



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – RF141501

**PEMETAAN POTENSI *SINKHOLE* DENGAN METODE VLF-EM
(STUDI KASUS : PROYEK BENDUNGAN PENGENDALI AIR DAERAH
BANYULANGSE, TUBAN)**

YOGIC WAHYU RHAMADIANTO
NRP. 03411640000023

Dosen Pembimbing I :
Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T.
NIP. 19890612 201504 1 003

Dosen Pembimbing II :
Dr.Dwa Desa Warnana
NIP. 19760123 200003 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – RF 184838

PEMETAAN POTENSI *SINKHOLE* DENGAN METODE VLF-EM (STUDI KASUS : PROYEK BENDUNGAN PENGENDALI AIR DAERAH BANYULANGSE, TUBAN)

YOGIC WAHYU RHAMADIANTO
NRP. 0341164000023

DOSEN PEMBIMBING I :
Juan Pandu G.N.R, S.Si, M.T
NIP. 19890612 201504 1 003

DOSEN PEMBIMBING II :
Dr. Dwa Desa Warnana
NIP. 19760123 200003 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “Pemetaan Potensi *Sinkhole* dengan metode VLF-EM (Studi Kasus : Proyek Bendungan Pengendali Air Daerah Banyuwangi)” merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip telah ditulis lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 19 Juni 2020



Yogic Wahyu Rhamadianto
NRP. 0341164000023

Halaman ini sengaja dikosongkan

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR

Tugas akhir ini diajukan oleh

Nama : Yogic Wahyu Rhamadianto
NRP : 03411640000023
Departemen : Teknik Geofisika
Judul Tugas Akhir : Pemetaan Potensi *Sinkhole* dengan Metode VLF-EM (Studi Kasus : Proyek Bendungan Pengendali Sungai Banyulangse, Tuban)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan tim penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 30 Juli 2020

1.  (Pembimbing I)

Juan Pandu Gya Nur Rochman S.Si, M.T.,

NIP. 19890612 201504 1 003

2.  (Pembimbing II)

Dr. Dwa Desa Warnana

NIP. 19760123 200003 1 001

3.  (Penguji I)

M. Haris Miftakhul Fajar, S.T., M.Eng.

NIP. 19890208 201803 1 001

4.  (Penguji II)

Wien Lestari, ST., M.T.

NIP. 19811002 201212 2 003

Menyetujui,
Kepala Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember



Dr. Dwa Desa Warnana
NIP. 19760123 200003 1 001

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PEMETAAN POTENSI *SINKHOLE* DENGAN METODE VLF-EM
(STUDI KASUS : PROYEK BENDUNGAN PENGENDALI AIR
DAERAH BANYULANGSE, TUBAN)**

Nama Mahasiswa : Yogic Wahyu Rhamadianto
NRP : 0341164000023
Departemen : Teknik Geofisika ITS
Dosen Pembimbing I : Juan Pandu G.N.R, S.Si, M.T.
Dosen Pembimbing II : Dr.Dwa Desa Warnana

ABSTRAK

Kabupaten Tuban terletak di sisi Pantai Utara Jawa yang didominasi lingkungan pengendapan laut dangkal. Di beberapa area tertentu, terbentuk *karst* atau kompleks batukapur. Dalam waktu dekat, akan dibangun bendungan pengendali yang berlokasi di Banyulangse, Kecamatan Semanding. Bendungan ini memanfaatkan *karst* yang mengelilingi sungai sebagai penahan alami. Namun *karst* memiliki karakteristik yang mudah tererosi dan bereaksi oleh zat kimia terutama air sehingga kemungkinan besar terdapat *sinkhole* atau lubang bawah permukaan. Hal ini menjadi problematika ketika bendungan beroperasi nanti terutama saat debit air mencapai puncaknya. Untuk menangani hal tersebut, dilakukan pemetaan awal kondisi bawah permukaan area Banyulangse. Salah satu metode yang sesuai dengan alokasi medan adalah metode VLF-EM. Dengan sifatnya yang *mobile* dan *rapid*, metode VLF-EM dapat memetakan zona potensi *sinkhole* berdasarkan parameter konduktivitas yang dimiliki tanpa bantuan medium dan injeksi sumber energi. Lintasan akuisisi sebanyak 5 buah sepanjang 500-515 meter mengikuti aliran sungai dan 1 buah sepanjang 220 meter yang memotong sungai di ujung area pengukuran. Dari pengolahan data *tipper*, menjadi model kualitatif dan kuantitatif, diperoleh titik dugaan *sinkhole* berisi air dengan resistivitas 100-300 Ω .m dan berisi udara dengan resistivitas 550-650 Ω .m. *Sinkhole* berisi air terlihat pada lintasan 1 *offset* 100-200 meter dan kedalaman 45-50 meter, lintasan 4 pada *offset* 50-150 meter dan kedalaman 50-150 meter dan pada *offset* 440 meter dan kedalaman 45 meter. Sedangkan *sinkhole* berisi udara terlihat pada lintasan 5 pada *offset* 350 meter dan kedalaman 30-40 meter.

Kata kunci : Bendungan , *karst*, *sinkhole*, VLF-EM.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**MAPPING OF SINKHOLE POTENTIAL WITH VLF-EM METHOD
(CASE STUDY : BANYULANGSE REGIONAL WATER-CONTROL DAM,
TUBAN)**

Abstract

Name	: Yogic Wahyu Rhamadianto
Student ID	: 03411640000023
Departement	: Teknik Geofisika ITS
Advisor 1	: Juan Pandu G.N.R, S.Si, M.T.
Advisor 2	: Dr.Dwa Desa Warnana

Tuban Regency is located on the side of the North Coast of Java which discusses the shallow marine depositional environment. In certain areas, karst or limestones complexes are formed. In the near future, a dam will be built in Banyulangse, Semanding District. This dam utilizes karst which uses the river as a natural barrier. However, karst has characteristics that are easily eroded and reacted by chemicals that are needed so that most of them are sinkholes or subsurface holes. This is a serious problem of dam operation later especially when the water flow reaches its peak. For handling it, early survey should be conducted. One method that is suitable for field survey is VLF-EM method. By its mobility and rapid operation, the VLF-EM method can map the sinkhole zone based on the conductivity parameters without the aid of medium and injection of energy sources. Tracks has been obtained as many as 5 lines along 500-515 meters through the river and 1 lines 220 meters along which cut the river at the end of the acquisition track. From data tipper processing into qualitative and quantitative models, it is obtained that the alleged sinkhole contains water with interval of resistivity between 100-300 $\Omega.m$ and contains air with a resistivity of 550-650 $\Omega.m$. Sinkhole containing water is seen at line 1 offset 100-200 meters and depth of 45-50 meters, line 4 at offset 50-150 meters and depth of 50-150 meters, and line 4 at offset 440 meters and depth of 45 meters. Whereas sinkhole filled with air is seen on line 5 at offset 350 meters and 30-40 meters depth.

Keywords : dam, karst, sinkhole, VLF-EM

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir di departemen Teknik Geofisika ITS dengan judul “Pemetaan Potensi *Sinkhole* dengan Metode VLF-EM (Studi Kasus : Proyek Bendungan Pengendali Air Daerah Banyulangse, Tuban)” . Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir hingga selesai terdapat bantuan dan dukungan dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Dwa Desa Warnana selaku Kepala Departemen dan dosen pembimbing kedua serta pemberi kesempatan proyek TA ini yang telah memberikan wawasan dan masukan.
2. Bapak Juan sebagai pembimbing pertama yang memberikan kontribusi besar berupa pengalaman dan dukungan teknis yang membuat penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Haris dan Ibu Wien sebagai dosen penguji sidang Tugas Akhir ini.
4. Keluarga yang saya banggakan, dari Ibu, Ayah, dan adik perempuan yang memberikan doa dan dorongan mental.
5. Bapak Singgih Purwanto selaku dosen wali yang memberikan saran dan arahan dalam masalah perkuliahan.
6. Staf dan tenaga kependidikan yang membantu dalam menyelesaikan administrasi berkaitan dengan Tugas Akhir.
7. Teman-teman baik seangkatan maupun tidak yang telah memberikan doa serta dukungan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Teman akuisisi di lapangan terutama mas Bram dari Jurusan Fisika dan mas Arik yang menuntun dan berbagi pengalaman tentang alat dan orientasi medan.
9. Teman-teman satu laboratorium yang sukarela berbagi informasi mengenai perkembangan tugas akhir.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis memahami bahwa dalam proses penyusunan laporan ini tidak luput dari kesalahan. Sehingga penulis memohon kritik dan saran yang konstruktif dari pembaca untuk hasil yang lebih baik dikemudian hari. Semoga Tugas Akhir ini memberikan kebermanfaatan bagi orang lain.

Surabaya, 19 Juni 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	I
PERYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	III
HALAMAN PENGESAHAN.....	V
ABSTRAK.....	VII
ABSTRACT	IX
KATA PENGANTAR	XI
DAFTAR ISI	XIII
DAFTAR GAMBAR.....	XV
DAFTAR TABEL	XVII
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG	1
1.2. RUMUSAN MASALAH	2
1.3. BATASAN MASALAH	2
1.4. TUJUAN PENELITIAN	2
1.5. MANFAAT PENELITIAN	2
1.6. TARGET LUARAN	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1. DASAR TEORI.....	3
2.1.1. Medan Elektromagnetik.....	3
2.1.2. Perambatan Medan Elektromagnetik	4
2.1.3. Amplitudo dan Fase Gelombang Eletromagnetik.....	5
2.1.4. Gelombang VLF (Very Low Frequency).....	7
2.1.5. Resistivitas Semu.....	8
2.1.6. NA-MEMD.....	8
2.1.7. Analisis Data.....	9
2.1.7.1. Kualitatif.....	9
2.1.7.2. Kuantitatif.....	10
2.1.8. Karst dan Sinkhole	10
2.1.9. Geologi Regional Tuban.....	11
2.1.9.1. Fisiografi Regional	11
2.1.9.2. Stratigrafi Regional	12
2.1.9.3. Sejarah Geologi.....	14

2.2. PENELITIAN TERDAHULU	14
BAB III METODOLOGI.....	19
3.1. WAKTU DAN LOKASI PENELITIAN	19
3.2. PERALATAN LAPANGAN.....	19
3.3. PROSEDUR PENELITIAN.....	20
3.3.1. Teknik Pengambilan Data.....	20
3.3.2. Teknik Pengolahan Data.....	21
3.3.3. Diagram Alir.....	21
3.3.4. QC (Quality Control).....	21
3.3.5. NA-MEMD (Data Denoising).....	22
3.3.6. Fraser dan Karous-Hjelt.....	23
3.3.7. Inversi.....	23
BAB IV HASIL.....	27
4.1. DATA VLF-EM	27
4.2. PENAPISAN DATA DENGAN NA-MEMD	27
4.3. PENGOLAHAN KUALITATIF	29
4.4. DATA SEKUNDER.....	31
4.5. PENGOLAHAN KUANTITATIF	33
4.6. ANALISIS DAN INTERPRETASI	35
BAB V SIMPULAN DAN SARAN.....	41
5.1. KESIMPULAN.....	41
5.2. SARAN	41
DAFTAR PUSTAKA.....	43
LAMPIRAN.....	47
BIOGRAFI PENULIS.....	51

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1 MODEL MEDAN ELEKTROMAGNETIK	4
GAMBAR 2.2 MODEL INDUKSI	6
GAMBAR 2.3 MODEL INDUKSI MEDAN ELEKTROMAGNETIK	7
GAMBAR 2.4 PEMBENTUKAN KARST	11
GAMBAR 2.5 KOLOM STRATIGRAFI CEKUNGAN JAWA TIMUR UTARA	14
GAMBAR 2.6 GEOLOGI REGIONAL TUBAN	14
GAMBAR 3.1 DESAIN AKUISISI VLF-EM.....	20
GAMBAR 3.2 ALAT DAN BAHAN DI LAPANGAN	20
GAMBAR 3.3 <i>FLOWCHART</i> UMUM	24
GAMBAR 3.4 <i>FLOWCHART</i> QC.....	25
GAMBAR 3.5 <i>FLOWCHART</i> KH-FRASER	25
GAMBAR 3.6 <i>FLOWCHART</i> INVERSI DAN NA-MEMD	26
GAMBAR 4.1 DATA <i>TIPPER</i> LV-1 TANPA PENYARINGAN.....	28
GAMBAR 4.2 IMF LV-1 SAAT PENAPISAN DENGAN NA-MEMD	29
GAMBAR 4.3 DATA <i>TIPPER</i> LV-1 SETELAH DITAPIS.....	28
GAMBAR 4.4 GRAFIK <i>FRASER</i> LV-1 FREKUENSI 16.1 KHZ (<i>FILTERED</i>)	30
GAMBAR 4.5 PENAMPANG KH <i>INPHASE</i> (ATAS) DAN <i>QUADRATURE</i> (BAWAH) LV-1 FREKUENSI 16.1 KHZ (<i>FILTERED</i>).....	30
GAMBAR 4.6 ILUSTRASI LETAK <i>BORING LOG</i>	31
GAMBAR 4.7 PROFIL N-SPT <i>DEEP BOR</i> (DB)	32
GAMBAR 4.8 PERSEBARAN GOA BAWAH PERMUKAAN DI TUBAN	32
GAMBAR 4.9 HASIL INVERSI 2D LINTASAN LV-1.....	33
GAMBAR 4.10 PASANGAN GRAFIK REKONSTRUKSI (ATAS) DAN MODEL INVERSI (BAWAH) LV-1 HINGGA LV-6	35
GAMBAR 4.11 KOMBINASI <i>FRASER</i> , <i>INPHASE</i> , <i>QUADRATURE</i> , DAN MODEL INVERSI (ATAS KE BAWAH) DARI LV-1 HINGGA LV-6	36
GAMBAR 4.12 <i>OVERLAY</i> MODEL INVERSI PADA LINTASAN AKUISISI.....	39

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

TABEL 2.1 NILAI RESISTIVITAS BATUAN (TELFORD DKK., 1990)	5
TABEL 2.2 PENELITIAN SEBELUMNYA YANG BERKAITAN	15
TABEL 3.1 LINTASAN VLF-EM	19
TABEL 4.1 LINTASAN DAN FREKUENSINYA.....	27

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kabupaten Tuban merupakan salah satu daerah yang berbatasan langsung dengan Laut Jawa di sebelah utara. Jika ditinjau dari segi geologi regional, sebagian besar daerah berupa lapisan sedimen klastik dan batugamping. Hal ini menyebabkan Tuban menjadi salah satu daerah dengan kerentanan yang cukup tinggi mengingat lapisan sedimen klastik tergolong lemah daya ikatnya dan batugamping reaktif terhadap reaksi kimia misalnya terkorosi oleh air (Van Bemmelen, 1949). Tetapi dari kondisi tersebut, Tuban memiliki beberapa sumber mata air dari kompleks batu gamping atau *karst*. Salah satunya adalah sungai Banyulangse di Kecamatan Semanding.

Beberapa area dengan banyak singkapan batu gamping terletak tidak jauh dari pemukiman warga di sekitar Sungai Banyulangse. Terbentuknya *karst* diakibatkan pengangkatan sebagian area tertentu yang dulunya berupa lautan dangkal. Pada jangka waktu yang dekat, upaya pembangunan mulai ditingkatkan. Salah satunya adalah proyek bendungan yang dibangun di sekitar Sungai Banyulangse. Hal ini riskan karena kondisi sekitar berupa *karst*. Adapun potensi celah ataupun lubang yang diakibatkan oleh kontak dan reaksi kimia seperti air, suhu, panas, dan kelembapan udara menjadi masalah yang serius. Potensi itu diperkuat juga dengan ditemukannya beberapa lubang atau goa di area tertentu sekitar sungai. Oleh karena itu, pendugaan mengenai potensi lubang bawah permukaan atau *sinkhole* perlu dilakukan. Hasil dapat digunakan sebagai salah satu pertimbangan pembangunan bendungan berdasarkan potensi lokasi *sinkhole*.

Secara teoritis, *sinkhole* yang terjadi dapat dideteksi melalui sifat fisisnya. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur sifat fisis tersebut yaitu metode VLF-EM (*Very Low Frequency-Electromagnetic*). Prinsip metode ini memanfaatkan sinyal elektromagnetik frekuensi rendah yang seringkali bersumber dari pemancar militer yang tersebar di penjuru dunia (McNeill dan Labson, 1991). Salah satu sumber pemancar terdekat adalah Jepang dan Australia. Gelombang ini akan merambat dan menginduksi bawah permukaan secara regional. Medan induksi ini akan terbaca oleh alat VLF-EM. Jika terdapat anomali seperti *sinkhole* maka akan menampilkan nilai medan induksi yang berbeda dari yang lain (Fernando A. Monteiro Santos dkk., 2006). Data VLF-EM akan diolah dan dianalisis secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis kualitatif akan menghasilkan diagram *Fraser* dan *Karous-Hjelt* (KH) yang menunjukkan posisi area *interest* (Karous dan Hjelt, 1983). Analisis kuantitatif akan menghasilkan nilai resistivitas semu yang kemudian diinterpretasikan berdasarkan kisaran resistivitas geologi regional. Proses penapisan data menggunakan algoritma *NA-MEMD* dilakukan pada tahap awal untuk

menghilangkan *noise* yang didominasi oleh sinyal frekuensi tinggi. Hal ini akan meningkatkan kualitas data sehingga hasil interpretasi lebih akurat (Sungkono dkk., 2016). Aplikasi dari VLF-EM juga dapat diterapkan dalam masalah lingkungan dan geoteknik seperti dalam kasus investigasi air lindi (Warnana dkk., 2017a) dan rekahan pada tanggul di area LUSI (Shofyan dkk., 2016). Penelitian yang disebutkan berkaitan dengan penelitian kali ini dalam segi metode dan interpretasi.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, dalam penelitian ini akan dibahas beberapa permasalahan, yakni:

1. Bagaimana hasil analisis kualitatif dan kuantitatif data VLF-EM sekitar sungai Banyulangse ?
2. Bagaimana pemetaan area potensi *sinkhole* di sungai Banyulangse berdasarkan interpretasi kualitatif dan kuantitatif?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Pengolahan data memakai *filter* NA-MEMD, *Fraser*, *Karous-Hjelt*, *PrepVLF* dan *INV2D*VLF.
2. Hasil analisis berupa penggambaran resistivitas yang diduga kuat berupa *sinkhole* secara kualitatif ataupun kuantitatif

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Menginterpretasikan secara kualitatif dan kuantitatif keadaan bawah permukaan daerah *karst* sungai Banyulangse
2. Memetakan area yang berpotensi sebagai *sinkhole*.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari tugas akhir ini adalah memberikan informasi potensi *sinkhole* atau gerowong pada area pengukuran yang akan berperan penting sebagai informasi awal pembangunan bendungan pengendali di sungai Banyulangse.

1.6. Target Luaran

Target luaran yang diharapkan dalam penelitian ini adalah publikasi dalam bentuk paper, poster ataupun jurnal skala nasional atau internasional.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1. Medan Elektromagnetik

Fenomena kemagnetan benda konduktor akibat aliran listrik disekitarnya sebagian besar disebabkan oleh adanya medan elektromagnetik (EM). Medan EM merupakan kombinasi medan listrik dan magnet yang mengalami perambatan dan menginduksi medium tertentu. Hasil induksi medan EM tergantung pada parameter fisis internal mediumnya seperti konduktivitas listrik. Perambatan gelombang elektromagnetik berhubungan erat dengan konsep Maxwell yang dinyatakan dalam persamaan berikut ini,

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

Dimana J adalah rapat arus (A/m^2), E adalah intensitas medan listrik (V/m), B adalah rapat fluks magnet ($Weber/m^2$), D adalah pergerakan muatan listrik (C/m^2), dan H adalah intensitas medan magnet (A/m). Dari persamaan diatas, medan listrik dapat dihasilkan dari perubahan medan magnet terhadap waktu pada persamaan 2.1 dan arus listrik total yang disebabkan oleh perubahan medan magnet begitupun sebaliknya pada persamaan 2.2. Dengan memakai sifat vektor identitas, persamaan medan terhadap waktu dapat dirumuskan sebagai berikut (Telford dkk., 1990).

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

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

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot J + \nabla \cdot \frac{\partial D}{\partial t} = \nabla \cdot J + \frac{\partial(\nabla \cdot D)}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial(\nabla \cdot D)}{\partial t} = 0 \quad (2.7)$$

Bentuk perubahan secara volumetrik pada densitas arus (D) dapat dikatakan sebanding dengan tingkat akumulasi densitas muatan (Q) sehingga,

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial(\nabla \cdot D)}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.9)$$

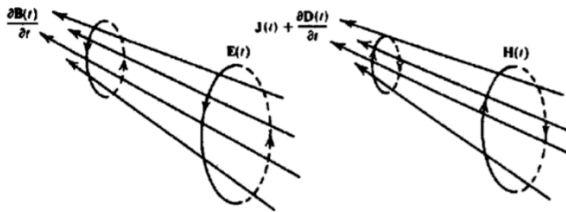
$$\nabla \cdot D = Q \quad (2.10)$$

Pada medium dengan konduktivitas dalam interval tertentu, muatan tidak terakumulasi sepanjang medium selama arus berlangsung dengan mengabaikan efek zat elektrolitik (bisa berfungsi sebagai kapasitor) sehingga akumulasi densitas muatan (Q) menjadi 0. Perubahan fisis model medan elektromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.1 dibawah ini.

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot D = \varepsilon \varepsilon_0 \nabla \cdot E \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot D = Q = 0 \quad (2.13)$$



Gambar 2.1 Model medan elektromagnetik (Telford dkk., 1990)

2.1.2. Perambatan Medan Elektromagnetik

Perambatan gelombang elektromagnetik beserta medannya berawal dari penelitian yang mengangkat arus listrik alami bumi oleh Barlow pada tahun 1847. Medan magnetik frekuensi rendah dengan jangkauan luas menginduksi arus listrik fluktuatif yang mengalir pada lapisan bumi disebut sebagai arus telurik yang diketahui bersumber dari luar bumi. Sumber arus telurik diketahui berasal dari luar bumi (Telford dkk., 1990). Pengaruh diurnal yang menyebabkan fluktuasi arus sebagian besar terjadi di ionosfer sehingga lapisan tersebut diduga kuat sebagai medium terjadinya *electromagnetic coupling*. Secara sederhana, induksi medan EM pada ionosfer terhadap permukaan bumi yang mengakibatkan timbulnya arus *eddy* yang memicu munculnya medan EM sekunder dari bawah permukaan. Dari konsep tersebut, terdapat parameter penting yang berhubungan dengan perambatan gelombang EM dari ionosfer ke bumi yaitu *skin depth* yang menyatakan kedalaman gelombang menembus dan menginduksi bawah permukaan dengan efektif. Tingkat penurunan sinyal gelombang sekitar $1/e$ atau 37% yang dinyatakan dalam persamaan berikut ini,

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\rho}{f \times 4\pi \times 10^{-7}}} \quad (2.14)$$

$$\delta_1 \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.15)$$

Dimana ρ adalah resistivitas lapisan (ohm.m) dan f adalah frekuensi gelombang (Hz) (Telford dkk., 1990). Nilai resistivitas acuan untuk lingkungan sedimen dan kapur ditunjukkan pada Tabel 2.1 dibawah ini,

Tabel 2.1 Nilai resistivitas batuan (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Resistivitas (Ω m)	Jenis Batuan	Resistivitas (Ω m)
Lempung	1-100	Air Tanah	0.5-300
Lanau	10-200	Batupasir	50-500
<i>Limestones</i>	50-10 ⁷	<i>Dolomite</i>	3.5 x 10 ² – 5 x 10 ³

2.1.3. Amplitudo dan Fase Gelombang Eletromagnetik

Medan EM yang menginduksi suatu konduktor akan menghasilkan medan sekunder dengan fase yang tertinggal dengan nilai tertentu. Secara umum, adanya medan sekunder atau bahan konduktor dapat diamati dari perubahan bacaan nilai medan pada alat detektor yang biasanya berupa amplitudo dan fase. Pemodelan sederhananya dapat digambarkan dengan tiga koil bernilai induktansi dan resistansi yang berbeda serta kapasitansi yang dapat diabaikan seperti pada Gambar 2.2 dibawah. Medan EM primer (dari koil 1) pada titik terdekat konduktor (koil 2) diciptakan dari arus primer koil 1 i_p sebagai berikut,

$$H_p = G i_p = G I_p \sin \omega t \quad (2.16)$$

Dimana G merepresentasikan konstanta yang menghubungkan geometri model, area, jumlah lilitan koil primer, dan atenuasi gelombang. Setelah beberapa saat, tercipta medan induksi pada koil 2 (konduktor) yang tertinggal fasenya terhadap medan primer sebesar $\pi/2$ yang dinyatakan pada persamaan di bawah ini,

$$e_s = -M \frac{di_p}{dt} = -\omega M I_p \cos \omega t \quad (2.17)$$

$$e_s = -i\omega M H_p / G \quad (2.18)$$

Antara koil 1 (*transmitter*) dan 2 (*conductor*) terjadi *mutual inductance* (interferensi) dengan arus pada koil 2 (*konduktor*) sehingga,

$$i_s = \frac{e_s}{z_s} = \frac{e_s}{(r_s + i\omega L_s)} \quad (2.19)$$

$$H_s = G' i_s \quad (2.20)$$

$$H_s = \frac{-G' j \omega M H_p}{G(r_s + j \omega L_s)} \quad (2.21)$$

$$H_s = \frac{-G' M H_p (j \omega r_s + \omega^2 L_s)}{G(r_s^2 + \omega^2 L_s^2)} \quad (2.22)$$

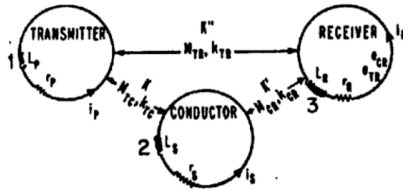
$$H_s = \frac{-G' M H_p (Q^2 + jQ)}{G L_s (1 + Q^2)} \quad (2.23)$$

Dimana G' adalah konstanta dan $Q = \omega L_s / r_s$ dan medan primer di koil 3 (terjadi interferensi medan primer dan sekunder di koil 3) sebagai berikut ,

$$H_p' = G'' i_p \quad (2.24)$$

$$H_p' = G'' I_p \sin \omega t \quad (2.25)$$

$$H_p' = \frac{G'' H_p}{G} \quad (2.26)$$



Gambar 2.2 Model Induksi (Telford dkk., 1990)

Dimana G'' sama dengan G dan G' (karena parameter model awal yang dibuat seragam sehingga faktor G relatif sama untuk setiap komponen). Sehingga magnitudo relatif dari medan pada *receiver* sebagai berikut,

$$\left| \frac{H_s}{H_p} \right| = \frac{G' i_s}{G'' i_p} \quad (2.27)$$

$$\left| \frac{H_s}{H_p} \right| = \frac{G' M}{G'' L_s \sqrt{1 + 1/Q^2}} \quad (2.28)$$

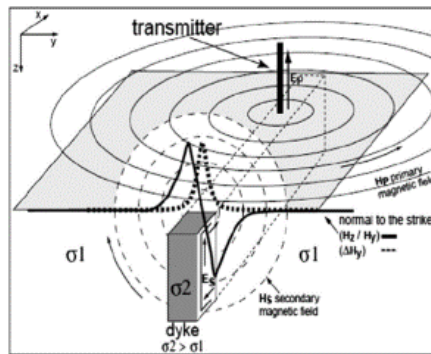
Perbedaan fase antara medan primer dan sekunder dinyatakan sebagai berikut,

$$\theta_p - \theta_s = \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{\omega L_s}{r_s} \right) \quad (2.29)$$

$$\theta_p - \theta_s = \left(\frac{\pi}{2} + \phi \right) \quad (2.30)$$

2.1.4. Gelombang VLF (Very Low Frequency)

Penggunaan metode ini dalam geofisika mulai berkembang pesat setelah 1964 meliputi penyelidikan mineral konduktif (McNeill dan Labson, 1991) kemudian merambah lebih spesifik sesuai dengan pertumbuhan teknologi antara lain identifikasi zona lemah dalam eksplorasi air tanah (Jamal dan Singh, 2018a), penentuan kedalaman bahan galian (Ebrahimi dkk., 2019b), pemetaan daerah urban (Pazzi dkk., 2016), pemetaan area perbukitan (Singh dan Sharma, 2016a), penentuan struktur bawah tanah pemandian air panas (Yoku, 2015), eksplorasi mineral (Guo dkk., 2020), pendugaan potensi bijih besi (Youssef dkk., 2018), deliniasi air lindi (Popoola dan Adenuga, 2019) serta pemetaan posisi sumur air tanah (Ammar dan Kruse, 2016a). Metode VLF-EM dikategorikan sebagai metode pasif yang memanfaatkan gelombang radio dari *transmitter* radio stasiun militer dengan frekuensi 15-30 kHz sebagai medan primernya. *Transmitter* ini akan menghasilkan gelombang bidang EM yang memicu arus *eddy* bawah permukaan. Komponen medan EM primer dapat diasumsikan sebagai gelombang yang menjalar secara horizontal. Medan atau gelombang ini akan menembus ke dalam bumi dengan kedalaman tertentu dan menginduksi medan komponen medan listrik horizontal dan magnet sekunder (terdiri atas komponen horizontal dan vertikal) seperti gambar di bawah ini (Bosch dan Muller, 2001a).



Gambar 2.3 Model induksi medan EM (Bosch dan Muller, 2001a)

Gabungan kedua medan pada gambar diatas membentuk suatu pola osilasi berupa *in-phase* dan *out-of-phase* (*inphase* dan *quadrature*) terhadap medan EM primer (Bosch dan Muller, 2001a). Jika gelombang mengalami polarisasi pada bidang xy dan merambat melalui sumbu z, vektor magnetik H₀ pada sudut θ terhadap sumbu x memiliki komponen magnetic (Wijayanto dkk., 2015),

$$H_{x0} = H_0 \cos \theta \quad (2.31)$$

$$H_{y0} = H_0 \sin \theta \quad (2.32)$$

Sehingga dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$H_x = (H_0 \cos \theta) e^{-ax} \cos(\omega t - az) \quad (2.33)$$

$$H_y = (H_0 \sin \theta) e^{-ax} \cos(\omega t - az) \quad (2.34)$$

Kuadrat perbandingan amplitudo dinyatakan sebagai berikut,

$$\rho = \left(\frac{1}{\omega \mu} \right) \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.35)$$

Pada jarak yang jauh dari transmitter, gelombang VLF cenderung didominasi oleh mode TM (*Transverse Magnetic*) saat merambat. Mode TM ini memiliki komponen medan listrik horizontal yang mengecil ketika menginduksi medium konduktif. Frekuensi gelombang VLF akan mengalami atenuasi dikarenakan kondisi ionosfer dan jarak perambatan yang jauh. Oleh karena itu, hanya mode orde terendah (dominasi TM) yang diperhatikan mengingat mode orde tinggi yang didominasi TE (*Transverse Electric*) mengalami tingkat atenuasi yang lebih besar sehingga efek interferensi tidak terlalu diperhatikan (Nabighian, 1991).

2.1.5. Resistivitas Semu

Resistivitas semu sering disamakan dengan impedansi total pada permukaan. Dengan menghitung besar komponen ortogonal medan listrik dan horizontal medan magnet pada permukaan untuk sembarang nilai frekuensi, dapat diketahui variasi resistivitas terhadap kedalaman. Resistivitas semu dapat dinyatakan sebagai berikut (Telford dkk., 1990),

$$Z_x = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.36)$$

Dimana Akan tetapi semakin dalam penetrasi, biasanya nilai resistivitas yang ditampilkan memiliki akurasi yang rendah sehingga perlu memperhatikan faktor *non-uniformity* lapisan dan *skin-depth* teoritis.

2.1.6. NA-MEMD

Pengambilan data geofisika dengan metode apapun tidak akan terlepas dari adanya *noise*. Dalam metode VLF-EM, *noise* biasanya berasal dari gelombang EM frekuensi medium sampai tinggi contohnya tiang listrik, *handphones*, stasiun *relay*, petir dan badai matahari. Untuk menjaga kualitas data maka komponen *noise* perlu diminimalkan hingga tingkat SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) optimal. Upaya meminimalkan *noise* pada metode VLF-EM dapat dilakukan beberapa cara. Salah satunya dengan mengaplikasikan algoritma NA-MEMD (*Noise*

Assisted Multivariated Empirical Mode Decomposition). Algoritma ini akan menguraikan data *tipper* (*inphase* dan *quadrature*) menjadi beberapa frekuensi sesuai tingkat energi atau frekuensi. Frekuensi yang dianggap *noise* dibuang kemudian dilakukan proses rekonstruksi sinyal yang *less-noise* dari interferensi sinyal representatif (Sungkono dkk., 2016). Sinyal representatif akan ditampilkan dan dipilih dalam kanal IMF (*Intrinsic Mode Function*) pada program algoritma NA-MEMD. Data *tipper* akan didekomposisi menjadi beberapa kanal IMF ($\sum_{i=1}^N c_i(t)$) dan residu monoton $r(t)$ dengan persamaan di bawah ini,

$$x(t) = \sum_{i=1}^N c_i(t) + r(t) \quad (2.37)$$

Sedangkan alur algoritma NA-MEMD secara umum dijelaskan sebagai berikut:

1. Membuat *Gaussian White-Noise time-series* yang tak berkorelasi (*m-channel*) yang sama panjangnya dengan input dimana $m \geq 1$.
2. Penambahan kanal *noise* (*m-channel*) yang dibuat di langkah satu ke input sinyal *multivariate* (*n-channel*), sehingga mendapatkan $(n+m)$ -sinyal *channel*.
3. Dilakukan *processing* hasil $(n+m)$ -*channel multivariate signal* dengan algoritma MEMD untuk mendapatkan *multivariate IMFs*.
4. Dari hasil $(n+m)$ *variate IMFs*, kanal m yang menunjukkan *noise* dieliminasi, sehingga tersisa set kanal n yang menunjukkan sinyal asli (Sungkono dkk., 2016).

2.1.7. Analisis Data

Data VLF akan diolah dengan dua metode yaitu kualitatif dan kuantitatif. Berikut penjelasan mengenai metode yang digunakan antara lain,

2.1.7.1. Kualitatif

Pada metode ini, data VLF yang digunakan dapat berupa *inphase-quadrature* (*tipper*) atau *tilt-ellips*. Tahap ini akan melibatkan penyaringan dengan *Fraser filter* dan *Karous-Hjelt filter*. Data *tipper* VLF-EM akan membentuk suatu grafik fluktuatif sebagai cerminan kondisi anomali bawah permukaan. Suatu anomali akan terdeteksi pada grafik *Fraser* jika terjadi *crossing* antara data *tipper*. *Fraser filter* berfungsi untuk menghilangkan efek perbedaan fase sebesar 90° sehingga amplitudo grafik menjadi maksimum seutuhnya (Fraser, 1969). Hal ini mengakibatkan pengurangan jumlah data pada *offset* tertentu (Nabighian, 1991). Persamaan *filter Fraser* dinyatakan sebagai berikut,

$$M_n = (M_{n+2} + M_{n+1}) - (M_{n-1} + M_{n-2}) \quad (2.38)$$

Dimana M_n merupakan stasiun tertapis n , M_{n+i} merupakan stasiun disekitar M_n dengan jarak $\pm(i)$. Sedangkan *Karous-Hjelt filter* memanfaatkan teknik penapisan linear yang dikembangkan dari konsep *Fraser filter*. *Filter* ini akan menghasilkan penampang rapat arus ekuivalen (RAE) yang dihitung berdasarkan titik stasiun yang berdekatan sebagai berikut,

$$\frac{I_a}{2\pi} \left(\frac{\Delta x}{z} \right) = \left(\frac{0.102M_{-3} - 0.059M_{-2} + 0.561M_{-1} - 0.561M_1 + 0.059M_2 - 0.102M_3}{z} \right) \quad (2.39)$$

Dimana Δz adalah ketebalan asumsi dari bidang arus (m), Δx adalah jarak antara titik atau stasiun VLF-EM dan juga nilai kedalaman terhadap bidang arus (m). Lokasi bidang asumsi arus yang diduga anomali berada di tengah titik data perhitungan dengan *Karous-Hjelt (KH) filter* (Karous dan Hjelt, 1983).

2.1.7.2. Kuantitatif

Pengolahan data VLF-EM dengan metode ini memakai nilai *inphase* dan *quadrature*. Proses kuantitatif atau inversi akan memodelkan satu per satu frekuensi VLF-EM dengan nilai *background resistivity* yang dapat diketahui atau diperkirakan (Fernando A. Monteiro Santos dkk., 2006). Santos (2006) telah mengembangkan program Inv2DVLF untuk proses inversi semacam ini. Metode yang dipakai berupa FEM (*Finite Element Method*) dan *least-square*. FEM sendiri merupakan *gridding* pemodelan sederhana secara numerik dimana setiap blok memiliki nilai awal yang tergantung oleh parameter yang telah ditentukan misalkan *background resistivity*. Secara umum, FEM dinyatakan sebagai berikut,

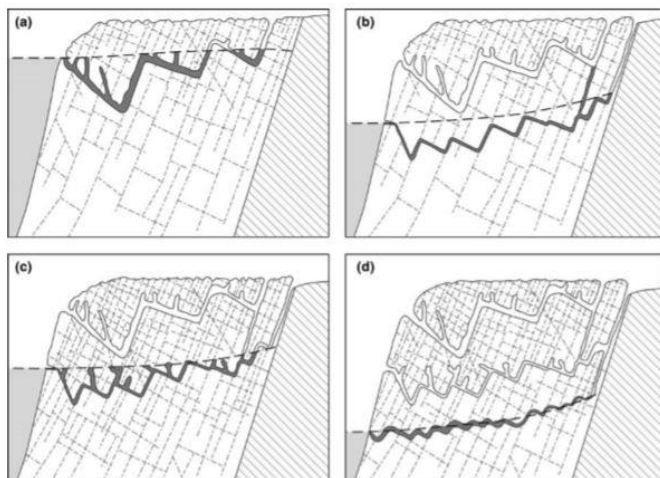
$$K\{E_x\} = s \quad (2.40)$$

Dimana K merupakan matriks resistivitas batuan dan s merupakan *boundary conduction* (Wijayanti, 2017).

2.1.8. Karst dan Sinkhole

Karst merupakan area yang didominasi oleh batuan berporositas yang mudah larut sehingga sering terjadi rembesan air. Batuan yang sering menjadi penyusun *karst* didominasi batugamping atau batukapur. Proses pelarutan batuan ini yang menyebabkan terbentuknya *sinkhole* atau lubang bawah permukaan sehingga terjadi penurunan permukaan atau amblesan. *Sinkhole* sendiri merupakan ruang kosong atau lubang di sekitar sistem drainase bawah permukaan baik terkoneksi secara masif atau kecil (eds.W. B. White dkk., 2019). Beberapa teori yang mendasari terbentuknya *sinkhole* pada wilayah *karst* antara lain teori vadus, freatik dalam, dan freatik dangkal. Teori vadus menggambarkan air yang menembus dan menciptakan rongga baik kearah vertikal ataupun

horizontal. Pembentukan *karst* secara umum dimulai dari tipe *freatik* kemudian membesar atau merembes menjadi bentuk *vadose* (Lewin dan Woodward, 2009) seperti pada gambar dibawah ini,



Gambar 2.4 Pembentukan *karst* (saluran utama membesar (a) dan sistem *freatik* menjadi *vadose* (b-d)) (Lewin dan Woodward,2009)

Pada gambar diatas menunjukkan secara tidak langsung bahwa dalam fase *freatik* mengalami proses perembesan vertikal air yang berlangsung terus-menerus dan dominan daripada perembesan horizontal.

2.1.9. Geologi Regional Tuban

2.1.9.1. Fisiografi Regional

Jawa Timur terbagi menjadi lima zona antara lain Zona Pegunungan Selatan (Jawa Timur), Zona Solo, Zona Perbukitan Kendeng, Zona Depresi Randublatung, dan Zona Perbukitan Rembang. Secara fisiografi daerah penelitian terletak di Zona Rembang (Van Bemmelen, 1949) yang didominasi oleh struktur antiklinorium berarah Barat-Timur. Ciri khas dari zona ini berupa perbukitan *karst* yang bergelombang dan diselingi dataran rendah (Adji dkk., 2017). Antiklinorium Rembang memiliki lebar sekitar 50 km dengan puncaknya mencapai 500 meter diatas permukaan laut. Sisi puncak dekat Tuban didominasi oleh *reef limestones* dengan bentuk menyerupai batu berundak yang besar.

2.1.9.2. Stratigrafi Regional

Berdasarkan data eksplorasi hidrokarbon, satuan stratigrafi yang tertua adalah Formasi Ngimbang yang tidak tersingkap di permukaan (Husein, 2016). Berikut formasi yang menyusun area Tuban antara lain,

1. *Formasi Kujung*

Formasi Kujung merupakan satuan stratigrafi tertua yang tersingkap dan tersusun oleh sebagian besar batulempung dengan sisipan batugamping dan batupasir.

2. *Formasi Prupuh*

Tipe formasi berupa batugamping bioklastik berlapis tebal, keras, kaya akan fosil Orbitoid, yang berlapis dengan batugamping kapuran berwarna putih kotor.

3. *Formasi Tuban*

Formasi Tuban terdiri atas peralihan batulempung dengan beberapa sisipan batugamping dan klastika karbonat berisi fosil foraminifera disertai fragmen koral dan algae.

4. *Formasi Tawun*

Formasi ini tersusun oleh perselingan antara batulempung pasir dengan batupasir dan batugamping yang kaya akan foraminifera golongan orbitoid yang semakin ke atas menjadi batulanau dengan dominan oksida besi.

5. *Formasi Ngrayong*

Bagian bawah tersusun atas batugamping *Orbitoid* (*Cycloclypeus*) dan batulempung sedangkan bagian atas tersusun oleh batupasir dengan sisipan batugamping orbitoid.

6. *Formasi Bulu*

Formasi ini tersusun oleh kalkarenit berlempeng (*platty sandstones*) dengan sisipan napal pasir. Kalkarenitnya tersusun oleh litoklas karbonat, foraminifera kecil maupun besar, serta butir-butir kuarsa, feldspar dan glaukonit.

7. *Formasi Wonocolo*

Formasi Wonocolo tersusun oleh napal dan batulempung tidak berlapis. Bagian bawah tersusun oleh batugamping pasir dan batupasir gampingan.

8. *Formasi Ledok*

Penyusun utamanya terdiri atas perselingan antara batupasir glaukonitik dengan kalkarenit yang berlempeng-lempeng, dengan beberapa sisipan napal.

9. *Formasi Mundu*

Formasi Mundu memiliki ciri litologi yang khas tersusun oleh napal masif berwarna abu-abu muda hingga putih kekuning-kuningan dengan kandungan foraminifera yang melimpah dengan sedikit glaukonit.

10. *Formasi Selorejo*

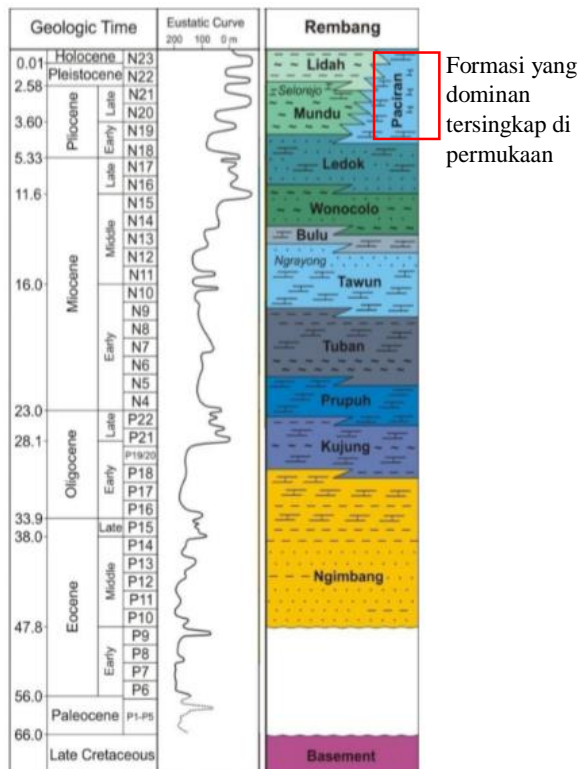
Satuan ini tersusun oleh perselang-selingan antara *foraminiferal grainstone* yang sebagian bersifat glaukonitan dengan batugamping napalan hingga batugamping pasiran.

11. Formasi Lidah

Formasi ini tersusun oleh batulempung yang berwarna kebiruan dan napal berlapis yang diselingi oleh batupasir dan lensa-lensa *fossiliferous grainstone/rudstone (coquina)*.

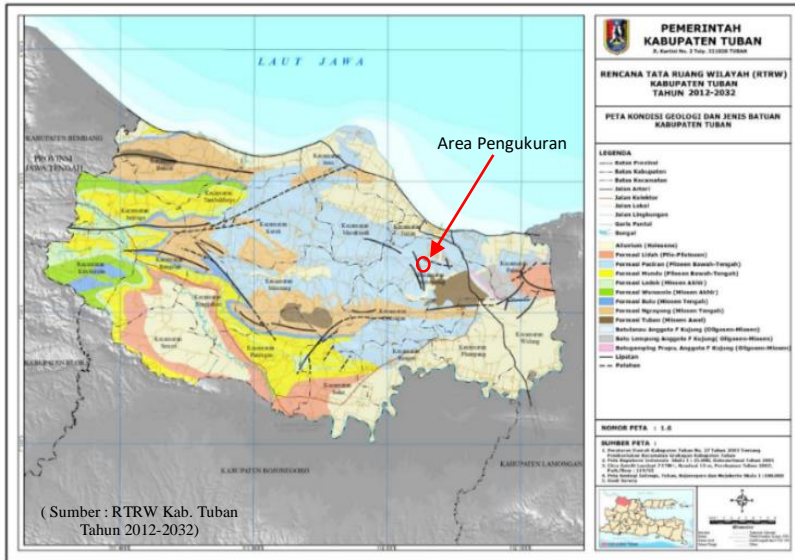
12. Formasi Paciran

Formasi Paciran tersusun oleh batugamping massif berupa terumbu yang lapuk dan membentuk permukaan yang khas akibat pelarutan (*karren surface*). Adapun lapisan lempung dengan sisipan lanau yang tersebar dengan proporsi yang berbeda-beda. Berikut gambaran stratigrafi yang berada di sekitar area penelitian,



Gambar 2.5 Kolom stratigrafi cekungan Jawa Timur Utara (Husein, 2016)

Sebaran formasi yang tersingkap dari permukaan daerah Tuban dapat dilihat pada Gambar 2.6 dibawah ini dimana terdapat tanda merah sebagai penunjuk lokasi pengukuran sebagai berikut,



Gambar 2.6. Geologi Regional Tuban

2.1.9.3. Sejarah Geologi

Cekungan Jawa Timur Utara diduga terbentuk pada salah satu lempeng mikrokontinen yaitu Lempeng Argo yang menyusun Jawa Timur hingga Sulawesi Barat (Husein dan Moch Nukman, 2015). Husein & Nukman (2015) menginterpretasikan bila pembentukan cekungan ini lebih kepada tipe tepian benua pasif (*passive margin*). Sedimen awal pengisi cekungan bersumber dari daratan (*terrigenous sediments*) pada saat peregangannya (*basin rifting*), sebelum kemudian berubah menjadi lingkungan laut pada akhir Eosen. Struktur pengontrol peregangannya berarah timur laut-barat daya, yang mencerminkan pola regangan Selat Makassar.

2.2. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan atau sama seperti penelitian ini disajikan dalam Tabel 2.2 sebagai berikut,

Tabel 2.2 Penelitian sebelumnya yang berkaitan

No	Judul	Output
1	<i>Hydrogeological investigation in Santiago Island (Cabo Verde) using magnetotellurics and VLF methods</i> , (Fernando A. Monteiro Santos dkk., 2006)	Penggambaran pengaruh infiltrasi air laut dominan di pesisir resistivitas 20-30 Ω m dan kedalaman kurang dari 80 meter. Dugaan jalur air laut melalui patahan yang ditunjukkan dengan MT 2D. Terjadi penurunan tingkat infiltrasi air laut dari ketebalan <i>high conductivity layer (fault zone)</i> melalui data MT dan kandungan Na-Cl.
2	<i>Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method – A case study</i> . (F.A. Monteiro Santos dkk., 2006)	Terdapat rekahan di bagian barat-laut area survei dan pola rayapan memotong area survei. Aliran air tanah terkontaminasi dari utara ke selatan sesuai gradien atau kontur ditunjukkan oleh model inversi VLF-EM.
3	Pemetaan aliran sungai bawah tanah di daerah Rengel-Tuban dengan memakai metode <i>very low frequency-electromagnetic (VLF-EM)</i> . (Wijayanti, 2017)	Rentang nilai resistivitas yang dihasilkan dari model inversi 2D sekitar 0-1300 Ω m dengan nilai <i>damping</i> 0,3. Kedalaman sungai sekitar 5-20 meter.
4	<i>Early stage sinkhole formation in the Acque Albule basin of central Italy from geophysical and geochemical observations</i> . (Argentieri dkk., 2015)	Kedalaman penurunan utama area sekitar 2 meter dilihat dari GPS dan data residual gravity. Resistivitas pengisi <i>sinkhole</i> sekitar kurang dari 30 Ω m dibandingkan dengan <i>country-rock</i> sekitar 800-1000 Ω m. Distribusi anisotropis CO ₂ mengindikasikan rekahan dengan arah NE-SW yang semakin meningkat kadarnya.
5	Estimasi aliran sungai bawah tanah di daerah Dengok dan Ngrejok Wetan Gunung Kidul	Respon nilai resistivitas rendah mengindikasikan adanya aliran bawah permukaan. Hasil rapat arus ekuivalen

	menggunakan metode VLF –EM dan VLF-VGrad. (Anita dan Purwantiningsih, 2018)	VLF-EM lebih baik daripada VLM-EM-VGRAD.
6	Penerapan Metode <i>Very Low Frequency Electromagnetic</i> (VLF-EM) untuk Mendeteksi Rekahan Pada Daerah Tanggulangin, Sidoarjo. (Shofyan dkk., 2016)	Terdapat rekahan dengan nilai resistivitas sekitar 0-80 Ω m dengan panjang 0-30 meter dan kedalaman 10-30 meter. Area berstatus relatif tidak stabil berdasarkan dugaan rekahan. Rekahan berarah barat daya ke Timur Laut.
7	<i>Interpretation of very low frequency electromagnetic measurements in terms of normalized current density over variable topography.</i> (Sharma dkk., 2014)	Penggambaran model berupa densitas arus semu tidak berbeda jauh dengan model sebenarnya. Permukaan yang tidak rata akan menjadi signifikan ketika perbandingan variasi topografi berada dalam orde magnitudo <i>skin-depth</i> . Sehingga perlu mempertimbangkan faktor topografi untuk hasil yang akurat. Hasil inversi dipengaruhi oleh <i>noise</i> sedangkan hasil <i>filter</i> Karous-Hjelt bersifat <i>robust</i> .
8	<i>Near-Surface Resistivity Structure near Avcillar Landslide in Istanbul, Turkey by 2D Inversion of VLF data.</i> (Karcioğlu, 2019)	Area dengan <i>high resistivity</i> ($> 30 \Omega$ m) mengindikasikan selipan <i>clay</i> dan <i>water-bearing layers</i> sedangkan <i>low-resistivity</i> ($< 30 \Omega$ m) menandakan peningkatan <i>clay</i> yang tersaturasi air. Hasil kualitatif dan kuantitatif saling berkorelasi. Patahan <i>strike-slip</i> yang terdeteksi di pengukuran sebelumnya tidak terlihat pada hasil pengukuran kali ini. Kemungkinan akibat kedalaman penetrasi VLF, model yang berbeda, dan terisi oleh material longsor.
9	<i>Two-dimensional resistivity imaging in the Kestelek boron area by VLF and DC resistivity</i>	Resistivitas sedang ($> 25 \Omega$ m) dan tinggi ($> 40 \Omega$ m) menunjukkan titik terdalam dari deposit boron. Sedangkan turunan dari puncak positif ke negatif (fase

	<i>methods.</i> (Bayrak dan Şenel, 2012)	transisi) pada Karous-Hjelt <i>pseudosections</i> merupakan posisi ideal deposit boron. Data resistivitas menggambarkan <i>high conductivity</i> ($< 4 \Omega\text{m}$) yang diduga berupa lapisan <i>clay</i> yang kaya Li_2O . Sudut fase menunjukkan posisi vertikal relatif anomali.
10	Intepretasi Filter Fraser dan Karous-Hjelt Pada Data VLF-EM untuk Mengidentifikasi Air Lindi di Area TPA Ngipik. (Yadi dkk., 2017)	Anomali konduktif (Air Lindi) memiliki kedalaman yang bervariasi pada setiap lintasan. <i>Filter Fraser</i> dan <i>Karous-Hjelt</i> efektif untuk mendeteksi air lindi meskipun kedalamannya kurang akurat.
11	<i>Basic processes and factors determining the evolution of collapse sinkholes-A sensitive study.</i> (Romanov dkk., 2020)	Perubahan stabilitas <i>sinkhole</i> dipengaruhi oleh interaksi yang kompleks antar komponen terutama batuan penyusun yang mudah larut dan zat kimia seperti air.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

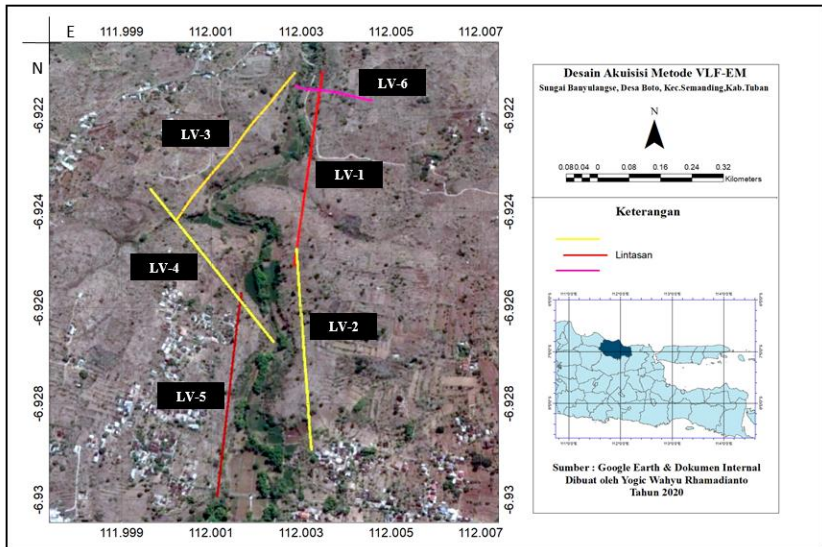
Pengambilan data metode VLF-EM dilakukan di sekitar sungai Banyulangse, Desa Boto, Kecamatan Semanding, Kabupaten Tuban. Lintasan akuisisi berjumlah 6 dengan 5 lintasan sepanjang 500 meter dan 1 lintasan sepanjang 200 meter. Akuisisi dilaksanakan pada tanggal 4-7 Oktober 2019. Berikut tabel lintasan dan desain akuisisi pada penelitian kali ini,

Tabel 3.1 Lintasan VLF-EM

No	Lintasan	Arah	Panjang Lintasan (m)	Koordinat			
				Awal		Akhir	
				S	E	S	E
1	LV-1	188.6°	515	6°	112°	6°	112°
				55'	00'	55'	00'
				14.0"	13.5"	31.1"	11.0"
2	LV-2	175.9°	505	6°	112°	6°	112°
				55'	00'	55'	00'
				29.6"	11.1"	45.7"	12.2"
3	LV-3	217.4°	500	6°	112°	6°	112°
				55'	00'	55'	00'
				13.8"	11.1"	26.7"	01.2"
4	LV-4	141.7°	510	6°	111°	6°	112°
				55'	59'	55'	00'
				24.4"	59.1"	37.3"	09.4"
5	LV-5	186.0°	500	6°	112°	6°	112°
				55'	00'	55'	00'
				32.9"	06.7"	49.0"	05.0"
6	LV-6	106.9°	220	6°	112°	6°	112°
				55'	00'	55'	00'
				15.0"	10.9"	17.1"	17.7"

3.2. Peralatan Lapangan

Peralatan yang digunakan dalam akuisisi kali ini adalah *VLF-EM ENVI Scintrex* dengan peralatan penunjang seperti *Global Positioning System (GPS) Garmin* untuk menentukan koordinat titik lintasan, kompas geologi untuk orientasi medan terutama arah kutub Utara bumi. Selain itu diperlukan *roll meter* dan tali rafia untuk interval titik lintasan, peralatan tulis untuk penulisan data, dan *handphone* berkamera untuk dokumentasi sekitar seperti pada Gambar 3.2



Gambar 3.1 Desain akuisisi VLF-EM



Gambar 3.2 Alat dan bahan di lapangan

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Teknik Pengambilan Data

Proses akuisisi meliputi tahap desain survei dan pengukuran. Tahap pembuatan desain survei dimulai dari penentuan area prospek kemudian orientasi dan kebutuhan lintasan yang disesuaikan dengan kondisi geologi dan target. Digitasi desain dapat dilakukan melalui *Google Earth* atau ArcGIS. Desain kali ini mengambil 6 lintasan dengan detail yaitu 5 lintasan 500 meter menyusuri sungai dan 1 lintasan 200 meter memotong sungai. Interval stasiun yang dipakai

yaitu 5 meter. Hal ini disesuaikan dengan kontur *karst* dan resolusi hasil yang dibutuhkan. Saat akuisisi dimulai, perlu dilakukan *scanning* frekuensi VLF-EM dan orientasi alat saat pengukuran berjalan. QC data dilakukan secara cepat dengan melihat fluktuasi nilai yang didapatkan dengan sebelumnya, Qbar, dan hasil pengulangan.

3.3.2. Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data VLF-EM dilakukan dengan memakai analisis kuantitatif dan kualitatif. Langkah pertama dimulai dari *filtering* data dengan algoritma NA-MEMD pada *software* MATLAB. Kemudian hasil dekomposisi data dipakai untuk analisis kualitatif dan kuantitatif. Pada analisis kualitatif, semua data berupa *inphase*, *quadrature*, *tilt-ellips*, dan *Tfield* diolah dalam *Microsoft Excel* dengan *filter Fraser dan Karous-Hjelt*. Hasil *Karous-Hjelt* berupa koordinat dan nilai rapat arus diplot dalam Surfer untuk mendapatkan penampang RAE (Rapat Arus Ekuivalen). Metode interpolasi yang digunakan adalah Krigging karena data VLF-EM masih terdistribusi normal dan sifat *interpolant* Krigging yang stabil. Sedangkan untuk analisis kuantitatif, hanya perlu data *inphase* dan *quadrature* yang sudah terdekomposisi. Pada tahap ini, dilakukan inversi menggunakan program INV2DVLF (Santos, 2006). Kemudian hasil analisis kuantitatif dan kualitatif dibandingkan dengan data penunjang seperti data bor.

3.3.3. Diagram Alir

Pada proses *denoising* memakai MEMD, data VLF-EM perlu disesuaikan dengan keperluan inversi Inv2DVLF yang hanya membutuhkan data *inphase* dan *quadrature*. Algoritma MEMD tersedia dalam *file* MATLAB dengan kode yang dipakai bernama *main.m*, pada kode tersebut dimasukkan alamat *file xls* atau *excel* yang berisi kolom pertama sebagai *inphase* dan kedua sebagai *quadrature*. Kemudian kode dijalankan dan setelah beberapa saat akan menampilkan IMF *inphase* dan *quadrature*. Dari IMF, dipilihlah *channel* yang merepresentasikan sinyal asli atau noise yang kecil. Kemudian akan dilakukan rekonstruksi data tipper VLF-EM yang kemudian dilakukan *filtering* Fraser dan Karous-Hjelt. Pada proses inversi, pemodelan *gridding* dilakukan dengan metode *finite element* pada program Inv2DVLF. *Gridding* dibuat pada program PrepVLF sesuai dengan parameter awal seperti jumlah data, tebalan lapisan, resistivitas lokal, dan jumlah blok *grid*. Setelah model dibuat, kemudian dimasukkan kedalam program Inv2DVLF untuk proses inversi atau *model-fitting*. Secara umum ditunjukkan pada Gambar 3.3.

3.3.4. QC (Quality Control)

Pengontrolan kualitas data VLF dilakukan secara langsung saat pengukuran. Dengan melihat *trend* yang terbentuk, dapat dikatakan bahwa data tersebut masih berada dalam *trend* atau keluar. Umumnya data VLF bersifat

fluktuatif normal yaitu nilai data naik dan turun dengan rentang nilai batas tertentu (biasanya rentang nilai dapat diperkirakan ketika data sudah banyak). Jika didapatkan data dengan nilai yang melebihi rentang batas, maka perlu dilakukan pengecekan terhadap SNR atau Q_{bar} yang menunjukkan kualitas medan primer (Dalam hal ini, dipakai nilai 60% sebagai standar minimal data terkontrol). Ketika data keluar dari *trend* dan Q_{bar} berada dibawah standar, maka perlu dilakukan pengulangan (pada kali ini, dilakukan pengulangan tiga kali). Jika hasilnya tetap sama, maka data dicatat dan pengukuran dilanjutkan. Pengulangan ditujukan untuk memilah atau merata-rata hasil pengukuran sehingga didapatkan data yang representatif dan *robust*. Alur tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.4 sedangkan terkait dengan nilai yang mencolok, hal itu bisa dikarenakan adanya sumber medan elektromagnet lokal yang kuat atau *noise* seperti bahan galian konduktif, aliran atau genangan air, sutet, dan stasiun *relay*. Oleh karena itu, perlu dibuat catatan lapangan yang menggambarkan kondisi sekitarnya (biasa dilakukan jika ditemukan sumber gangguan yang signifikan seperti yang disebutkan sebelumnya).

3.3.5. NA-MEMD (*Data Denoising*)

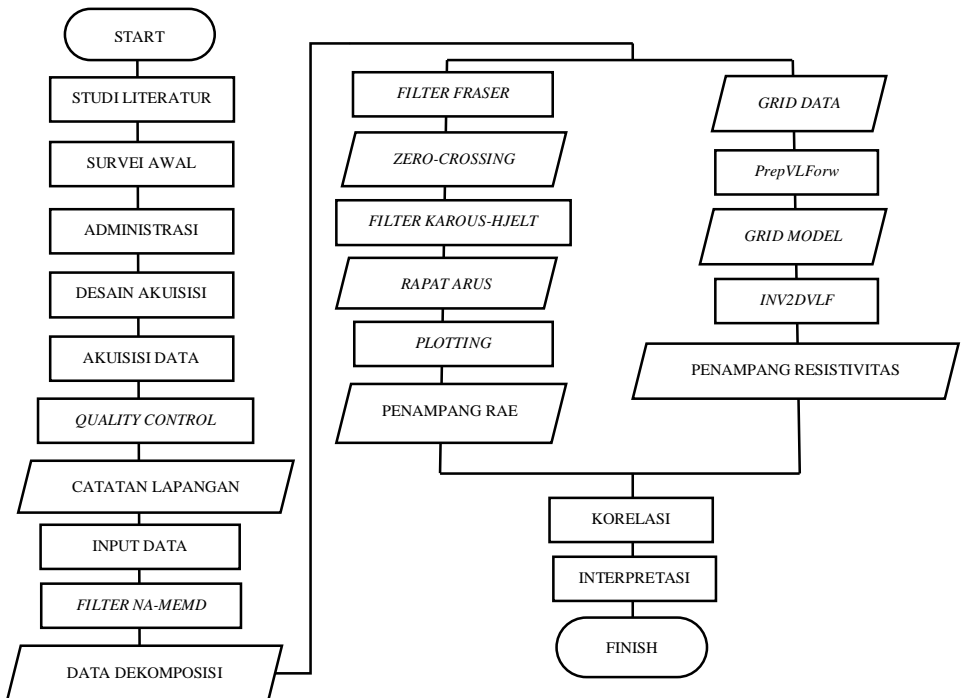
Proses *denoising* data VLF dari *noise* frekuensi tinggi dilakukan dengan menggunakan algoritma NA-MEMD yang dibuat dalam program MATLAB. Pertama, komponen *inphase* dan *quadrature* dipisahkan dari data dan dibuat dalam *file* XLS. Hal ini dikarenakan *input* NA-MEMD berupa data *tipper* (komponen *real* dan imajiner) yang menggambarkan nilai medan primer dan sekunder. Pada kode MATLAB, dituliskan nama dan ekstensi *file* XLS sehingga MATLAB bisa mengaksesnya secara langsung. Program dijalankan dan akan menghasilkan kanal IMF's (*Intrinsic Mode Function*) sebagai penguraian sinyal berdasarkan energi. Setiap kanal IMF's memiliki tingkat energinya tersendiri. Menurut Sungkono (2014), pemilihan sinyal IMF yang baik biasanya antara nomor 3 hingga 5. Kanal nomor 1 dan 2 merepresentasikan energi tinggi sedangkan nomor 6 dan 7 (kadang muncul kanal 8) merupakan residu yang diakibatkan oleh efek *drift* atau *background noise*. Setelah ditentukan IMF-nya, proses rekonstruksi akan otomatis berjalan dan menghasilkan kurva data *tipper* VLF (*inphase* dan *quadrature*) yang telah diurai oleh NA-MEMD (biasanya akan lebih *smooth* dan terdapat model *forward tipper* yang bisa dijadikan sebagai bahan perbandingan). Apabila kurva rekonstruksi masih *rough*, dapat dilakukan *running* ulang dan memilih kombinasi IMF yang berbeda (program akan menampilkan nilai yang berbeda untuk setiap *running* tergantung dari proses perhitungan numerik). Jika kurva rekonstruksi cukup representatif, maka data *tipper* hasil NA-MEMD disimpan dari *Worksheet* MATLAB ke Excel untuk dilakukan pengolahan lebih lanjut. Untuk lebih singkatnya, bisa melihat Gambar 3.6 sebagai penggambaran alur kerjanya.

3.3.6. *Fraser dan Karous-Hjelt*

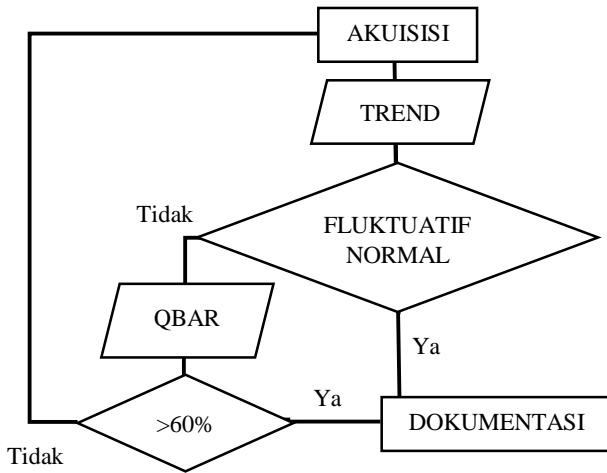
Setelah mengalami penapisan oleh algoritma NA-MEMD, data *tipper* diolah lebih lanjut memakai *filter Fraser* dan *Karous-Hjelt*. Dua *filter* ini tersedia dalam format kode MATLAB sehingga hanya perlu mencantumkan nama dan ekstensi *file* data *tipper*. Setelah dijalankan, penampang RAE (Rapat Arus Ekuivalen) sebagai hasil dari *filter KH* akan ditampilkan dan secara otomatis data *Fraser* akan disimpan dalam format XLS. Jika ingin membuat variasi *gridding* atau interpolasi data, hasil *filter KH* disimpan ke dalam format XLS setelah diekstrak dari *Worksheet* MATLAB. Variasi *gridding* dapat dilakukan dengan memakai software *Surfer*. Data *Fraser* kemudian dibuat *plot* yang menggambarkan posisi *crossing* atau anomali. Terakhir, dilakukan perbandingan mengenai posisi anomali antara hasil *KH* dengan *Fraser*.

3.3.7. **Inversi**

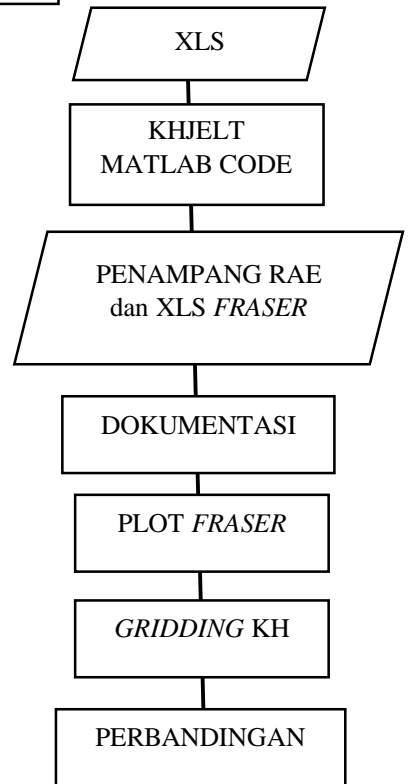
Data *tipper* selain diolah memakai *Fraser* dan *Karous-Hjelt*, juga diolah memakai program *inversi* untuk mendapatkan nilai resistivitas (*Fraser* dan *KH* hanya menampilkan posisi anomali secara kualitatif). Pertama, perlu dibuat *model grid* sebagai bahan *inversi*. Pembuatan *model grid* dilakukan berdasarkan *input* data *tipper* dengan format *file* yang telah dijelaskan oleh Santos (2006) dengan memakai program *PrepVLFForw*. Informasi yang dibutuhkan berupa data *line* (nama profil, jumlah stasiun, frekuensi, dan *offset*), data topografi, dan *mesh data* (koordinat *model grid*). Hasil dari pemodelan *grid* berupa *file tmp* yang digunakan sebagai *input* utama program *INV2DVLF*. Program *INV2DVLF* membutuhkan jumlah iterasi, parameter *Lagrange*, dan nama *output files*. Hasil *running* *INV2DVLF* berupa *FMODEL*, *FDATAR*, *FEMESH*, *SENSIV*, dan *Results.tmp* (*file* ini berisi semua model yang didapatkan selama *inversi* berlangsung). Setelah model didapatkan, kemudian dibandingkan dengan data geologi dan *Fraser-Karous Hjelt*. Jika berbeda, maka perlu dilakukan pengulangan *inversi* dengan variasi resistivitas *background* atau parameter *Lagrange*. Jika sesuai, maka hasil *inversi* sudah mencapai optimal.



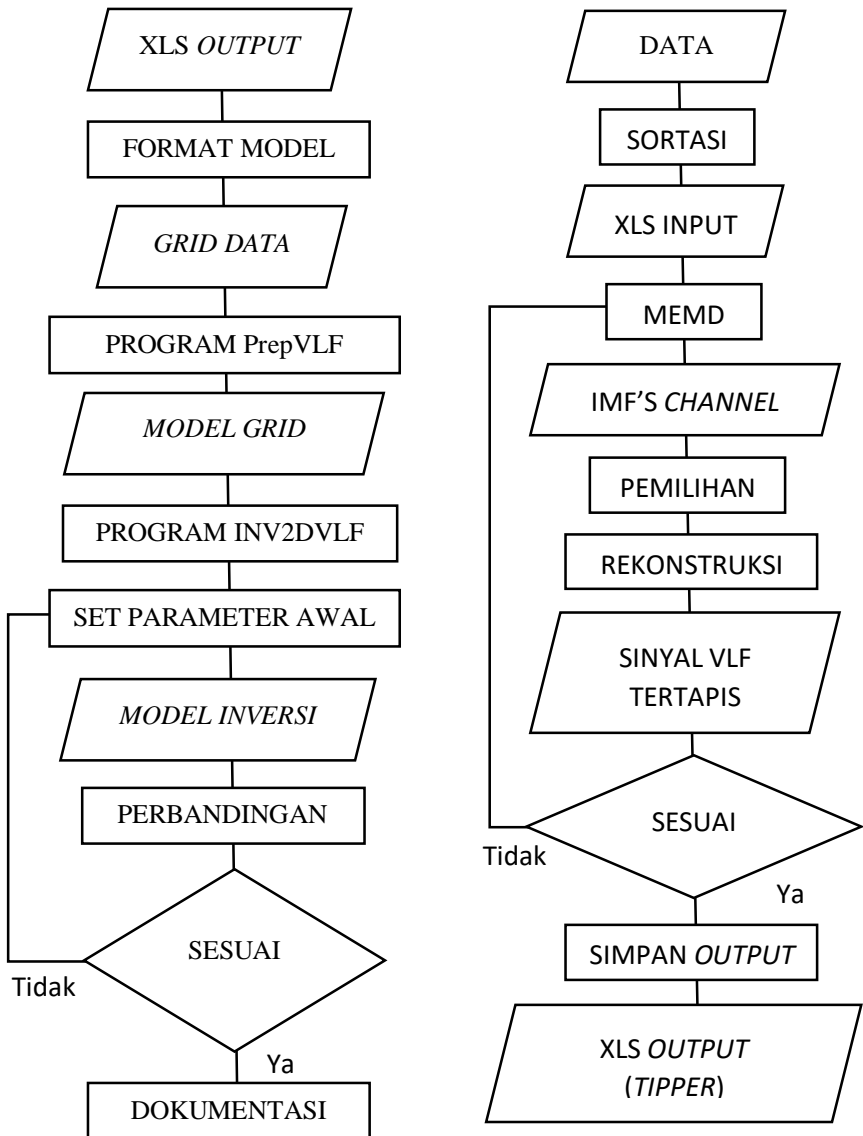
Gambar 3.3 Flowchart umum



Gambar 3.4 Flowchart QC



Gambar 3.5 Flowchart KH-fraser



Gambar 3.6 Flowchart inversi (kiri) dan NA-MEMD (kanan)

BAB IV HASIL

Bagian ini menjelaskan tentang pengolahan, analisis, dan pembahasan hasil pengukuran untuk menjawab permasalahan yang telah diajukan sebelumnya. Bagian ini terdiri atas subbab yang menjelaskan proses pemilahan data hingga analisis hasil pengolahan berupa potensi *sinkhole* di daerah terkait sebagai berikut.

4.1. Data VLF-EM

Data lapangan yang diambil pada pengukuran ini terdiri atas 3 frekuensi yang berbeda-beda tiap lintasan dan disajikan dalam Tabel 4.1 sebagai berikut,

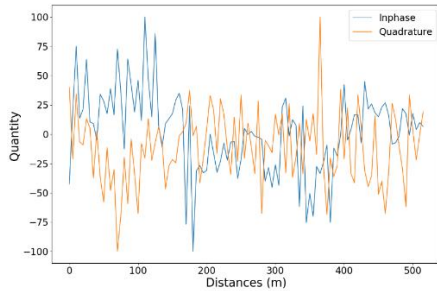
Tabel 4.1 Lintasan dan frekuensinya

No	Lintasan	Panjang (m)	Frekuensi 1 (kHz)	Frekuensi 2 (kHz)	Frekuensi 3 (kHz)
1	LV-1	515	18.3	16.1	16.8
2	LV-2	502	19.9	16.8	15.1
3	LV-3	500	19.8	15.1	15.9
4	LV-4	510	19.8	24.1	19.9
5	LV-5	500	19.8	22.2	15.8
6	LV-6	220	19.8	15.4	22.2

4.2. Penapisan Data dengan NA-MEMD

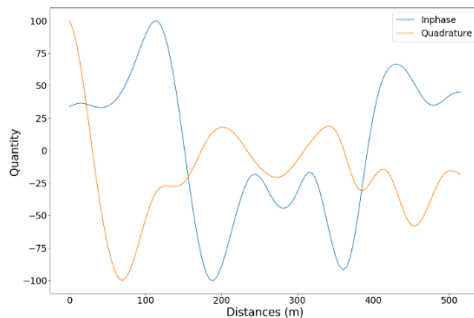
Visualisasi data akan menampilkan proporsi nilai *inphase* dan *quadrature* terhadap jarak atau panjang lintasan. Hal ini bertujuan sebagai identifikasi awal atau *quick look* pola data dan potensi adanya *outliers*. Adanya pengaruh *noise* yang cukup signifikan sehingga pola *inphase* dan *quadrature* menunjukkan tingkat fluktuasi yang tinggi. Sumber *noise* yang memungkinkan antara lain sutet, alat elektronik, instalasi, dan timbunan konduktif. Oleh karena itu, perlu penapisan awal hingga menghasilkan data dengan tingkat *noise* minimum. Hal tersebut dapat dicapai dengan salah satu *filter* yaitu NA-MEMD. Penapis tersebut akan membagi data mentah menjadi kanal IMF (*Intrinsic Mode Function*) yaitu semacam dekomposisi sinyal berdasarkan kondisi optimum gelombang (Sungkono dkk., 2016). Dengan mengaplikasikan sifat adaptif, NA-MEMD

dapat menampilkan sejumlah kanal IMF yang berbeda-beda. Nomor kanal terkecil menunjukkan bilangan gelombang yang tinggi. Hal ini berhubungan dengan *noise* frekuensi tinggi seperti sutet atau timbunan konduktif. *Noise* tersebut terlihat pada Gambar 4.1 dengan pola yang sangat fluktuatif. Sedangkan kanal residual menunjukkan pengaruh geologi dalam, *background noise*, atau efek statik.

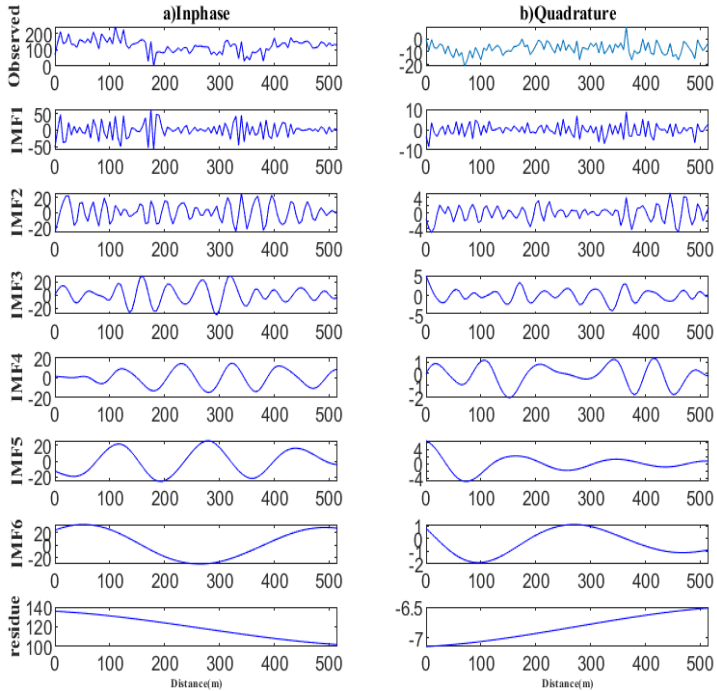


Gambar 4.1 Data *tipper* LV-1 tanpa penyaringan

Pemilihan kombinasi IMF sendiri tergantung dari karakteristik target, proses stokastik, dan penelitian terdahulu yang mirip. Dengan kata lain, pemilihan kanal tidak didasarkan pada kondisi sekitar atau kejadian tertentu melainkan kondisi geologi area penelitian seperti litologi lapisan, estimasi kedalaman target, dan struktur geologi. Namun pada umumnya, IMF 1,2, dan residual dihilangkan sehingga didapatkan data tertapis dengan *noise* minimum (Sungkono dkk., 2016). Hasil penapisan dapat dikatakan bagus ketika grafik data tertapis (*filtered data*) masih mengikuti *trend* grafik data mentah seperti pada Gambar 4.2. Contoh penguraian IMF berdasarkan *filter* NA-MEMD pada lintasan 1 pada Gambar 4.3,



Gambar 4.2 Data *tipper* LV-1 setelah ditapis

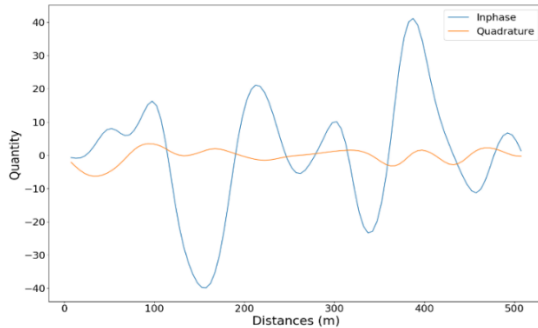


Gambar 4.3 IMF LV-1 saat penapisan dengan NA-MEMD

4.3. Pengolahan Kualitatif

Data yang sudah tersaring akan dipilah untuk dilakukan proses inversi karena tidak semua frekuensi menggambarkan pola yang bagus dan inversi sendiri membutuhkan waktu yang cukup lama dengan proses percobaan parameter dan nilai resistivitas lingkungan. Proses penentuan data inversi dimulai dari melihat grafik *fraser* dan *karous-hjelt* (KH). Setiap lintasan memiliki 3 frekuensi sehingga perlu dipilah mana yang merepresentasikan pola bawah permukaan dengan baik. Ketika *inphase* berpotongan dengan *quadrature* pada grafik *fraser* maka anomali berpotensi berada pada posisi secara horizontal sekitar perpotongan tersebut seperti terlihat pada contoh Gambar 4.4 (Yadi dkk., 2017). Ujung dari anomali yang dekat dengan permukaan mungkin terletak pada posisi puncak grafik *fraser*. *Inphase* akan naik ketika berada di depan ujung teratas konduktor dan akan turun ketika berada dibelakangnya atau sepanjang *conductive body* dengan asumsi posisi konduktor miring (Sungkono dkk., 2016). Pada sebagian besar kasus, penampang *karous-hjelt* lebih mudah diamati daripada *fraser* karena parameter distribusi rapat arus yang secara tidak langsung

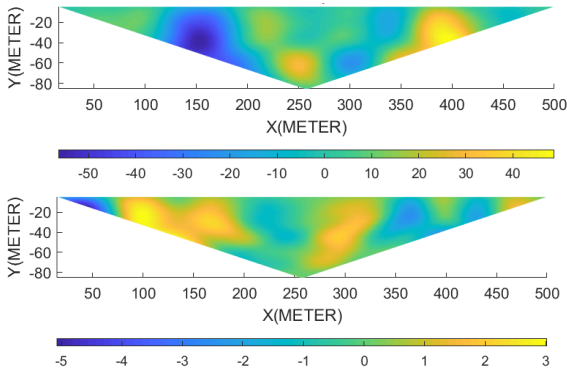
menunjukkan tingkat konduktivitas bawah permukaan dan kedalaman relatif. Dengan kata lain, *karous-hjelt* menampilkan gambaran 2D (*pseudosection*) sedangkan fraser hanya 1D (horizontal). Oleh karena itu, penampang KH memiliki bobot lebih sebagai acuan pemilahan data.



Gambar 4.4 Grafik *fraser* LV-1 frekuensi 16.1 kHz (*filtered*)

Penampang KH menggambarkan nilai rapat arus dari konversi data *tipper* menggunakan hukum *Biot-Savart* (Sungkono dkk., 2016). Tingkat densitas arus ditunjukkan dengan warna sesuai dengan skala batang. Dengan kata lain, area tersebut bersifat relatif konduktif terhadap sekitarnya seperti pada contoh Gambar 4.5. Kedalaman yang ditunjukkan penampang bersifat relatif mengikuti pola distribusi densitas arus, bukan target anomali sebenarnya.

5



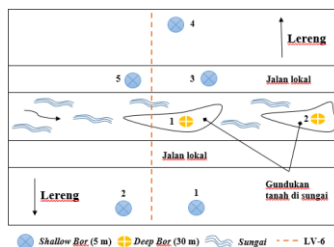
Gambar 4.5 Penampang KH *inphase* (atas) dan *quadrature* (bawah) LV-1 frekuensi 16.1 kHz (*filtered*)

Pemilahan frekuensi acuan didasarkan pada kombinasi antara KH dan inversi semua lintasan dengan pertimbangan pola tertentu atau kecocokan seperti posisi

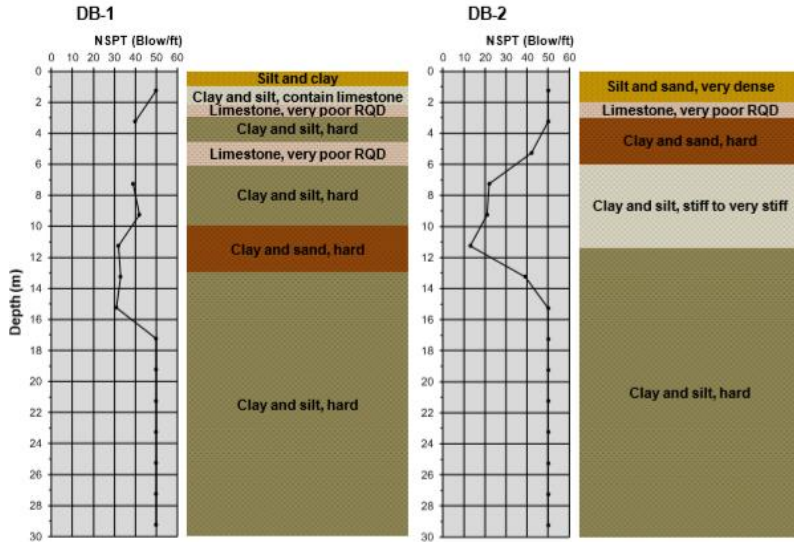
anomali secara lateral dan modulus. Kemudian pada semua lintasan, diambil nilai frekuensi yang sama ataupun yang mendekati frekuensi acuan untuk bahan analisis dan interpretasi. Jika tidak terdapat frekuensi yang sama pada lintasan tersebut atau beda nilai frekuensinya jauh, maka diambil model inversi dengan tingkat *error* terkecil. Proses inversi akan menghasilkan penampang yang tidak hanya menunjukkan estimasi nilai resistivitas melainkan posisi horizontal dan vertikalnya.

4.4. Data Sekunder

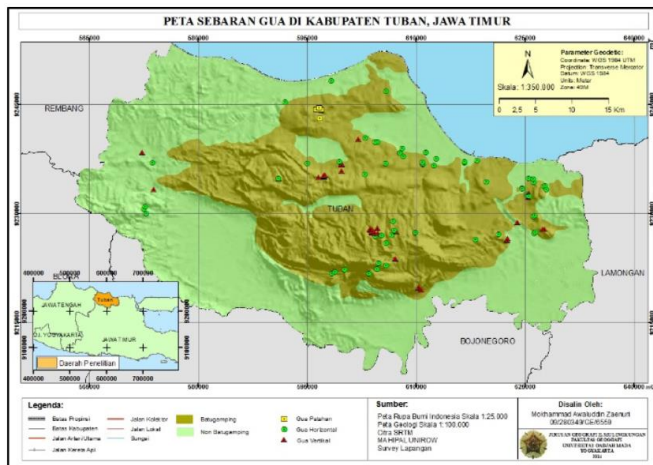
Pada area pengukuran, tepatnya di sekitar titik permulaan LV-6 dan LV-1, dilakukan survei geoteknik berupa *shallow boring log* dengan kedalaman 5 titik sedalam 5 meter dan 2 titik sedalam 30 meter (dengan SPT setiap 2 meter memakai metode *free fall hammer*) yang diilustrasikan pada Gambar 4.6. Berdasarkan hasil *shallow boring log*, diketahui bahwa lapisan bawah tanah sekitar didominasi oleh lempung berlanau tersementasi dan *limestone* bergradasi pada kedalaman kurang lebih 6 meter. Sedangkan nilai permeabilitas tanah lempung berpasir sekitar 7.43×10^{-7} cm/s pada kedalaman kurang lebih 10 meter. Pengujian indeks tanah di laboratorium menyatakan bahwa tanah lempung lokal dikategorikan sebagai CH (plastisitas tinggi), CL (plastisitas rendah), dan SM (berlanau) (Testana Engineering, Inc., 2019). Nilai berat volume (γ) yang didapatkan sekitar 1.71 hingga 1.86 t/m³ dan angka pori berkisar 0.89 hingga 1.16. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi lapisan tanah lokal termasuk dalam formasi Paciran yang didominasi batu gamping dan tanah berlempung yang dapat dilihat dari Gambar 4.7 (Testana Engineering, Inc., 2017). Dari aspek geologi, *karst* di Tuban hanya menunjukkan ciri-ciri morfologi yang terbatas dengan tingkat pembentukan sebagian. Sebagian besar bukit *karst* memiliki pola mengelompok dan bervariasi dalam aspek morfologi. Terdapat beberapa goa yang tersebar terutama di bagian tengah daerah Tuban seperti yang terlihat pada Gambar 4.8 (Zaenuri dan Haryono, 2015).



Gambar 4.6 Ilustrasi letak *boring log* (Testana Engineering, Inc., 2019)



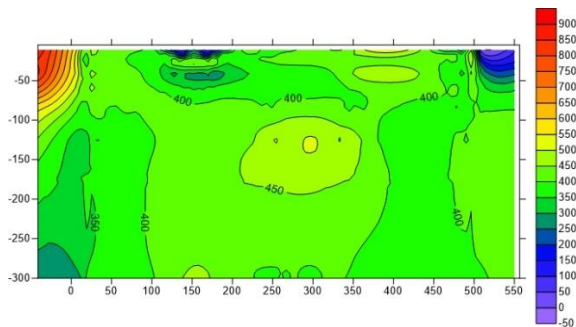
Gambar 4.7 Profil N-SPT *Deep Bor* (DB) (Testana Engineering, Inc., 2019)



Gambar 4.8 Persebaran goa bawah permukaan di Tuban (Zaenuri dan Haryono, 2015)

4.5. Pengolahan Kuantitatif

Pengolahan kuantitatif meliputi proses inversi menggunakan data yang sudah tertapis. Proses ini memakai program *INV2DVLF* dengan *input* model grid, parameter *Lagrange*, dan iterasi maksimum. Program ini memakai konsep *finite element* (F.A. Monteiro Santos dkk., 2006) dalam membuat model *grid* awal yang dilakukan dengan program *PrepVLF*, *input* data tertapis NA-MEMD, nilai resistivitas lingkungan, dan informasi topografi. Parameter yang digunakan antara lain nilai resistivitas lingkungan sebesar 400 Ω .m, *Lagrange parameter* sebesar 0.3, dan iterasi maksimum sebanyak 15 kali. Nilai resistivitas lingkungan didapatkan dengan pertimbangan resistivitas *karst* Rengel sekitar 0-300 Ω .m (Wijayanti, 2017), nilai resistivitas gamping (500-10³ Ω .m) dan lempung (1-100 Ω .m) (Telford dkk., 1990), serta parameter geoteknik (Testana Engineering, Inc., 2019). Hasil inversi berupa data *mesh* dengan nilai konduktivitas atau resistivitas, *error*, dan informasi spasial. Visualisasi penampang resistivitas memakai metode interpolasi *Krigging* sebagai berikut,



Gambar 4.9 Hasil inversi 2D lintasan LV-1

Pada Gambar 4.9 menunjukkan nilai resistivitas berdasarkan skala warna yang telah diatur untuk interval nilai semua lintasan pada *bar* disamping (dalam satuan Ω .m). Semakin tinggi nilai resistivitasnya maka area tersebut tergolong relatif resistif terhadap sekitarnya begitupun sebaliknya. Jika terdapat blok area dengan nilai mencolok dan berbeda dari sekitarnya maka dapat dikatakan bahwa area tersebut termasuk anomali. Pada LV-4, dari frekuensi 16.8 kHz dan 24.1 kHz terdapat nilai ekstrem disertai fluktuasi tinggi yang membuat kualitas data tidak bagus meskipun sudah melalui *filtering*. Hal ini dikarenakan pada *offset* tertentu, terdapat pemukiman dan aktivitas menggunakan alat elektronik yaitu *sound-system* yang diperkirakan menjadi *noise* frekuensi tinggi. Berdasarkan *RMS* (*Root Mean Square*) *error*, frekuensi modus, kombinasi *fraser* dengan *karous-*

*hjel*t, frekuensi acuan setiap lintasan untuk bahan analisis dan interpretasi ditentukan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 sebagai berikut

Tabel 4.2 *Error model inversi*

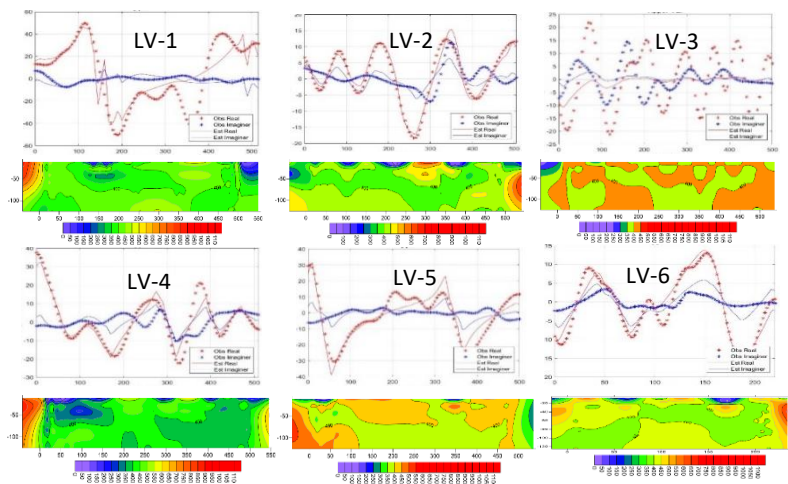
<i>Lines</i>		IMF 3-5			IMF 4-6		
1	Freq (kHz)	16.1	16.8	18.3	16.1	16.8	18.3
	<i>RMS</i>	5.00	5.91	4.91	3.75	4.74	3.83
2	Freq (kHz)	15.1	16.8	19.9	15.1	16.8	19.9
	<i>RMS</i>	3.08	3.75	2.36	1.22	2.72	0.85
3	Freq (kHz)	15.1	15.9	19.8	15.1	15.9	19.8
	<i>RMS</i>	5.03	6.57	4.46	2.22	3.28	2.74
4	Freq (kHz)	19.8	19.9	24.1	19.8	19.9	24.1
	<i>RMS</i>	3.90	200	77.2	1.55	-	-
5	Freq (kHz)	15.8	19.8	22.2	15.8	19.8	22.2
	<i>RMS</i>	1.67	2.04	1.99	1.04	1.73	1.15
6	Freq (kHz)	15.4	19.8	22.2	15.4	19.8	22.2
	<i>RMS</i>	2.57	1.63	2.86	1.73	0.77	2.31

Tabel 4.3 Frekuensi yang dipilih per lintasan

No	Lintasan	Frekuensi (kHz)
1	LV-1	16.1
2	LV-2	19.9
3	LV-3	19.8
4	LV-4	19.8
5	LV-5	19.8
6	LV-6	19.8

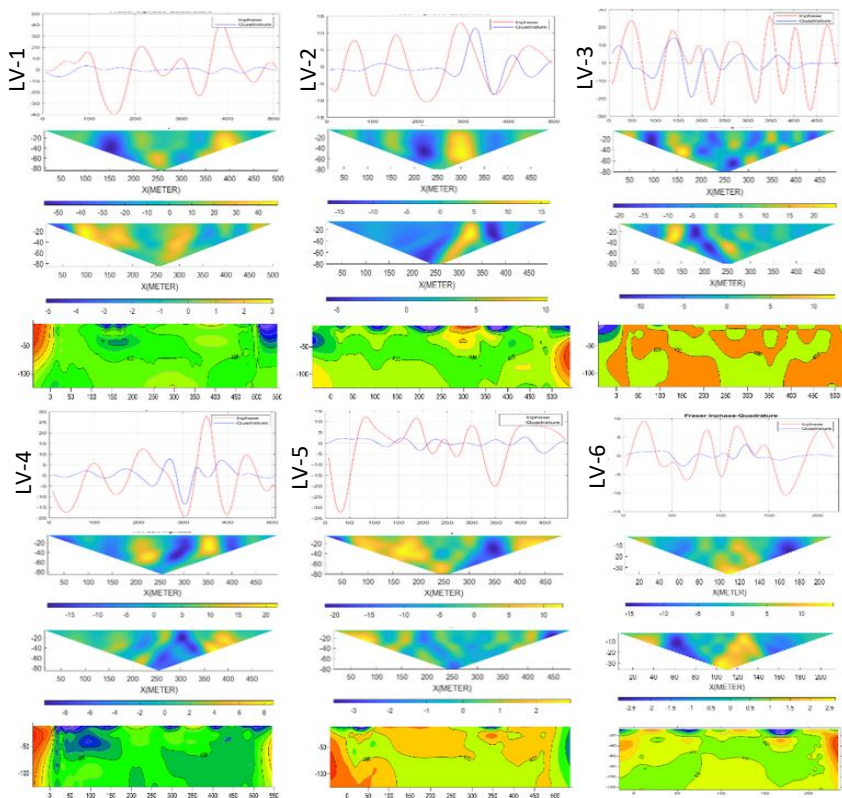
4.6. Analisis dan Interpretasi

Analisis dan interpretasi data VLF dilakukan berdasarkan model inversi yang didukung dengan penampang KH dan grafik *fraser*. Model inversi yang baik akan menunjukkan pola grafik estimasi yang bermiripan dengan grafik observasi. Grafik observasi merepresentasikan data tertapis NA-MEMD sedangkan grafik estimasi merupakan hasil kalkulasi atau data sintetik berdasarkan model inversi yang optimum. Nilai RMS yang terkecil tidak selalu menghasilkan model yang representatif atau sesuai. Gabungan model yang dianggap representatif ditampilkan pada Gambar 4.10 dibawah ini,



Gambar 4.10 Pasangan grafik rekonstruksi (atas) dan model inversi (bawah) LV-1 hingga LV-6 (pola S dari kiri atas ke kanan bawah)

Berdasarkan Gambar 4,10, penampang LV-3 menunjukkan pola data estimasi yang berbeda dari data observasi. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor seperti pemilihan IMF yang mereduksi komponen sinyal atau frekuensi penting, parameter inversi seperti *Lagrange*, resistivitas lingkungan atau *noise* tertentu. Untuk mendapatkan hasil yang meyakinkan, perlu adanya penggabungan analisis semua penampang lintasan. Pada diagram *fraser*, terlihat beberapa *crossing* yang menunjukkan potensi anomali pada Gambar 4.11,



Gambar 4.11 Kombinasi *fraser*, *inphase*, *quadrature*, dan model inversi (atas ke bawah) dari LV-1 hingga LV-6 (mengular dengan pola S dari kiri atas ke kanan bawah)

Pada LV-1, terlihat pola anomali pada model inversi dengan titik pengukuran atau *offset* sekitar 100-200 meter, kedalaman sekitar 45-50 meter, dan nilai resistivitas sekitar 150-200 Ω .m. Hal ini juga ditunjukkan pada penampang KH dengan warna biru-kuning (*inphase-quadrature*) dan *fraser* dengan pola hiperbolik terbuka pada *offset* yang sama. Kondisi sepanjang lintasan berupa lahan terasering dengan beberapa titik dijadikan tempat pengeboran. Hasil inversi dan KH (*quadrature*) menunjukkan anomali konduktif sedangkan KH (*inphase*) dan *fraser* cenderung resistif. Dari perbedaan visualisasi ini, kemungkinan terdapat *sinkhole* dengan pengisi fluida udara. Namun dengan adanya *shallow boring log* (termasuk uji permeabilitas) dan aliran sungai di sekitar titik awal LV-1 memungkinkan terjadinya infiltrasi air

melalui jalur lama akibat proses alami atau baru akibat pengeboran. Dengan memakai asumsi ini, air dapat menyebar ke bagian bawah permukaan yang kering dan berlubang sehingga penampang KH (*inphase* dan *quadrature*) yang relatif bertolak belakang memungkinkan terjadi. Dengan kata lain, *sinkhole* terisi udara akan memberikan respon anomali resistif pada *inphase* dan infiltrasi air pengeboran dan sungai yang membasahi bawah permukaan atau mengisi *sinkhole* akan memberikan hasil konduktif pada *quadrature*. Pemilihan dugaan ini berdasarkan pendekatan model *underground cave* dengan pengisi air sepenuhnya, kombinasi air dan udara, serta udara sepenuhnya. Pada model goa terisi air penuh dan udara penuh didapatkan visualisasi yang jelas. Namun pada model kombinasi, fluida udara tidak terdeteksi dengan baik (Sungkono dkk., 2016). Lintasan ini berpotongan dengan LV-6 pada *offset* sekitar 60 meter.

Pada LV-2, terlihat pola anomali konduktif pada *offset* sekitar 250-350 meter pada penampang KH dan *fraser*. Model inversi juga memperlihatkan adanya anomali konduktif dekat permukaan pada *offset* yang sama. Kondisi sepanjang lintasan lahan terbuka dari *offset* 0-250 meter kemudian beberapa bekas tambang kapur tradisional pada *offset* 250-450 meter dan sisanya berupa ladang dan pemukiman. Oleh karena itu, anomali tersebut bukan berupa *sinkhole* dilihat dari kedalaman dan kondisi lintasan.

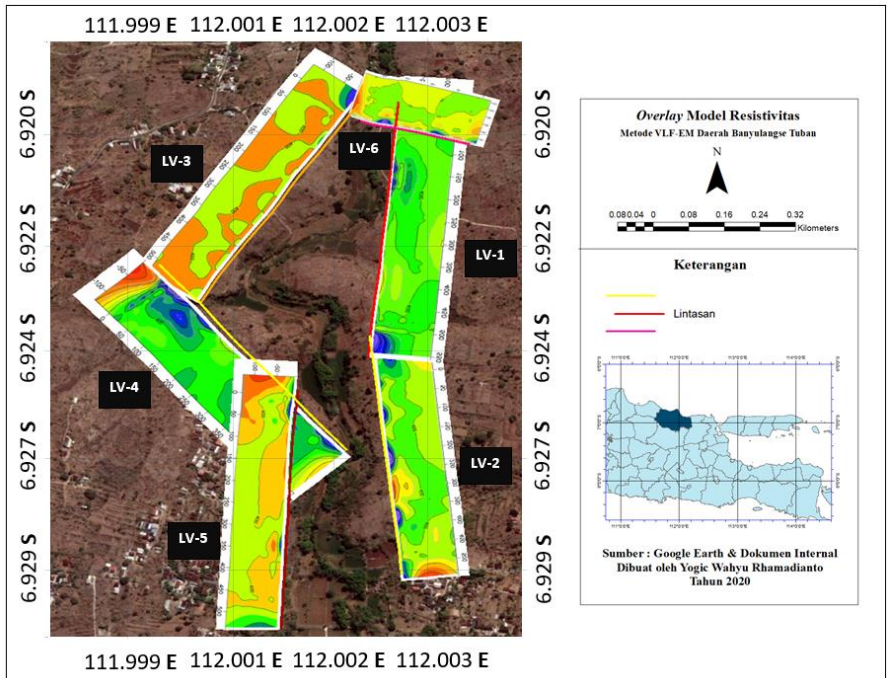
Pada LV-3, terlihat pola resistif dengan nilai resistivitas 400-450 Ω .m yang diduga sebagai batu gamping yang masih kompak. Kondisi lapangan berupa lahan terbuka kemudian persawahan setelah menempuh *offset* sekitar 480 meter. Kontur lintasan memiliki gradien ketinggian yang fluktuatif sekitar 1-5 meter. Letak lintasan yang relatif jauh sekitar 25-35 meter dan ketinggian sekitar 30-50 meter terhadap badan sungai ditambah dengan kondisi berupa lahan terbuka memperkecil kemungkinan infiltrasi air sehingga bawah permukaan dapat dikatakan sebagai lapisan kompak tanpa terdeteksi *sinkhole*.

Pada LV-4, terlihat anomali konduktif pada model inversi dengan nilai resistivitas sekitar 200-300 Ω .m, *offset* sekitar 50-150 meter, dan kedalaman sekitar 25-60 meter. Hal ini juga diperkuat dengan penampang KH (*inphase*) dan *fraser* yang menunjukkan adanya anomali konduktif pada *offset* yang sama. Adapun sungai kecil pada *offset* 120-130 meter di sekitar lintasan LV-4 yang diduga meresap ke bawah permukaan. Anomali ini diduga berupa *sinkhole* yang berisikan air resapan dari sungai kecil di permukaan. Bentuk kasar *sinkhole* dan distribusi infiltrasi air dapat dilihat pada model inversi dan kemungkinan *sinkhole* tidak terisi penuh oleh air dikarenakan permeabilitas tanah lokal sekitar 7.43×10^{-7} cm/s dan penampang *inphase* tidak menunjukkan densitas arus yang relatif besar. Sedangkan pada ujung lintasan dengan *offset* 350-450 meter terlihat titik maksimum *inphase* yang mengindikasikan anomali konduktif kuat. Namun

pada rentang *offset* tersebut, lintasan relatif dekat dengan badan sungai yang lebih besar. Area yang dekat dengan air permukaan dengan volume masif rentan menjadi tempat infiltrasi air permukaan ke dalam tanah sehingga area sekitarnya menjadi badan konduktif dan pembacaan nilai cenderung merepresentasikan air permukaan (badan sungai besar). Hal ini juga ditunjukkan dengan distribusi zona resistivitas sekitar 300-350 Ω .m, lebih rendah dari resistivitas lingkungan yang dipakai sekitar 400 Ω .m. Pada zona tersebut terdapat blok kecil atau anomali dengan resistivitas yang lebih rendah sekitar 100-150 Ω .m pada *offset* sekitar 440 meter dan kedalaman sekitar 45 meter. Anomali tersebut diduga sebagai *sinkhole* kecil tersaturasi air berada sekitar di bawah badan sungai besar.

Pada LV-5 terlihat pola zona resistif dengan nilai sekitar 400-450 Ω .m pada *offset* 0-50 meter dan kedalaman lebih dari 60 meter. Kemungkinan area ini diduga sebagai area batuan gamping yang masih kompak atau belum mengalami erosi dan pelarutan yang signifikan. Hal ini diperkuat dengan dekatnya lintasan dengan perkebunan dan pemukiman dengan jarak sekitar 100-200 meter dan ketinggian sekitar 50-60 meter terhadap badan sungai sehingga kemungkinan infiltrasi atau pengaruh air sungai kecil. Sedangkan area konduktif dekat permukaan diakibatkan *noise* seperti kabel listrik dan benda logam. Namun pada *offset* sekitar 350 meter dan kedalaman 30-40 meter terlihat anomali kecil yang lebih resistif dari sekitar 550-650 Ω .m. Bentuk ini diduga sebagai *sinkhole* berisi udara karena KH, *fraser*, dan inversi menunjukkan pola resistif dan geometri blok anomali yang sesuai. Dugaan ini dikaitkan dengan kecilnya perbedaan ketinggian dan jarak dari badan sungai daripada zona resistif pertama yang meningkatkan kemungkinan infiltrasi air untuk pelarutan terutama pada batu gamping.

Pada LV-6, lintasan ini berpotongan dengan LV-1 pada *offset* 50 meter. Pada *offset* 0-50 merupakan zona konduktif berdasarkan penampang KH. Hal ini disebabkan pada *offset* 16-24 meter, lintasan memotong sungai. Namun pada model inversi tidak menunjukkan secara jelas anomali konduktif kecuali pada permukaan pada *offset* 50-70 meter dan 150-180 meter. Kondisi lapangan setelah *offset* 24 meter merupakan lahan terasering dengan beberapa titik dijadikan tempat *shallow boring log*. Aktivitas ini bisa menjadi *noise*. Oleh karena itu, dua anomali tersebut diragukan sebagai *sinkhole* dilihat dari adanya *boring log* di sekitar lintasan dan posisi anomali pada model inversi. Pada akhirnya, hasil analisis dan interpretasi kemudian digabung dan ditimpa pada desain akuisisi untuk melihat pola gabungan antara lintasan satu dengan yang lainnya pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 *Overlay* model inversi pada lintasan akuisisi

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan pembahasan sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut,

1. Pendugaan lapisan dan anomali bawah permukaan dapat digambarkan dengan baik dari model resistivitas dengan rentang nilai sekitar 50-1000 Ω .m. Interval tersebut sesuai dengan formasi Paciran yang tersusun sebagian besar oleh batu gamping dan lempung berlanau.
2. Potensi anomali yang ditemukan pada area pengukuran antara lain,
 - a. Lintasan LV-1 pada titik pengukuran 100-200 meter dan kedalaman 45-50 meter dengan resistivitas 150-200 Ω .m diduga sebagai *sinkhole* berisi dominan air.
 - b. Lintasan LV-4 pada titik pengukuran 50-150 meter dan kedalaman 45-50 meter dengan resistivitas 200-300 Ω .m serta titik pengukuran sekitar 440 meter dan kedalaman 30-40 meter dengan resistivitas 100-150 Ω .m. Keduanya diduga sebagai *sinkhole* berisi dominan air.
 - c. Lintasan LV-5 pada titik pengukuran sekitar 350 meter dan kedalaman sekitar 30-40 meter dengan resistivitas 550-650 Ω .m diduga sebagai *sinkhole* berisi dominan udara.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian ini, saran yang dapat diajukan untuk menjadi perbandingan atau peningkatan hasil penelitian di waktu yang datang antara lain,

1. Pengujian terhadap hasil pengolahan baik itu secara bor ataupun penggalian di area *interest*.
2. Perlunya metode geofisika lain sebagai pendukung mengingat metode VLF-EM termasuk dalam metode survei awal dengan tingkat validasi atau kepercayaan data menengah.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

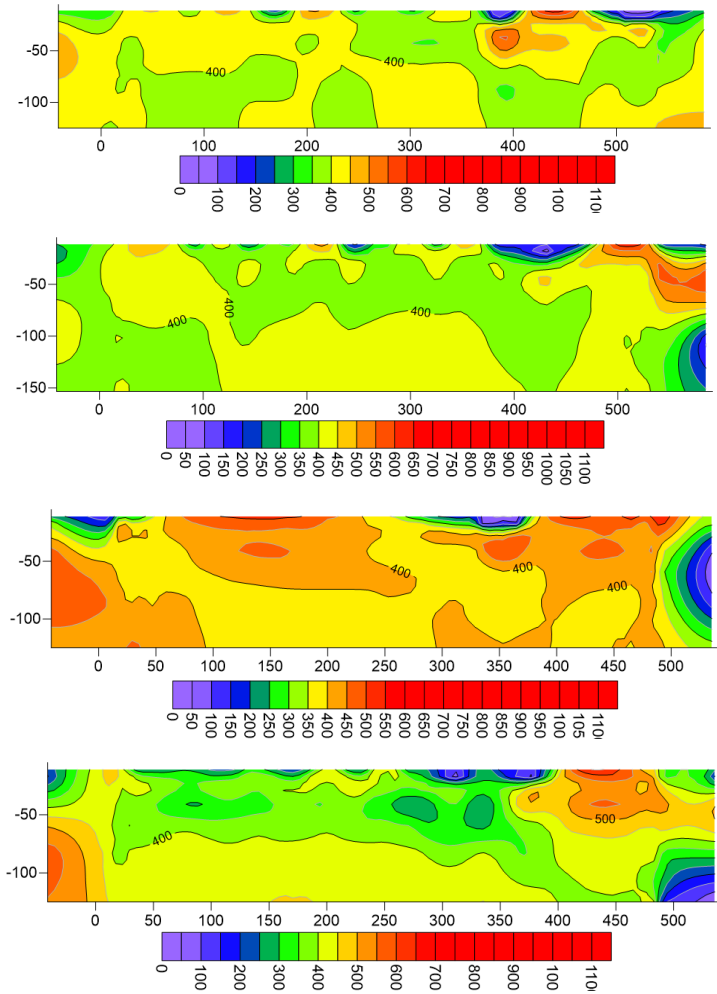
- Adji, T.N., Fatchurohman, H., Bahtiar, I.Y. dan Mujib, M.A. (2017), "Analisis Tingkat Perkembangan Akuifer Karst di Kawasan Karst Gunung Sewu, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Karst Rengel, Tuban, Jawa Timur Berdasarkan Analisis Hidrograf", dipublikasikan oleh INA-Rxiv, <http://doi.org/10.31227/osf.io/vr8sp>.
- Ammar, A.I. dan Kruse, S.E. (2016), "Resistivity Soundings and VLF Profiles for Siting Groundwater Wells in a Fractured Basement Aquifer in the Arabian Shield, Saudi Arabia", *Journal of African Earth Sciences*, Vol.116, hal. 56–67. <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.12.020>.
- Anita, F. dan Purwantiningsih, P. (2018), "Estimasi aliran sungai bawah tanah di daerah Dengok dan Ngrejok Wetan Gunung Kidul menggunakan metode VLF-EM dan VLF-EM-VGRAD", *Sainstek : Jurnal Sains dan Teknologi*, Vol.9, No.2, hal. 123. <http://doi.org/10.31958/js.v9i2.607>.
- Argentieri, A., Carluccio, R., Cecchini, F., Chiappini, M., Ciotoli, G., De Ritis, R., Di Filippo, M., Di Nezza, M., Marchetti, M., Margottini, S., Materni, V., Meloni, F., Nardi, A., Rotella, G., Sapia, V. dan Venuti, A. (2015), "Early Stage Sinkhole Formation in the Acque Albule Basin of Central Italy from Geophysical and Geochemical Observations", *Engineering Geology*, Vol.191. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.03.010>.
- Bayrak, M. dan Şenel, L. (2012), "Two-Dimensional Resistivity Imaging in the Kestelek Boron Area by VLF and DC Resistivity Methods", *Journal of Applied Geophysics*, <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.03.010>.
- Bosch, F.P. dan Muller, I. (2001), "Continuous Gradient VLF Measurements: A New Possibility for High Resolution Mapping of Karst Structures", *First Break*, Vol.19, No.6, hal. 343–350. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2397.2001.00173.x>.
- Ebrahimi, A., Sundararajan, N. dan Ramesh Babu, V. (2019), "A Comparative Study for the Source Depth Estimation of Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) Signals", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.162, hal. 174–183. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.01.007>.
- Fraser, D.C. (1969), "Contouring of VLF-EM Data", *GEOPHYSICS*, Vol.34, No.6, hal. 958–967. <http://doi.org/10.1190/1.1440065>.
- Guo, Z., Xue, G., Liu, J. dan Wu, X. (2020), "Electromagnetic Methods for Mineral Exploration in China: A Review", *Ore Geology Reviews*, Vol.118, hal. 103357. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103357>.
- Husein, S. (2016), *Fieldtrip "Geologi Cekungan Jawa Timur Utara"*, Universitas Gajah Mada dan PT.Geodwipa Teknik Nusantara, Indonesia. https://www.researchgate.net/publication/315486479_Fieldtrip_Geologi_Cekungan_Jawa_Timur_Utura.

- Husein, S. dan Moch Nukman (2015), "Rekonstruksi Tektonik Mikrokontinen Pegunungan Selatan Jawa Timur: Sebuah Hipotesis Berdasarkan Analisis Kemagnetan Purba", *Seminar Nasional Kebumihan ke-8 Jurusan Teknik Geologi Universitas Gajah Mada, Daerah Istimewa Yogyakarta*. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.3325.5126>.
- Jamal, N. dan Singh, N.P. (2018), "Identification of Fracture Zones for Groundwater Exploration Using Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) and Electrical Resistivity (ER) Methods in Hard Rock Area of Sangod Block, Kota District, Rajasthan, India", *Groundwater for Sustainable Development*. <http://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.05.003>.
- Karçioğlu, G. (2019), "Near-Surface Resistivity Structure near Avcılar Landslide in İstanbul, Turkey by 2D Inversion of VLF Data", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.163. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.02.012>.
- Karous, M. dan Hjelt, S.E. (1983), "Linear Filtering of VLF Dip-Angle Measurements", *Geophysical Prospecting*, Vol.31, No.5, hal. 782–794. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01085.x>.
- Lewin, J. dan Woodward, J. (2009), "Karst Geomorphology and Environmental Change", dalam *The Physical Geography of Mediterranean*, Karst Geomorphology and Environmental Change, Oxford University Press. https://www.researchgate.net/publication/259470163_Karst_Geomorphology_and_Environmental_Change.
- McNeill, J.D. dan Labson, V.F. (1991), "Geological Mapping Using VLF Radio Fields", dalam *Electromagnetic Method in Applied Geophysics-Applications Part B*, Society of Exploration Geophysicists, USA. <http://doi.org/10.1190/1.9781560802686>.
- Monteiro Santos, F.A., Mateus, A., Figueiras, J. dan Gonçalves, M.A. (2006), "Mapping Groundwater Contamination around a Landfill Facility Using the VLF-EM Method — A Case Study", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.60. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.01.002>.
- Monteiro Santos, Fernando A., Almeida, E.P., Gomes, M. dan Pina, A. (2006), "Hydrogeological Investigation in Santiago Island (Cabo Verde) Using Magnetotellurics and VLF Methods", *Journal of African Earth Sciences*, Vol.45. <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.03.012>.
- Nabighian, M.N. (1991), "Society of Exploration Geophysicists" ed. Corbett, J. D., *Society of Exploration Geophysicist*, Vol.II, hal. 826. <http://doi.org/https://doi.org/10.1190/1.9781560802686>.
- Pazzi, V., Tapete, D., Cappuccini, L. dan Fanti, R. (2016), "An Electric and Electromagnetic Geophysical Approach for Subsurface Investigation of Anthropogenic Mounds in an Urban Environment", *Geomorphology*, Vol.273, hal. 335–347. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.035>.

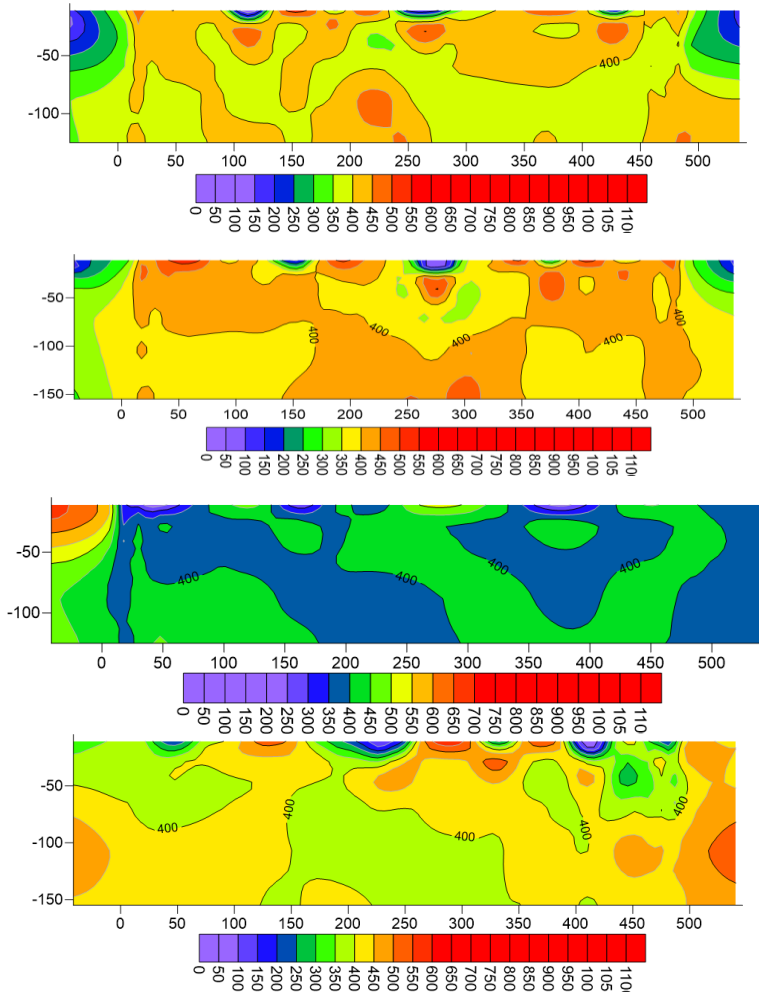
- Popoola, O.I. dan Adenuga, O.A. (2019), "Determination of Leachate Curtailment Capacity of Selected Dumpsites in Ogun State Southwestern Nigeria Using Integrated Geophysical Methods", *Scientific African Vol. 6*, <http://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00208>.
- Sharma, S.P., Biswas, A. dan Baranwal, V.C. (2014), "Very Low-Frequency Electromagnetic Method: A Shallow Subsurface Investigation Technique for Geophysical Applications", dalam *Recent Trends in Modelling of Environmental Contaminants*, eds. Sengupta, D., Springer India, New Delhi, hal. 119–141. http://doi.org/10.1007/978-81-322-1783-1_5.
- Shofyan, M.S., Hilyah, A. dan Rochman, J.P.G.N. (2016), "Penerapan Metode Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) Untuk Mendeteksi Rekahan Pada Daerah Tanggulangin, Sidoarjo", *Jurnal Geosaintek*, Vol.2, No.2, hal. 129. <http://doi.org/10.12962/j25023659.v2i2.1927>.
- Singh, A. dan Sharma, S.P. (2016), "Interpretation of Very Low Frequency Electromagnetic Measurements in Terms of Normalized Current Density over Variable Topography", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.133, hal. 82–91. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.018>.
- Sungkono, Santosa, B.J., Bahri, A.S., Santos, F.M. dan Iswahyudi, A. (2016), "Application of Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition in VLF-EM Data to Identify Underground River.", *World Scientific Publishing Journal Volume 8*, No.3, hal. 23. <http://doi.org/10.1142/S2424922X1650011X>.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. dan Sheriff, R.E. (1990), *Applied Geophysics*, 2 Ed., Cambridge University Press, United Kingdom. Diambil dari <https://books.google.co.id/books?id=oRP5fZYjhXMC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>.
- Testana Engineering, Inc. (2017), *Laporan Penyelidikan Tanah*, Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Bidang Sumber Daya Air Pemerintah Kabupaten Tuban, Desa Jadi, Kecamatan Semanding, Kabupaten Tuban.
- Testana Engineering, Inc. (2019), *Laporan Penyelidikan Tanah*, CV.Imaji Konsultan Surabaya, Semanding, Tuban, Jawa Timur.
- Van Bemmelen, R.W. (1949), *Geology of Indonesia Vol II Economic Geology*, U.S. Government Printing Office, USA. Diambil dari https://books.google.co.id/books/about/The_Geology_of_Indonesia_Vol_II.html?id=uF0yygEACAAJ&redir_esc=y.
- Warnana, D.D., Yadi, K., Rochman, J.P.G.N., Sutra, N. dan A. Soemitro, R.A. (2017), "Deteksi Persebaran Air Lindi Menggunakan Inversi VLF-EM Studi Kasus TPA Ngipik", *Jurnal Geosaintek*, Vol.3, No.2, hal. 99. <http://doi.org/10.12962/j25023659.v3i2.2964>.

- eds. White, W. B., Culver, D., dan Pipan, T. (2019), "Encyclopedia of Caves, Third.", Elsevier Inc, San Diego, United States of America. <https://www.elsevier.com/books/encyclopedia-of-caves/white/978-0-12-814124-3>.
- Wijayanti, N. (2017), "Pemetaan aliran sungai bawah tanah di daerah Rengel-Tuban dengan menggunakan metode Very Low Frequency-Electromagnetic (VLF-EM)", ITS Surabaya. Diambil dari (*Institutional Website or Repository*) <http://repository.its.ac.id/id/eprint/3439>.
- Wijayanto, T., Santosa, B.J., Warnana, D.D. dan Candra, A.D. (2015), "Penerapan metode Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) untuk menafsirkan bidang longsoran, studi kasus desa Jombok, Kecamatan Ngantang, Kabupaten Malang, Jawa Timur", *Jurnal Spektra* <http://journal.unj.ac.id/unj/index.php/spektra/article/view/5841>.
- Yadi, K., Warnana, D.D., G.N.R., J.P., Sutra, N. dan A. Soemitro, R.A. (2017), "Interpretasi Filter Fraser dan Karous-Hjelt Pada Data VLF-EM Untuk Mengidentifikasi Air Lindi di Area TPA Ngipik", *Jurnal Teknik ITS*, Vol.6. <http://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.24356>.
- Yoku, R. (2015), "Penentuan Struktur Bawah Permukaan Daerah Taman Wisata Pemandian Air Panas Tahura R Soerjo Cagar Menggunakan Metode VLF-EM", ITS Surabaya. Diambil dari (*Institutional Website or Repository*) <http://repository.its.ac.id/id/eprint/72120>.
- Youssef, M.A.A., Abd El-Gawad, A.M.S. dan Farag, K.S.I. (2018), "Iron Ore Prospecting Based on Very Low Frequency-Electromagnetic and Geoelectrical Resistivity at Wadi Abu Subeira, Northeastern Aswan, South Egypt", *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Vol.7, No.2, hal. 253–263. <http://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.08.002>.
- Zaenuri, M.A. dan Haryono, E. (2015), "Diferensiasi morfologi karst Kabupaten Tuban-Jawa Timur", Universitas Gajah Mada, Yogyakarta. Diambil dari <http://lib.geo.ugm.ac.id/ojs/index.php/jbi/article/view/266/243>.

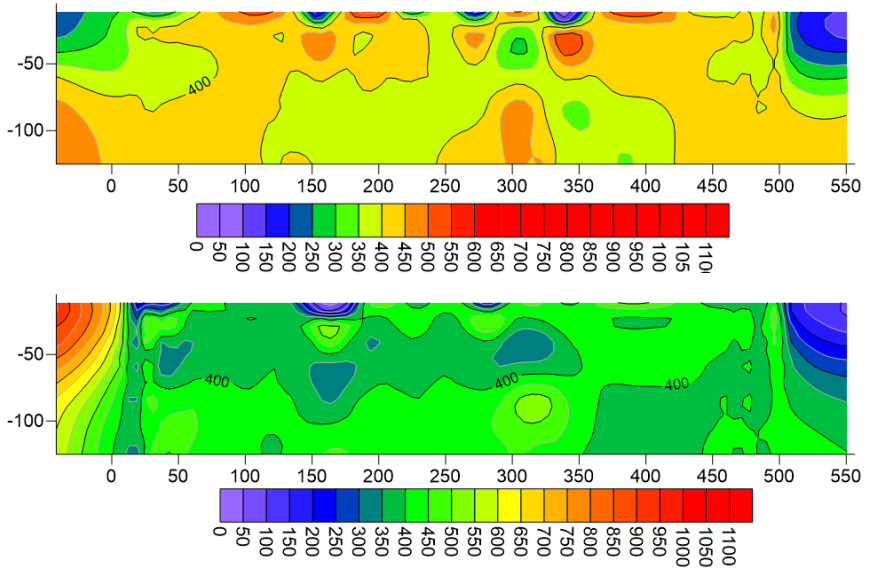
LAMPIRAN



Gambar 1. Model inversi LV-6 (22.2 kHz dan 15.8 kHz) dan LV-5 (22.2 kHz dan 15.8 kHz) (atas ke bawah)



Gambar 2. Model inversi LV-3 (15.9 kHz dan 15.1 kHz) dan LV-2 (16.8 kHz dan 15.1 kHz) (atas ke bawah)



Gambar 3. Model inversi LV-1 18.3 kHz (atas) dan 16.8 kHz (bawah)



Gambar 4. Start point lintasan LV-6



Gambar 5. Temuan goa, lubang, dan amblesan yang terlihat di sekitar lintasan pengukuran.

Biografi Penulis



Yogic Wahyu Rhamadianto lahir di Kediri, 30 Desember 1997 sebagai putra sulung dari pasangan Sumianto dan Darti. Pendidikan formal penulis dimulai dari SDN Doko (2004-2010), SMPN 3 Kota Kediri (2010-2013), SMAN 1 Kota Kediri (2013-2016) dan kini sedang menempuh perkuliahan di Departemen Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis berkontribusi aktif dalam bidang akademik maupun non-akademik. Di bidang akademik, penulis pernah menjadi asisten laboratorium Petrofisika dan laboratorium Fisika

Dasar pada tahun ajaran 2018/2019. Penulis juga merupakan asisten mata kuliah seismologi. Di bidang non-akademik, penulis pernah mengikuti *Workshop* Kepenulisan BIMITS 2018 dan EPW ITS 2018. Selain itu penulis pernah menjadi staff departemen RISTEK HMTG ITS periode tahun 2017/2018 dan Kadiv HRD Al-Ardh periode tahun 2018. Penulis juga memiliki pengalaman tergabung dalam tim PKM Eksakta-Humaniora pada tahun 2016 dan menjadi ketua tim PKM-GT tahun 2018 yang berhasil didanai. Penulis juga ikut andil dalam acara olimpiade kebumian nasional GEOSPHERE 2019 sebagai panitia kompetisi interpretasi *well log*. Penulis mendapatkan kesempatan mengikuti survei atau pemetaan proyek bendungan daerah Tuban bersama beberapa tenaga lapangan untuk dijadikan topik tugas akhir. Apabila ada yang didiskusikan lebih lanjut, dapat menghubungi penulis via email: yogicrhama@gmail.com.