



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RF141501

**IDENTIFIKASI HIDROGEOLOGI SITUS CANDI DAN
PETIRTAAN JOLOTUNDO MENGGUNAKAN METODE
VLF-EM**

EKA CAHYA PUTRA SUKANDAR
NRP 3714100031

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Amien Widodo, M.S
NIP. 19591010 198803 1002

Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si, M.Si.
NIP. 19760123 200003 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan Dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RF 141501

**IDENTIFIKASI HIDROGEOLOGI SITUS CANDI DAN
PETIRTAAN JOLOTUNDO MENGGUNAKAN METODE
VLF-EM**

**EKA CAHYA PUTRA SUKANDAR
NRP 3714100031**

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si.
NIP. 19591010 198803 1 002
Dr. Dwa Desa Warnana
NIP. 19760123 200003 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

UNDERGRADUATE THESIS - RF 141501

***HYDROGEOLOGY IDENTIFICATION OF JOLOTUNDO
TEMPLE SITE USING VLF-EM METHOD***

**EKA CAHYA PUTRA SUKANDAR
NRP 3714100031**

Advisor

**Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si.
NIP. 19591010 198803 1 002**

**Dr. Dwa Desa Warnana
NIP. 19760123 200003 1 001**

**GEOPHYSICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil, Environmental and Geo Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018**

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

IDENTIFIKASI HIDROGEOLOGI SITUS CANDI DAN PETIRTAAN JOLOTUNDO MENGGUNAKAN METODE VLF-EM

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Surabaya, 24 Juli 2018

Menyetujui,

1. 
.....
Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si (Pembimbing I)
NIP. 19591010 198803 1 002
2. 
.....
Dr. Dwa Desa Warnana (Pembimbing II)
NIP. 19760123 200003 1 001
3. 
.....
Moh. Singgih Purwanto, S.Si., MT (Penguji I)
NIP. 19800916 200912 1 002
4. 
.....
Wien Lestari, S.T, M.T (Penguji II)
NIP. 19811002 201212 2 003

Mengetahui,

Kepala Laboratorium Geofisika Teknik dan Lingkungan
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya


.....
Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si
NIP. 19591010 198803 1002

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan “Identifikasi Hidrogeologi Situs Candi dan Petirtaan Jolotundo Menggunakan Metode *VLf-EM*” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 26 Juni 2018

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized initials and a horizontal line extending to the right.

Eka Cahya Putra Sukandar

3714100031

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

IDENTIFIKASI HIDROGEOLOGISITUS CANDI DAN PETIRTAAN JOLOTUNDO MENGGUNAKAN METODE *VLF-EM*

Nama Mahasiswa : Eka Cahya Putra Sukandar
NRP : 3714100031
Departemen : Teknik Geofisika FTSLK-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si
2. Dr. Dwa Desa Warnana

Abstrak

Situs sejarah dan budaya menjadi salah satu peninggalan penting yang perlu dijaga, termasuk di dalamnya situs petirtaan Jolotundo yang berada di wilayah Kabupaten Mojokerto. Pengetahuan akan sistem hidrogeologi akan membantu melestarikan dan menjaga suplai air di situs petirtaan. Metode *Very Low Frequency - Electromagnetic*(VLF-EM) dipilih untuk memetakan sistem hidrogeologi dan aliran air di wilayah tersebut. Metode ini dipilih karena dapat memetakan wilayah yang jenuh air dengan memanfaatkan nilai resistivitas dari material di wilayah pengukuran. Jumlah lintasan yang diambil sebanyak 6 lintasan dengan spasi yang digunakan bervariasi yakni sepanjang 1 meter, 1,5 meter, serta 5 meter. Nilai resistivitas target sebesar 0-10 Ohm.meter yang merupakan rentang resistivitas dari air. Terdapat anomali yang diidentifikasi sebagai aliran air yang teridentifikasi pada lintasan 2, 3, 4, dan 5. Adapun aliran air tersebut terbentuk dari akuifer dengan tipe akuifer tertekan. Batuan penyusun sistem hidrogeologi daerah penelitian terdiri atas batuan tuff, aglomerat, serta breksi gunung api. Batuan aglomerat berfungsi sebagai batuan penyusun akuifer dari sistem hidrogeologi, sedangkan batuan tuf berfungsi sebagai batuan pembatas, yang menjebak air sehingga tidak keluar dari akuifer. Interpretasi pada penampang hasil pengolahan menunjukkan adanya 2 jalur aliran air dimana aliran pertama berada sejajar dengan lintasan pertama sementara aliran kedua berada di sebelah timur laut dari aliran pertama. Keadalaman dari kedua aliran tersebut berturut-turut yakni sedalam 20 meter serta 6 meter. Adapun arah kedua aliran tersebut yakni barat laut-tenggara dimana aliran yang ke dua merupakan aliran yang diindikasikan menyuplai air di situs petirtaan Jolotundo. Dugaan ini dikuatkan dengan posisi situs yang berada tepat di bawah aliran ke dua.

Kata Kunci: hidrogeologi, Jolotundo, resistivitas, *VLF- EM*

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

HYDROGEOLOGY IDENTIFICATION OF JOLOTUNDO TEMPLE SITE USING VLF-EM METHOD

Name : Eka Cahya Putra Sukandar
NRP : 3714100031
Department : Teknik Geofisika FTSLK-ITS
Advisor : 1. Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si
2. Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si, M. Si

Abstract

Cultural and historical sites are important relics which need to be preserved, including "Situs Petirtaan Jolotundo" which located in Mojokerto Regency. Knowing its hydrogeology system will be essential in helping preserve and keep the water supply remain stable. Very Low Frequency (also known as VLF) method considered as one of the best way to map the hydrogeology system and the water flow in that region. There are 6 acquisition lines in total with varied spacing which are 1 meter, 1.5 meters, and 5 meters. The target resistivity range from 0 to 10 Ohm.meter which included as water resistivity scale. Anomaly which identified as water flow path is detected in line 2, 3, 4, and 5. The water flow path formed from aquifer which included as confined aquifer. There are several rocks type which construct the hydrogeological system such as tuff, agglomerates, and brecchia. The aquifer consist of agglomerate, while the seal rock consist of tuff. Interpretation also shows the indication of 2 water flow area where the first one flow along the Line VLF 1 while the second located in the north east of the first water flow. The depth of both target respectively are 20 meters and 6 meters. The water flow from north west to south east where the second water flow expected as the water supplier of "Situs Petirtaan Jolotundo". This hypothesis is supported with the fact that the location of the site is right under the second water flow.

Key words: hydrogeology, Jolotundo, resistivity, VLF

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul

“IDENTIFIKASI HIDROGEOLOGI SITUS CANDI DAN PETIRTAAN JOLOTUNDO MENGGUNAKAN METODE *VLF-EM*”

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Departemen Teknik Geofisika Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Ayah, Ibu, serta semua keluarga yang selalu mendoakan, menguatkan, dan mendukung penulis sehingga penulis bisa sampai saat ini.
2. Dr. Widya Utama, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Geofisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si dan Dr. Dwa Desa Warnana selaku dosen pembimbing atas segala bimbingan dan motivasinya kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
4. M. Singgih Purwanto, S.Si., M.T. selaku koordinator tugas akhir dan Bapak Solichan yang selalu memberikan informasi mengenai tugas akhir.
5. Juan Pandu G. N. R., S.Si. M.T. selaku dosen wali yang telah memberikan arahan akademik selama penulis menempuh pendidikan di Departemen Teknik Geofisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
6. Bapak dan Ibu dosen serta para staf Departemen Teknik Geofisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.
7. Teman-teman seperjuangan 118 yang saling mendukung dan memotivasi satu sama lain.
8. Teman-teman seperjuangan TG3 yang saling mendukung dan memotivasi satu sama lain.
9. Keluarga Mahasiswa Teknik Geofisika ITS yang selalu memberikan doa dan dukungannya kepada penulis.

10. Serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu, terimakasih telah mendoakan dan mendukung penulis sampai dengan selesainya tugas akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa dalam tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tugas akhir ini. Akhir kata, penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat membawa manfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 26 Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	xi
Abstract	xiii
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
BAB II DASAR TEORI	3
2.1 Geologi dan Hidrogeologi Daerah Penelitian	3
2.2 Porositas dan Permeabilitas	4
2.3 Persamaan Maxwell.....	5
2.4 Prinsip Dasar Very Low Frequency (VLF)	7
2.5 Metoda VLF-EM.....	7
2.6 Filter Karous-Hjelt	7
2.7 Inversi	8
2.8 Studi Pendahuluan	9
BAB III METODOLOGI	13
3.1 Diagram Alir Penelitian	13
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.3. Timeline Pekerjaan	16
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	17
4.1 Analisa Data.....	17
4.2 Analisa Hasil	17
4.2.1 Analisa Lintasan VLF 1	17
4.2.2 Analisa Lintasan VLF 2	18
4.2.3 Analisa Lintasan VLF 3	20
4.2.4 Analisa Lintasan VLF 4	22
4.2.5 Analisa Lintasan VLF 5	23
4.2.6 Analisa Lintasan VLF 6	25
4.2.7 Penentuan Aliran Air Tanah Menggunakan Peta Fraser	27
4.2.8 Korelasi Hasil Inversi Tiap Lintasan Pada Kedalaman 6 dan 22 Meter	28
4.3 Sistem Hidrogeologi Jolotundo.....	29
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	33

5.1	Kesimpulan.....	33
5.2	Saran	33
DAFTAR PUSTAKA.....		35

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Peta Geologi Daerah Penelitian (Santoso, 1992)	4
Gambar 2. 2	Rapat arus ekivalen yang dihitung dengan menggunakan filter karous-Hajelt: (a) inphase dan (b) quadrature. Kotak bergaris hitam adalah posisi benda anomali sebenarnya	8
Gambar 2. 3	Peta Hidrogeologi Gunung Penanggungan dan Sekitarnya (Pratiknyo, 2016).....	10
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian	13
Gambar 3. 2	Desain Akuisisi Data	15
Gambar 4. 1	Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 1	17
Gambar 4. 2	Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 1	18
Gambar 4. 3	Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 2	19
Gambar 4. 4	Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 2	20
Gambar 4. 5	Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 3	21
Gambar 4. 6	Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 3	21
Gambar 4. 7	Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 4	22
Gambar 4. 8	Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 4	23
Gambar 4. 9	Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 5	24
Gambar 4. 10	Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 5	24
Gambar 4. 11	Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 6	25
Gambar 4. 12	Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 6	26
Gambar 4. 13	Peta Fraser	27

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Batuan Penyusun Geologi Mojokerto(Sumber: BPN Kabupaten Mojokerto)	3
Tabel 2 Detail akuisisi tiap lintasan	15
Tabel 3 Timeline Pekerjaan	16

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sejarah menjadi bagian penting dari bangsa Indonesia dimana menyimpan nilai-nilai luhur dan peninggalan yang berharga. Salah satu bentuk peninggalan yang memiliki nilai historis tinggi yakni berupa bangunan, baik berbentuk candi maupun bangunan lain dari masa kerajaan. Seperti diketahui bahwa pada zaman dahulu, terdapat banyak kerajaan yang berdiri di negeri ini. Salah satu peninggalan yang ada hingga sekarang yakni candi dan petirtaan Jolotundo yang terletak di Desa Seloliman, Kecamatan Trawas, Mojokerto. Candi Jolotundo dibangun pada zaman kerajaan Singosari yang dipimpin oleh raja Airlangga dan diperuntukkan sebagai sarana ritual (BPCB Mojokerto, 2001)

Keberadaan Candi Jolotundo dianggap penting karena menjadi tempat suci dan terletak di satu diantara 7 gunung yang dianggap suci oleh masyarakat pada masa Kerajaan Majapahit. Selain itu, terdapat kolam yang berisi air jernih yang juga digunakan untuk beragam ritual dan dimanfaatkan oleh warga sekitar. Adanya kolam air di daerah pegunungan menandakan adanya daerah tangkapan air dimana wilayah ini berperan sangat vital dalam suplai air, serta sistem hidrogeologi dimana menjadi sistem aliran dari daerah tangkapan air menuju ke situs. Oleh karena itu, dibutuhkan survey untuk mengetahui sistem hidrogeologi dari daerah penelitian guna menjaga aliran air di wilayah tersebut. Metode geofisika yang dapat memetakan wilayah tersebut salah satunya yakni metode *very low frequency – electromagnetic* (VLF-EM). Metode ini memanfaatkan sifat gelombang elektromagnetik untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitas dari material di daerah penelitian. Metode ini dipilih karena bisa menggambarkan kondisi bawah permukaan yang berhubungan dengan daerah jenuh air sebagai indikasi dari daerah aliran air serta sistem hidrogeologinya, serta mobilitasnya yang tinggi dikarenakan wilayah penelitian berada pada daerah pegunungan yang cukup terjal. Selain itu, penggunaan metode VLF untuk mengidentifikasi akuifer dan aliran air telah digunakan untuk mendeteksi keberadaan akuifer dan arah aliran air pada studi kasus serupa yakni pada batuan vulkanik yang berada pada wilayah Tenggara pulau Aegina (Area Perdika), Yunani. Respon dan hasil pengolahan menunjukkan adanya zona konduktif yang dapat diasosiasikan dengan adanya akuifer. (Papadopoulos, 2010)

Adapun hasil pengolahan dan interpretasi data selanjutnya digunakan untuk menentukan sistem hidrogeologi dari kawasan Candi dan Petirtaan Jolotundo.

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dari penulisan Tugas Akhir ini yakni bagaimana kondisi hidrogeologi wilayah candi Jolotundo, serta bagaimana hasil identifikasinya menggunakan metode VLF-EM

1.3. Tujuan

Tujuan penulisan Tugas Akhir ini yakni untuk mengidentifikasi hidrogeologi berupa akuifer dan pola aliran situs Candi dan Petirtaan Jolotundo menggunakan metode VLF-EM

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian berada di atas wilayah candi dan petirtaan Jolotundo
2. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan metode VLF-EM
3. Pengukuran hanya bertujuan mengidentifikasi sistem hidrogeologidaerah penelitian tanpa melakukan penelitian pada kondisi tanah dan kandungannya

BAB II DASAR TEORI

2.1 Geologi dan Hidrogeologi Daerah Penelitian

Wilayah Kabupaten Mojokerto secara geologi terbagi atas empat macam batuan, yaitu aluvium, pliosen fassies sedimen, pliosen fasies batu gamping dan miosen fasies sedimen. Jenis batuan aluvium dan miosen fasies sedimen banyak dimanfaatkan masyarakat untuk tegalan dan sawah serta sebagian kecil batuan pliosen fasies sedimen untuk tegalan.

Struktur geologi yang dijumpai di wilayah Kabupaten Mojokerto adalah sebagai berikut ini:

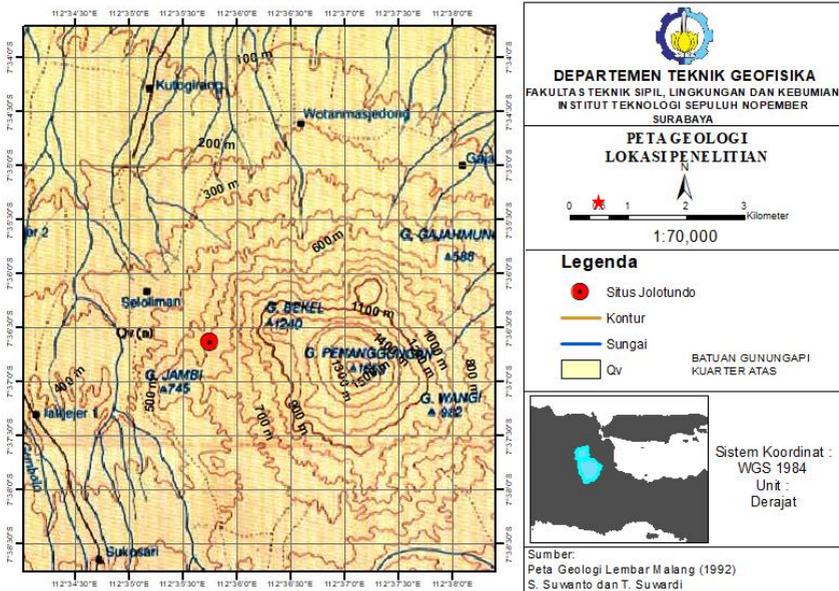
1. Struktur primer (berupa perlapisan batuan, lipatan antiklin – sinklin, dijumpai pada sisi utara)
2. Struktur sekunder (berupa sesar normal, sesar geser, dengan arah baratdaya-timurlaut dan barat laut-tenggara, berkembang di bagian tengah dan selatan).
3. Struktur sekunder lainnya berupa kekar-kekar pada batuan berkembang dalam skala yang lebih kecil dan dikontrol oleh aktifitas struktur regionalnya

Tanah di wilayah Kabupaten Mojokerto ditinjau dari struktur geologi, unsur batuan pembentuk serta luasnya sebagai berikut :

Tabel 1 Batuan Penyusun Geologi Mojokerto(Sumber: BPN Kabupaten Mojokerto)

No.	Batuan Pembentuk	Luas (Ha)	Persentase (%)
1.	Hasil Gunung berapi tak teruraikan	1.744,85	1,80
2.	Hasil Gunung berapi kwarter muda	3.034,10	3,13
3.	Hasil Gunung berapi kwarter tua	4.148,86	4,28
4.	Aluvium, facies gunung berapi	81.930,30	84,52
5.	Aluvium	3.896,83	4,02
6.	Pleistosen, facies sedimen	1.395,88	1,44
7.	Pleistosen, facies gunung berapi	785,18	0,81
	Total	96.936	100,00

Berikut merupakan geologi daerah penelitian, yakni daerah Gunung Penanggungan dilihat dari peta geologi



Gambar 2. 1 Peta Geologi Daerah Penelitian (Santoso, 1992)

Geologi daerah penelitian terbentuk atas batuan gunungapi kuartar atas yang terdiri atas batuan breksi gunungapi, tuff, breksi tufan, serta aglomerat. Daerah penelitian terletak di wilayah Gunung Penanggungan dengan medan yang cukup terjal serta vegetasi yang lebat. (Santoso, 1992)

Adapun hidrologi daerah Mojokerto sangat ditentukan oleh besarnya curah hujan, jumlah mata air atau sumber air dan pola aliran sungai dan bendungan. Jumlah mata air mencapai 161 buah, yang berfungsi sebanyak 153 mata air. Debit air tersebut rata-rata maksimum 19,42 lt/detik dan debit rata-rata minimum 7,60 lt/detik. Mata air tersebut sebagian besar sebarannya terdapat di wilayah Kabupaten Mojokerto bagian Selatan yang merupakan daerah pegunungan yang terdiri atas Gunung Penanggungan dan Welirang. (Bappeda Kab. Mojokerto, 2013)

2.2 Porositas dan Permeabilitas

Porositas adalah perbandingan volume rongga-rongga pori terhadap volume total seluruh batuan. Perbandingan ini biasanya dinyatakan dalam persen:

$$\phi = \frac{\text{Volume pori}}{\text{Volume total batuan}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.1)$$

Pori merupakan ruang di dalam batuan yang selalu terisi oleh fluida, seperti air tawar/asin, udara atau gas bumi. Porositas efektif yaitu apabila bagian rongga pori-pori di dalam batuan berhubungan. Porositas efektif biasanya lebih kecil daripada rongga pori-pori total yang biasanya berkisar dari 10% sampai 15%. Porositas efektif dinyatakan sebagai berikut (Nurwidyanto,2006):

$$\phi_e = \frac{\text{Volume pori bersambung}}{\text{Volume total batuan}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.2)$$

Berdasarkan pembentukannya porositas dibagi dalam dua macam yaitu :

1. Porositas primer yaitu porositas yang terbentuk saat pembentukan batuan. saat proses sedimentasi butiran batuan akan terdapat rongga diantara butiran-butiran tersebut. nah rongga - rongga tersebut merupakan porositas primer. porositas yang demikian merupakan porositas intergranular atau porositas interparticle
2. Porositas sekunder yaitu porositas yang terbentuk karena proses geologi yang dialami oleh batuan yang sudah jadi sehingga mengakibatkan terbentuknya space yang dapat menjadi porositas yang baru. Porositas sekunder dapat terbentuk akibat adanya tektonik yang menyebabkan terbentuknya rekahan-rekahan pada batuan tersebut.

Permeabilitas didefinisikan sebagai suatu bilangan yang menunjukkan kemampuan dari suatu batuan untuk mengalirkan fluida. Permeabilitas merupakan fungsi tingkat hubungan ruang antar pori-pori batuan.

Henry Darcy (1856), membuat hubungan empiris dengan bentuk diferensial sebagai berikut :

$$v = - \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dl} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana ; V = kecepatan aliran, cm/sec

μ = viskositas fluida yang mengalir, cp

dP /dL = gradien tekanan dalam arah aliran , atm/cm

k = permeabilitas media berpori, darcy

Tanda negatif dalam persamaan menunjukkan bahwa bila tekanan bertambah dalam satu arah, maka arah alirannya bearlawanan dengan arah pertambahan tekanan tersebut.

2.3 Persamaan Maxwell

Gelombang elektromagnetik yang selanjutnya disingkat gelombang EM adalah gelombang yang menjalarnya tak perlu medium. Dasar dari gelombang EM adalah teori-teori listrik dan magnet yang kemudian diringkaskan menjadi

sekumpulan persamaan yang disebut persamaan Maxwell. Maxwell memprediksi bahwa perubahan waktu terhadap medan listrik akan menghasilkan medan magnet, seperti halnya adanya perubahan medan magnet yang menghasilkan medan listrik (hukum Faraday). Dari dasar ini Maxwell mengawali suatu konsep bahwa arus displacement merupakan sumber dari medan magnet. Dengan demikian teori Maxwell menyediakan hubungan penting antara medan listrik dengan medan magnet.

Pada awalnya Maxwell memprediksi bahwa gelombang EM menjalar dengan kecepatan jalar seperti kecepatan jalar cahaya. Penaksiran ini dibuktikan oleh Hertz secara eksperimen, dan dia merupakan orang pertama yang meneliti gelombang EM. Penemuan ini telah mengawali beberapa ilmu tentang sistem komunikasi seperti radio, televisi dan radar. Pada tingkat konseptual, Maxwell menggabungkan masalah cahaya dan gelombang EM, kemudian membangun ide bahwa cahaya adalah bentuk dari radiasi elektromagnetik. Gelombang EM dibentuk oleh muatan listrik yang dipercepat. Gelombang diradiasi terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus dan juga kedua duanya tegak lurus arah penjarannya. Dengan demikian gelombang EM adalah gelombang transversal. Oleh Maxwell ditunjukkan bahwa amplitudo-amplitudo medan listrik dan medan magnet (E & B) dalam gelombang EM mempunyai hubungan $E = c B$, dengan c adalah kecepatan cahaya.

Pada jarak yang cukup jauh dari sumber gelombang, amplitudo dari getaran medan akan mengecil terhadap jarak, sebagai perbandingan ($1/r$). Gelombang EM juga mempunyai momentum dan energi sehingga dapat menghasilkan tekanan terhadap materi yang dijumpai. Gelombang EM mempunyai banyak frekuensi. Sebagai contoh gelombang radio adalah gelombang EM yang dihasilkan oleh osilasi arus di menara antena radio. Pemancaran gelombang cahaya adalah bentuk frekwensi tinggi dari radiasi EM yang dihasilkan oleh osilasi elektron dalam sistem atom. Hukum hukum dasar dari medan listrik dan magnet mendasari persamaan-persamaan Maxwell. Persamaan ini merupakan teori terpadu dari EM.

Persamaan tersebut adalah :

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \dots\dots\dots(2.5)$$

Penggabungan dari persamaan-persamaan diatas dapat diturunkan suatu bentuk persamaan gelombang EM. Untuk ruang hampa ($Q = 0, i = 0$) , solusi persamaan gelombang tersebut menghasilkan kecepatan jalar gelombang sebesar $(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}$ yang mana nilai ini sama dengan kecepatan rambat cahaya.

2.4 Prinsip Dasar Very Low Frequency (VLF)

VLF merupakan metoda pasif yang menggunakan radiasi gelombang EM dari pemancar militer (ada sekitar 42 global tanah pemancar komunikasi militer) yang beroperasi di frekuensi VLF band (15–30 kHz) sebagai medan elektromagnetik primer. Medan elektromagnetik primer sebuah pemancar radio, memiliki komponen medan listrik vertikal E_{pz} dan komponen medan magnetik horizontal H_{py} tegak lurus terhadap arah perambatan sumbu x.

Pada jarak yang cukup jauh dari antenna pemancar, komponen medan elektromagnetik primer dapat dianggap sebagai gelombang yang berjalan secara horizontal. Jika di bawah permukaan terdapat suatu medium yang konduktif maka komponen medan magnetik dari gelombang elektromagnetik primer akan menginduksi medium tersebut sehingga akan menimbulkan arus induksi.

Arus induksi akan menimbulkan medan elektromagnetik baru yang disebut medan elektromagnetik sekunder, H_s , yang mempunyai komponen horizontal dan komponen vertikal. Medan magnetik ini mempunyai bagaian yang sefase (in-phase) dan berbeda fase (out-of-phase) dengan medan primer. Adapun besar medan elektromagnetik sekunder sangat tergantung dari sifat konduktivitas benda di bawah permukaan. Paal (1965) juga telah berhasil mengamati dari gelombang radio pada frekuensi sangat rendah dapat digunakan untuk zona prospek konduktif dari deposit mineral.

2.5 Metoda VLF-EM

Pengukuran metode VLF-EM (Very Low Frequency-Electromagnetik) menggunakan transmitter yang berasal dari sinyal pemancaran radio yang diterima oleh alat VLF-EM berupa gelombang permukaan yang berjalan dan menyebar sejauh ribuan mil. Kondisi geologi mengakibatkan adanya perubahan arus listrik gelombang EM. Medan magnet yang disebabkan oleh gelombang EM ini dikenal dengan medan magnet primer. Medan magnet primer akan meningkat ketika gelombang mengenai benda konduktif (Warnana, 2007).

Benda konduktif tersebut akan menjadi sumber medan magnet sekunder setelah dikenai oleh medan magnet primer. Dengan mengukur medan magnet sekunder dan membandingkan dengan medan magnet primer serta medan listrik yang dihasilkan, maka karakteristik kelistrikan di bawah permukaan dapat ditentukan (Telford et al., 1990).

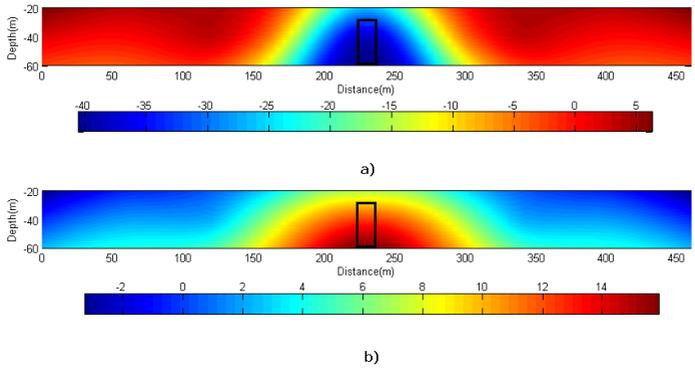
2.6 Filter Karous-Hjelt

Filter Karous-Hjelt merupakan filter yang dikembangkan dari konsep medan magnetik yang berhubungan dengan aliran arus listrik. Filter ini dikembangkan dari filter statistika linier berdasarkan atas filter Fraser dan

Teori medan linier dari Bedat dan Piersol. Filter ini menghasilkan profil kedalaman dari rapat arus yang diturunkan dari nilai komponen vertikal medan magnetik pada setiap titik pengukuran. Rumus matematisnya dapat dituliskan

$$KH_n = -0.102M_{n-3} + 0.059M_{n-2} - 0.561M_{n-1} + 0.561M_{n+1} - 0.059M_{n+2} + 0.102M_{n+3} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana $M_n=H_z+H_x$ adalah nilai yang terukur pada alat.



Gambar 2. 2 Rapat arus ekuivalen yang dihitung dengan menggunakan filter karous-Hajelt: (a) inphase dan (b) quadrature. Kotak bergaris hitam adalah posisi benda anomali sebenarnya

Filter Karos-Hjelt menghitung sumber arus ekuivalen pada kedalaman tertentu yang umumnya dikenal sebagai rapat arus. Posisi rapat arus ini dapat menjadi alat untuk mengintepretasikan lebar dan kemiringan sebuah benda anomali seperti pada Gambar 2.2 (Bahri, 2011)

2.7 Inversi

Pemodelan ke belakang (*inverse modeling*) adalah proses yang mencoba mengembalikan pengaruh dari perambatan gelombang untuk menghasilkan suatu gambaran bawah permukaan bumi. Pemodelan ke belakang (*inverse*) bertujuan untuk meminimalkan fungsi dengan menggunakan metode inversi yang dikembangkan oleh Levenberg-Marquardt (Hilyah, 2016)

Algoritma Levenberg-Marquardt merupakan pengembangan algoritma *backpropagation* standar. Pada algoritma *backpropagation* proses *update* bobot menggunakan *negative gradient descent* sedangkan pada algoritma Levenberg-

Marquardt menggunakan pendekatan matriks Hessian (H) yang dapat dihitung dengan

$$H = J^T e \dots\dots\dots (2.7)$$

Sedangkan gradien dapat dihitung dengan

$$g = J^T J \dots\dots\dots (2.8)$$

Dalam hal ini J merupakan sebuah matriks Jacobian yang berisikan turunan pertama dari *error* jaringan terhadap bobot dan bias jaringan. Perubahan bobot dapat dihitung dengan:

$$\Delta X = [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \dots\dots\dots (2.9)$$

Sehingga perbaikan bobot dapat ditentukan dengan:

$$X = X + \Delta X \dots\dots\dots (3.0)$$

$$X = \Delta X + [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \dots\dots\dots (3.1)$$

(Rahmat, 2006)

2.8 Studi Pendahuluan

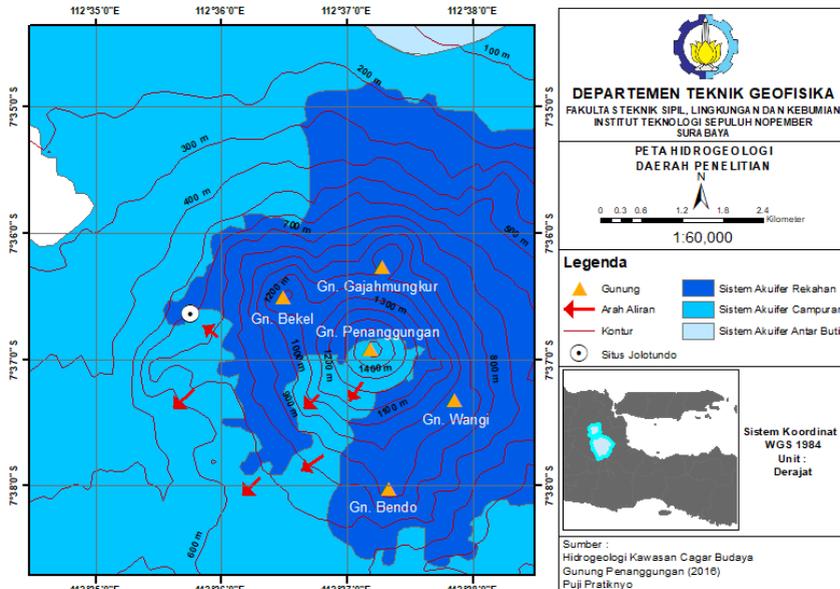
Penelitian hidrogeologi dengan menggunakan metode VLF EM telah beberapa kali dilakukan di beberapa negara. Lokasinya pun berada di kawasan vulkanik yang memiliki ciri sama dengan lokasi penelitian di situs petirtaan Jolotundo. Beberapa penelitian tersebut diantaranya yakni penelitian hidrologi vulkanik di Nicaragua, Ekuador, serta Samudera Hindia. Penelitian di Ekuador dilakukan untuk menginvestigasi hidrologi vulkanik di Masaya, Nicaragua. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kedalaman air tanah. Hasilnya menunjukkan bahwa hidrologi di daerah tersebut terisolasi dari sistem aliran air tanah di sekitarnya yang disebabkan oleh patahan pada daerah kaldera.

Penelitian lain juga dilakukan seperti penelitian mengenai karakterisasi hidrogeologi pada *Plateaus Region* menggunakan *remote sensing* serta beberapa metode geofisika, termasuk juga metode VLF. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sumber hidrogeologi dan VLF digunakan untuk memetakan kontras resistivitas pada zona patahan. Lokasi penelitian terletak pada Lembah Inter-Andean Tengah, Ekuador.

Adapun penelitian terkait candi Jolotundo dan kawasan Gunung Penanggungan telah dilakukan oleh Puji Pratiknyo dengan Judul “Hidrogeologi

Kawasan Cagar Budaya Gunung Penanggungan”. Penelitian difokuskan pada kondisi hidrogeologi Gunung Penanggungan secara keseluruhan. Metode yang digunakan yaitu metode keilmuan geologi. (Pratiknyo, 2016)

Metodologi yang dilakukan adalah dengan melakukan pemetaan hidrogeologi. Data yang terkumpul diolah dan selanjutnya dilakukan analisa dan dibuat peta hidrogeologinya. Hasil yang didapatkan adalah di daerah penelitian terdapat 3(tiga) sistem akuifer, yaitu : sistem akuifer ruang antar butir, sistem akuifer antar butir dan rekahan, dan sistem akuifer rekahan. Berikut merupakan peta hidrologi hasil penelitiannya



Gambar 2. 3 Peta Hidrogeologi Gunung Penanggungan dan Sekitarnya (Pratiknyo, 2016)

Gambar 2.2 menunjukkan sistem akuifer pada wilayah Gunung Penanggungan dimana terdiri atas 3 jenis sistem akuifer yang berupa sistem akuifer antar butir, sistem akuifer antar butir dan rekahan, serta sistem akuifer rekahan. Lokasi penelitian berada pada wilayah dengan sistem akuifer rekahan yang merupakan bentukan akuifer tertekan.

Air tanah, secara umum, mengalir dari bagian Selatan menuju ke arah Utara dengan tinggi muka air tanah berkisar 16,28 – 167,62 meter dari permukaan air laut dengan kedalaman berkisar 0,46 – 11,93 m. Daerah imbuhan terdapat pada puncak hingga lereng bawah Gunung Penanggungan sedangkan daerah lepasan berada di sebelah Utara dan juga di bagian tengah-

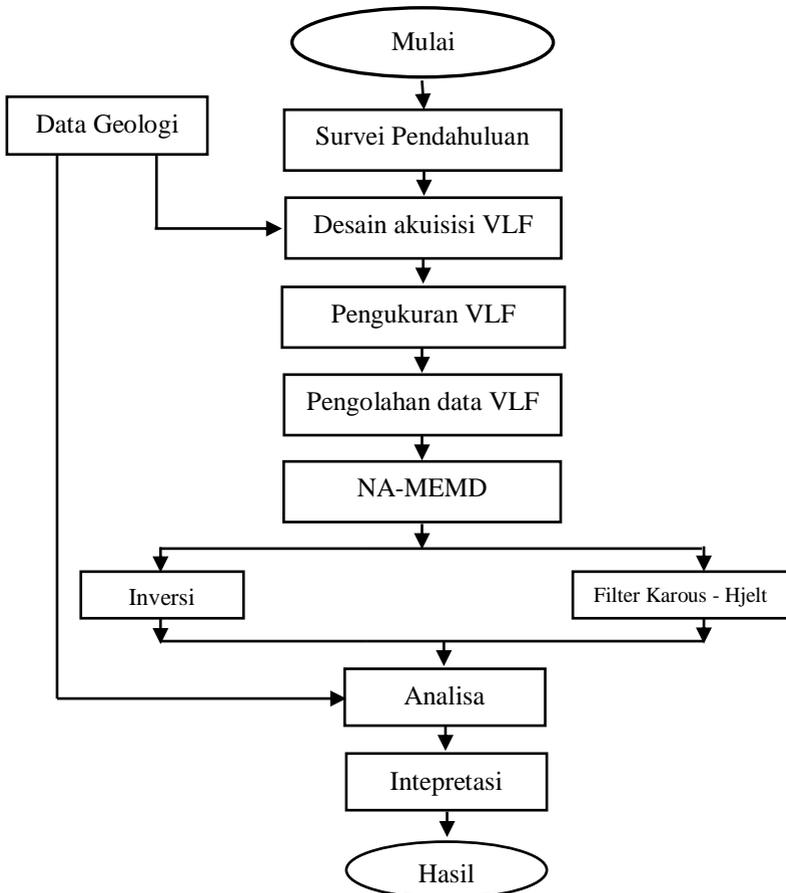
Timur daerah penelitian atau di bagian lereng paling bawah Gunung Penanggungan sampai daerah dataran sepanjang alur sungai utama pada daerah pemetaan. (Pratiknyo,2016)

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir penelitian Tugas Akhir ini:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan penjelasan singkat dari diagram alir secara singkat.

1. Survei Pendahuluan

Dilakukan studi dan survey pendahuluan berupa studi geologi regional daerah penelitian serta studi literatur yang terkait dengan penelitian ini. Studi literatur berupa pengumpulan sumber-sumber sitasi dan peta geologi regional yang akan digunakan pada penelitian.

Adapun survei pendahuluan ke daerah penelitian dilakukan guna mengetahui kondisi lapangan sebelum dilakukan pengukuran. Kondisi lapangan penting untuk menentukan desain akuisisi yang digunakan sehingga mendapatkan hasil data yang diinginkan

2. Desain akuisisi

Penentuan titik pengukuran serta jumlah lintasan yang dibutuhkan dimana keduanya disesuaikan dengan keadaan di lapangan. Selain itu arah pengukuran yang diambil harus tegak lurus dengan arah aliran (arah target) sehingga dapat memetakan target anomaly secara maksimal. Dalam hal ini, dilakukan pengukuran dengan jumlah 6 lintasan dimana lintasan 2, 3, 4, dan 5 tegak lurus terhadap arah aliran. Sementara lintasan 1 digunakan untuk meng-cover data dari keempat lintasan yang tegak lurus dengan arah aliran. Adapun lintasan 6 di diambil sebagai perbandingan antara data VLF dan geolistrik yang diambil secara bersamaan.

3. Pengukuran VLF seperti yang dijelaskan pada Sub Bab 3.2

4. Pengolahan data

Pengolahan data awal dilakukan dengan melakukan *filtering* menggunakan *filter* NA-MEMD dengan tujuan untuk melakukan *smoothing* pada data yang telah diperoleh. Hal ini dikarenakan data hasil pengukuran masih bercampur dengan noise sehingga harus dilakukan *filtering* untuk mendapatkan tren data yang baik

Pengolahan selanjutnya dibagi menjadi 2 yakni secara kualitatif dan kuantitatif dimana pengolahan secara kualitatif dilakukan dengan menggunakan filter Karous-Hjelt sementara pengolahan kuantitatif dilakukan dengan melakukan inversi. Pengolahan kualitatif bertujuan untuk mengetahui posisi dan kedalaman anomaly sebelum dilakukan pengolahan dengan menggunakan inversi. Adapun inversi dilakukan untuk memvalidkan data hasil pengolahan secara kualitatif. Inversi yang dilakukan berupa inversi menggunakan algoritma Lavernberg Marquardt-Fletcher dimana algoritma ini bekerja dengan cara menggunakan data yang telah ada pada titik tertentu dan pada titik sebelumnya untuk menentukan nilai pada titik selanjutnya.

5. Analisa dan interpretasi

Dilakukan untuk mendapatkan informasi dari penampang hasil pengolahan. Data geologi juga diperlukan untuk menghindari kesalahan interpretasi yang bisa saja tidak sesuai dengan kondisi geologi di lapangan.

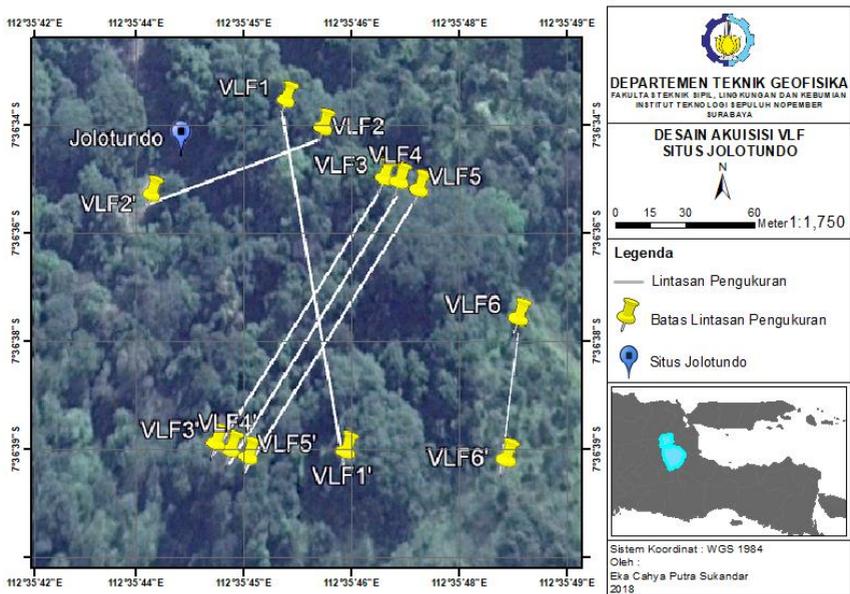
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan pada 24-26 Maret 2018. Akuisisi data VLF berlokasi di Situs Petirraan Jolotundo, Trawas, Mojokerto.

Berikut desain akuisisi pengukuran serta detail tiap lintasan:

Tabel 2 Detail akuisisi tiap lintasan

	VLF 1	VLF 2	VLF3	VLF 4	VLF 5	VLF 6
Panjang Lintasan (m)	195	44	160	145	145	66
Jumlah Datum	40	45	33	30	30	45



Gambar 3. 2Desain Akuisisi Data

3.3. Timeline Pekerjaan

Tabel 3 Timeline Pekerjaan

No	Kegiatan	Minggu ke -							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Orientasi Medan	■							
2	Studi Literatur	■	■						
3	Akuisisi Data			■					
4	Pengolahan Data			■	■	■	■		
5	Penyusunan Laporan					■	■	■	
6	Asistensi dan Revisi						■	■	
7	Pembuatan Presentasi								■

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

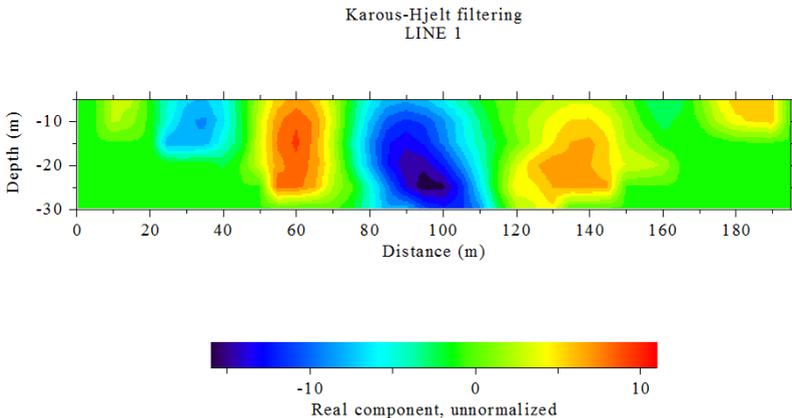
Telah dilakukan pengukuran VLF dengan spasi masing-masing lintasan VLF 1, 3, 4, dan 5 spasi 5 meter, lintasan VLF 2 spasi 1 meter, serta lintasan VLF 6 dengan spasi 1,5 meter dengan target hidrogeologi dari kawasan sekitar Situs Petirtaan Jolotundo.

Pengolahan data yang telah diperoleh dilakukan dengan menggunakan software MatLab, Inv2DVLF, serta *software* Karous-Hjelt-Fraser *Filter*. Pengolahan dilakukan untuk mendapatkan nilai resistivitas dan konduktivitas dari material di bawah permukaan. Parameter inilah yang selanjutnya digunakan untuk menentukan arah aliran dan hidrogeologi dari daerah penelitian.

4.2 Analisa Hasil

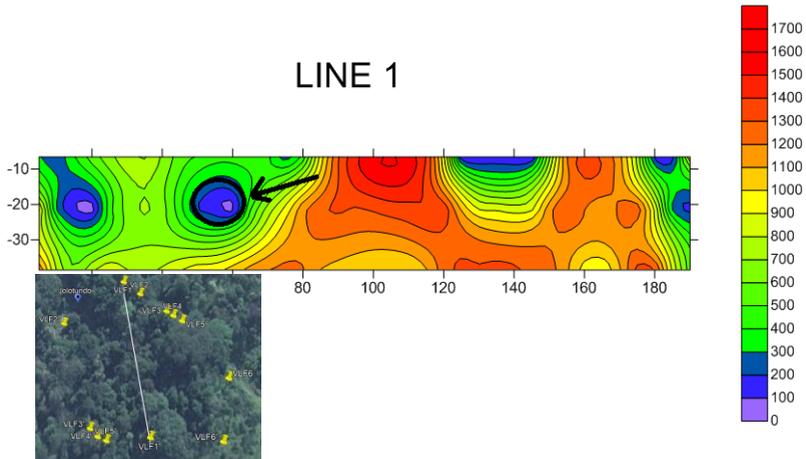
4.2.1 Analisa Lintasan VLF 1

Lintasan VLF 1 sepanjang 200 meter diukur pada tanggal 24 Maret 2018 dengan kondisi lingkungan berupa hutan pegunungan. Lintasan ini memiliki arah pengukuran selatan-utara dengan jarak antar titik sebesar 5 meter. Titik awal pengukuran berada pada koordinat 676082 E, 9158521 N UTM dan titik akhir berada pada koordinat 676108 E, 9158371 N UTM



Gambar 4. 1 Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 1

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature. Frekuensi yang digunakan yakni 19800 Hz dan diolah menggunakan *software* KHjelt untuk memperoleh kenampakan penampang 2D hasil *filter* Karous Hjelt. Dari gambar 4.1 terlihat bahwa anomali yang bersifat konduktif (yang memiliki konduktivitas tinggi) berada pada meter ke 60.



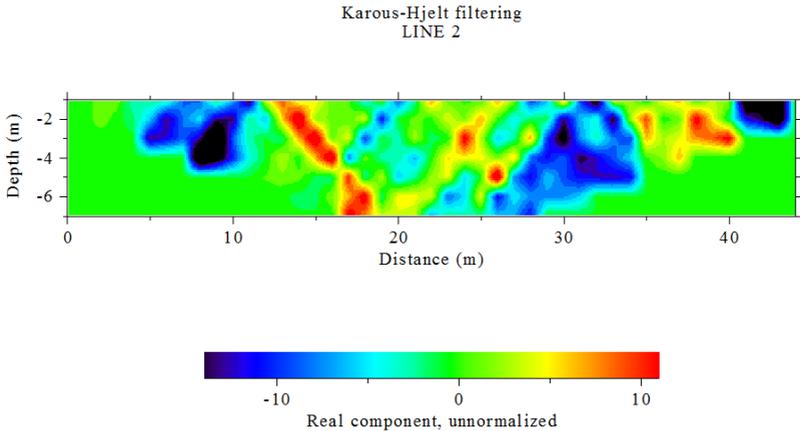
Gambar 4. 2Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 1

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature yang sebelumnya telah dilakukan proses *filtering* menggunakan filter NA-MEMD. Jumlah iterasi yang digunakan sebanyak 50 kali dengan resistivitas awal model sebesar 1000 Ohm.meter yang diperoleh dari pengukuran menggunakan metode geolistrik. Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa terdapat 3 zona dengan warna biru yang menandakan zona tersebut memiliki resistivitas rendah. Zona tersebut tersebar pada meter ke 20 dengan kedalaman 15-25 meter, meter ke 60 dengan kedalaman 15-25 meter, serta meter ke 120-150 pada kedalaman kurang dari 10 meter. Adapun dengan mempertimbangkan penampang rapat arus hasil filter Karous Hjelt, dimana hanya pada meter ke 60 yang memiliki konduktivitas tinggi, maka zona warna biru pada meter ke 60 yang diduga sebagai akuifer air. Resistivitas dari zona tersebut memiliki nilai kurang dari 10 Ohm.meter yang termasuk dalam skala resistivitas dari air.

4.2.2 Analisa Lintasan VLF 2

Lintasan VLF 2 sepanjang 45 meter diukur pada tanggal 25 Maret 2018 dengan kondisi lingkungan berupa hutan pegunungan. Lintasan ini memiliki

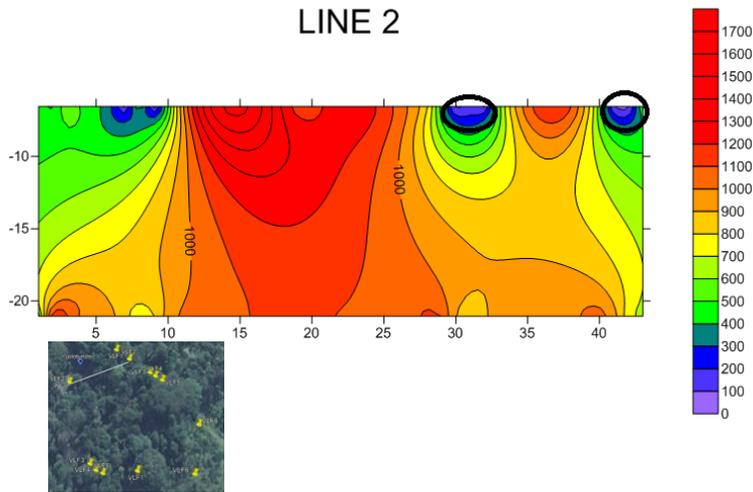
arah pengukuran barat daya – timur laut dengan jarak antar titik sebesar 1 meter. Titik awal pengukuran berada pada koordinat 676100 E, 9158507 N UTM dan titik akhir berada pada koordinat 676015 E, 9158477 N UTM



Gambar 4. 3Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 2

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature. Frekuensi yang digunakan yakni 19800 Hz dan diolah menggunakan *software* KHjelt untuk memperoleh kenampakan penampang 2D hasil *filter* Karous Hjelt.

Dari gambar 4.3 terlihat bahwa anomaly yang bersifat konduktif (yang memiliki konduktivitas tinggi) berada pada meter ke 10-20 serta 35-40

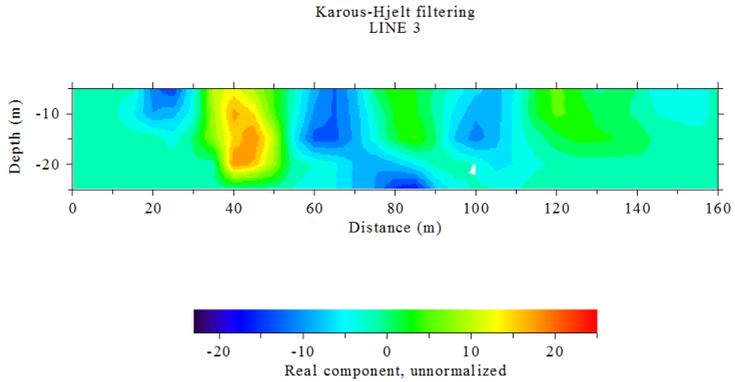


Gambar 4. 4 Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 2

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature yang sebelumnya telah dilakukan proses *filtering* menggunakan filter NA-MEMD. Jumlah iterasi yang digunakan sebanyak 50 kali dengan resistivitas awal model sebesar 1000 Ohm.meter yang diperoleh dari pengukuran menggunakan metode geolistrik. Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa terdapat 3 zona dengan warna biru yang menandakan zona tersebut memiliki resistivitas rendah yang dapat diinterpretasikan sebagai zona jenuh air. Zona tersebut tersebar pada meter ke 0-10, meter ke 30, serta meter ke 40-45 dengan kedalaman 0-10 meter. Resistivitas dari ketiga zona tersebut memiliki nilai kurang dari 100 Ohm.meter yang termasuk dalam skala resistivitas dari air.

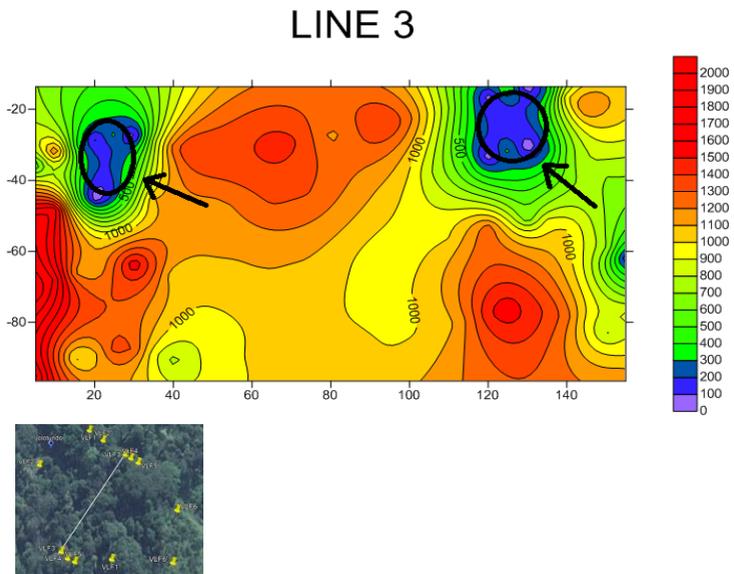
4.2.3 Analisa Lintasan VLF 3

Lintasan VLF 3 sepanjang 160 meter diukur pada tanggal 25 Maret 2018 dengan kondisi lingkungan berupa hutan pegunungan. Lintasan ini memiliki arah pengukuran barat daya – timur laut dengan jarak antar titik sebesar 5 meter. Titik awal pengukuran berada pada koordinat 676128 E, 9158487 N UTM dan titik akhir berada pada koordinat 676040 E, 9158354 N UTM



Gambar 4. 5 Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 3

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature. Frekuensi yang digunakan yakni 19800 Hz dan diolah menggunakan *software* KHjelt untuk memperoleh kenampakan penampang 2D hasil *filter* Karous Hjelt. Dari gambar 4.5 terlihat bahwa anomali yang bersifat konduktif (yang berwarna merah dan kuning) berada pada meter ke 40 serta 120-140

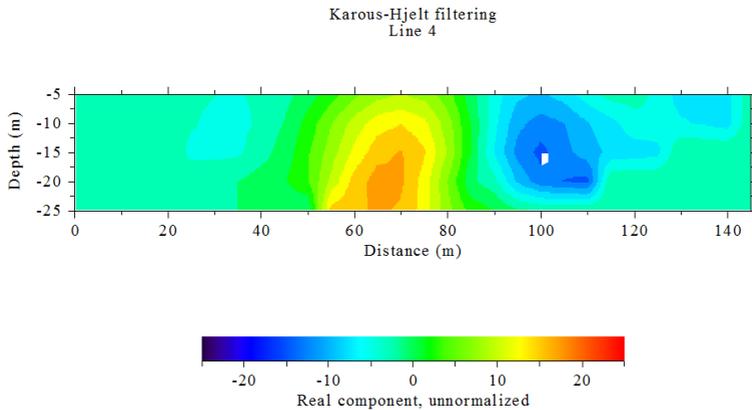


Gambar 4. 6 Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 3

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature yang sebelumnya telah dilakukan proses *filtering* menggunakan filter NA-MEMD. Jumlah iterasi yang digunakan sebanyak 50 kali dengan resistivitas awal model sebesar 1000 Ohm.meter yang diperoleh dari pengukuran menggunakan metode geolistrik. Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa terdapat 2 zona dengan warna biru yang menandakan zona tersebut memiliki resistivitas rendah. Zona tersebut tersebar pada meter ke 20-40serta meter ke 120-140 dengan kedalaman kurang dari 40 meter. Resistivitas dari kedua zona tersebut memiliki nilai kurang dari 100 Ohm.meter. Kedua zona tersebut diindikasikan sebagai zona jenuh air atau akuifer air dimana indikasi ini didukung dengan hasil penampang rapat arus yang menunjukkan zona tersebut memiliki rapat arus yang tinggi.

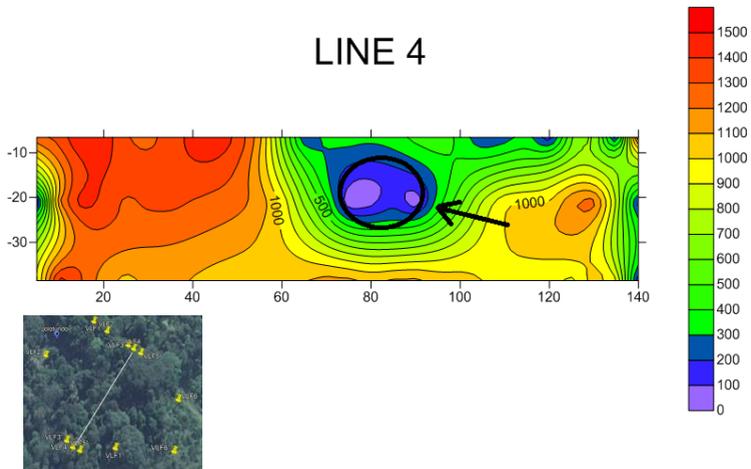
4.2.4 Analisa Lintasan VLF 4

Lintasan VLF 4 sepanjang 145 meter diukur pada tanggal 25 Maret 2018 dengan kondisi lingkungan berupa hutan pegunungan. Lintasan ini memiliki arah pengukuran barat daya – timur laut dengan jarak antar titik sebesar 5 meter. Titik awal pengukuran berada pada koordinat 676135 E, 9158482 N UTM dan titik akhir berada pada koordinat 676057 E, 9158361 N UTM



Gambar 4. 7Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 4

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature. Frekuensi yang digunakan yakni 19800 Hz dan diolah menggunakan *software* KHjelt untuk memperoleh kenampakan penampang 2D hasil *filter* Karous Hjelt. Dari gambar 4.7 terlihat bahwa anomali yang bersifat konduktif (berwarna kuning-merah) berada pada meter ke 60-80.

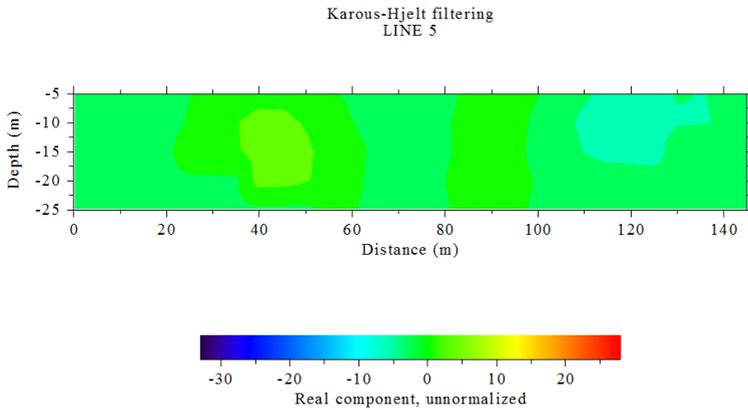


Gambar 4. 8 Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 4

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature yang sebelumnya telah dilakukan proses *filtering* menggunakan filter NA-MEMD. Jumlah iterasi yang digunakan sebanyak 50 kali dengan resistivitas awal model sebesar 1000 Ohm.meter yang diperoleh dari pengukuran menggunakan metode geolistrik. Dari Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa terdapat zona dengan warna biru yang menandakan zona tersebut memiliki resistivitas rendah. Zona tersebut tersebar pada meter ke 60-80 dengan kedalaman 10-25 meter. Resistivitas dari zona tersebut memiliki nilai kurang dari 100 Ohm.meter. Zona ini diduga sebagai akuifer air.

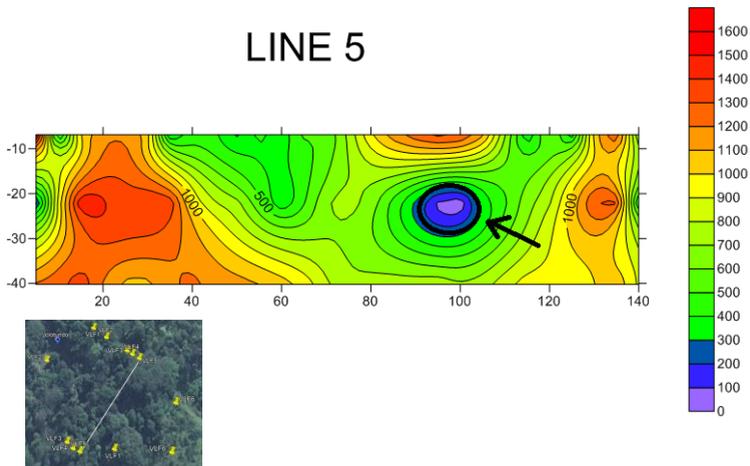
4.2.5 Analisa Lintasan VLF 5

Lintasan VLF 5 sepanjang 145 meter diukur pada tanggal 26 Maret 2018 dengan kondisi lingkungan berupa hutan pegunungan. Lintasan ini memiliki arah pengukuran barat daya – timur laut dengan jarak antar titik sebesar 5 meter. Titik awal pengukuran berada pada koordinat 676144 E, 9158476 N UTM dan titik akhir berada pada koordinat 676066 E, 9158357 N UTM



Gambar 4. 9 Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 5

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature. Frekuensi yang digunakan yakni 18200 Hz dan diolah menggunakan *software* KHjelt untuk memperoleh kenampakan penampang 2D hasil *filter* Karous Hjelt. Dari gambar 4.9 terlihat bahwa anomali yang bersifat konduktif berada pada meter ke 90-100

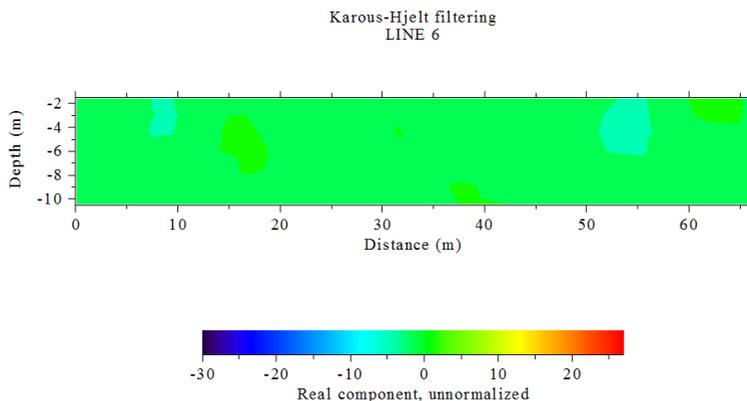


Gambar 4. 10 Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 5

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature yang sebelumnya telah dilakukan proses *filtering* menggunakan filter NA-MEMD. Jumlah iterasi yang digunakan sebanyak 50 kali dengan resistivitas awal model sebesar 1000 Ohm.meter yang diperoleh dari pengukuran menggunakan metode geolistrik. Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa terdapat satu zona dengan warna biru yang menandakan zona tersebut memiliki resistivitas rendah. Zona tersebut terletak pada meter ke 90-100 pada kedalaman 20-30 meter. Resistivitas dari zona tersebut memiliki nilai kurang dari 100 Ohm.meter. Pemodelan ini sesuai dengan pemodelan hasil pengukuran geolistrik dimana letak zona jenuh air sama dengan letak dari gambar di atas.

4.2.6 Analisa Lintasan VLF 6

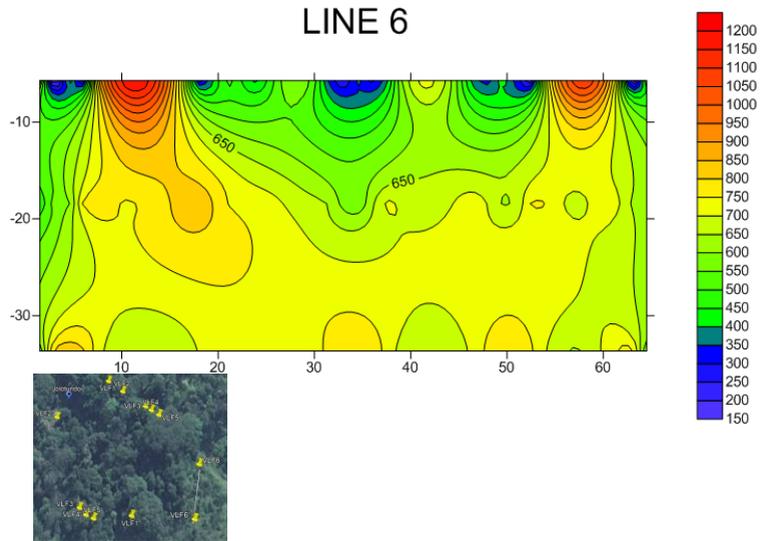
Lintasan VLF 6 sepanjang 66 meter diukur pada tanggal 26 Maret 2018 dengan kondisi lingkungan berupa hutan pegunungan. Lintasan ini memiliki arah pengukuran barat daya – timur laut dengan jarak antar titik sebesar 1,5 meter. Titik awal pengukuran berada pada koordinat 676188 E, 9158417 N UTM dan titik akhir berada pada koordinat 676181 E, 9158356 N UTM



Gambar 4. 11 Hasil Filter Karous Hjelt Lintasan VLF 6

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature. Frekuensi yang digunakan yakni 18200 Hz dan diolah menggunakan *software* KHjelt untuk memperoleh kenampakan penampang 2D hasil *filter* Karous Hjelt.

Dari gambar 4.11 terlihat bahwa anomaly yang bersifat konduktif (yang memiliki konduktivitas tinggi) berada pada meter ke 25

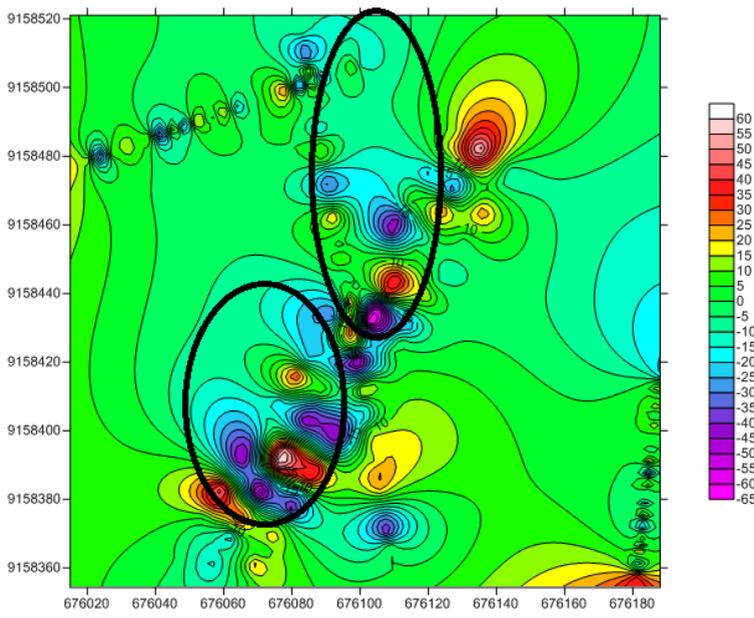


Gambar 4. 12 Penampang Hasil Inversi Lintasan VLF 6

Data yang digunakan berupa data Inphase dan Quadrature yang sebelumnya telah dilakukan proses *filtering* menggunakan filter NA-MEMD. Jumlah iterasi yang digunakan sebanyak 50 kali dengan resistivitas awal model sebesar 1000 Ohm.meter yang diperoleh dari pengukuran menggunakan metode geolistrik. Dari Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 tidak terlihat zona yang jenuh air karena meskipun pada penampang hasil inverse menunjukkan anomali resistivitas rendah, namun tidak diikuti oleh peta penampang rapat arusnya yang malah tidak menunjukkan zona tersebut bersifat konduktif.

4.2.7 Penentuan Aliran Air Tanah Menggunakan Peta Fraser

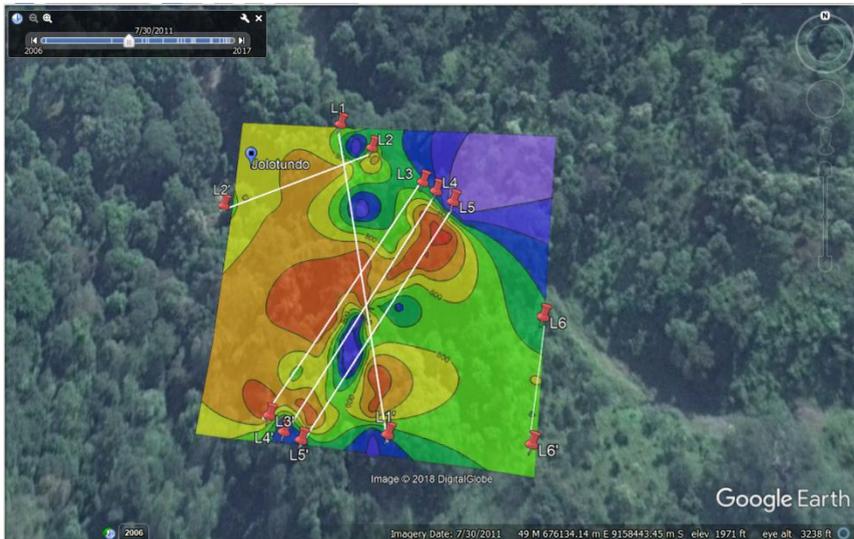
Penentuan arah aliran air tanah dapat dilakukan dengan menggunakan peta filter fraser. Peta ini digunakan sebagai interpretasi kualitatif sebelum dilakukannya pengolahan inversi.



Gambar 4. 13 Peta Fraser

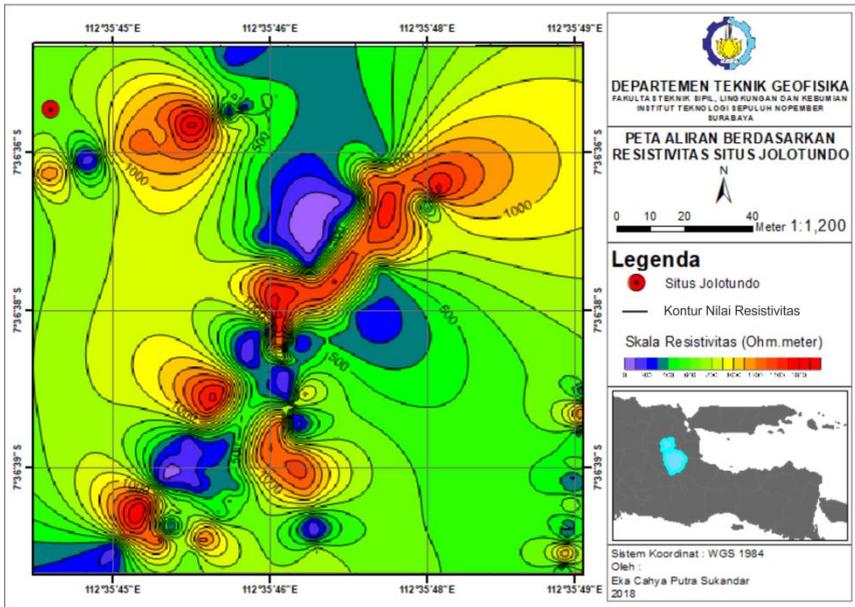
Dari gambar4.13 dapat dilihat bahwa terdapat 2 zona yang diperkirakan merupakan jalur aliran air menuju kolam petirraan Jolotundo yang ditunjukkan dengan bagian peta yang dilingkari.

4.2.8 Korelasi Hasil Inversi Tiap Lintasan Pada Kedalaman 6 dan 22 Meter



Gambar 4. 14Peta Korelasi kedalaman 22 Meter

Adapun pada gambar 4.15 dengan kedalaman 22 meter, sudah tidak terlihat jelas arah aliran pada tiap lintasan, terutama lintasan ke dua. Hal ini disebabkan oleh keberadaan air tanah yang memang dekat dengan permukaan sehingga pada kedalaman 22 meter, sudah tidak terlihat lagi arah alirannya dengan jelas.



Gambar 4. 15Peta Korelasi Kedalaman 6 Meter

Dari gambar 4.14 di atas, dapat dilihat terdapat 3 zona lingkaran dengan dua anak panah. Anak panah menunjukkan dugaan arah aliran air. Anak panah sebelah kanan merupakan aliran air yang mengalir sejajar sepanjang lintasan 1, sementara panah sebelah kiri merupakan aliran air yang mengalir dari lintasan 3, 4, dan 5 menuju lintasan 2 dan langsung mengalir ke petirtaan Jolotundo. Adapun ketidakmenerusan zona dengan warna biru pada aliran sebelah kiri disebabkan tidak adanya data yang terukur pada ruang antara lintasan 2 dan 3. Hal ini disebabkan kondisi medan yang tidak memungkinkan untuk dilakukan pengukuran dikarenakan merupakan jurang.

4.3 Sistem Hidrogeologi Jolotundo

Lokasi penelitian berada pada formasi batuan gunung api kuartar atas yang terbentuk pada zaman plistosen akhir hingga holosen. Formasi ini mencakup wilayah Gunung Penanggungan dan Gunung Panderman yang berada dalam satu wilayah. Batuan penyusun formasi tersebut terdiri atas batuan breksi gunung api, tuf, breksi tufan, dan aglomerat.

Dalam mengidentifikasi sistem hidrogeologi wilayah penelitian, digunakan fisika berupa metode VLF. Metode VLF dipilih karena dianggap dapat membantu mengidentifikasi keberadaan aliran air dengan baik. Selain itu,

penggunaan metode VLF untuk mengidentifikasi akuifer dan aliran air telah digunakan untuk mendeteksi keberadaan akuifer pada studi kasus serupa yakni pada batuan vulkanik yang berada pada wilayah Tenggara pulau Aegina (Area Perdika), Yunani.

Pengolahan data dilakukan dengan dua cara yakni inversi menggunakan *software* Inv2DVLF yang sebelumnya telah dilakukan *filtering* menggunakan *filter* NA-MEMD serta pengolahan ke dua menggunakan *software* Karous Hjelt. Berdasarkan peta penampang hasil inversi tiap lintasan VLF dapat diidentifikasi zona aliran fluida, dalam hal ini air, serta batuan yang terdapat di bawah permukaan berdasarkan warna pada peta. Skala warna dimulai dari biru hingga merah dimana zona dengan warna biru menandakan zona dengan resistivitas rendah yang dapat diindikasikan sebagai zona jenuh air. Zona inilah yang menjadi target penelitian untuk diketahui arah alirannya. Seperti diketahui bahwa air memiliki konduktivitas tinggi, sementara konduktivitas berbanding terbalik dengan resistivitas, sehingga air memiliki resistivitas rendah. Sementara zona dengan warna merah merupakan zona dengan resistivitas tinggi yang dapat diindikasikan bahwa tersusun atas batuan yang keras.

Adapun dari korelasi antar lintasan diperoleh peta persebaran zona jenuh air yang digunakan untuk menentukan arah aliran air. Dilihat dari skala warna yang ada, zona berwarna biru yang merupakan zona yang diindikasikan jenuh air memiliki resistivitas sebesar 0 – 10 Ohm.meter. Adapun zona dengan warna merah dapat diinterpretasikan dengan zona yang terbentuk dari batuan keras, dalam hal ini batuan beku yang diindikasikan batuan andesit, yang memiliki nilai resistivitas tinggi. Dugaan ini diperkuat oleh keadaan di lapangan dimana area pengukuran merupakan wilayah pegunungan yang tersusun atas batuan vulkanik.

Sistem hidrogeologi dari Situs Petirtaan Jolotundo terdiri atas akuifer yang letaknya cukup dalam, dengan kedalaman berkisar 20 meter. Adapun batuan penyusun sistem hidrogeologi daerah penelitian terdiri atas batuan tuff dan aglomerat. Batuan aglomerat berfungsi sebagai batuan penyusun akuifer dari sistem hidrogeologi, Hal ini disebabkan batuan aglomerat memiliki porositas dan permeabilitas yang baik. Sedangkan batuan tuff berfungsi sebagai lapisan kedap yang menjebak air sehingga tidak keluar dari akuifer. Hal ini disebabkan properti batuan tuff yang mirip dengan properti batu lempung dimana keduanya sama-sama memiliki porositas tinggi namun permeabilitasnya sangat rendah. Akibatnya air bisa masuk ke batuan tersebut, namun tidak dapat teralirkan ke luar. Ketebalan akuifer berkisar antara 5 hingga 20 meter.

Dari Gambar 4.15, arah aliran air secara garis besar terdiri atas 2 aliran dengan arah barat laut – tenggara. Aliran pertama terletak sepanjang line 1, sementara aliran ke dua terletak pada titik ke 70-100 meter dari line 3, 4, dan 5

dengan kedalaman sekitar 20 meter serta pada titik ke 30-45 meter dari lintasan 2. Hal ini juga dikuatkan dengan posisi dari sumber air jolotundo yang tepat berada di bawah dari titik ke 30-45 meter pada lintasan ke 2.

Namun pada aliran ke dua, pemodelan inversi kurang dapat mendetil dikarenakan spasi antar lintasan cukup jauh. Jauhnya spasi ini disebabkan karena medan yang merupakan jurang sehingga tidak dapat diukur. Adapun kedalaman dari aliran pertama berkisar antara 10 meter sementara kedalaman aliran ke dua kurang dari 6 meter. Adapun tren kedalaman pada aliran ke dua adalah semakin ke arah bawah semakin mendekati permukaan.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa diindikasikan terdapat 2 aliran air sebagai bagian dari sistem hidrogeologi candi dan petirtaan Jolotundo dengan arah aliran tenggara-barat laut pada kedalaman berkisar 20 meter yang dikuatkan dengan adanya 2 pola garis hasil integrasi antar lintasan pada daerah penelitian dengan nilai resistivitas sebesar 1-10 Ohm.meter.

5.2 Saran

Untuk menindaklanjuti penelitian ini, penulis meyarankan untuk dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan metode VLF untuk mencakup wilayah anomali dan wilayah yang belum tercakup dalam penelitian ini. Selain itu, spasi antar titik dan antar lintasan dapat dibuat lebih rapat untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

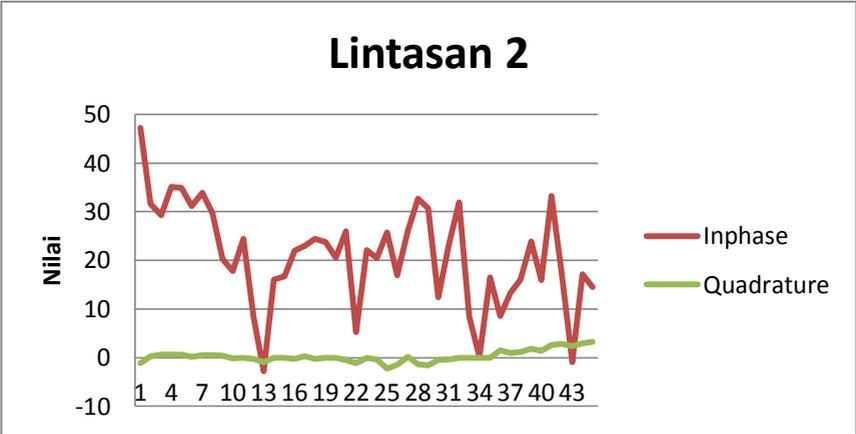
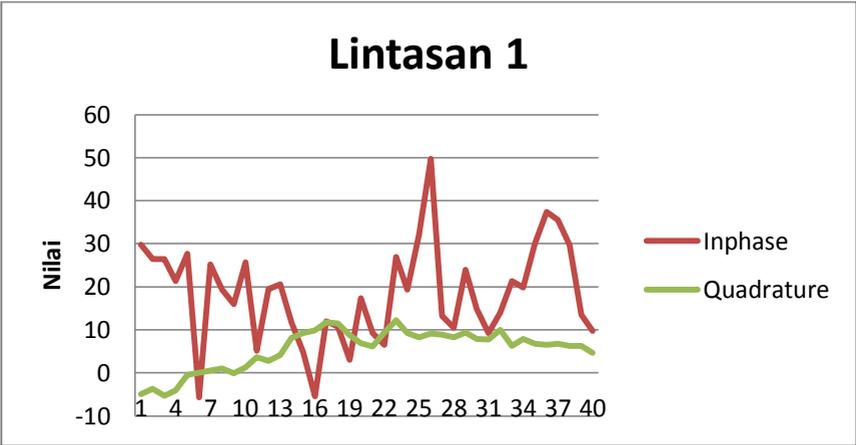
DAFTAR PUSTAKA

- Bahri, A. S., 2011. *Pemetaan Potensi Air Bawah Permukaan di Daerah Karst (Studi Kasus: Kabupaten Pacitan)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Bappeda., 2014. *Potensi Kabupaten dan Kota Mojokerto*. [Online] Terdapat pada: <http://bappeda.jatimprov.go.id/bappeda/wp-content/uploads/potensi-kab-kota-2013/kab-mojokerto-2013.pdf> [Diakses 23 Januari 2018].
- Bemmelen, R. W., 1949. *The Geology of Indonesia, Vol. 1A*. The Hague: Gov. Printed Offices.
- Bosch, F. P., & Muller, I., 2001. *Continuous Gradient VLF Measurements: A New Possibility For High Resolution Mapping Of Karst Structures*. First Break , 343-350.
- Boubekraoui, S., Courteaud, M., Aubert, M., & Coudray, J., 1998. *New Insights into the Hydrogeology of a Basaltic Shield Volcano from a Comparison between Self-Potential and Electromagnetic Data: Piton de la Fournaise, Indian Ocean*. Journal of Applied Geophysics , 165-177.
- Connor, C., Sanford, W. E., & MacNeil, R., 2005. *Geophysical Investigations of Volcano Hydrogeology at Masaya Caldera, Nicaragua*.
- Fraser, D. C. *Contouring of VLF-EM Data*.
- Hilyah, A., & Rochman, J. P. G., 2016. *Penerapan Metode Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) untuk Mendeteksi Rekahan Pada Daerah Tanggulangin, Sidoarjo*. Research gate , 131.
- Katili, J. A., 1989. *Geologi Indonesia*. Jakarta: Ikatan Ahli Geologi Indonesia.
- Nurwidyanto, M. I., Yustiana, M., & Widada, S., 2006. *Pengaruh ukuran butir terhadap porositas dan permeabilitas pada batu pasir*. Semarang: Jurnal Berkala Fisika Universitas Diponegoro.
- Paal, G. *Ore prospecting based on VLF radio signal. Geoexploration*.

- Papadopoulos, T. D., Stournaras, G., & Alexopoulos, J. D., 2010. *Geophysical investigation for aquifer detection in fissured rocks of volcanic origin. A case history*. Yunani: Journal of The Balkan Geophysical Society
- Pratiknyo, P. (2016). *Hidrogeologi Kawasan Cagar Budaya Gunung Penanggungan*. Yogyakarta: JIK TekMin, Volume 28 Nomor 1.
- Rahmat, Setiawan, R., & Purnomo, M. H., 2006. *Perbandingan Algoritma Lavenberg-Marquardt dengan Metode Backpropagation pada Proses Learning Jaringan Syaraf Tiruan untuk Pengenalan Pola Sinyal Elektrokardiograf*. Yogyakarta: Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi , 30.
- Rios-Sanchez, M., Gierke, J. S., & Munoz-Martinez, T., 2012. *Hydrogeological Characterization of the Plateaus Region of the Quito Aquifer System Using Remote Sensing, Digital Geomorphology, and Geophysics*. Conference: World Environmental and Water Resources Congress .
- W.M. Telford, L. P., 2012. *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Yadi, K., Warnana, D. D., Rohman, J. P., Sutra, N., & Soemitro, R. A., 2017. *Deteksi Persebaran Air Lindi Menggunakan Inversi VLF-EM Studi Kasus TPA Ngipik*. Surabaya: Geosaintek .

LAMPIRAN

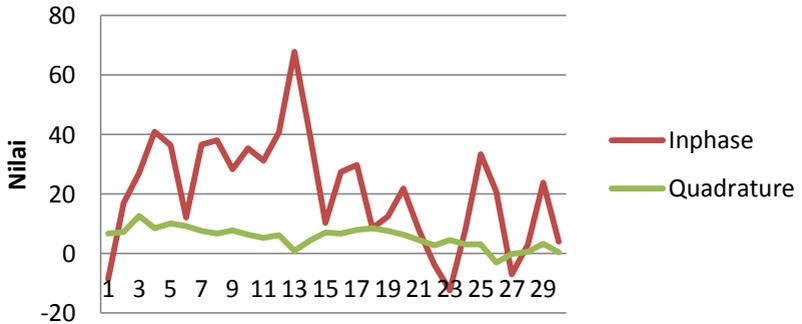
Data



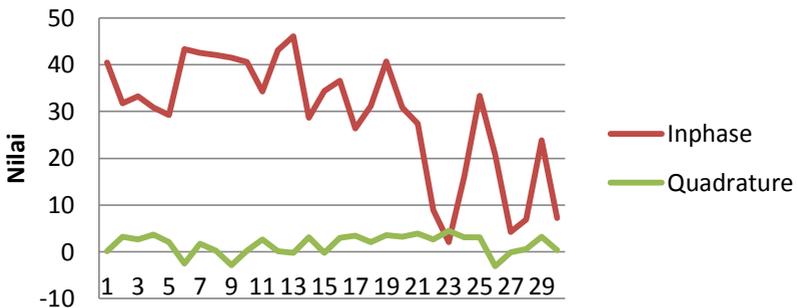
Lintasan 3



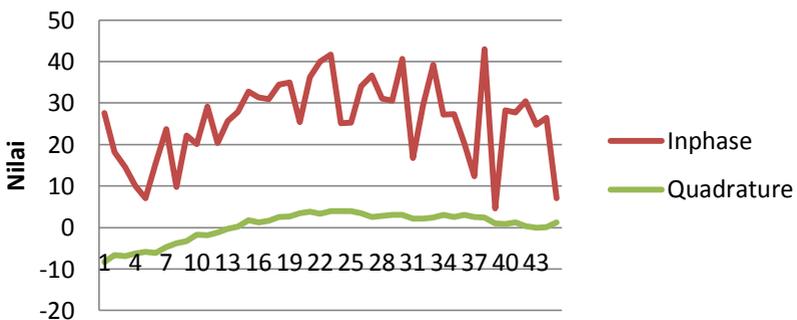
Lintasan 4



Lintasan 5



Lintasan 6



Tabel Resistivitas

Material	Resistivity ($\Omega \cdot m$)	Conductivity (Siemen/m)
Igneous and Metamorphic Rocks		
Granite	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalt	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Quartzite	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Sedimentary Rocks		
Sandstone	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Shale	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Limestone	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
Soils and waters		
Clay	1 - 100	0.01 - 1
Alluvium	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Groundwater (fresh)	10 - 100	0.01 - 0.1
Sea water	0.2	5
Chemicals		
Iron	9.074×10^{-8}	1.102×10^7
0.01 M Potassium chloride	0.708	1.413
0.01 M Sodium chloride	0.843	1.185
0.01 M acetic acid	6.13	0.163
Xylene	6.998×10^{16}	1.429×10^{-17}

Tabel Resistivitas Material (Telford, 1990)

Lokasi Penelitian



Proses pembukaan jalur pengukuran





BIOGRAFI PENULIS



Eka Cahya Putra Sukandar lahir di Mojokerto pada tanggal 28Maret 1996. Pendidikan yang ditempuh penulis yaitu SDN Watesnegoro 2, SMPN 1Ngoro dan SMAN 1Pandaan. Setelah lulus dari pendidikan menengah atas, penulis melanjutkan pendidikan di Teknik Geofisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2014. Selama perkuliahan, penulis mengikuti kegiatan kemahasiswaan antara lain sebagai Staff Departemen Riset dan Teknologi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika ITS pada 2015. Kemudian, pada tahun 2016 penulis menjadi Kadiv di Departemen Riset dan Teknologi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika ITS.