pada tanggul digunakan pemodelan dengan bentuk sumber potensial berupa *inclined sheet*. Sharma dan Biswas (2014) menggambarkan anomali *Self Potential* (Gambar 9) dan menjelaskan persamaan umum anomali *Self Potential* pada setiap titik di permukaan P(x) dengan sumber anomali *inclined sheet* sebagai berikut:

$$v(x) = k \ln \left[\frac{(x-x_2)^2 + z_2^2}{(x-x_1)^2 + z_1^2} \right] \quad (2.20)$$



Gambar 2.9 Model anomali *inclined sheet*

dengan k adalah momen dipol arus listrik di permukaan, x_1 , z_1 dan x_2 , z_2 merupakan koordinat batas atas dan bawah dari model *inclined sheet* (Sharma dan Biswas, 2014). Parameter tersebut pada saat perhitungan respon pemodelan ke depan diubah-ubah kemudian dioptimasi dengan metode inversi sehingga didapatkan model yang cocok dengan data observasi.

Apabila terdapat lebih dari satu anomali *Self Potential* pada suatu target, maka menurut (Sharma dan Biswas, 2014) perlu dilakukan penjumlahan aljabar dari masing-masing anomali dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{(x)} = \sum_{j=1}^M v_j(x) \quad (2.21)$$

dengan $V_{j(x)}$ merupakan beda potensial di titik x dan M adalah jumlah pemodelan anomali.

2.6 Inversi (*Inverse Modeling*)

Inversi merupakan proses pencocokan data model yang ditentukan terhadap data teramati yang dimiliki dengan proses *curve fitting* antara model matematika dan model yang dimiliki (Supriyanto, 2007). Tujuan dari proses inversi ini ialah untuk menemukan pemodelan bumi berdasarkan data pengamatan.

Kesesuaian antara respon model dan data pengamatan dinyatakan sebagai suatu fungsi obyektif (*misfit*) yang harus diminimumkan. Untuk mencari minimum fungsi obyektif berhubungan dengan proses pencarian model optimum, dimana pencarian parameter model tersebut didapatkan dari karakteristik minimum fungsi tersebut. Menurut (Grandis, 2009) pemodelan inversi dapat dilakukan jika fungsi pemodelan ke depan telah diketahui sebelumnya.

2.6.1 Inversi Metode Resistivitas 2D

Permasalahan dalam inversi berhubungan dengan parameter model (M) dan data (N), keduanya berpengaruh terhadap penentuan klasifikasi permasalahan inversi dan cara penyelesaiannya. Terdapat tiga klasifikasi permasalahan dalam inversi yaitu; *overdetermined*, *underdetermined* dan *mixed-determined*. Inversi data resistivitas 2D termasuk dalam permasalahan *mixed-determined*, yang merupakan gabungan dari *under-determined* dan *over-determined*. Hal ini disebabkan karena beberapa blok medium dilalui oleh arus listrik sedangkan beberapa medium tidak terlewati arus listrik. Medium yang terlewati arus listrik akan terdefinisi dengan baik, hal ini merupakan permasalahan dalam inversi *over-determined*. Sedangkan medium yang tidak terlewati arus listrik tidak akan terdefinisi, sehingga hal ini merupakan permasalahan inversi *under-determined*.

Proses inversi data resistivitas 2D dapat dilakukan menggunakan *software* Res2DInv. Res2DInv merupakan suatu program komputer yang dapat menentukan model resistivitas 2D bawah permukaan berdasarkan data hasil observasi geolistrik. Beberapa konfigurasi yang dapat diaplikasikan pada *software* ini antara lain konfigurasi Wenner, *pole-pole*, *dipole-dipole*, *Wenner-Schlumberger*. *Software* ini menggunakan algoritma *least square* untuk proses inversinya. Algoritma *least square* terdiri dari dua algoritma yaitu, *standard smoothness-constrain least square* dan *robust constrain least square*.

Prinsip dari inversi *least square* merupakan proses regresi linier terhadap suatu variasi parameter terhadap parameter yang lain, dengan menentukan jumlah *error* kuadrat terkecil antara data yang teramati dengan model tebakan yang diberikan (Adji F, 2016). Untuk mendapatkan solusi terbaik, maka perlu ditambahkan sejumlah informasi tambahan atau yang dikenal dengan dengan “*a priori information*” yang selanjutnya digunakan untuk meng-*constrain* solusi sehingga diperoleh solusi yang dianggap paling tepat untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan (Supriyanto, 2007). Informasi awal bisa didapat dari data geologi setempat.

Fungsi obyektif yang sering digunakan dalam proses inversi data resistivitas 2D adalah:

$$E(m^{k+1}) = \| W_d (J\Delta m - d_{cal}) \|^2 + \lambda \| C m^{k+1} \|^2 \quad (2.22)$$

dengan m merupakan model resistivitas, C adalah matrik *smoothing*, d merupakan resistivitas semu perhitungan J adalah matrik Jacobian pemodelan ke depan dan k merupakan iterasi ke- k (Sungkono, 2016). Untuk meminimumkan nilai *error* maka Persamaan (2.22) harus memenuhi syarat sebagai berikut:

$$\frac{\partial E}{\partial m^{k+1}} = 0 \quad (2.23)$$

2.6.2 Inversi Self Potential

Variasi dari berbagai macam optimasi global berasal dari prinsip yang berbeda beda seperti Hukum Boltzman dalam mekanika statistik untuk mencapai energy minimum (*Simulated Annealing*), evolusi biologi (algoritma genetik dan *neural network*) dan tingkah laku dari individu atau sekelompok (*Particle Swarm Optimization*).

Pada penelitian ini, inversi yang digunakan untuk mengolah data *Self Potential* menggunakan algoritma *Very Fast Simulated Annealing* (VFSA). VFSA merupakan metode pencarian acak terarah (*guided random search*) yang

dikembangkan dari optimasi global *Simulated Annealing* (SA) (Ingber, 1993). Metode SA dalam inversi didasarkan pada analogi dalam proses termodinamika pembentukan Kristal pada suatu substansi, misalnya logam (Grandis, 2009). Proses *Annealing* (pendinginan) pada suatu logam dimulai dengan pemanasan kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan secara perlahan-lahan. Pada proses pemanasan suatu substansi berbentuk cair kemudian atom-atom dalam materi tersebut bergerak bebas dikarenakan energi dalam proses pemanasan cukup tinggi. Setelah proses pemanasan kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan secara perlahan-lahan, hal ini menyebabkan atom-atom yang semula bergerak secara bebas akhirnya menemukan tempat yang optimum dimana energi internal yang dibutuhkan atom untuk mempertahankan posisinya adalah minimum. Proses SA dimulai dengan memilih suatu solusi awal yang menunjukkan kondisi materi sebelum proses dimulai. Gerakan bebas dari atom pada materi direpresentasikan dalam bentuk modifikasi terhadap solusi awal atau solusi sementara (Sharma dan Biswas, 2013).

Perbedaan VFSA dan SA terletak pada proses pendinginan. Proses pendinginan pada VFSA lebih cepat dibandingkan dengan SA. Artinya, saat SA menghitung dan mencari semua probabilitas model secara bersamaan, VFSA hanya mencari dan menghitung model terbaik berdasarkan model yang diperoleh sebelumnya sebagai acuan (Rizal, 2007). VFSA lebih efisien jika dibandingkan dengan SA. VFSA tidak mengingat semua model dalam proses optimasi sehingga memori yang dibutuhkan kecil, sehingga waktu yang dibutuhkan relatif lebih kecil dibandingkan dengan SA. Selain itu resolusi yang dihasilkan lebih baik daripada SA.

Dalam proses inversi, fungsi obyektif (*misfit*) memiliki peranan yang penting agar proses optimasi dapat dilakukan dengan maksimal. Persamaan fungsi obyektif antara data observasi dan kalkulasi yang digunakan ialah:

$$\varphi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_i^0 - V_i^c}{|V_i^0| + \frac{(V_{max}^0 - V_{min}^0)}{2}} \right)^2 \quad (2.24)$$

Dengan N adalah jumlah data, V_i^0 dan V_i^c adalah iterasi data observasi dan data kalkulasi, V_{max}^0 dan V_{min}^0 adalah nilai maksimum dan minimum dari respon data observasi. Parameter model dan *misfit* yang telah didapatkan disimpan untuk proses pembaruan parameter (Sharma dan Biswas, 2013). Pembaruan faktor y_i berlandaskan pada distribusi probabilitas Cauchy yang dihitung menggunakan persamaan:

$$y_i = \text{sgn}(u_i - 0,5) T_i \left[\left(1 + \frac{1}{T_i} \right)^{[2u_i - 1]} - 1 \right] \quad (2.25)$$

dengan u_i merupakan nilai acak yang variasinya antara 0 sampai 1, dan T_i adalah temperatur yang digunakan. Parameter P_i diperbarui menjadi P_i^{j+1} dari nilai sebelumnya P_i^j berdasarkan persamaan:

$$P_i^{j+1} = P_i^j + y_i (P_i^{max} - P_i^{min}) \quad (2.26)$$

Persamaan (2.26) merupakan model yang baru diperoleh. Kemudian *misfit* dari model tersebut dibandingkan dengan model yang sebelumnya. Apabila *misfit* yang diperoleh lebih kecil dari *misfit* sebelumnya maka secara otomatis model tersebut diterima sebagai model baru. Sebaliknya jika *misfit* yang diperoleh lebih besar dari *misfit* sebelumnya, maka model ini memiliki kemungkinan untuk diterima sebagai model selanjutnya atau tidak, tergantung dari probabilitas dan temperatur. Probabilitas model sebesar $\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{T}\right)$, $\Delta\varphi$ menunjukkan selisih *misfit* dari kedua model (Sharma dan Biswas, 2013). Model diterima jika nilai acak yang dibangkitkan secara random lebih besar dari probabilitas tersebut, maka model dapat diterima sebagai model baru dan berlaku sebaliknya. Keberadaan probabilitas ini mengindikasikan bahwa tidak semua model dengan *misfit* besar

akan ditolak sebagai model selanjutnya. Hal ini berfungsi untuk menghindarkan algoritma terjebak pada minimum lokal.

Jika pada temperatur tertentu telah diperoleh model yang diinginkan maka selanjutnya temperatur akan diturunkan berdasarkan persamaan:

$$T_i(j) = T_{0i} \left(-c_i j^{\frac{1}{m}} \right) \quad (2.27)$$

dengan j adalah jumlah iterasi, c_i adalah konstanta yang mungkin bervariasi untuk parameter model yang berbeda, dan M adalah jumlah parameter model (Sharma dan Biswas, 2013).

2.7 Noise Assisted MEMD (NA-MEMD)

EMD atau *Empirical Mode Decomposition* merupakan suatu teknik untuk mendekomposisi sinyal melalui proses iteratif yang disebut dengan *sifting process*, menjadi komponen osilator terbatas yang dikenal dengan IMFs _{j} dan residu r (Huang *et al.*, 1998).

$$x = \sum_{j=1}^M IMF_j + r \quad (2.28)$$

EMD pada umumnya digunakan untuk mengolah data *univariate*. Kelemahan dari algoritma EMD ini terletak pada mode pencampuran ketika digunakan untuk menguraikan sinyal (Rehman and Mandic, 2010). Mode pencampuran menjelaskan bahwa salah satu IMF yang dihasilkan mungkin berisi sinyal dari mode isolasi yang berbeda atau sinyal suatu mode IMFs lain adalah residu (Hidayatullah, 2016). Oleh karena itu Rehman dan Mandic (2011) mengusulkan algoritma *Multivariate Empirical Mode Decomposition* (MEMD).

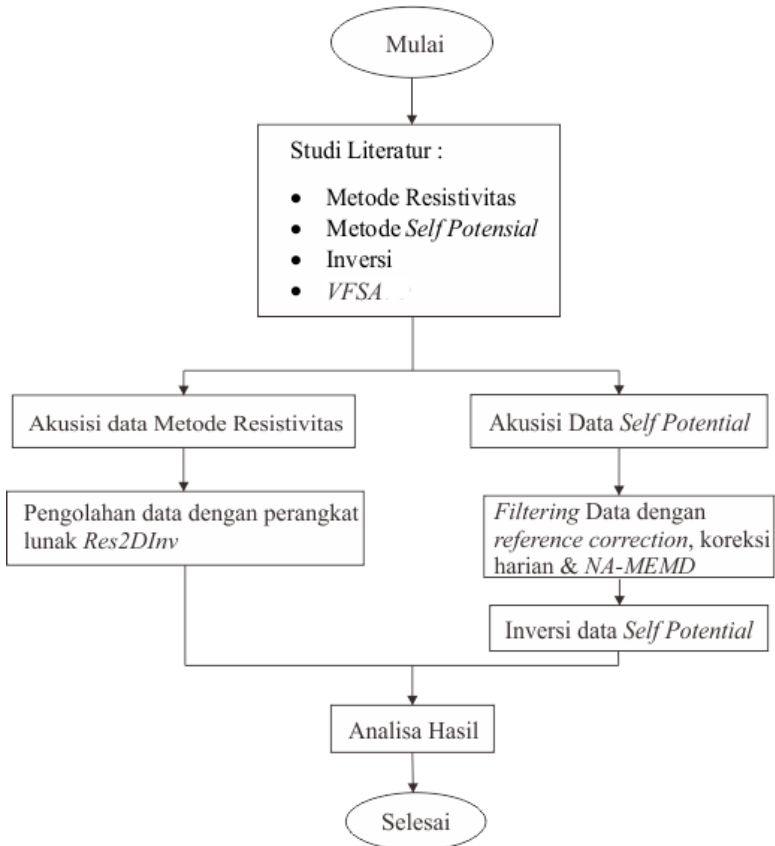
Algoritma MEMD dibuat untuk mendekomposisi sinyal *multivariate* secara simultan pada domain multidimensi (Sungkono, 2016). Namun metode ini juga memiliki kelemahan dalam pencampuran mode. Sehingga Rehman dan Mandic mengusulkan suatu algoritma baru yang dibuat untuk mengatasi permasalahan tersebut. Algoritma yang diusulkan ialah *Noise Assisted Multivariate EMD* (NA-MEMD). Algoritma ini mencoba mengeliminasi gangguan *noise* dan mengurangi

pencampuran mode dalam hasil akhir EMD dan MEMD. Metode ini memproses sinyal multivariate dan *noise* yang ditambahkan pada *channel* yang berisi WGN (*White Gaussian Noise*) secara terpisah (Rehman and Mandic, 2011). Kemudian MEMD diaplikasikan untuk membuat sinyal multivariate dan hasil IMF yang berhubungan dengan WGN diabaikan.

BAB III METODOLOGI

3.1 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi rembesan pada tanggul dengan metodologi seperti yang disusun pada diagram alir (*flow chart*) berikut:



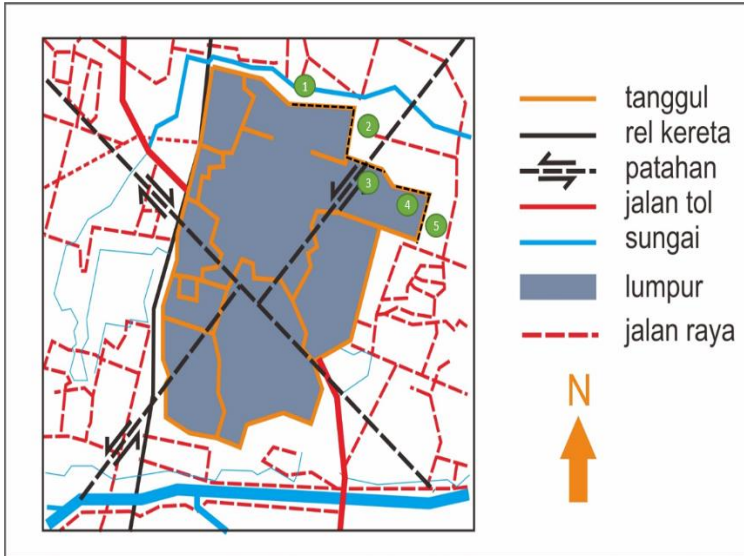
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

3.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep dasar maupun lanjut mengenai metode resistivitas, metode *Self Potential*, pemodelan ke depan dan inversi dari kedua metode. Studi literatur ini dilakukan pada beberapa *text book*, jurnal internasional yang terakreditasi, serta *thesis* dan disertasi dari universitas-universitas terkemuka.

3.3 Akuisisi Data Metode Resistivitas dan *Self Potential*

Sebelum dilakukan pengambilan data lapangan, tahap pertama yang harus dilakukan ialah perancangan lintasan pengambilan data. Lintasan yang diukur adalah lintasan pada tanggul yang rawan jebol. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua metode yaitu resistivitas konfigurasi *Wenner-Schlumberger* dan *Self Potential*. Terdapat lima lintasan yaitu di titik Ptabendo, P75A, P76-77, P78-79, P79-82 dengan jarak lintasan yang berbeda-beda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Lintasan pengukuran

3.4 Pengolahan Data Metode Resistivitas

Setelah dilakukan akuisisi data maka diperoleh nilai resistivitas semu bawah permukaan. Untuk menghasilkan nilai resistivitas bawah permukaan yang sebenarnya maka diperlukan proses inversi dengan menggunakan *software* Res2DInv. Res2DInv adalah sebuah program komputer secara otomatis menentukan model resistivitas 2-D bawah permukaan.

3.5 Filtering Data *Self Potential*

Pada metode *self potential* sebelum dilakukan proses inversi terlebih dahulu data yang diperoleh perlu di koreksi dengan menggunakan *reference correction* dan koreksi harian pada *base station*. Setelah dilakukan koreksi data *self potential*, selanjutnya dilakukan proses filtrasi dengan menggunakan metode *Noise Assessted-Multivariate Empirical Mode Decomposition* (NA-MEMD). Filtrasi ini bertujuan untuk memisahkan data asli pengukuran dengan *noise* dan residu yang timbul selama proses pengambilan data. Proses filtrasi ini menggunakan aplikasi Matlab2010a dengan algoritma yang diusulkan oleh Rehman dan Mandic (2011).

3.6 Inversi data *Self Potential*

Inversi data *Self Potential* dilakukan dengan menggunakan algoritma VFSA. Tahap awal dalam tahap ini ialah penentuan parameter awal agar diperoleh *fitting curve* antara data lapangan dan data teoritik. Pemodelan yang digunakan untuk menentukan rembesan fluida pada tanggul ialah model *inclined sheet* dengan parameter k adalah momen dipol arus listrik di permukaan, x_1, z_1 dan x_2, z_2 merupakan koordinat batas atas dan bawah dari model *inclined sheet*. Hasil dari proses inversi ini adalah perkiraan parameter terbaik dari anomali yang diperoleh saat pengukuran. Sehingga rembesan pada Tanggul LUSI dapat diprediksi dengan akurat.

3.7 Analisa Hasil

Setelah dilakukannya observasi dan pengolahan data lapangan, pada tahap ini dilakukan analisis hasil yang diperoleh dari kedua metode tersebut. Pada metode *Self Potential* dilakukan *plotting* nilai beda potensial dan jarak pada setiap titik. Sedangkan metode resistivitas dilakukan *plotting* nilai resistivitas dan kedalaman pada setiap titik. Hasil *plotting* tersebut menggambarkan kondisi bawah permukaan. Analisa ini dilakukan untuk menjawab permasalahan pada penelitian ini. Kemudian dapat disimpulkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan dan memberikan rekomendasi yang dapat dilakukan untuk memperbaiki penelitian yang telah dilakukan atau penerapan hasil penelitian ini untuk diaplikasikan pada bidang geoteknik dan geofisika dekat permukaan (*near surface geophysics*). Seluruh hasil penelitian ini dianalisa dan ditulis dalam bentuk draf tugas akhir.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data Metode Resistivitas

4.1.1 Akuisisi Data Lapangan

Pengukuran data resistivitas 2D dilakukan dengan menggunakan konfigurasi Wenner—Schlumberger di tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI). Terdapat lima lintasan pengukuran di tanggul LUSI yang dipilih karena sering terjadi amblesan di tanggul tersebut. Lintasan yang dipilih ini antara lain titik Ptabendo, P75A, P76—77, P78—79, P79—82 dengan panjang lintasan masing masing sebesar 825m, 405m, 297m, 405m dan 324m. Besarnya spasi ditentukan berdasarkan panjang lintasan dan jumlah elektroda. Spasi yang digunakan pada setiap lintasan lintasan berturut—turut adalah 15m, 15m, 11m, 15m dan 12m.

Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan perangkat lunak Res2DInv untuk mendapatkan tampilan 2 dimensi penampang resistivitas lapisan tanah bawah permukaan. Hasil tampilan dari perangkat lunak Res2DInv terdiri dari tiga bagian. Bagian pertama menunjukkan kontur resistivitas semu pengukuran (*measured apparent resistivity*) yang diperoleh dari data akuisisi data lapangan. Bagian kedua menunjukkan kontur resistivitas semu dari hasil perhitungan (*calculated apparent resistivity*). Untuk bagian ketiga menunjukkan kontur resistivitas sebenarnya yang diperoleh melalui proses inversi (*inverse model resistivity section*) (Telford *et al*, 1976).

Dari ketiga tampilan hasil dari Res2DInv tersebut, analisa data dilakukan pada bagian ketiga yaitu *inverse model resistivity section* untuk melihat zona rembesan pada tanggul lumpur LUSI. Daerah yang memiliki nilai resistivitas rendah di dekat permukaan diduga sebagai daerah rembesan fluida sedangkan resistivitas rendah untuk di bawah lapisan tanggul diduga sebagai lapisan tanah setempat.

4.1.2 Hasil Analisa Data Pengukuran Lapangan

Pada lintasan pertama yaitu titik Ptabendo panjang lintasan sebesar 825m dengan spasi 15m. Hasil dari pengolahan data menggunakan Res2Dinv menunjukkan variasi nilai resistivitas pada titik Ptabendo berkisar antara 0.164–5.25 Ω m. Pada saat pengukuran genangan lumpur juga sangat dekat dengan permukaan tanggul seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1



Gambar 4.1 Kondisi tanggul pada lintasan pertama Ptabendo

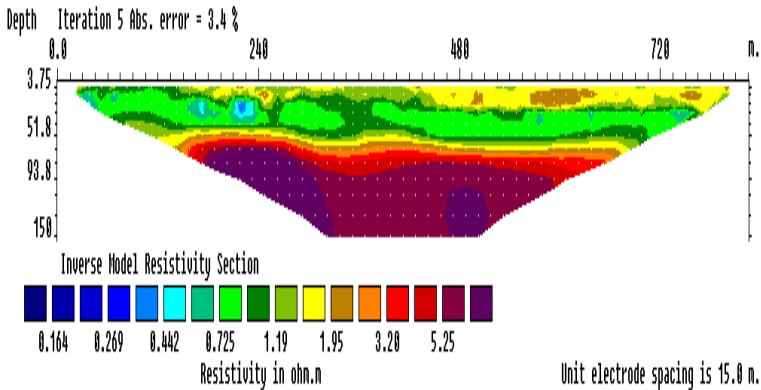
Setelah diperoleh data pengukuran, data diolah dengan menggunakan perangkat lunak Res2DInv untuk mendapatkan tampilan dua dimensi penampang resistivitas dari struktur lapisan tanah bawah permukaan. Terdapat dua teknik inversi yang terdapat dalam Res2DInv yaitu *robust constrain inversion* (L1-norm) dan *smoothness constrain inversion* (L2-norm).

Dalam penelitian tugas akhir ini pengolahan data resistivitas menggunakan perangkat lunak Res2DInv dilakukan dengan

teknik *robust constrain inversion* (L1-norm). Teknik inversi L1-norm mampu mereduksi data *outlier* dengan baik jika dibandingkan dengan L2-norm. Teknik L1-norm juga mampu mereduksi perbedaan antara pengukuran dan perhitungan nilai resistivitas (Loke, 2002). Teknik *robust constrain inversion* mampu menunjukkan dengan sangat baik hasil resolusi batas antar lapisan. Ini menjelaskan jika terdapat perbedaan yang jelas pada resistivitas lapisan di bawah permukaan, teknik *robust constrain inversion* memberikan resolusi batas antar lapisan yang tidak dipengaruhi oleh tipe konfigurasi yang digunakan saat pengambilan data (Adiat *et al*, 2013).

Hasil dari pengolahan data menggunakan perangkat lunak Res2DInv dengan teknik L1-norm pada lintasan pertama menunjukkan batas antar lapisan yang cukup jelas pada tanggul (Gambar 4.2). Tanggul pada umumnya memiliki ketinggian berkisar antara 1–15m (material tanggul) dari atas permukaan. Tanggul umumnya memiliki resistivitas yang lebih tinggi dari pada nilai resistivitas tanah dibawahnya, hal ini sebagai akibat dari pemampatan dan karakteristik instrinsik dari material penyusun tanggul (Sungkono *et al*, 2014).

Pada Gambar 4.2 terlihat adanya rembesan pada tanggul akibat saturasi fluida ditandai dengan nilai resistivitas yang rendah jika dibandingkan dengan nilai resistivitas daerah sekitarnya. Terdapat beberapa anomali yang ditunjukkan oleh Gambar 4.2 yang diduga sebagai efek dari rembesan fluida lumpur, sebagaimana pada jarak $\pm 248\text{m}$. Selanjutnya, untuk mendapatkan interpretasi yang lebih akurat dalam mengidentifikasi posisi rembesan fluida perlu dibandingkan dengan hasil inversi data *Self Potential* yang akan dijelaskan pada sub bab berikutnya.



Gambar 4.2 Resistivitas 2D hasil inversi data resistivitas yang terukur pada lintasan 1

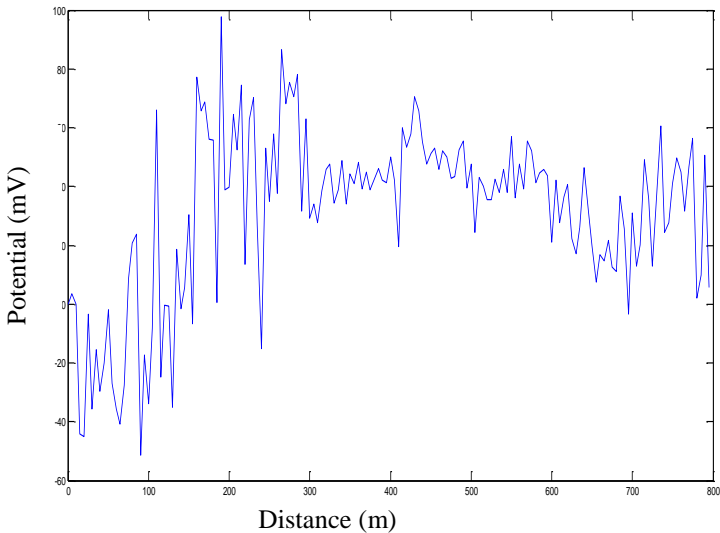
4.2 Analisa Data Metode *Self Potential*

Data self-potential (SP) yang terukur dikoreksi dan difilter yang selanjutnya diproses inversi dengan pendekatan global *Very Fast Simulated Annealing* (VFSA).

4.2.1 Akuisisi Data Lapangan

Akuisisi data lapangan pada tanggul LUSI dengan menggunakan metode *Self Potential* dilakukan pada lima lintasan titik pengukuran yang sama dengan metode resistivitas, yaitu pada titik Ptabendo, P75A, P76–77, P78–79, P79–82. Panjang lintasan untuk masing–masing lintasan berturut–turut adalah 795m, 400m, 300m, 415m dan 340m. Jarak yang ditentukan berdasarkan pada panjang maksimal tanggul yang memungkinkan untuk pengambilan data. Metode pengukuran yang digunakan ialah *Fix Base Station* yaitu salah satu *porouspot* tetap dan satu *porouspot* yang lain bergerak sesuai spasi yang telah ditentukan yaitu sebesar 5 m. Selain itu dipilih suatu titik diluar lintasan pengukuran yang ditetapkan sebagai *base station* dimana setiap 10 menit dilakukan penagambilan data di *base station*. Pengambilan data pada *base station* dilakukan sebagai acuan nilai beda potensial pada tanggul.

Data yang diperoleh berupa nilai potensial yang terukur pada tiap titik pengukuran. Potensial hasil pengukuran di lapangan ditampilkan dengan cara plot antara beda potensial yang terukur (mV) dengan jarak atau titik pengambilan data pada tiap lintasan pengukuran dengan menggunakan Matlab2010, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3



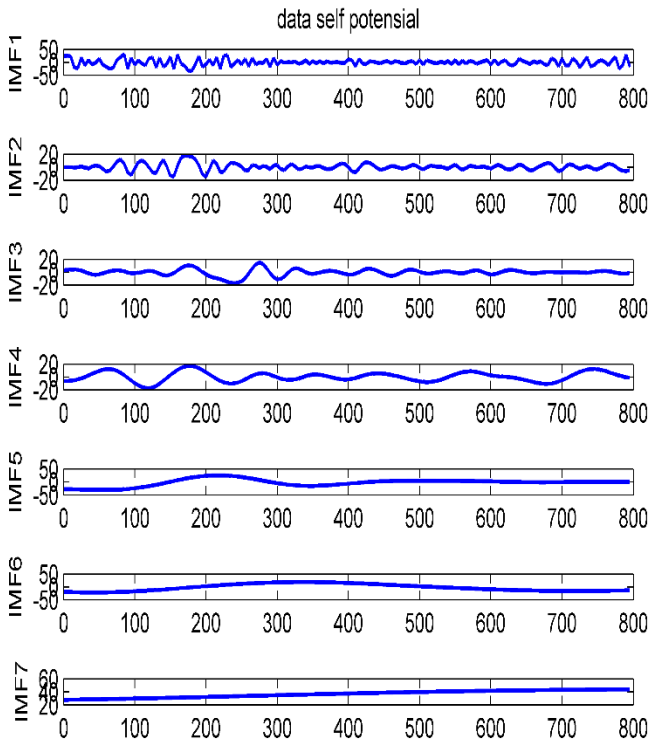
Gambar 4.3 Data pengukuran *Self Potential* pada lintasan 1

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa data hasil pengukuran terganggu oleh *noise* ketika pengambilan data. Beda potensial yang diperoleh di lapangan belum menunjukkan potensial yang sebenarnya, karena ada perbedaan apabila pengukuran dilakukan di tempat yang sama dengan waktu yang berbeda. Suhu juga mempengaruhi nilai beda potensial hasil pengukuran yang menyebabkan proses saturasi air berubah-ubah seiring dengan penguapan yang terjadi di lintasan pengukuran (Hidayatullah, 2015). Data hasil pengukuran di lapangan sulit untuk diinterpretasikan secara langsung sebab datanya terkontaminasi *noise* sehingga perlu dikoreksi dan *difilter*. Koreksi yang

digunakan ialah *reference correction* dan koreksi harian. Setelah dikoreksi kemudian data tersebut *difilter* dengan menggunakan algoritma *Noise Assessted–Multivariate Empirical Mode Decomposition* (NA–MEMD).

4.2.2 Filtering Data Menggunakan Reference Correction, Koreksi Harian dan NA–MEMD

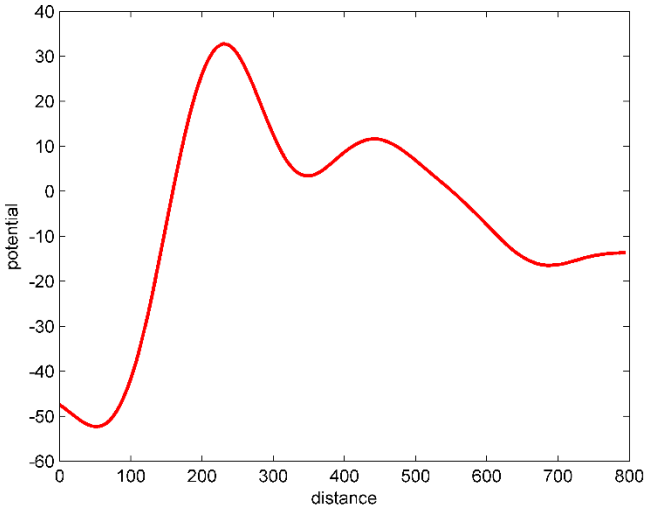
Untuk mendapatkan nilai beda potensial yang sebenarnya data yang diperoleh harus dikoreksi dan difilter. Setelah dilakukan kedua koreksi tersebut pada data hasil pengukuran *Self Potential*, dilakukan proses pemfilteran dengan menggunakan algoritma *Noise Assessted–Multivariate Empirical Mode Decomposition* (NA–MEMD). Pemfilteran ini digunakan untuk mereduksi noise data SP. Pemfilteran ini dilakukan dengan cara: 1) mendekomposisi data SP menggunakan algoritma NA-MEMD dengan hasil sebagaimana Gambar 4.4; 2) menjumlahkan sejumlah IMF yang merepresentasikan data SP dan mengabaikan IMF yang merepresentasikan noise. IMF rendah memiliki bilangan gelombang yang besar, yang sering merepresentasikan geologi dekat permukaan ataupun *noise* lingkungan. Sedangkan IMF tinggi merepresentasikan *trend* data dan umumnya mencerminkan *noise* frekuensi rendah (*drift*) atau bawah permukaan yang dangkal.



Gambar 4.4 Hasil dekomposisi data *Self Potential* pada lintasan 1 Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) menggunakan metode NA-MEMD.

Gambar 4.4 merupakan hasil dekomposisi data *Self Potential* (Gambar 4.3) yang terbagi menjadi tujuh IMF. IMF terakhir merupakan nilai residu dari data pengukuran yang diabaikan dalam seleksi IMF. Gambar 4.4 IMF1, IMF2, IMF3 dan IMF4 mengandung “keacakan” data yang tinggi, sehingga IMF tersebut harus dieliminasi. Oleh karena itu hanya IMF5 dan

IMF6 yang dijumlahkan untuk mendapatkan data pengukuran *Self Potential* yang tidak mengandung *noise* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5



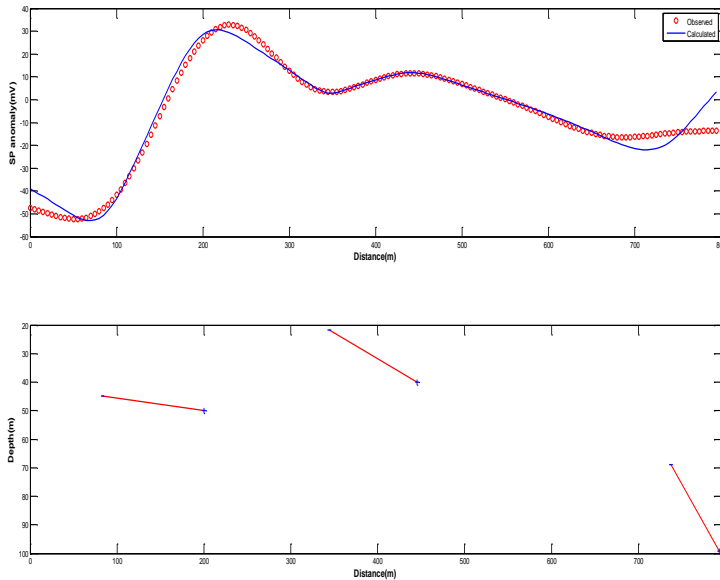
Gambar 4.5 Hasil penjumlahan IMF data *Self Potential* pada lintasan 1 Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) menggunakan metode NA-MEMD.

4.2.3 Hasil Inversi *Self Potential* dengan Algoritma *Very Fast Simulated Annealing* (VFSA)

Tahap awal dalam proses inversi data *Self Potential* ialah penentuan model dan parameter model agar diperoleh kecocokan antara data lapangan dan data teoritik. Dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi adanya rembesan pada tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI), model sumber anomali yang digunakan ialah *inclined sheet* (retakan atau patahan). Rembesan fluida pada tanggul dapat melalui pori-pori batuan maupun melalui retakan pada tanggul akibat dari deformasi tanggul yang melebihi batas plastisnya (Sungkono *et al.*, 2014). Bentuk retakan

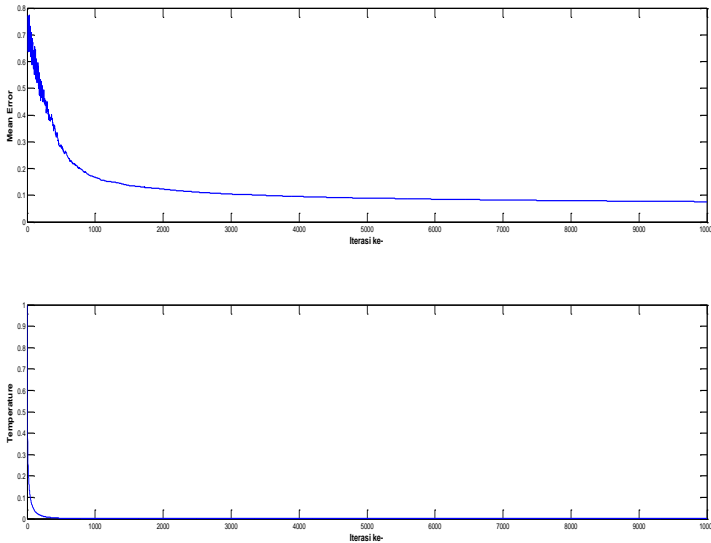
atau rekahan tersebut menjadi dasar pemilihan bentuk sumber anomali yang berupa *inclined sheet*.

Berdasarkan Persamaan (2.20) yang dipaparkan oleh Sharma dan Biswas (2013) maka parameter dari model anomali *inclined sheet* antara lain adalah k , x_1 , x_2 , z_1 dan z_2 . Dengan k merupakan momen dipol arus listrik pada permukaan dan parameter yang lain merupakan koordinat batas atas dan bawah dari model anomali *inclined sheet*. Batas pencarian k ditentukan berdasarkan amplitudo beda potensial yang terukur, x_1 dan x_2 ditentukan berdasarkan panjang lintasan pengukuran dan jumlah anomali yang dihasilkan saat proses *filtering* NA-MEMD, z_1 dan z_2 ditentukan berdasarkan kedalaman maksimal yang mampu diukur oleh metode *Self Potential* (Hidayatullah, 2015). Parameter-parameter tersebut harus ditebak nilainya agar kurva yang dihasilkan cocok, sehingga model atau solusi sesuai dengan data yang diperoleh dari hasil pengukuran. Penebakan parameter dikenal dengan istilah *trial and error*. Proses *trial and error* parameter tersebut digunakan saat proses inversi data *Self Potential* dengan menggunakan algoritma VFSA.



Gambar 4.6 (a)Fitting kurva data observasi dengan data perhitungan;(b)Citra rekahan yang terdeteksi melalui proses inversi data *Self Potential* pada lintasan 1 Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI).

Hasil kecocokkan kurva data observasi dengan data perhitungan *Self Potential* melalui proses inversi menggunakan algoritma VFSA yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 (a) menunjukkan hasil yang cukup baik meskipun terdapat beberapa data “*outlier*”. Namun hasil inversi tersebut sudah dapat diterima dan dianggap mampu menginterpretasikan keadaan bawah permukaan. Selain itu inversi data *Self Potential* dengan algoritma VFSA menghasilkan informasi tentang anomali yang didapatkan seperti kedalaman dan jarak seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 (b).



Gambar 4.7 Rata-rata *error* untuk setiap iterasi pada lintasan 1.

Karakteristik VFSA yang ditunjukkan oleh Gambar 4.7 yaitu saat suhu tinggi maka pergerakan partikel acak dan tidak beraturan sehingga probabilitas nilai optimum yang diterima sangatlah besar, ketika suhu menurun maka pergerakan partikel perlahan-lahan mulai stabil dan menuju posisi yang konvergen pada iterasi ke 10000.

4.3 Hasil Interpretasi Data Resistivitas dan *Self Potential* pada Setiap Lintasan Pengukuran

Metode untuk menentukan zona rembesan sangat penting untuk menilai stabilitas tanggul. Anomali rembesan merupakan ancaman terhadap kekokohan tanggul. Metode geofisika mempunyai peranan penting dalam pemetaan zona rembesan dan *monitoring* tanggul. Pengukuran Metode *Self Potential* dan Resistivitas merupakan teknik untuk *monitoring* yang mempunyai keuntungan tidak merusak lingkungan sekitar. Hal ini merupakan aspek yang penting ketika meneliti suatu tanggul. Penerapan

metode *Self Potential* untuk penyelidikan rembesan pada tanggul didasarkan pada pengukuran potensial listrik yang disebabkan oleh air yang bergerak dalam medium berpori (Ogilvy and Bogoslovsky, 1969). Pengamatan dan pemodelan kuantitatif dari *Self Potential* menunjukkan anomali negatif ketika rembesan masuk ke tanggul dan positif ketika aliran fluida naik ke permukaan (Ogilvy *et al*, 1969; Corwin, 1988). Patahan dan zona lemah pada data resistivitas biasanya ditandai dengan anomali resistivitas rendah (Panthulu, 2001). Hasil dari pengolahan data menggunakan metode resistivitas dan *Self Potential* pada lima lintasan pengukuran dianalisa untuk mendapatkan hasil interpretasi yang akurat mengenai zona rembesan pada tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI).

4.3.1 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 1 (Ptabendo)

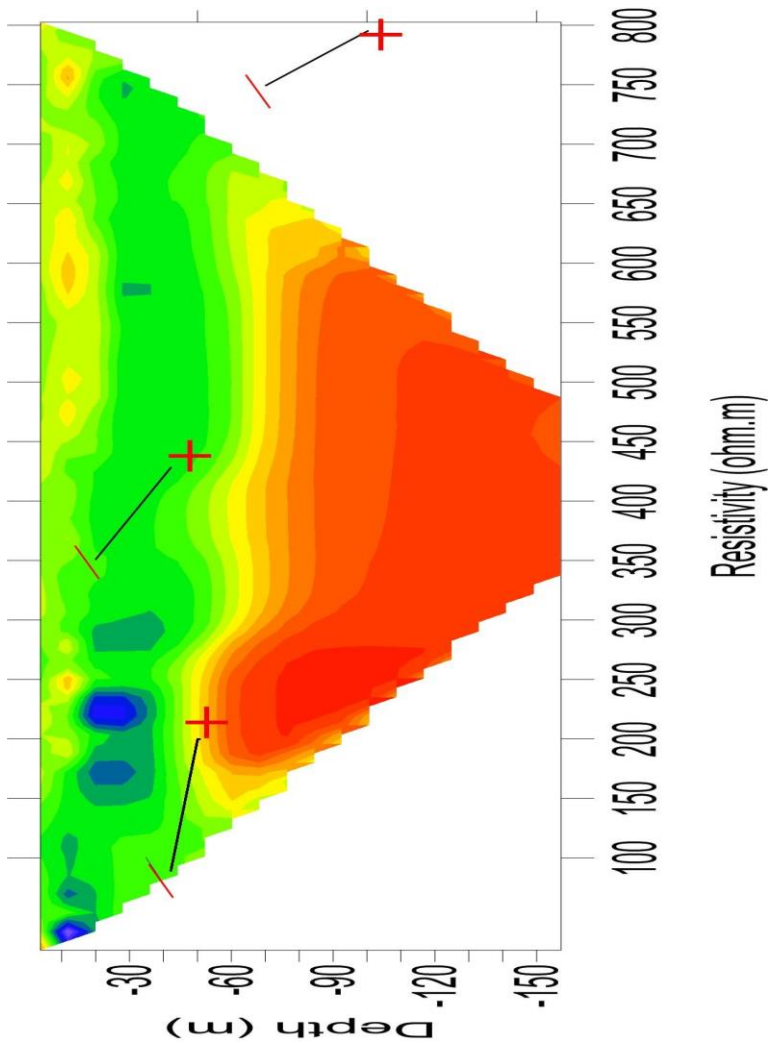
Lintasan 1 (Ptabendo) terletak di tanggul bagian utara. Tanggul bagian utara sering menjadi pusat penelitian karena tanggul bagian utara sering jebol (*collapse*). Hasil pengolahan data pada lintasan 1 dengan menggunakan metode resistivitas dan *Self Potential* (Gambar 4.9) menunjukkan bagian tanggul yang mulai tersaturasi fluida akibat adanya retakan pada tanggul.

Pada saat pengukuran kondisi tanggul pada lintasan 1 (Gambar 4.1) berisi fluida lumpur yang sangat dekat dengan permukaan tanggul namun di beberapa titik terdapat bagaian tanggul yang kering (Gambar 4.8)



Gambar 4.8 Bagian tanggul pada lintasan 1 yang kering

Setelah dilakukan pengolahan data metode resistivitas dan *Self Potential* pada lintasan 1 terlihat beberapa anomali yang dihasilkan dari kedua metode tersebut. Melalui proses inversi data *Self Potensial* dihasilkan tiga tren yang menunjukkan kemungkinan adanya retakan tanggul pada lintasan 1. Tren yang muncul yaitu pada jarak sekitar 90–200m, 350–430m, dan 750–795m dengan kedalaman masing masing berkisar antara 42–50m, 20–42m dan 70–100m. Sedangkan letak anomali resistivitas rendah yang terdeteksi dengan menggunakan metode resistivitas terdapat pada jarak sekitar 20–90m, 90–200m dan 350–410m dengan kedalaman ketiganya berkisar antara 5–45m.



Gambar 4.9 Hasil pengolahan data resistivitas dan *Self Potential* pada lintasan 1

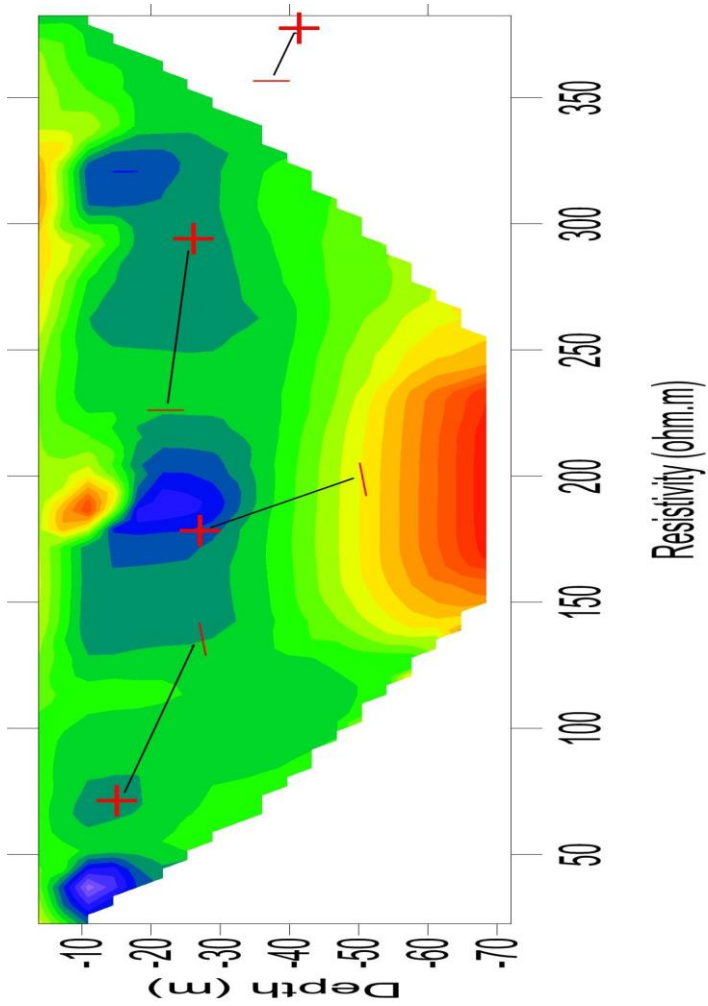
4.3.2 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 2 (P75A)

Lintasan 2 merupakan tanggul di bagian utara (P75A). Pada saat pengambilan data tanggul P75A sedang mengalami perbaikan karena tanggul tersebut mulai melemah sehingga dikhawatirkan akan mengalami *collapse*.



Gambar 4.10 Kondisi tanggul pada saat pengambil data lintasan 2

Melalui proses inversi data *Self Potential* dihasilkan empat tren yang diduga sebagai retakan tanggul pada lintasan 2. Tren yang muncul yaitu pada jarak sekitar 75–135m, 180–200m, 230–290m, 360–390m dengan kedalaman masing–masing sekitar 15–25m, 27–48m, 21–24m, 36–40m. Sedangkan letak anomali resistivitas rendah yang terdeteksi dengan menggunakan metode resistivitas terdapat pada jarak sekitar 30–45m, 75–135m, 180–200m, 230–290m, 370–380m dengan kedalaman masing–masing sekitar 5–25m, 10–25m, 25–45m, 20–25m, 5–25m.



Gambar 4.11 Hasil pengolahan data resistivitas dan *Self Potential* pada lintasan 2

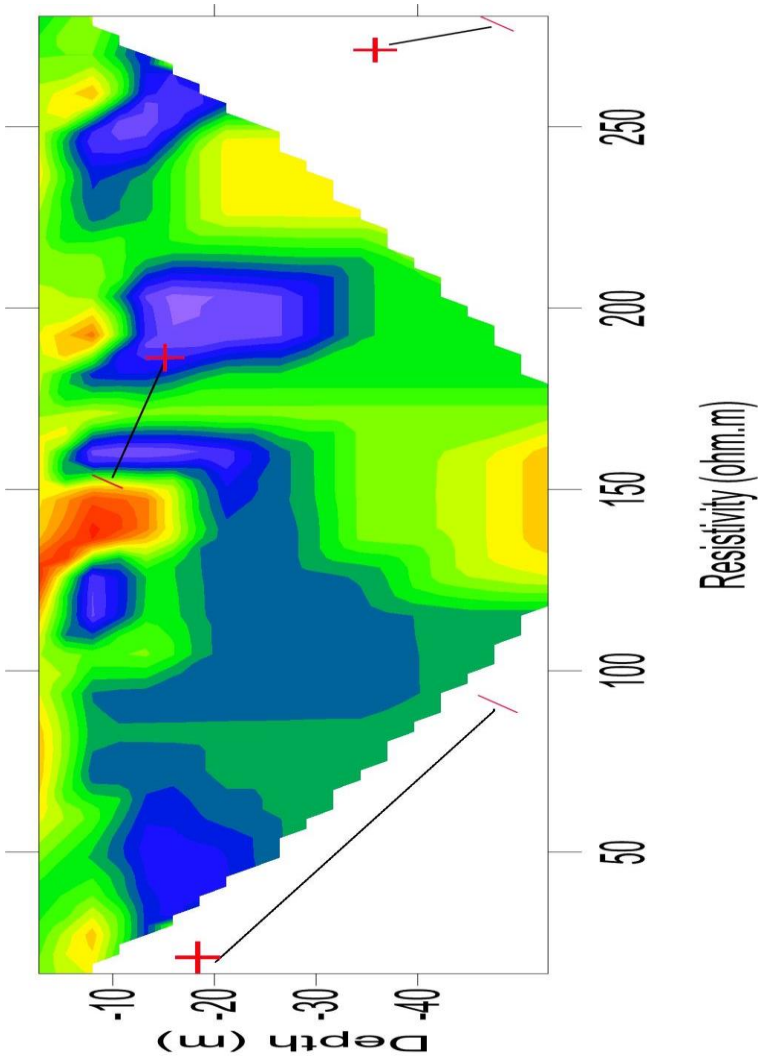
4.3.3 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 3 (P76-77)

Lintasan 3 merupakan tanggul dengan koordinat (P76-77). Pada saat pengambilan data kondisi tanggul cukup kering jika dibandingkan dengan tanggul yang lain, hanya sebageian titik yang sedikit terisi fluida seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12. Tanggul ini didominasi oleh tanah biasa dan batu sehingga fluida dapat menerobos masuk ke dalam pori-pori tanggul.



Gambar 4.12 Kondisi tanggul pada saat pengambil data lintasan 3

Hasil pengolahan data pada lintasan 3 dengan menggunakan metode resistivitas dan *Self Potential* (Gambar 4.13) terlihat beberapa anomali yang diduga sebagai bagian tanggul yang tersaturasi fluida. Melalui proses inversi data *Self Potential* dihasilkan tiga tren yang diduga sebagai retakan tanggul pada lintasan 3. Tren yang muncul yaitu pada jarak sekitar 20-90m, 153-185m, 275-280m dengan kedalaman masing-masing sekitar 20-48m, 10-15m, 37-47m.



Gambar 4.13 Hasil pengolahan data resistivitas dan *Self Potential* pada lintasan 3

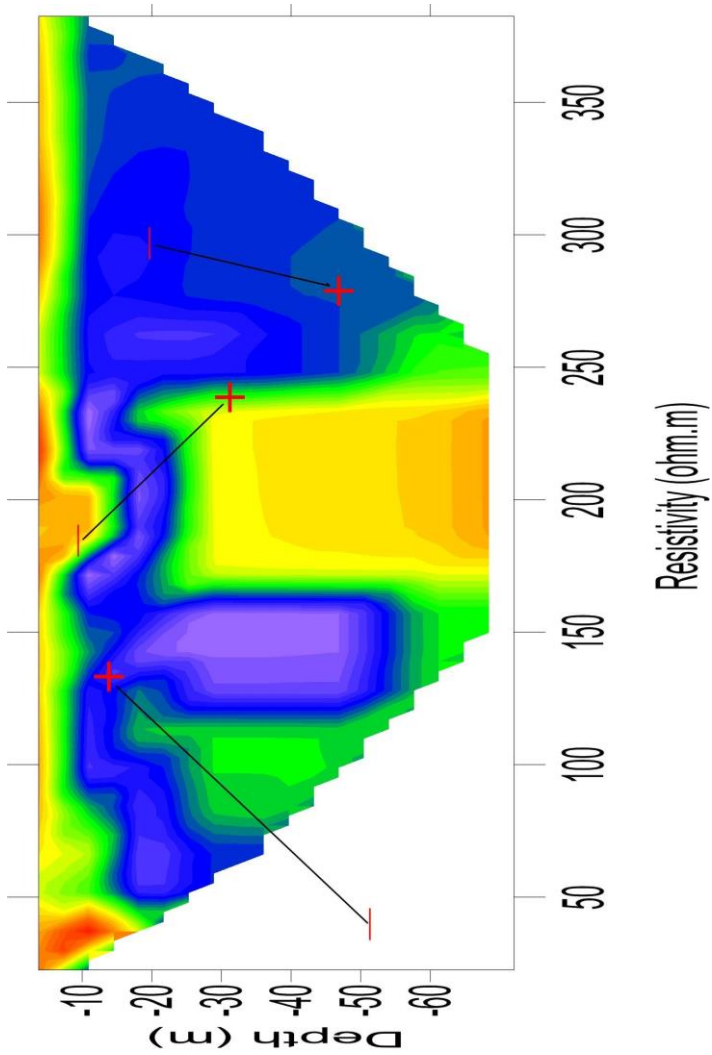
Sedangkan letak anomali resistivitas rendah yang terdeteksi dengan menggunakan metode resistivitas terdapat pada jarak sekitar 30–45m, 45–65m, 155–165m, 175–210m, 270–280m dengan kedalaman masing–masing sekitar 3–20m, 10–25m, 10–20m, 15–25m, 5–10m.

4.3.4 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 4 (P78-79)

Lintasan 4 merupakan tanggul dengan koordinat (P78–79). Tanggul ini juga di dominasi oleh batuan kerikil dan pasir, sama seperti tanggul pada lintasan 3. Pada saat pengambilan data, tanggul ini terisi oleh fluida berbeda dengan lintasan 3 yang cukup kering.



Gambar 4.14 Kondisi tanggul pada saat pengambil data lintasan 4



Gambar 4.15 Hasil pengolahan data resistivitas dan *Self Potential* pada lintasan 4

Hasil pengolahan data pada lintasan 4 dengan menggunakan metode resistivitas dan *Self Potential* (Gambar 4.15) terlihat beberapa anomali yang diduga sebagai bagian tanggul yang tersaturasi fluida. Melalui proses inversi data *Self Potential* dihasilkan tiga tren yang diduga sebagai retakan tanggul pada lintasan 4. Tren yang muncul yaitu pada jarak sekitar 40–130m, 185–235m, 280–295m dengan kedalaman masing–masing sekitar 15–50m, 10–30m, 20–45m. Sedangkan letak anomali resistivitas rendah yang terdeteksi dengan menggunakan metode resistivitas terdapat pada jarak sekitar 95–130, 155–175m, 210–225m dengan kedalaman ketiganya sekitar 5–20m, 10–25m, 10–20m, 15–25m, 5–10m.

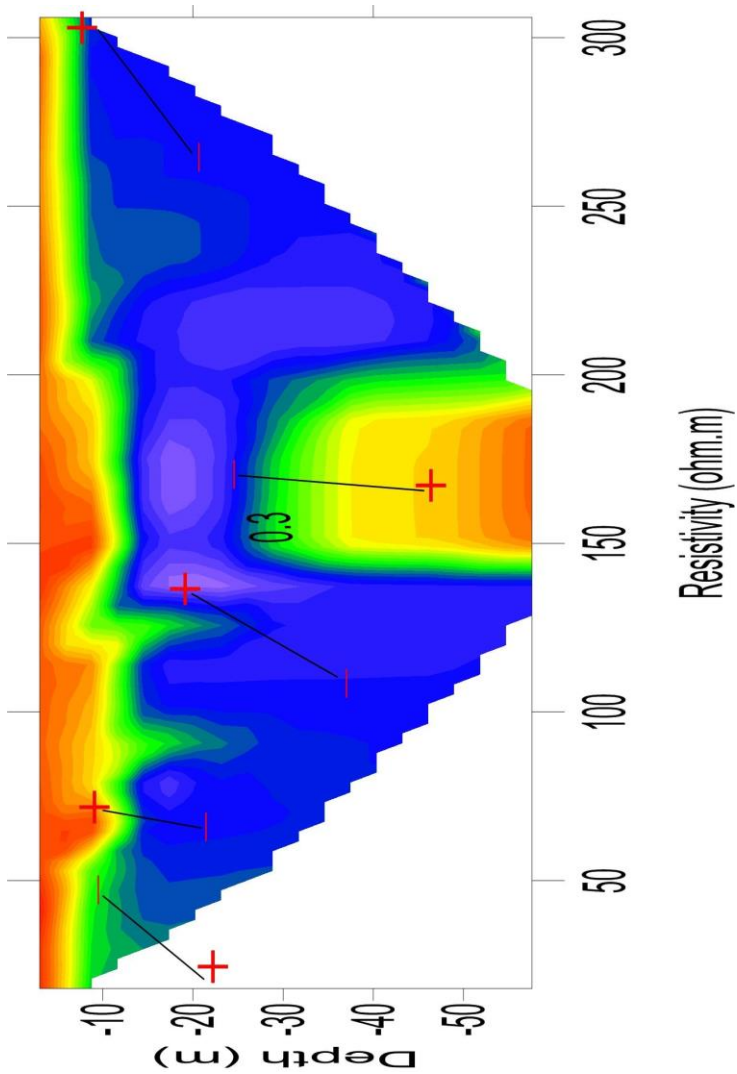
4.3.5 Analisa dan Interpretasi Data Pada Lintasan 5 (P79-82)

Lintasan 5 merupakan tanggul dengan koordinat (P79–82). Tanggul P79–82 merupakan tanggul dengan elevasi rendah dan mengalami penurunan tanah terbesar (Husein *et al*, 2015). Tanggul ini terletak pada sisi paling timur dimana terjadi banyak tekanan dari luapan lumpur dan memungkinkan terjadinya penurunan kualitas tanggul (runtuh) yang disebabkan oleh rembesan air (Sungkono *et al*, 2015) maupun penurunan muka tanggul. Tanggul ini juga di dominasi oleh batuan kerikil dan pasir. Pada saat pengambilan data, tanggul ini terisi oleh fluida paling banyak jika dibandingkan dengan tanggul lain.



Gambar 4.16 Kondisi tanggul pada saat pengambil data lintasan 5

Hasil pengolahan data pada lintasan 5 dengan menggunakan metode resistivitas dan *Self Potential* (Gambar 4.13) terlihat dihasilkan beberapa anomali yang diduga sebagai bagian tanggul yang tersaturasi fluida. Melalui proses inversi data *Self Potential* dihasilkan lima tren yang diduga sebagai retakan tanggul pada lintasan 5. Tren yang muncul yaitu pada jarak sekitar 20–45m, 65–70m, 110–135m, 165–170m, 265–315m dengan kedalaman masing–masing sekitar 11–20m, 11–20m, 20–35m, 25–45m, 10–20m. Sedangkan letak anomali resistivitas rendah yang terdeteksi dengan menggunakan metode resistivitas terdapat pada jarak sekitar 20–50m, 115–135m, 165–170m, 260–300m, dengan kedalaman masing-masing sekitar 10–20m, 10–20m, 15–20m, 10–20m.



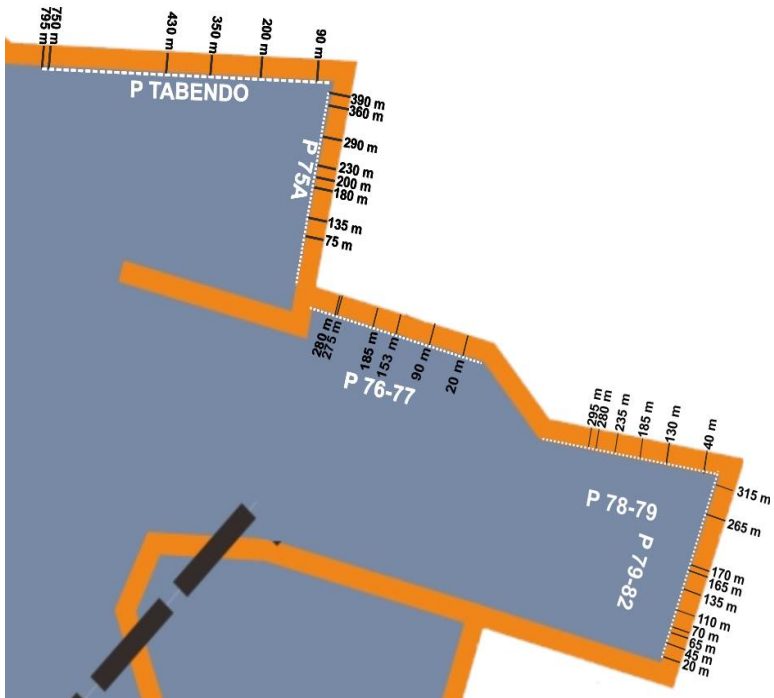
Gambar 4. 17 Hasil pengolahan data resistivitas dan *Self Potential* pada lintasan 5

4.4 Hasil Interpretasi Zona Rembesan Pada Tanggul LUSI

Berdasarkan hasil interpretasi pada masing-masing lintasan pengukuran yang telah dilakukan maka dapat dibuat kemungkinan zona rembesan pada tanggul seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18. Daerah LUSI didominasi oleh sedimen alluvial tebal yang dulunya merupakan delta dan batuan sedimen setempat terdiri dari lempung lanauan, pasir lanauan, lempung dan batuan pasir (Arung Laby *et al*, 2016). Daerah ini juga dilalui oleh patahan Watu Kosek dan patahan Siring yang merupakan salah satu pemicu terjadinya deformasi muka tanah selain erupsi lumpur (Sungkono *et al*, 2014). Turunnya muka tanggul ini menyebabkan kekuatan tanggul melemah sehingga berpotensi runtuh (*collapse*). Keruntuhan tanggul LUSI paling sering disebabkan oleh rembesan air (Sungkono *et al*, 2014). Rembesan air pada tanggul LUSI dapat melalui dua cara yaitu melalui pori-pori dan retakan badan tanggul (Sungkono, 2016).

Hasil dari pengolahan data menggunakan metode *Self Potential* dan resistivitas menunjukkan terkadang anomali yang terdeteksi pada metode *Self Potential* tidak terdeteksi pada metode resistivitas, begitu pula sebaliknya. Anomali yang terdeteksi pada metode *Self Potential* namun tidak terdeteksi pada metode resistivitas kemungkinan disebabkan oleh faktor spasi pengukuran yang digunakan. Dalam pengambilan data metode *Self Potential* spasi pengukuran yang digunakan ialah 5m sedangkan pada metode resistivitas spasi pengukuran bervariasi mulai 11–15m tergantung pada panjang lintasan dan banyaknya elektroda. Sebaliknya terdapat anomali yang terdeteksi pada metode resistivitas namun tidak terdeteksi pada metode *Self Potential* hal ini kemungkinan disebabkan oleh proses pemodelan anomali *Self Potential*. Pada penelitian ini digunakan pemodelan berupa *inclined sheet* yang menggambarkan kemungkinan adanya retakan yang mengakibatkan rembesan pada tanggul, padahal rembesan tidak hanya disebabkan oleh retakan saja. Salah satu penyebab lain yang mengakibatkan rembesan pada tanggul ialah masuknya fluida pada pori-pori tanggul. Pada pemodelan *inclined*

sheet, rembesan akibat masuknya fluida pada pori-pori tanggul tidak dapat terdeteksi. Rembesan pada tanggul dapat terdeteksi dengan menggunakan pemodelan berupa bola.



Gambar 4.18 Zona rembesan pada tanggul LUSI

“ halaman ini sengaja dikosongkan ”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dengan judul “Integrasi Metode *Self Potential* dan Resistivitas Untuk Identifikasi Rembesan Air Pada Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI)” maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil interpretasi data *Self Potential* dan resistivitas didapatkan kemungkinan lokasi retakan yang dapat menyebabkan rembesan pada tanggul LUSI yaitu:
 - a. Tanggul Ptabendo
Jarak = 20-90, 90-200, 350-430, 750-795 meter
Kedalaman = 5-45, 5-50, 5-45, 70-100 meter
 - b. Tanggul P75A
Jarak = 30-45, 75-135, 180-200, 230-290, 360-390 meter
Kedalaman = 5-25, 10-25, 25-48, 20-25, 5-40 meter
 - c. Tanggul P76-77
Jarak = 20-90, 153-185, 185-210, 270-280 meter
Kedalaman = 3-48, 10-25, 15-25, 5-47 meter
 - d. Tanggul P78-79
Jarak = 40-130, 155-175, 185-235, 280-295 meter
Kedalaman = 5-50, 10-25, 10-30, 20-45 meter
 - e. Tanggul P79-82
Jarak = 20-50, 65-70, 110-135, 165-170, 260-315 meter
Kedalaman = 10-20, 11-20, 10-35, 15-45, 10-20 meter

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dengan judul “Integrasi Metode *Self Potential* dan Resistivitas Untuk Identifikasi Rembesan Air Pada Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI)” maka saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Untuk penelitian selanjutnya perlu menggunakan spasi yang sama, sehingga dapat dilakukan perbandingan untuk hasil yang lebih akurat.
2. Pemodelan anomali *Self Potential* untuk identifikasi rembesan menggunakan dua model yaitu *inclined sheet* dan bola.
3. Perlu dilakukan *joint inversion*, sehingga interpretasi hasil menjadi lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

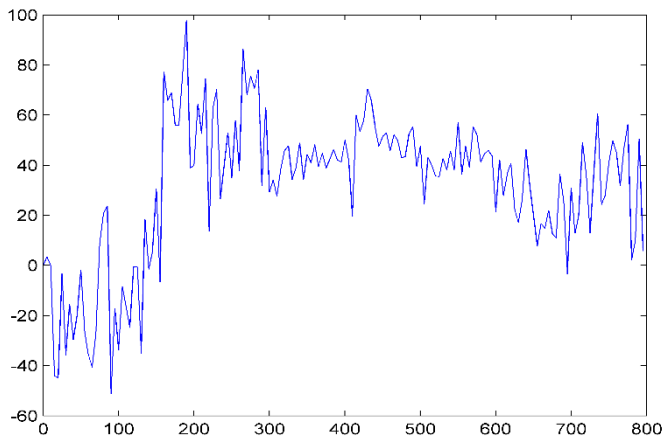
- Adiat, K. A., Nordin, N. M., 2013. Effects of electrode spacing and inversion techniques on the efficacy of 2D resistivity imaging to delineate subsurface feature, *American Journal of Applied Sciences.*, 10 (I): 66-72.
- Bhattacharya, P.K., Patra, H.P., 1968. *Direct current geoelectric sounding: Principles and Interpretation.* Elsevier Pub. Co.
- Brundsen, D. and Prior, D.B., 1984. *Slope Instability* John Wiley and Sons.
- Chunhsien, Wu., Chihkuan, Ni., Honyim, Ko., 2005. *Seismic Response of an Earth Dam: Finite Element Coupling Analysis and Validation from Centrifuge Test, China.*
- Corwin, R. F. and Hoover, D. B., 1979. The self potential method in geothermal exploration, *Geophysics*, 44, 226-245.
- Di Prinzio, M., Bittelli M., Castellarin, A., Pisa, P.R., 2010. Application of GPR to the monitoring of river embankments, Italy.
- Deidda, G.P., Ranieri, G., 2005. *Seismic tomography imaging of an unstable embankment, Italy.*
- Dobrin, M.B., 1981. *Introduction to Geophysical Prospecting.* Mc Graw-Hill International Book Company, Tokyo.
- Firdaus, Nanang., 2016. Implementasi Algoritma Regressive-Regressive Particle Swarm Optimization Pada Inversi Vertical Electrical Sounding Untuk Mencitrakan Bawah Permukaan Tanggul 'LUSI', Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Fernández Martínez, J.L., García Gonzalo, E., Fernández Álvarez, J.P., Kuzma, H.A., Menéndez Pérez, C.O., 2010. PSO: A Powerful algorithm to solve geophysical inverse problems: Application to a 1D-DC resistivity case. *J. Appl. Geophys.* 71, 13-25. Doi:10.1016/j.jappgeo.2010.02.001
- Grandis, H., 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika* Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), Jakarta.

- Hartantyo, Eddy and Umar, Darwis., 2012. Buku Panduan Praktikum Metode Geolistrik dan Elektromagnetik, Studi Geofisika, FMIPA UGM.
- Hidayatullah, W.M., 2016. Analisa Zona Rembesan Air Pada Tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) Menggunakan Metode Self Potential Dengan Algoritma Very Fast Simulated Annealing, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S., Wu, M., Shih, H., Zheng, Q., Yen, N., Tung, C., and Liu, H. 1998, The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis. *Proc. Royal Soc. A*, 454: 903-995.
- Husein, A., Santosa, B.J., and Bahri, A.S., 2014. Seepage Monitoring of Embankment Dam Using Resistivity Method: A Case Study of LUSI Mud Volcano P79-82 Embankment.
- Laby, D.A., 2016. Implementasi Algoritma PSO yang cepat, Stabil dan Robust Untuk Inversi Dispersi Gelombang Rayleigh dan Vertical Electrical Sounding, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Loke. M.H., 2004. Electrical Imaging Surveys for Enviromental and Engineering Studies: A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys, Malaysia.
- N. U. Rehman and D.P. Mandic, 2009. Filter Bank Property of Multivariate Empirical Mode Decomposition, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no.1.
- Oglivly, A. A., Ayed, M. A., and Bogoslovsky, V. A., 1969. Geophysical studies of water leakages from reservoirs, *Geophys. Prosp.*, 22, 36-62.
- Taib., M. I. T., 1999. Eksplorasi Geolistrik: Diktat Kuliah Metode Geolistrik, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Raharjo, and S. A. Sehad., 2011. Survey Metode Self Potensial Menggunakan Elektroda Pot Berpori untuk Mendeteksi Aliran Fluida Panas Bawah Permukaan di Kawasan Batu

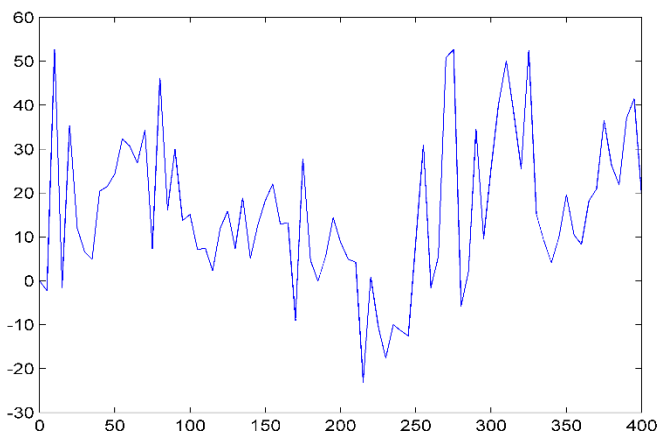
- Raden Kabupaten Banyumas Jawa Tengah, Berkala Fisika Flux.
- Revil, Andre., and Jardani, A., 2013. The Self Potential Method, Theory and Application in Environmental Geosciences.
- Reynolds, John., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Singapore: John Wiley and Sons.
- Sakka., 2002. Metode Geolistrik Tahanan Jenis, FMIPA UNHAS, Makassar.
- Sato, M., Mooney, H.M., 1960. The electrochemical mechanism of sulphide self-potentials. *Geophysics* XXV.
- Sudarsono. U dan Sujarwo. I.B., 2008B. Aspek Geologi Teknik Lumur Sidoarjo Jawa Timur
- Sungkono, Bahri, A.S., Warnana, D.D., Monteiro Santos, F.A., Santosa, B.J., 2014. Fast, Simultaneous and Robust VLF-EM Data Denoising and Reconstruction Via Multivariate Empirical Mode Decomposition. *Comput. Geosci.*
- Sungkono, 2016. Pengembangan Metode Analisa data VLF-EM, Dispersi Gelombang Rayleigh dan Resistivitas untuk Menilai Kestabilan Tanggul LUSI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Supriyanto, E., 2007. Analisa Data Geofisika : Memahami Teori Inversi, Diktat Jurusan Fisika Komputasi Universitas Indonesia, Jakarta.
- Syamsuddin, Lantu, Massinai, M.A., Akbar, S., 2012. Identifikasi Sesar Bawah Permukaan dengan Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner di Sekitar Da Jene'berang Kecamatan Parangloe, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan.
- Telford, W., and L. Geldart., 1990. *Applied Geophysics*. London: Cambridge University.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

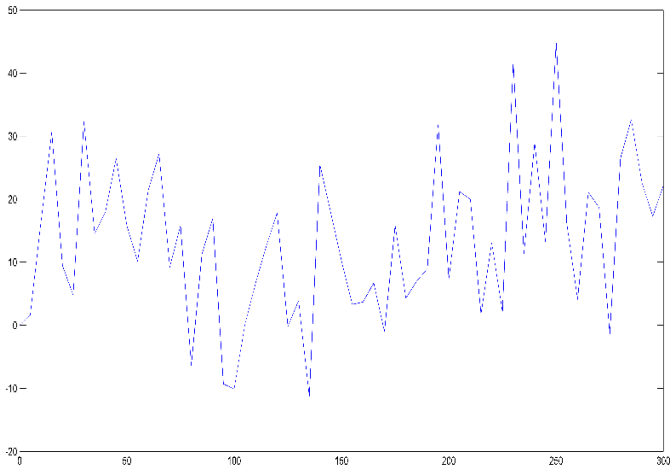
LAMPIRAN A
Data Pengukuran dan Hasil Dekomposisi data *Self Potential*



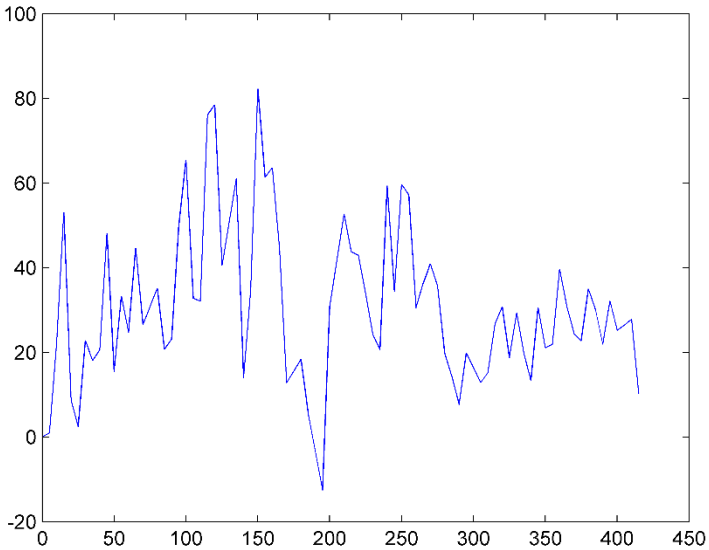
Gambar 1. Data pengukuran *Self Potential* pada lintasan 1



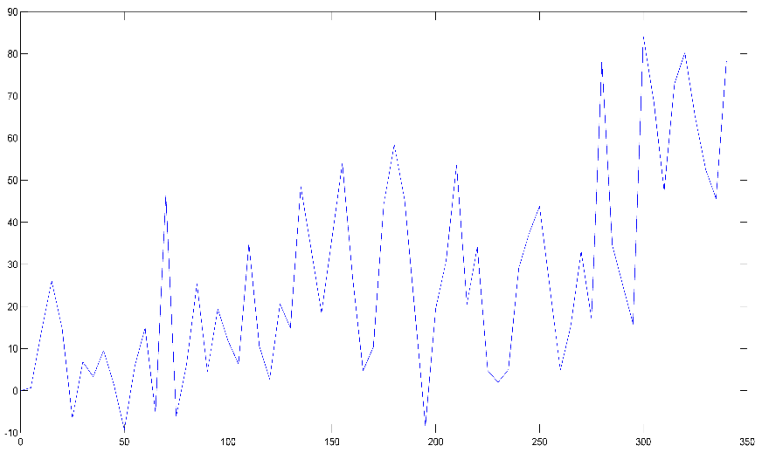
Gambar 2. Data pengukuran *Self Potential* pada lintasan 2



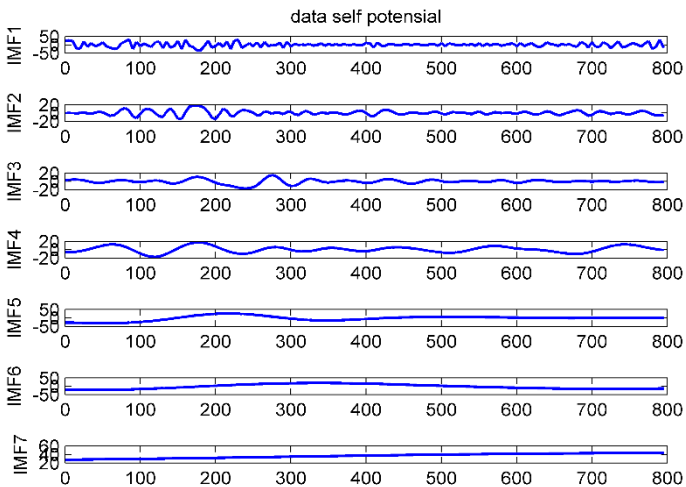
Gambar 3. Data pengukuran *Self Potential* pada lintasan 3



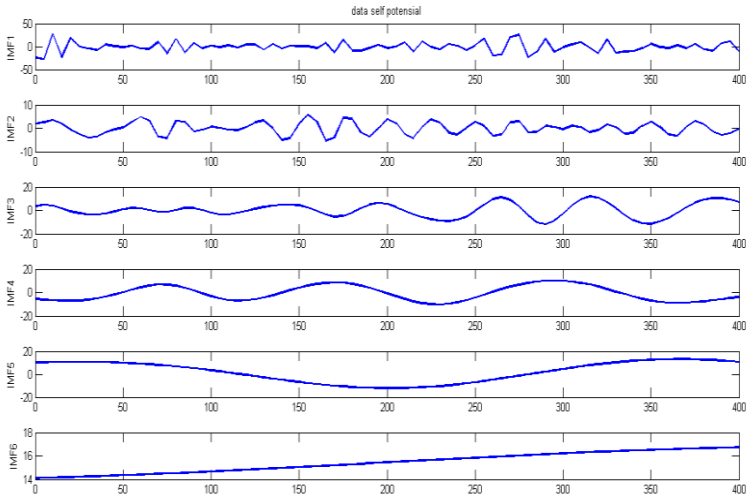
Gambar 4. Data pengukuran *Self Potential* pada lintasan 4



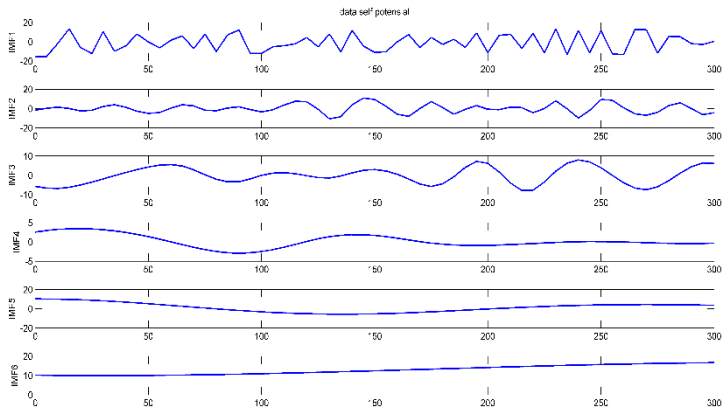
Gambar 5. Data pengukuran *Self Potential* pada lintasan 5



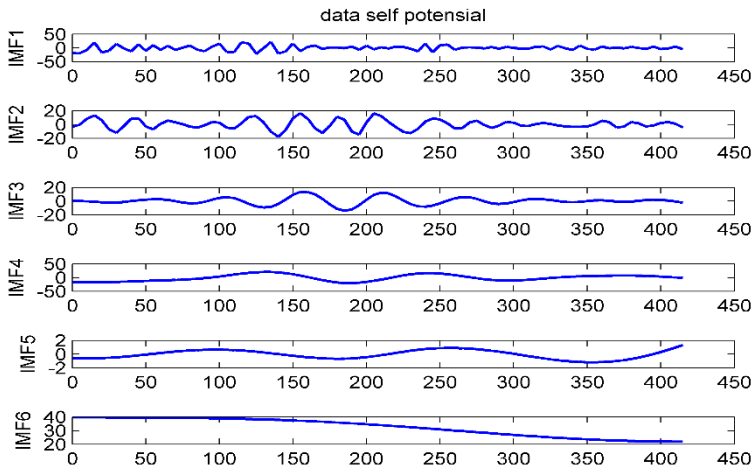
Gambar 6. Hasil dekomposisi data *Self Potential* pada lintasan 1 menggunakan metode NA-MEMD.



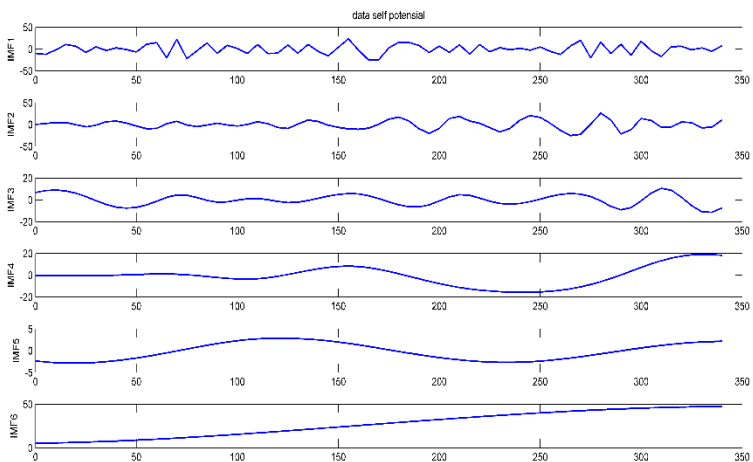
Gambar 7. Hasil dekomposisi data *Self Potential* pada lintasan 2 menggunakan metode NA-MEMD.



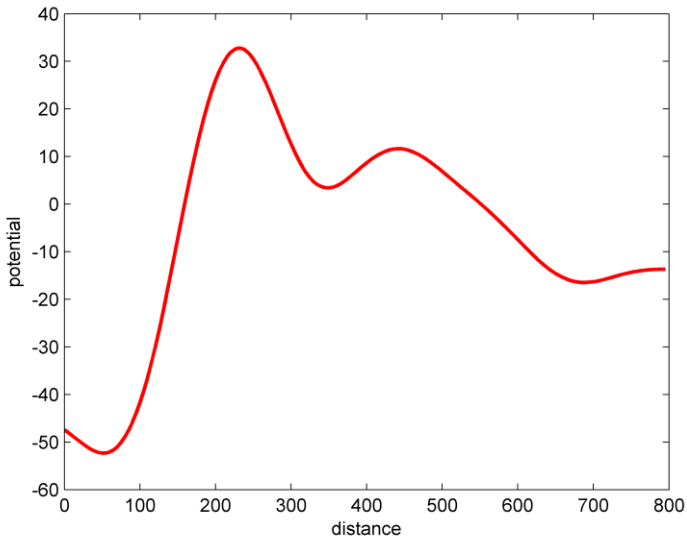
Gambar 8. Hasil dekomposisi data *Self Potential* pada lintasan 3 menggunakan metode NA-MEMD.



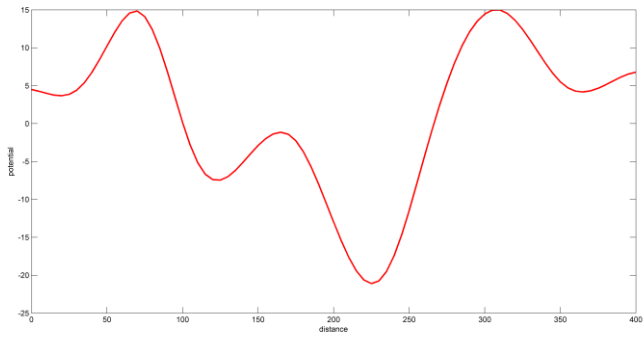
Gambar 9. Hasil dekomposisi data *Self Potential* pada lintasan 4 menggunakan metode NA-MEMD.



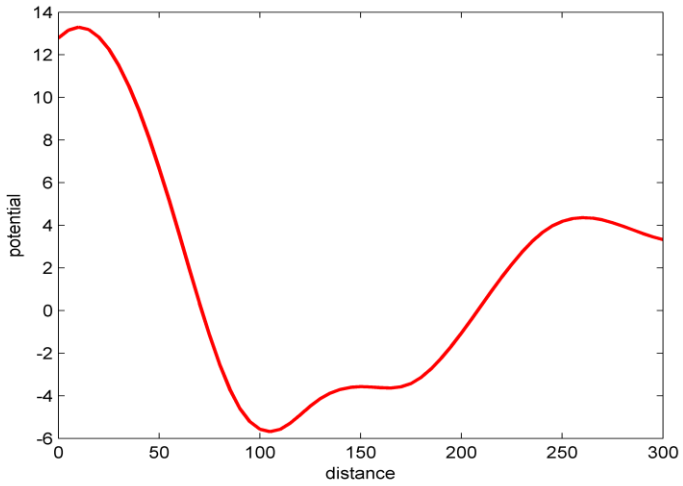
Gambar 10. Hasil dekomposisi data *Self Potential* pada lintasan 5 menggunakan metode NA-MEMD.



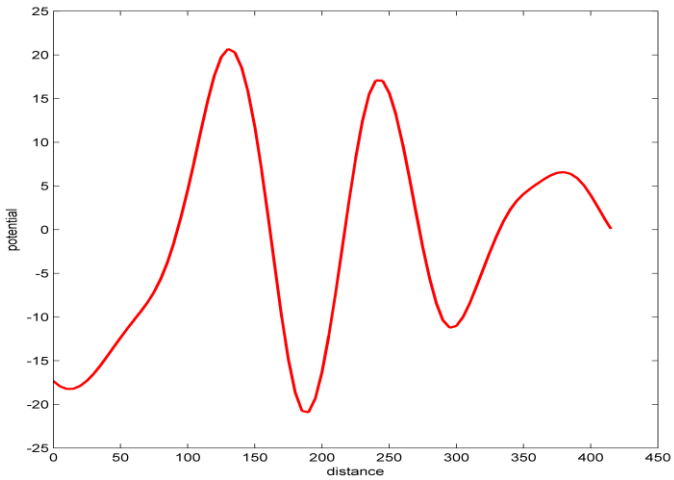
Gambar 11. Hasil Penjumlahan IMF pada Lintasan 1



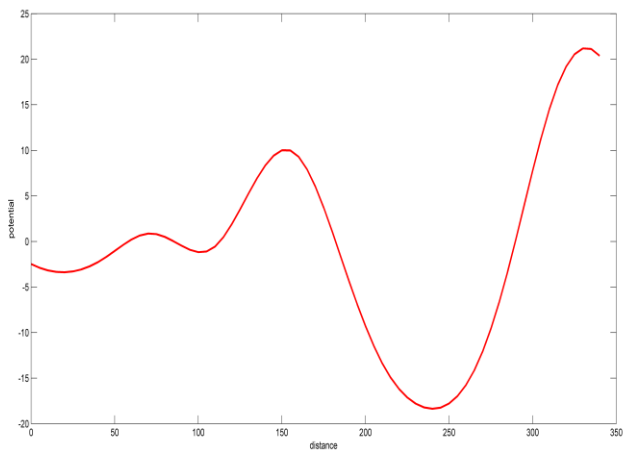
Gambar 12. Hasil Penjumlahan IMF pada Lintasan 2



Gambar 13. Hasil Penjumlahan IMF pada Lintasan 3



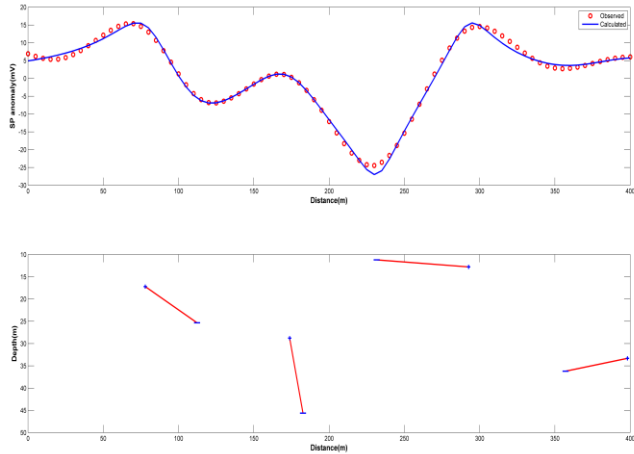
Gambar 14. Hasil Penjumlahan IMF pada Lintasan 4



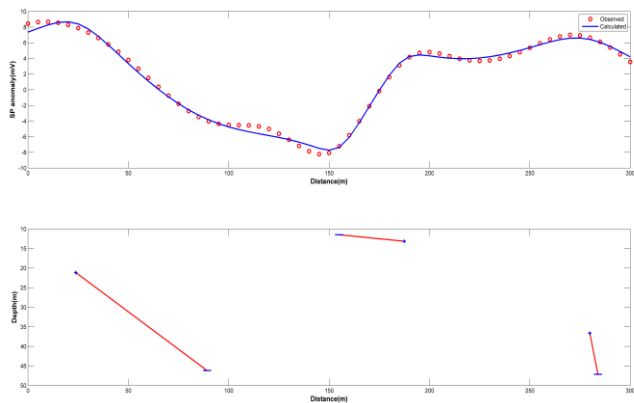
Gambar 15. Hasil Penjumlahan IMF pada Lintasan 5

LAMPIRAN B

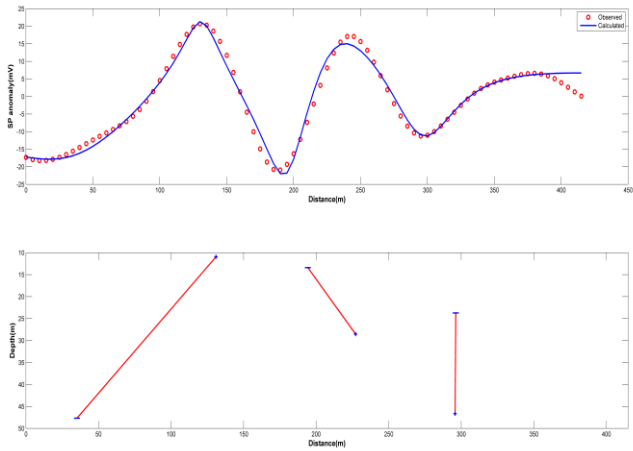
Hasil Inversi data *Self Potential* menggunakan algoritma *VFSA*



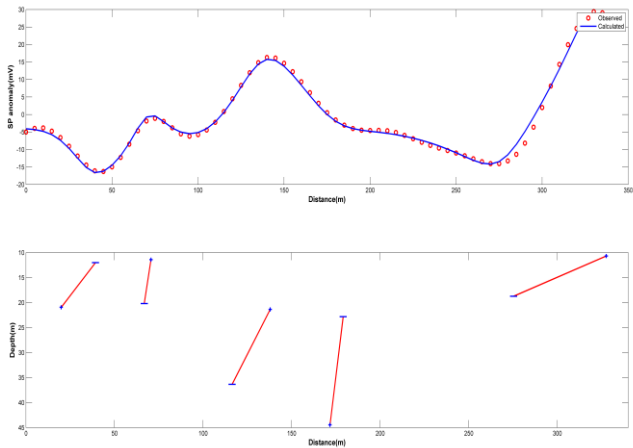
Gambar 16. Hasil Inversi data *Self Potential* pada lintasan 2



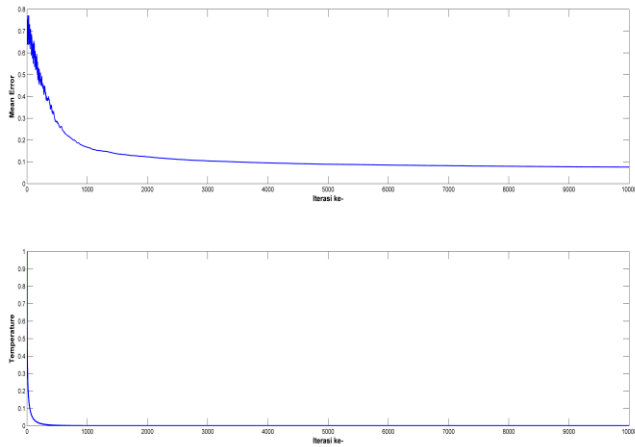
Gambar 17. Hasil Inversi data *Self Potential* pada lintasan 3



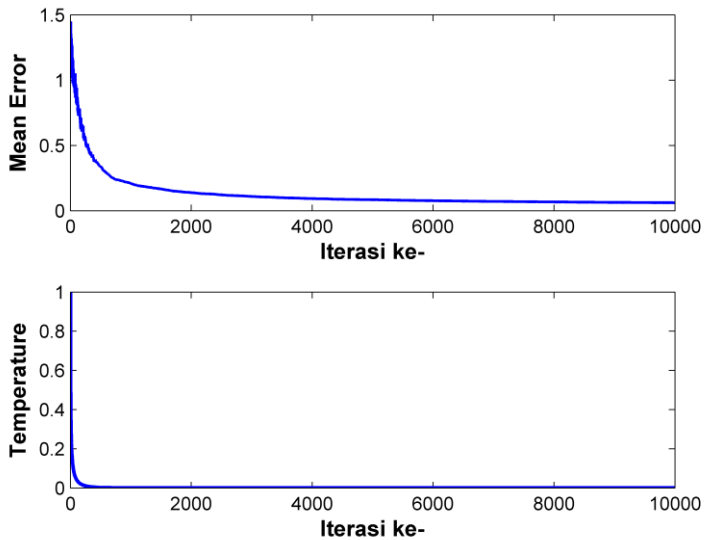
Gambar 18. Hasil Inversi data *Self Potential* pada lintasan 4



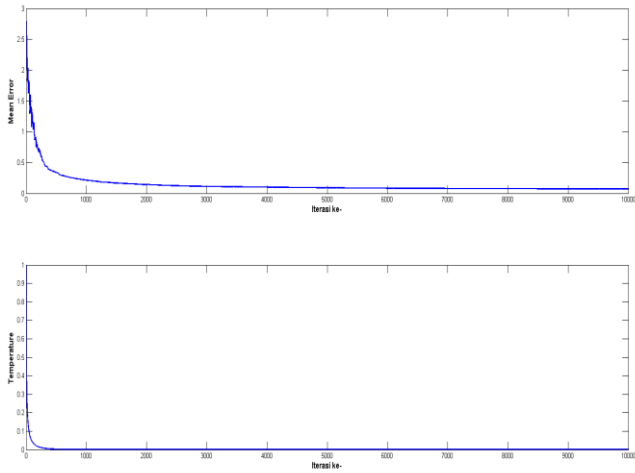
Gambar 19. Hasil Inversi data *Self Potential* pada lintasan 5



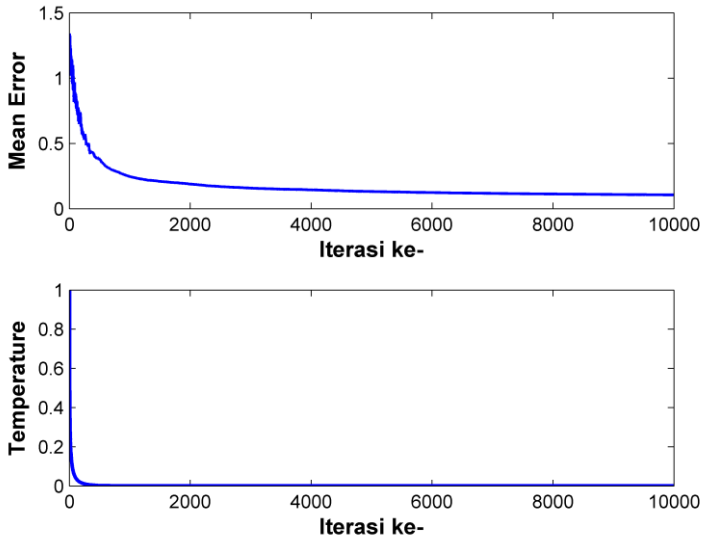
Gambar 20. Rata-rata *error* untuk setiap iterasi pada lintasan 1



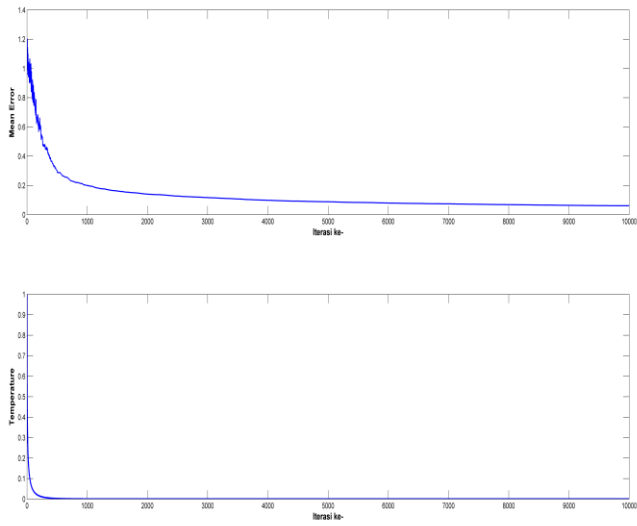
Gambar 20. Rata-rata *error* untuk setiap iterasi pada lintasan 2



Gambar 21. Rata-rata *error* untuk setiap iterasi pada lintasan 3



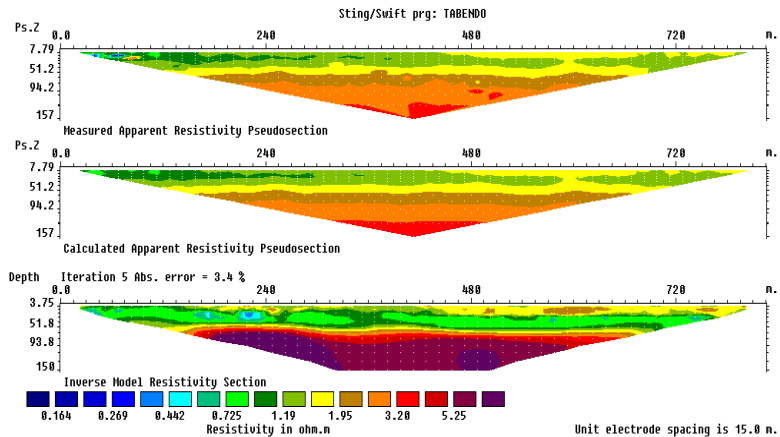
Gambar 22. Rata-rata *error* untuk setiap iterasi pada lintasan 4



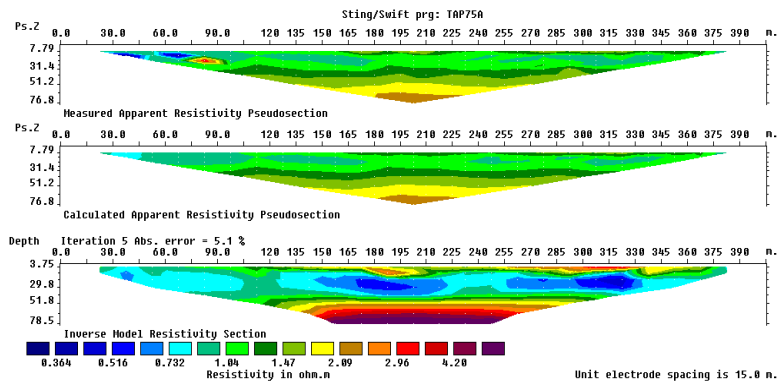
Gambar 21. Rata-rata *error* untuk setiap iterasi pada lintasan 5

LAMPIRAN C

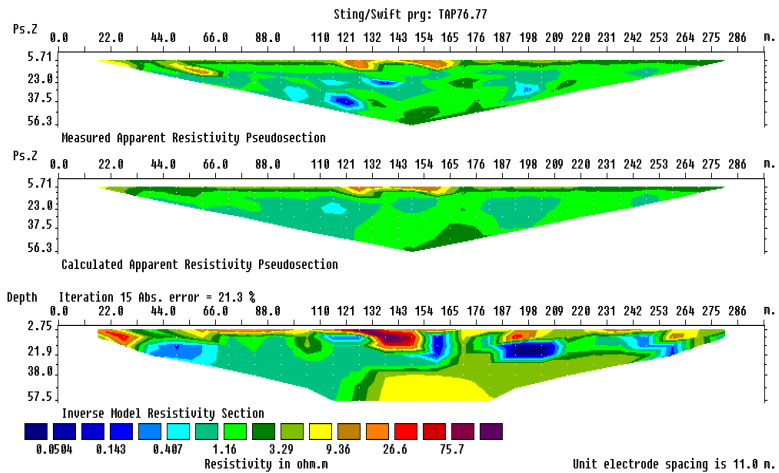
Hasil pengolahan data resistivitas menggunakan *software Res2DInv*



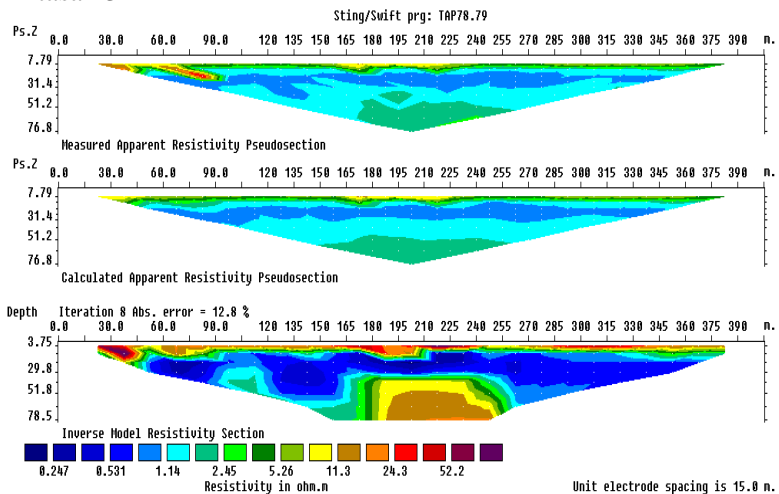
Gambar 22. Resistivitas 2D hasil inversi data resistivitas pada lintasan 1



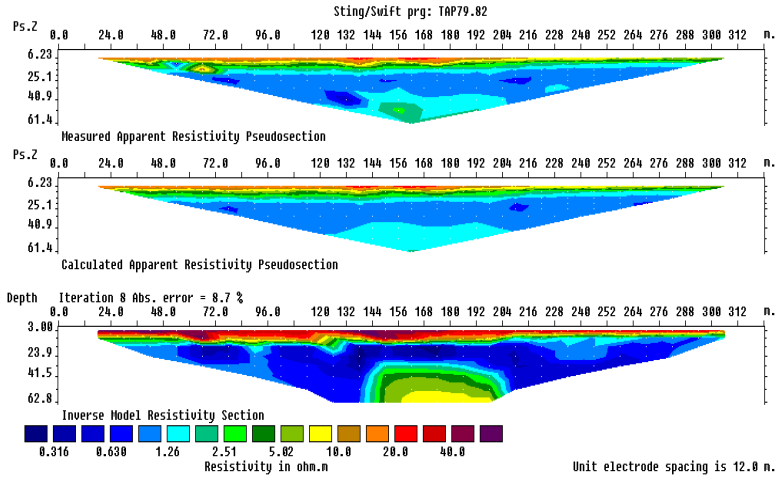
Gambar 23. Resistivitas 2D hasil inversi data resistivitas pada lintasan 2



Gambar 24. Resistivitas 2D hasil inversi data resistivitas pada lintasan 3



Gambar 25. Resistivitas 2D hasil inversi data resistivitas pada lintasan 4



Gambar 26. Resistivitas 2D hasil inversi data resistivitas pada lintasan 5

BIODATA PENULIS



Penulis “Masyithah Noor Wasillah” merupakan anak ke 2 dari 2 bersaudara yang lahir di Kabupaten Sumenep pada 14 Oktober 1994. Semasa kecil penulis menempuh pendidikan formal antara lain di TK An-Nur, SDN Pangarangan V Sumenep, SMP Negeri 1 Sumenep, dan SMA Negeri 1 Sumenep. Penulis diterima di Jurusan Fisika

FMIPA-ITS pada tahun 2012 melalui jalur SNMPTN Undangan dan terdaftar dengan NRP 1112100013. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan dan organisasi mahasiswa. Beberapa organisasi yang ditekuni penulis yaitu sebagai staf Departemen Perekonomian HIMASIKA ITS (2013-2014), staf ahli Departemen Perekonomian HIMASIKA ITS (2014-2015), Forum Komunal Mahasiswa Sumenep ITS (FOKUS ITS). Penulis juga pernah menjadi Asisten Laboratorium Fisdas. Penulis juga pernah aktif mengikuti berbagai kegiatan ilmiah maupun non-ilmiah. Prestasi yang pernah diraih penulis selama kuliah ialah dua kali PKM terdani DIKTI, Juara I Basket Putri Rektorcup ITS 2014. Bila ada kritik dan saran, pembaca dapat berkirim pesan ke: masyithahnoorwasillah@gmail.com.

“Pelaut yang hebat tidak dilahirkan dari ombak yang tenang”