



TUGAS AKHIR - SF 184801

**IDENTIFIKASI SESAR PASURUAN
MENGUNAKAN METODE *VERY LOW
FREQUENCY ELECTROMAGNETIC***

**M. RIZAL ARIS MAULANA
NRP 0111164000031**

**Dosen Pembimbing
Dr. Sungkono**

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



TUGAS AKHIR - SF 184801

**IDENTIFIKASI SESAR PASURUAN
MENGUNAKAN METODE *VERY LOW
FREQUENCY ELECTROMAGNETIC***

**M. RIZAL ARIS MAULANA
NRP 0111164000031**

**Dosen Pembimbing
Dr. Sungkono**

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - SF 184801

**IDENTIFICATION OF PASURUAN FAULT
USING VERY LOW ELECTROMAGNETIC
METHOD**

**M. RIZAL ARIS MAULANA
NRP 0111164000031**

**Advisor
Dr. Sungkono**

**DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE AND DATA ANALITIC
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN
“IDENTIFIKASI SESAR PASURUAN
MENGGUNAKAN METODE *VERY LOW*
***FREQUENCY ELECTROMAGNETIC*”**

Disusun untuk memenuhi syarat kelulusan mata kuliah Tugas
Akhir Program Strata I
Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Disusun Oleh :
M. RIZAL ARIS MAULANA
NRP. 01111640000031

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

Dr. Sungkono

NIP. 19850702.201404.1.002



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**“IDENTIFIKASI SESAR PASURUAN MENGGUNAKAN
METODE *VERY LOW FREQUENCY
ELECTROMAGNETIC*”**

Nama : M. Rizal Aris Maulana
NRP : 0111164000031
Departemen : Fisika, ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Sungkono

ABSTRAK

Sesar Pasuruan merupakan salah satu sesar aktif di Jawa Timur. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, mengkarakterisasi, dan mengetahui arah dari Sesar Pasuruan menggunakan metode *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM). Akuisisi data dilakukan menggunakan 4 lintasan yang terbentang sejauh 1 km dengan jarak antar titik sepanjang 10 meter untuk 2 lintasan dan 5 meter untuk 2 lintasan lainnya. Hasil akuisisi data VLF-EM berupa *in-phase*, *quadrature*, *total field*, dan *tilt angle*. Data-data tersebut masih terpengaruh oleh adanya *noise*, sehingga metode *noise assisted-multivariate empirical mode decomposition* (NA-MEMD) diaplikasikan untuk mereduksi *noise*. Selanjutnya, data terfilter NA-MEMD dianalisa secara kualitatif menggunakan filter Fraser dan K-Hjelt untuk mengetahui zona resistif dan konduktif. Selain itu, analisa kuantitatif untuk mengetahui resistivitas 2D berdasarkan data *in-phase* dan *quadrature*. Analisa secara kualitatif dan kuantitatif pada keempat lintasan menunjukkan letak anomali konduktif yang diduga sebagai Sesar Pasuruan. Selanjutnya, Sesar Pasuruan ini melewati Formasi Rabano yang didominasi oleh tufa dan batu pasir yang teridentifikasi oleh nilai resistivitas 0–75 Ωm pada kedalaman berkisar 5–35 meter yang membentang dari arah barat laut hingga tenggara. Posisi jalur sesar dan kedalaman sesar ini sesuai dengan penelitian sebelumnya.

Kata Kunci : Fraser, Inversi, K-Hjelt, NA-MEMD, Sesar Pasuruan, VLF-EM

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

“IDENTIFICATION OF PASURUAN FAULT USING VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC METHOD”

Name : M. Rizal Aris Maulana
NRP : 0111164000031
Departement : Physics, ITS
Advisor Lecturer : Dr. Sungkono

ABSTRACT

Pasuruan Fault is an active fault in East Java. The aim of this research is to identify, characterize, and determine the direction of the Pasuruan Fault using very low frequency electromagnetic (VLF-EM) method. Data acquisition is carried out using 4 lines that extend 1 km with a distance between points along 10 meters for 2 lines and 5 meters for 2 other lines. The results of data acquisition VLF-EM are in-phase, quadrature, total field, and tilt angle. The data are still affected by noise, consequently noise assisted-multivariate empirical mode decomposition (NA-MEMD) method is applied to reduce noise. Furthermore, NA-MEMD filtered data were analyzed qualitatively using Fraser and K-Hjelt filters to determine the resistive and conductive zones. In addition, quantitative analysis to determine 2D resistivity based on in-phase and quadrature data. Qualitative and quantitative analyse of the four lines show the conductive anomaly interpreted as to be the Pasuruan Fault. Furthermore, Pasuruan Fault passes through the Rabano Formation which is dominated by tuffs and sandstone which are identified by resistivity values of 0–75 Ωm at depths ranging from 5–35 meters stretching from northwest to southeast. The position track and depth of Pasuruan Fault are appropriate with previous research.

Keyword : *Fraser, Inversion, K-Hjelt, NA-MEMD, Pasuruan Fault, VLF-EM*

“This page is intentionally left blank”

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kepada Allah SWT, karena-Nya lah Tugas Akhir dengan judul “Identifikasi Sesar Pasuruan Menggunakan Metode *Very Low Frequency Electromagnetic*” dapat terselesaikan dengan baik. Namun, hal tersebut tidak luput dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Walaupun penulis tak dapat membalasnya dengan hal yang setimpal. Sehingga, hanya bisa membalasnya dengan mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Sungkono, selaku dosen pembimbing serta dosen wali penulis selama studi di Departemen Fisika ITS. Beliau telah memberikan seluruh waktu dan jasanya dalam menyelesaikan pengerjaan Tugas Akhir penulis.
2. Bapak Anang, selaku donator pada penyelesaian Tugas Akhir penulis.
3. Bapak Kepala Dusun Pasinan dan segenap warga Dusun Pasinan yang menyediakan ruang di balai desa sebagai tempat penginapan penulis bersama rekan-rekan selama penelitian. Serta, memberikan kesempatan penulis untuk melakukan penelitian di dusunnya.
4. Mas Bram dan Mas Haidar selaku rekan penulis saat proses pengukuran penelitian. Mereka telah menyediakan waktu, raga, dan jasanya dalam proses pengukuran selama 3 hari.
5. Papa Abdul Mukti dan Ibu Djum’ati Maisyaroh selaku orang tua dan Maknyai Fatimah selaku nenek penulis, yang tiada henti membantu penulis baik secara material maupun non-material selama pengerjaan Tugas Akhir.
6. Bapak Dr. Gatut Yudoyono, MT. selaku Kepala Departemen Fisika ITS.
7. Pak Kis yang lebih akrab dengan sapaan Mbah Po. Beliau telah memberikan waktu dan jasanya yang sangat telaten dalam mengurus alat *receiver* dari VLF hingga dapat digunakan kembali dengan normal.

8. Bapak/Ibu dosen Departemen Fisika ITS yang turut serta dalam membantu baik materi maupun non-materi serta mendukung penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir.
9. Pak Yudi, Mas Edo, Bu Ismi, dan seluruh Staff Tata Usaha Departemen Fisika ITS yang juga bersedia jasanya direpoti untuk mengetahui keberadaan Kepala Departemen untuk keperluan tanda tangan selama pengerjaan Tugas Akhir.
10. Audi yang sempat menjadi partner penulis dalam proses pengukuran data VLF-EM yang hanya berjalan selama 4 hari. Namun, pengukuran tersebut belum membuahkan hasil sebab alat VLF-EM yang masih belum optimal.
11. Mas Ufal, selaku kakak penulis, dan Mbak Jidah, selaku kakak ipar penulis. Tak lupa Adek Libas dan Adek Ibrahim, selaku keponakan penulis yang tiada henti selalu menghibur penulis saat mengalami kepenatan dalam pengerjaan Tugas Akhir.
12. Mas Rifki yang lebih akrab dipanggil dengan Mas CP, dan juga Mbak Anisah yang lebih akrab dipanggil dengan Mbak Be. Mereka telah memberikan kesenggangan waktunya untuk membalas pertanyaan-pertanyaan selama penulis mengalami kebingungan *via* media sosial (*LINE*).
13. Mbak Latifa yang kerap kali membantu penulis untuk menyusun kalimat secara baik dan benar secara virtual (*WhatsApp*).
14. Alvira Syahfitri Ispriadi, selaku teman tercinta penulis yang sanggup meluangkan waktunya dalam menghibur penulis di kala mengalami kebuntuan dan juga memberikan masukan serta dorongan motivasi selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
15. Teman-teman Retjeh dot Aidi (Anas, Adam, Dimas, dan Mas As'ad) yang juga membantu penulis dalam menyumbangkan ide-ide recehnya untuk menghibur penulis.
16. Andri dan Farhan yang lebih akrab dipanggil dengan Opang, selaku teman penulis yang selalu sedia waktu dan jasanya dalam membantu proses pengerjaan Tugas Akhir dalam pembuatan koding *Matlab*.

17. Eden, Faisal, Thoriq, Bram, Nugi, Mas Iwan, Mas Wek, Lilid, Zaim, Reni, Mega, Mufidah, dan Nandika, selaku teman-teman laboratorium geofisika yang selalu memberikan efek gaduh di dalam laboratorium maupun grup media sosial (*WhatsApp*). Dengan demikian, dapat menghibur penulis di saat mengalami kebuntuan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
18. Kawan-kawan HIMASIKA ITS, SM-IAGI ITS, dan UKM Rebana ITS, khususnya BPH Cakra Garuda yang selalu mendukung dan menghibur penulis selama proses menyelesaikan Tugas Akhir.
19. SIRIUS 2016, selaku teman-teman angkatan penulis yang turut serta meramaikan ide-ide gila yang ada di grup *LINE* yang dapat menghibur penulis.
20. Neng Lia, Om Candra, dan Dek Dila yang bersedia rumah dan segala isinya terutama *WiFi* untuk proses penyelesaian Tugas Akhir penulis selama pandemi COVID-19.
21. Dulur-dulurku Paskibra SMAN 16 Surabaya (PASSMAXVI), yang turut serta dalam membantu dan mendukung penulis selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
22. Bapak/Ibu guru SMP dan SMA Taruna Surabaya yang juga turut mendoakan kelancaran selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
23. Seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebut satu persatu.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, kritik, masukan, serta saran yang membangun sangat dibutuhkan penulis agar kedepannya Tugas Akhir ini dapat dikembangkan lebih baik lagi. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi para pembaca.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis
M. Rizal Aris Maulana

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I.....	xxii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Geologi Regional	5
2.2 Sesar (Patahan)	6
2.3 Very Low Frequency (VLF-EM).....	8
2.4 Medan VLF-EM.....	11
2.5 Filter NA-MEMD	13
2.6 Filter Fraser.....	16
2.7 Filter Karous-Hjelt	18
2.8 Inversi VLF-EM.....	19
BAB III	23
METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Peralatan Penelitian.....	23
3.2 Lokasi Penelitian.....	23
3.3 Tahapan Penelitian.....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Analisa Data Lapangan	29
4.2 Filter NA-MEMD	30
4.3 Analisa Kualitatif.....	32

4.3.1	Filter Fraser	33
4.3.2	Filter Karous-Hjelt.....	35
4.4	Analisa Kuantitatif	38
4.5	Jalur Sesar Berdasarkan Data VLF-EM	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		43
5.1	Kesimpulan.....	43
5.2	Saran	43
DAFTAR PUSTAKA.....		45
LAMPIRAN.....		49
BIODATA PENULIS		63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Peta geologi regional (Suharsono and Suwarti, 1992)	5
Gambar 2. 2 Jenis sesar : (a) sesar geser (<i>shear fault</i>), (b) sesar normal (<i>normal fault</i>), (c) sesar naik (<i>reverse fault</i>).....	7
Gambar 2. 3 Perambatan gelombang elektromagnetik pada metode VLF-EM.....	10
Gambar 2. 4 Hasil pengolahan data lapangan menggunakan filter NA-MEMD, (a) data <i>in-phase</i> dan (b) data <i>quadrature</i>	16
Gambar 2. 5 Kurva <i>in-phase</i> (a) sebelum dan (b) setelah disaring menggunakan filter Fraser.....	17
Gambar 2. 6 Data observasi (atas) berupa kurva <i>in-phase</i> sebelum menggunakan filter K-Hjelt sedangkan (bawah) hasil menggunakan filter K-Hjelt.....	19
Gambar 3. 1 Desain akuisisi data penelitian.....	24
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 4. 1 Kurva data observasi Lintasan 3.....	30
Gambar 4. 2 Hasil dekomposisi yang diperoleh dari Lintasan 3 menggunakan filter NA-MEMD.....	31
Gambar 4. 3 Kurva data observasi Lintasan 3 setelah disaring menggunakan filter NA-MEMD. Tanda silang menunjukkan posisi <i>zero crossing</i> data <i>quadrature</i> , sedangkan tanda lingkaran mengindikasikan <i>zero crossing</i> untuk <i>in-phase</i>	32
Gambar 4. 4 Data <i>in-phase</i> dan <i>quadrature</i> Lintasan 3 (atas) sebelum dan (bawah) setelah menggunakan filter Fraser.....	34
Gambar 4. 5 Hasil Lintasan 1–4 menggunakan filter Fraser	35
Gambar 4. 6 (a) Data <i>in-phase</i> observasi terfilter NA-MEMD dengan tanda bulat menunjukkan <i>zero crossing</i> ; (b) hasil filter K-Hjelt data <i>in-phase</i>	36
Gambar 4. 7 Filter K-Hjelt untuk Lintasan 1–4. Kotak mengindikasikan posisi anomali konduktif yang diduga jalur Sesar Pasuruan	37
Gambar 4. 8 (a) model data observasi terfilter NA-MEMD dengan perhitungan inversi dan (b) model nilai resistivitas dalam model 2D	39

Gambar 4. 9 Resistivitas 2D hasil inversi Lintasan 1–4, kotak merepresentasikan dugaan sesar serta garis putus-putus sebagai dugaan jalur sesar40

Gambar 4. 10 Keberadaan sesar Pasuruan berdasarkan studi Paleoseismologi (Marliyani et al., 2019), dengan garis putih sebagai representasi dari lintasan yang digunakan dalam penelitian metode VLF-EM41

Gambar 4. 11 Perbandingan pendugaan Sesar Pasuruan menggunakan metode VLF-EM dengan penelitiannya Marliyani (2019). Garis putus-putus mengindikasikan dugaan jalur sesar berdasarkan data VLF-EM, sedangkan garis merupakan dugaan jalur sesar berdasarkan Marliyani (2019).....42

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Daftar nilai frekuensi pada masing-masing lintasan VLF-EM.....	29
---	----

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kabupaten Pasuruan merupakan salah satu kabupaten yang dilalui oleh sesar aktif di wilayah timur Jawa, yang merupakan sesar turun (Sesar Pasuruan) (Pusat Studi Gempa Nasional Indonesia, 2017). Sesar turun biasanya ditandai dengan keberadaan lembah dan lereng yang curam, yang dapat diamati di sekitaran wilayah padat penduduk. Struktur geologi yang dilalui oleh Sesar Pasuruan terdiri dari batu pasir dan tuf litik yang merupakan susunan Formasi Rabano. Sesar Pasuruan melintasi 3 kecamatan yakni Kecamatan Rejoso, Lekok, dan Nguling (Suharsono and Suwarti, 1992).

Menurut Marliyani et al. (2019) dalam studi paleoseismologinya, pergerakan yang ditunjukkan oleh sesar ini sebanyak minimal 6 kali selama 4000 tahun terakhir. Selain itu, sesar ini tercatat oleh *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS) telah menyebabkan, sebanyak 40 gempa dari tahun 1992–2015. Magnitudo terbesar yang terekam sebesar 4,9 pada tahun 1999, sedangkan pada tahun 2012 merupakan gempa dengan nilai magnitudo yang paling kecil sebesar 2,7. Dengan demikian, jalur atau posisi Sesar Pasuruan diketahui secara pasti untuk meminimalisasi karena dampak yang ditimbulkan oleh sesar tersebut bagi wilayah padat penduduk (Marliyani et al., 2019).

Dalam studi terkait patahan atau sesar, salah satu metode geofisika yang dapat diterapkan untuk proses pencitraan resistivitas bawah permukaan yakni dengan menggunakan metode *Very Low Frequency-Electromagnetic* (VLF-EM) (Sungkono et al., 2014). Beberapa studi tentang identifikasi sesar dengan menggunakan metode VLF-EM antara lain: Sesar Fethiye-Burdur di Turki (Gürer et al., 2009), sesar yang terletak di bagian barat daya Kota Izmi, Anatolia Barat, Turki (Drahor and Berge, 2017), sesar geser di area Schirmacheroasen, Antartika Utara (Gnaneshwar et al., 2011). Oleh karena itu, dalam penelitian ini

menggunakan metode VLF-EM untuk mengidentifikasi Sesar Pasuruan.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut merupakan permasalahan yang dapat dirumuskan dalam penelitian Tugas Akhir ini :

1. Bagaimana mengidentifikasi Sesar Pasuruan menggunakan metode VLF-EM?
2. Bagaimana karakteristik dari Sesar Pasuruan?
3. Bagaimana mengetahui arah Sesar Pasuruan berbasis data VLF -EM?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian Tugas akhir ini antara lain :

1. Mengidentifikasi Sesar Pasuruan menggunakan metode VLF-EM.
2. Mengetahui karakteristik dari Sesar Pasuruan.
3. Mengetahui arah Sesar Pasuruan berbasis data VLF-EM.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian Tugas Akhir ini, adapula batasan masalahnya yakni :

1. Lokasi penelitian yaitu di daerah Kabupaten Pasuruan, Kecamatan Lekok dan Nguling, serta Kabupaten Probolinggo, Kecamatan Tongas.
2. Metode yang digunakan untuk mereduksi *noise* pada data VLF-EM ialah *noise assisted multivariate empirical mode decomposition* (NA-MEMD).
3. Metode untuk menginterpretasi data VLF-EM untuk mengidentifikasi Sesar Pasuruan ialah Filter Fraser dan K-Hjelt serta inversi data VLF-EM (*Inv2DVLF*).

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian berikut, diharapkan memberikan wawasan kepada para penduduk maupun aparat pemerintahan agar

lebih berhati-hati dalam membangun tempat tinggal atau gedung maupun fasilitas umum lainnya di daerah sekitar sesar.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah :

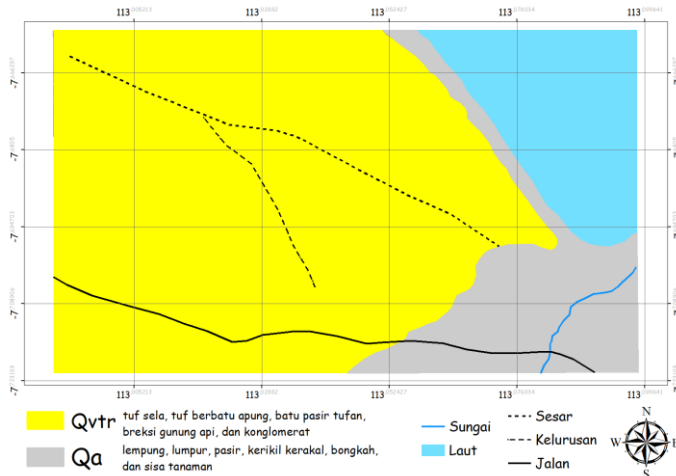
- **BAB I PENDAHULUAN**
Bab ini berisi tentang latar belakang dilakukannya penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**
Bab ini berisi tentang teori maupun konsep dasar sebagai landasan pengerjaan tugas akhir.
- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**
Bab ini berisi tentang peralatan yang digunakan, lokasi penelitian dan alur pengerjaan penelitian.
- **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**
Bab ini berisi tentang analisa dan hasil interpretasi data penelitian.
- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**
Bab ini berisi tentang rangkuman penelitian yang sesuai tujuan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Kabupaten Pasuruan memiliki luas 1.474,015 km² dengan koordinat 112°33'55"–113°30'37" Bujur Timur dan 7°32'34"–7°05'20" Lintang Selatan. Secara geografis, wilayah Kabupaten Pasuruan memiliki batas-batas yakni sebelah utara berbatasan dengan Kota Pasuruan, Selat Madura, dan Kabupaten Sidoarjo, sebelah selatan berbatasan dengan Kabupaten Malang, sebelah barat berbatasan dengan Kabupaten Mojokerto dan Kabupaten Batu, dan sebelah timur berbatasan dengan Kabupaten Probolinggo. Kabupaten Pasuruan terdiri dari 24 kecamatan terbagi menjadi 341 desa dan 24 kelurahan (Situs Resmi Pemerintah Kabupaten Pasuruan, 2020).



Gambar 2. 1 Peta geologi regional (Suharsono and Suwarti, 1992)

Pada Kabupaten Pasuruan, terdapat sesar normal dan kekar. Beberapa kelurusannya diduga merupakan sesar. Sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1, sesar normal dengan arah barat laut-tenggara dan memotong batuan berumur Pliosen-Holosen.

Sedangkan, kekar berkembang pada semua batuan dengan arah yang tidak teratur. Pada Kabupaten Pasuruan ini ditemukan satu sesar aktif yakni Sesar Pasuruan (Pusat Studi Gempa Nasional (Indonesia), 2017). Berikut ini merupakan persebaran fokasi dengan berdasarkan tataan stratigrafi :

- Batuan Endapan Permukaan
 - a) Aluvium (*Qa*) terdiri dari lempung, lumpur, pasir, kerikil kerakal, bongkah, dan sisa tanaman.
- Batuan Gunung Api
 - a) Tuff Rabano (*Qvtr*) terdiri dari tuf sela, tuf berbatu apung, batu pasir tufan, breksi gunung api, dan konglomerat.

Salah satu sesar yang melalui daerah ini yakni Sesar Pasuruan, yang telah terlihat jelas di topografi dengan adanya gawir sesar yang memanjang berarah barat timur sepanjang 13 km. Gawir sesar ini memotong bagian endapan vulkaniklastik Formasi Rabano yang berumur Pleistosen. Hal ini menunjukkan bahwa sesar ini berumur lebih muda dari Pleistosen (Suharsono and Suwarti, 1992). Marliyani et al. (2019) menunjukkan bahwa pergerakan sesar ini sebanyak minimal 6 kali dalam waktu 4000 tahun terakhir.

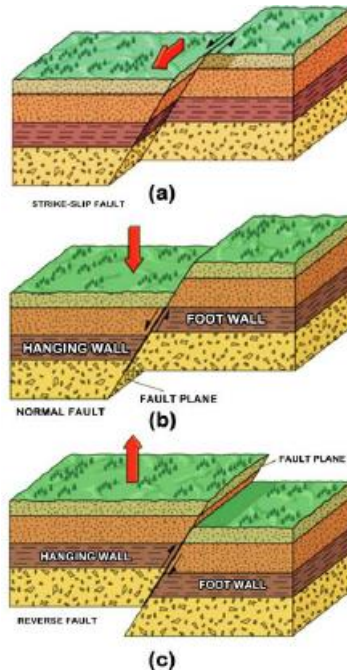
2.2 Sesar (Patahan)

Sesar atau patahan dapat didefinisikan sebagai zona rekahan pada lapisan batuan yang telah mengalami pergeseran baik secara garis lurus maupun terputar, sehingga terjadi perpindahan antara bagian-bagian yang berhadapan. Pergeseran atau perpindahan batuan terjadi di sepanjang permukaan yang disebut bidang sesar. Sesar dapat terjadi karena adanya ekstrusi magma ke permukaan bumi, atau gaya tektonik yang ditimbulkan saat terjadinya pergerakan lempeng.

Sesar mempunyai bentuk dan dimensi yang bervariasi, ada yang hanya beberapa meter atau bahkan mencapai ratusan kilometer. Menurut Sheriff dan Geldart (1995), sesar terdiri dari dua bagian yakni *foot wall* dan *hanging wall*. *Foot wall* merupakan bagian yang berada di bawah bidang sesar sedangkan, *hanging wall* merupakan bagian sesar yang berada di atas bidang sesar (Gambar 2.2).

Berdasarkan tingkat aktivitasnya, dibagi menjadi tiga, yakni : sesar aktif, potensi aktif, dan tidak aktif. Sesar aktif adalah sesar yang pernah bergerak pada kurun waktu 10.000 tahun terakhir, sesar berpotensi aktif jika sesar yang pernah bergerak pada kurun waktu dua juta tahun terakhir, sedangkan sesar tidak aktif merupakan sesar yang belum atau tidak pernah bergerak dalam kurun waktu lebih dari dua juta tahun terakhir.

Pada Gambar 2.2 merupakan sesar yang didasarkan pada pergerakannya, yakni sesar geser (*shear fault*), sesar normal (*normal fault*), sesar naik (*reverse fault*) (Gupta and Scholz, 2000).



Gambar 2. 2 Jenis sesar : (a) sesar geser (*shear fault*), (b) sesar normal (*normal fault*), (c) sesar naik (*reverse fault*)

Sesar geser yakni salah satu jenis sesar yang bergerak relatif mendatar, baik ke arah kiri maupun kanan. Namun, tidak menutup

kemungkinan jika terjadi pergerakan secara vertikal. Apabila pergerakan sesar bergerak ke bagian kiri disebut dengan *dekstral*, sedangkan bergerak ke bagian kanan disebut dengan *sinistra* (Hancock and Barka, 1987). Sesar normal karena pada bagian *hanging wall* relatif turun terhadap *foot wall*. Pada sesar normal, memiliki bidang sesar dengan sudut kemiringan sebesar 90^0 . Jenis sesar naik merupakan bentuk kebalikan dari sesar normal, karena arah *hanging wall* relatif lebih naik dari pada *foot wall*. Sehingga, batuan yang berumur lebih muda dapat tertutupi oleh batuan yang lebih tua, apabila pada sesar normal maka akan terjadi sebaliknya (Gupta and Scholz, 2000).

2.3 Very Low Frequency (VLF-EM)

Metode VLF-EM (*Very Low Frequency-Electromagnetic*) merupakan metode elektromagnetik dengan sumber sinyal berupa pemancar radio dalam rentang frekuensi 3–30 kHz, tetapi pada kenyataannya terbatas pada rentang 15–25 kHz (McNeill and Labson, 1993). Metode VLF-EM termasuk metode elektromagnetik pasif karena menggunakan pemancar radio yang digunakan untuk alat navigasi kapal selam (Sungkono et al., 2014). Metode ini sangat efektif untuk memisahkan anomali massa yang memiliki perbedaan konduktivitas yang signifikan terhadap lingkungan sekitarnya, atau pada kondisi *overburden mass* (lapisan penutup) yang relatif dangkal (Kaikkonen and Sharma, 1998).

Kedalaman maksimum yang diberikan dari penetrasi radiasi gelombang elektromagnetik ini dapat dinyatakan oleh faktor *skin depth* (δ). Faktor ini tergantung kondisi lingkungan di sekitar lokasi pengukuran. Akan menghasilkan penetrasi yang semakin dangkal apabila berada pada daerah yang semakin konduktif (Sharma et al., 2014). Kedalaman penetrasi gelombang EM dapat dituliskan sebagaimana Persamaan (2.1).

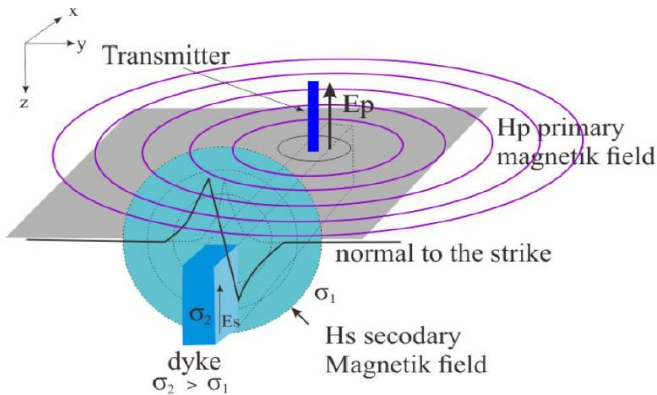
$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}} \approx 504 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.1)$$

Dengan δ merupakan *skin depth*, ρ merupakan resistivitas medium, ω merupakan frekuensi anguler, μ_0 merupakan permeabilitas pada

ruang hampa, dan f merupakan frekuensi pemancar yang terekam (Gürer et al., 2009).

Medan elektromagnetik primer yang dimiliki oleh pemancar radio memiliki komponen medan listrik vertikal (E_{pz}) dan komponen medan magnet horizontal (H_{py}) yang tegak lurus dengan arah perambatan pada sumbu x . Dikarenakan jarak yang cukup jauh dari antenna pemancar, komponen medan elektromagnetik diasumsikan sebagai gelombang berjalan horizontal. Energi medan elektromagnetik bergerak dan menembus ke bawah permukaan (dangkal). Apabila terdapat medium konduktif di bawah permukaan (Gambar 2.3), maka komponen medan magnet akan menginduksi batuan konduktif. Berdasarkan prinsip Faraday mengenai induksi elektromagnetik, medan magnetik yang berosilasi dapat menghasilkan medan listrik. Dari medan listrik tersebut, dapat memproduksi arus listrik di dalam batuan yang konduktif yang dinamakan dengan arus induksi (*Eddy Current*) (Bosch and Muller, 2001; Ismail, 2013).

Berdasarkan teori medan magnetik dalam bahan, ketika suatu benda dialiri arus listrik maka benda tersebut akan menghasilkan medan magnetik. Medan magnetik yang dihasilkan oleh benda hasil induksi disebut medan magnet sekunder. Medan magnet sekunder memiliki komponen vertikal (H_{sz}) dan komponen horizontal (H_{sy}). Medan magnet sekunder memiliki bagian yang sefase (*in-phase*) dan berbeda fase (*quadrature*) dengan medan elektromagnetik primer. Namun, besarnya medan elektromagnetik sekunder masih bergantung pada sifat konduktivitas benda bawah permukaan (Bosch and Muller, 2001; Indriyani, 2014).



Gambar 2. 3 Perambatan gelombang elektromagnetik pada metode VLF-EM

Perambatan gelombang elektromagnetik dari pemancar, akan terdeteksi oleh penerima berupa medan magnetik. Dimana komponen medan magnet yang dihasilkan (H_R) adalah superposisi dari bidang primer (H_p) dan sekunder (H_s). Sebab H_s dan H_R yang bergantung pada ruang, waktu, dan frekuensi. Sedangkan, dengan asumsi pengukuran jarak yang sangat jauh, maka H_p tidak bergantung pada jarak antara sumber dengan titik pengukuran. Sebagaimana dapat ditulis pada Persamaan (2.3) dan (2.4).

$$H_R = H_p + H_s \quad (2.3)$$

$$H_R = |H_p| e^{i\omega t} + |H_s| e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (2.4)$$

Dengan frekuensi pemancar $f = (\omega/2\pi)$ dan pergeseran fase (φ) antara komponen medan magnetik primer dan sekunder. Komponen-komponen tersebut dapat pula dinyatakan sebagai vektor, yakni :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ H_{Ry} \\ H_{Rz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ H_{Py} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ H_{Sy} \\ H_{Sz} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Hasil dari pengukuran metode VLF-EM adalah *in-phase* dan *quadrature* yang merupakan rasio dari H_{Rz}/H_{Ry} yang dapat

mencerminkan perubahan distribusi resistivitas di bawah permukaan (Bosch and Muller, 2001).

2.4 Medan VLF-EM

Gelombang elektromagnetik dalam perambatannya memiliki hubungan dengan vektor medan listrik dan medan magnet yang dapat dirumuskan sebagaimana pada Persamaan (2.6) dan (2.7).

$$\nabla_x E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla_x H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.7)$$

Dengan E merupakan medan listrik (V/m), B merupakan induksi magnetik (Wb/m^2), t merupakan waktu (*detik*), H adalah medan magnetik (A/m), J adalah rapat arus listrik (A/m^2), dan D adalah pergeseran listrik (C/m). Secara fisis, medan VLF-EM juga memanfaatkan persamaan Maxwell. Persamaan ini menggambarkan medan elektromagnetik yang merambat pada konduktivitas batuan (σ), permitivitas (ϵ), dan permeabilitas (μ) yang dapat dituliskan sebagaimana Persamaan (2.8) hingga (2.11).

$$\nabla_x H = (\sigma + i\omega\epsilon)E \quad (2.8)$$

$$\nabla_x E = -(i\omega\mu_0)H \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = q \quad (2.10)$$

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

Dengan E dan H secara berurutan merupakan vektor medan listrik dan magnet. Sedangkan, variabel lainnya, yakni : t , ω , dan q secara berurutan merepresentasikan waktu, frekuensi sudut, dan densitas muatan. Pada medium 3 dimensi, Persamaan (2.8) dan (2.9) dapat dijabarkan menjadi Persamaan (2.12) dan (2.13).

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) k = (\sigma + \epsilon i\omega)(E_x i + E_y j + E_z k) \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)i + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)j + \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\right)k = (-i\omega\mu)(H_x i + H_y j + H_z k) \quad (2.13)$$

Kemudian, mengasumsikan gelombang datar dengan gelombang yang miring terhadap bidang y - z dengan arah perambatan sesuai arah sumbu z . Dengan demikian, komponen medan elektromagnetik dan admitivitas ($\sigma + \epsilon i\omega$) tidak berubah pada arah x dan hanya bervariasi pada arah y dan z . Pemilihan ini terkait dengan definisi *Transverse Electric* (TE) dan *Transverse Magnetic* (TM) yang mana komponen medan vertikal elektrik dan magnetik hilang. Apabila pada kasus 2 dimensi, dimana turunan pertama dari Persamaan (2.12) dan (2.13) pada arah x bernilai nol, maka dapat dijabarkan sebagaimana Persamaan (2.14) dan (2.15).

a) *Transverse Electric Mode*

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) = (\sigma + i\omega\epsilon)E_x$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega\mu H_y$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu H_z \quad (2.14)$$

b) *Transverse Magnetic Mode*

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right) = (\sigma + i\omega\epsilon)H_x$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = (\sigma + i\omega\epsilon)E_y$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial y} = (\sigma + i\omega\epsilon)E_z \quad (2.15)$$

Penjalaran gelombang pada alat VLF-EM termasuk ke dalam mode TE, karena *output* yang dihasilkan pada alat VLF-EM berupa data *tipper* (H_z/H_y), terdiri dari bilangan kompleks akibat polarisasi antara medan vertikal (H_z) dan medan horizontal (H_y)

yang berbentuk *ellips* atau lingkaran. Apabila besarnya nilai H_z dan H_y tidak sama, berbentuk *ellips*, sedangkan jika nialainya sama, berbentuk lingkaran. Data *tipper* memiliki dua bagian, yakni *real* yang disebut dengan *in-phase* dan *imaginer* yang disebut dengan *quadrature* (Kalscheuer et al., 2008; Maulidina, 2015).

2.5 Filter NA-MEMD

Pada rentang frekuensi 15–30 kHz, terdapat beberapa sumber medan elektromagnetik selain VLF-EM. Sumber lain ini, dapat menjadi *noise* pada observasi data VLF-EM. Sumber *noise* pada VLF-EM dapat berupa medan eksternal berupa radiasi medan elektromagnetik dari petir dan paparan radiasi sinar matahari, dapat pula berasal dari perangkat-perangkat elektronik yang menggunakan gelombang elektromagnetik, seperti televisi, *mobile phone*, dan perangkat keras lainnya.

Noise pada data VLF-EM memberikan pengaruh yang sangat besar. Sebab data VLF-EM terdiri dari bagian *real* dan *imaginer* (*bivariate*), penyaringan data VLF-EM harus melibatkan metode yang berbasis *bivariate* agar kedua data tersebut dapat disaring secara simultan (tidak secara terpisah). Penyaringan data *bivariate* menggunakan metode *univariate* dapat menghilangkan atau mereduksi faktor intrinsik dari kedua data tersebut. Filter yang dapat digunakan untuk data *bivariate* ialah *Noise Assisted-Multivariate Empirical Mode Decomposition* (NA-MEMD) (Sungkono et al., 2014).

Filter NA-MEMD merupakan metode *non-linear* yang dapat diaplikasikan untuk mendekomposisi dan mereduksi *noise* data *mono-* dan *multi-variate*. Selain itu, filter NA-MEMD ini merupakan bentuk pengembangan dari metode *Empirical Mode Decomposition* (EMD) dan *Multivariate Empirical Mode Decomposition* (MEMD). Namun, kedua metode ini didapatkan masalah utama yakni EMD yang hanya bisa menganalisa sinyal *univariate* saja dan hasil dari EMD masih menghasilkan modus campuran (*mode mixing*). Sedangkan, metode MEMD dapat menganalisa sinyal *multivariate* dengan hasil dekomposisinya masih mengandung modus campuran.

Rehman *and* Mandic (2010) membuat beberapa *envelope* n-dimensi dengan mengambil proyeksi dari beberapa *input* di sepanjang arah yang berbeda di ruang n-dimensi. *Intrinsic Mode Function* (IMF) dihitung dengan menggunakan *envelope*. Dengan menganggap $V(s) = \{V_1(s), V_2(s), \dots, V_n(s)\}$ adalah sekumpulan n data spasial sebagai fungsi ruang (s) dan $X^{\theta k} = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k\}$ untuk menunjukkan arah vektor sepanjang arah yang diberikan oleh sudut dalam satu set arah, $X(k = 1, 2, \dots, K; K$ adalah jumlah arah). Proses algoritma MEMD untuk menghasilkan IMF sebagai berikut:

1. Memunculkan sekumpulan vektor arah yang sesuai X .
2. Menghitung sebuah proyeksi $P^{\theta k}(s)$ dari sekumpulan data spasial $V(s)$ sepanjang vektor arah $X^{\theta k}$ untuk semua nilai k .
3. Menemukan sesaat nilai spasial $s_i^{\theta k}$ yang sesuai dengan proyeksi maksimum untuk semua nilai k .
4. Menginterpolasikan nilai $s_i^{\theta k}$ dan $V(s_i^{\theta k})$ untuk memperoleh kurva *multivariate envelope* $e^{\theta k}(s)$ untuk semua nilai k .
5. Jumlah rata-rata $M(s)$ dari kurva *envelope* dihitung dengan
$$M(s) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{\theta k}(s).$$
6. Mengekstrak “detail” $D(s)$ menggunakan $D(s) = V(s) - M(s)$. Jika “detail” $D(s)$ memenuhi kriteria penghentian IMF *multivariate*, dapat menerapkan prosedur di atas untuk $V(s) - M(s)$, jika tidak menerapkan ke $D(s)$.

Untuk proses penghentian algoritma MEMD dalam mengestimasi IMF hampir sama yang diusulkan oleh Huang et al (2013), perbedaannya yakni kondisi kesetaraan jumlah ekstrem dan *zero crossing* tidak dikenakan, karena ekstrem tidak dapat didefinisikan untuk sinyal *multivariate*. Metode MEMD dapat mendekomposisi data *bivariate* secara simultan, namun pada kondisi tertentu IMF yang dihasilkan masih mengandung *mode misalignment* dan *mode mixing*. *Mode mixing* mengacu pada situasi ketika IMF yang dihasilkan dari dekomposisi EMD memiliki komponen frekuensi yang berbeda (Xu et al., 2019). Sedangkan, *mode misalignment* mengacu pada suatu kondisi dimana mode frekuensi biasa yang melalui data multivarian dengan indeks IMF

yang berbeda, sehingga menghasilkan ketidakcocokan dari jumlah atau skalanya (Hu and Liang, 2011).

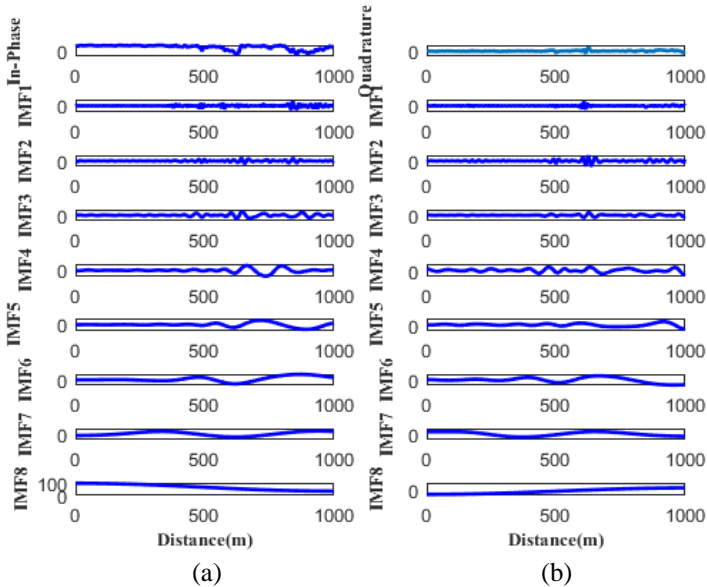
Algoritma NA-MEMD dikembangkan oleh Rehman *and* Mandic (2010). Dimana setiap hasil dekomposisi (IMF) data menggunakan NA-MEMD merupakan model osilasi sederhana dengan variabel amplitudo dan memiliki bilangan gelombang tertentu. Kedua variabel tersebut merupakan fungsi jarak. IMF terkecil memiliki bilangan gelombang yang lebih besar dibandingkan IMF selanjutnya, dan sebaliknya.

Proses filter menggunakan metode NA-MEMD dapat dilakukan melalui dua langkah, yaitu 1) mendekomposisi data menggunakan metode NA-MEMD untuk menghasilkan IMF, 2) menjumlahkan IMF yang telah didapatkan.

Algoritma dari metode NA-MEMD dapat ditulis sebagai berikut (Rehman and Mandic, 2010) :

1. Membangkitkan satu set *noise white gaussian time series* tak korelasi (*m-channel*) dengan panjang yang sama dengan data *input*.
2. Menambahkan sinyal *noise channel* (*n-channel*), sehingga memperoleh (*n+m*) sinyal.
3. Dekomposisi data yang telah ditambah *n-channel noise* menggunakan algoritma MEMD, untuk memperoleh IMFs.
4. Dari hasil (*n+m channel*) IMFs, *m-channel* yang berkorelasi dengan *noise* dibuang, sehingga didapatkan 1 set *n-channel* IMF yang sesuai dengan sinyal.

Berikut ini merupakan contoh dari pengolahan data lapangan menggunakan filter NA-MEMD yang ditampilkan pada Gambar 2.4. Dimana gambar tersebut menampilkan penguraian sinyal berfrekuensi tinggi hingga rendah dari data *in-phase* dan *quadrature*.



Gambar 2. 4 Hasil pengolahan data lapangan menggunakan filter NA-MEMD, (a) data *in-phase* dan (b) data *quadrature*

2.6 Filter Fraser

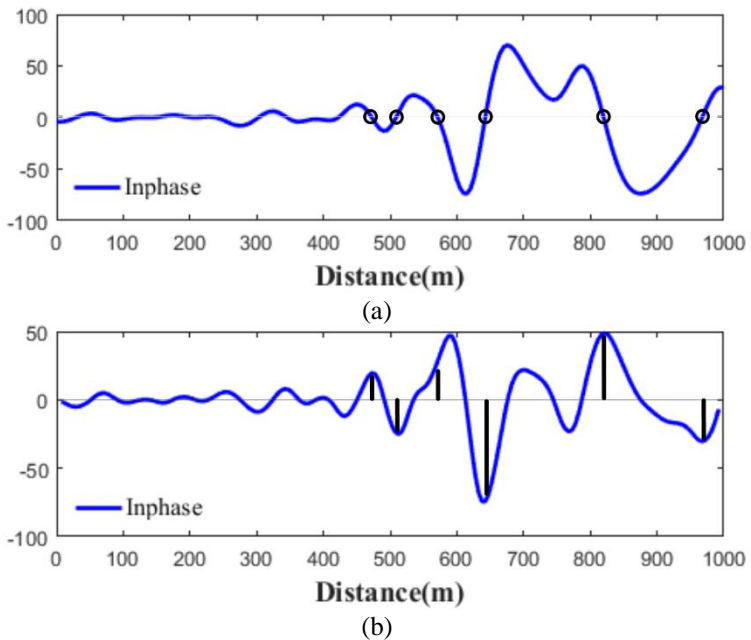
Anomali data VLF-EM ditunjukkan oleh *zero crossing* pada *in-phase* dan *quadrature*. Filter ini dapat menunjukkan titik potong dari anomali menjadi optimal (mencapai puncaknya). Filter ini dapat melemahkan panjang gelombang yang terlalu besar untuk mengurangi efek topografi dan faktor *drift*. Selain itu, filter ini dapat mengurangi efek pelemahan dari variasi temporal kuat sinyal pemancar.

Prinsip dasar dari filter ini yakni menggunakan 4 buah titik pengukuran yang berurutan, dengan cara mengurangi jumlah dari nilai data ke-3 dan ke-4 terhadap jumlah dari nilai data ke-1 dan ke-2. Kemudian, membuat grafik dengan titik tengah antara data ke-2 dan ke-3. Sehingga, secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$F_{2,3} = (M_3 + M_4) - (M_1 + M_2) \quad (2.16)$$

Dengan $F_{2,3}$ merupakan nilai Fraser terhitung dan M merupakan data pada titik. Hasil yang diperoleh dari filter Fraser dapat digunakan untuk menentukan posisi anomali (Fraser, 1969).

Penggunaan dari filter ini yakni dapat mengubah titik *zero crossing* menjadi puncak yang meningkatkan sinyal dari struktur konduktif. Proses yang dilakukan yakni merubah data VLF-EM dari yang masih terpengaruh oleh *noise* menjadi data yang minim dengan *noise*. Dengan mengetahui perbandingan kurva *in-phase* dari Gambar 2.5 (a) dan (b) yang menunjukkan pengaruh dari penggunaan filter Fraser. Puncak data yang telah dibentuk (Gambar 2.5 b) oleh filter ini menandakan bahwa pada titik tersebut tepat adanya struktur anomali. Oleh karena itu, kemampuan dari filter Fraser ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi anomali (Sungkono et al., 2017).



Gambar 2. 5 Kurva *in-phase* (a) sebelum dan (b) setelah disaring menggunakan filter Fraser

2.7 Filter Karous-Hjelt

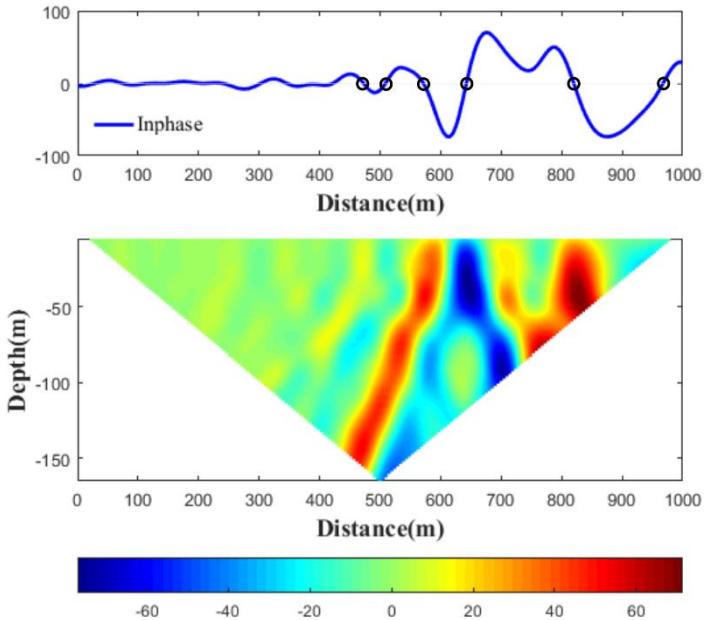
Filter Karous-Hjelt (K-Hjelt) merupakan teknik penyaringan yang digunakan untuk menghitung ekuivalen rapat arus yang dihasilkan medan magnet primer dengan medan yang terukur. Filter ini menghasilkan profil kedalaman dari rapat arus yang diturunkan dari nilai komponen vertikal medan magnetik pada setiap titik pengukuran (Sharma et al., 2014). Filter K-Hjelt dideskripsikan oleh :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta z}{2\pi} I_{\alpha}(0) = & -0.102M_{n-3} + 0.059M_{n-2} - 0.561M_{n-1} + \\ & 0.561M_{n+1} - 0.059M_{n+2} \pm 0.102M_{n+3} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Dengan $\frac{\Delta z}{2\pi} I_{\alpha}(0) = 0.5 \left[I\left(\frac{\Delta x}{2}\right) + I\left(-\frac{\Delta x}{2}\right) \right]$ yang merupakan nilai ekuivalen dengan rapat arus dan M_n adalah nilai *in-phase* atau *quadrature* yang terukur pada titik ke- n .

Persamaan (2.17) menunjukkan bahwa jarak spasi antar titik berpengaruh terhadap kedalaman yang dapat dijangkau oleh arus. Posisi rapat arus dapat digunakan sebagai parameter dalam menginterpretasi lebar dan kemiringan suatu benda anomali dengan kedalaman tertentu (Karous and Hjelt, 1983).

Berdasarkan hukum Biot-Savart, filter ini dapat mengkonversi data VLF-EM menjadi rapat arus. Gambar 2.6 (a) hanya menunjukkan data *in-phase* observasi terfilter NA-MEMD. Hal tersebut karena data *in-phase* lebih sensitif terhadap anomali jika dibandingkan data *quadrature*, sehingga filter K-Hjelt hanya dilakukan pada data *in-phase* (Maulidina, 2015) sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6 (b). Dimana nilai rapat arus yang semakin kecil menunjukkan nilai resistivitas yang lebih besar dan akan memiliki nilai resistivitas yang lebih kecil apabila nilai rapat arus semakin besar (Sungkono et al., 2017). Artinya, rapat arus yang bernilai positif mengindikasikan anomali konduktif, sedangkan rapat arus bernilai negatif mengindikasikan anomali resistif (Ogilvy and Lee, 1991).



Gambar 2. 6 Data observasi (atas) berupa kurva *in-phase* sebelum menggunakan filter K-Hjelt sedangkan (bawah) hasil menggunakan filter K-Hjelt

2.8 Inversi VLF-EM

Monteiro Santos et al., (2016) memperkenalkan analisa kuantitatif dengan menggunakan inversi data VLF-EM, *in-phase* dan *quadrature*. Tujuannya yakni menunjukkan informasi yang cukup rinci tentang distribusi resistivitas bawah permukaan.

Perangkat lunak (*Inv2DVLF*) digunakan untuk menganalisa secara kuantitatif dengan menggunakan metode regularisasi. Metode tersebut dengan melakukan pembalikan data VLF-EM berupa data *tipper* (*in-phase* dan *quadrature*). Dari perangkat lunak tersebut, diperoleh nilai resistivitas 2D sesuai dengan model awal sebagai *input* awalan (Khalil and Santos, 2011). Perangkat lunak *Inv2DVLF* dikembangkan berdasarkan penyelesaian ke depan menggunakan *finite element method* (FEM).

Permasalahan pada inversi VLF-EM ialah hubungan *non-linear* antara data hasil pengukuran dengan parameter fisiknya, sehingga diperlukan iterasi dalam menyelesaikan permasalahan tersebut. Berikut ini persamaan matematis untuk inversi VLF-EM.

$$A\Delta m = \Delta d \quad (2.18)$$

Dengan Δd merupakan vektor perbandingan antara data observasi dengan parameter model, Δm merupakan vektor koreksi terhadap iterasi, dan A merupakan matriks *Jacobian* dengan ukuran $M \times N$. M merupakan jumlah blok model, sedangkan N merupakan jumlah data observasi.

Untuk menghasilkan model bawah permukaan yang *reliable*, inversi data VLF-EM dilakukan untuk meminimumkan fungsi objektif sebagai berikut :

$$U = \|W_d (A\Delta m - \Delta d)\|^2 + \lambda \left[\|C_m^{k+1}\|^2 + \alpha \|W_m (m^{k+1} - m_b)\|^2 \right] \quad (2.19)$$

Dengan W_d menjelaskan matrik pembobot yang berbentuk diagonal, sedangkan C merupakan operator turunan kedua yang digunakan untuk mendefinisikan *smoothing* pada model. Matrik diagonal pembobot W_m digunakan untuk mengendalikan kedekatan model awal (m_b) dan hasil inversi. Terdapat juga parameter λ yang merupakan pengali *Lagrange* dan α digunakan sebagai pengontrol antara model yang didapatkan dengan model awal.

Persamaan (2.19) memiliki 2 suku, yaitu: suku pertama menjelaskan *misfit* dan suku kedua menjelaskan konstrain yang menggunakan informasi apriori yang terkait dengan model. Untuk meminimumkan fungsi objektif ini, metode *Least-Square* dapat diterapkan sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & (A^T W_d^T W_d A + \lambda C^T C + \lambda \alpha W_m^T W_m) \Delta m = \\ & A^T W_d^T W_d \Delta d - \lambda C^T C m^{(k)} + \lambda \alpha W_m^T W_m (m_b - m^{(k)}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) dapat dibawa ke dalam bentuk persamaan linear sebagaimana Persamaan (2.18), dengan:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} W_d A \\ \sqrt{\lambda C} \\ \sqrt{\lambda \alpha W_m} \end{bmatrix}, \Delta \bar{d} = \begin{bmatrix} W_d \Delta d \\ -\sqrt{\lambda C} m^{(k)} \\ \sqrt{\lambda \alpha W_m} (m_b - m^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Dengan demikian, iterasi akan berhenti apabila nilai nilai *misfit* telah sesuai. Selanjutnya, nilai dari *Root Mean Square Error* (RMSE) dapat menggunakan persamaan berikut:

$$S = \sqrt{\frac{\Delta d^T W_d^T W_d \Delta d}{N}} \quad (2.22)$$

Dalam proses inversi ini, iterasi dihentikan apabila iterasi mencapai jumlah yang telah ditetapkan sebelumnya dan saat RMSE sudah tidak mengalami perubahan (Sasaki, 2001).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

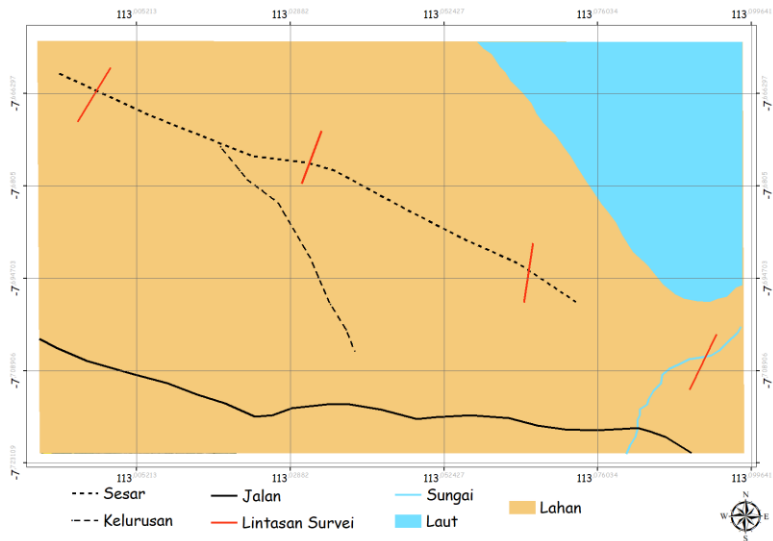
3.1 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini, antara lain :

1. VLF-EM *Envy Scintrex*
Alat ini digunakan untuk mengukur *in-phase*, *quadrature*, *total field*, dan *tilt angle* pada setiap titik pengukuran.
2. GPS (*Global Positioning System*)
Alat ini digunakan untuk mengetahui koordinat setiap titik lokasi pengukuran.
3. Tali Rafia
Tali tersebut digunakan sebagai pengganti *roll meter*, untuk mempermudah proses pengukuran dengan spasi antar titik yang tetap.
4. Laptop atau PC
Laptop atau PC digunakan sebagai perangkat keras untuk pengolahan data.
5. Notulensi
Notulensi sebagai bahan catatan tertulis selama melakukan pengambilan data.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini dilakukan di Kecamatan Lekok dan Nguling, Kabupaten Pasuruan, serta di Kecamatan Tongas, Kabupaten Probolinggo. Desain akuisisi data dapat dilihat pada Gambar 3.1. Pengambilan data dilakukan di 4 lintasan pengukuran dengan panjang lintasan sejauh 1000 meter (1 km). Lintasan-lintasan tersebut terbentang dari arah utara timur laut hingga selatan barat daya. Spasi yang digunakan berbeda-beda yakni 2 lintasan menggunakan spasi sebesar 5 meter dan 2 lintasan lainnya sebesar 10 meter. Sedangkan, spasi antar lintasan sejauh 6 km.



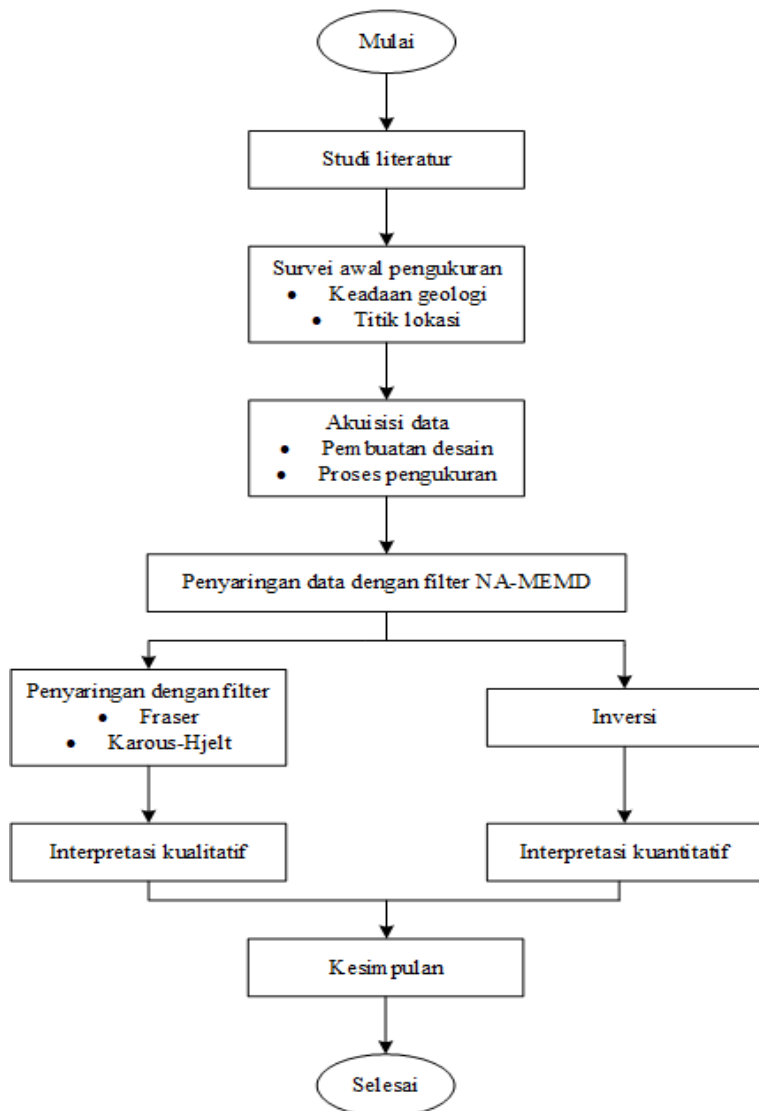
Gambar 3. 1 Desain akuisisi data penelitian

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian Tugas Akhir ini dapat ditampilkan sebagaimana Gambar 3.2. Penjelasan mengenai tahapan penelitian dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Langkah awal yang harus dilakukan sebelum melakukan penelitian yakni memahami konsep-konsep yang berkaitan dengan penelitian. Hal tersebut meliputi geologi regional daerah penelitian, metode VLF-EM, filter NA-MEMD, filter Fraser, filter Karous-Hjelt, dan inversi data VLF-EM.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

2. Survei Awal

Survei awal ini bertujuan untuk mengetahui kondisi geologi daerah penelitian sekaligus untuk mencari titik lokasi yang telah direncanakan sebelumnya. Survei ini dilakukan di Sesar Pasuruan, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur dengan koordinat $112^{\circ}33'55''$ hingga $113^{\circ}30'37''$ Bujur Timur dan antara $7^{\circ}32'34''$ hingga $8^{\circ}30'20''$ Lintang Selatan.

3. Akuisisi Data

Tahapan akuisisi data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Pembuatan desain akuisisi data

Pembuatan desain akuisisi data ini terkait dengan jumlah lintasan, jarak antar titik di dalam satu lintasan, jarak antar lintasan, dan jumlah lintasan yang digunakan dalam proses pengambilan data. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data sebanyak 4 lintasan dengan panjang masing-masing lintasan sejauh 1 km, dengan jarak antar lintasan sejauh 6 km. Jarak antar titik sejauh 5 meter untuk 2 lintasan dan 10 meter untuk 2 lintasan lainnya.

b. Pengambilan data pengukuran

Pada saat pengambilan data, yang dilakukan pertama kali yakni *scanning frequency* dengan syarat antena menghadap arah utara sesuai dengan letak pemancar radio terdekat dengan Indonesia yang berada di stasiun North West Cape, Australia. *Scanning frequency* tersebut digunakan untuk mengetahui stasiun VLF-EM yang akan digunakan, dengan nilai frekuensi yang harus bernilai antara 15–30 kHz. Setelah mengetahui ketiga frekuensi tersebut, maka dapat melakukan pengukuran pada masing-masing titik yang telah didesain. Data yang diperoleh berupa *in-phase*, *quadrature*, *total field*, dan *tilt-angle*.

4. Analisa Data

Ada beberapa tahap analisa data yang harus dilakukan agar dapat mengidentifikasi, mengkarakteristik, serta mengetahui arah

dari Sesar Pasuruan. Analisa data yang dilakukan antara lain analisa kualitatif dan kuantitatif. Berikut ini merupakan tahapan analisa data :

1. Penghilangan *noise*

Data yang diperoleh tersebut masih terpengaruh banyak *noise*. Penyebab adanya *noise* yaitu petir, radiasi matahari dan perangkat-perangkat elektronik manusia yang dapat mengganggu sinyal-sinyal elektromagnetik seperti tower, antenna, dan alat-alat pemancar elektromagnetik lainnya, serta *noise* yang disebabkan oleh struktur daerah geologi regional. Sehingga, pada penelitian ini menggunakan filter NA-MEMD yang digunakan untuk menghilangkan *noise-noise* tersebut. Algoritma NA-MEMD dioperasikan untuk menghasilkan IMF pada masing-masing variabel. Penyaringan dilakukan dengan cara menyeleksi IMF yang dapat menggambarkan *noise-noise* yang dapat dihilangkan.

2. Analisa Kualitatif

a. Mengetahui zona resistif dan konduktif

Setelah menghilangkan *noise*, maka dapat mengetahui zona resistif dan konduktif dari data VLF-EM. Filter yang digunakan yakni Fraser dan Karous-Hjelt. Data yang digunakan yakni komponen *in-phase* dan *quadrature* dengan filter Fraser maka dapat mengetahui zona konduktif maupun resistif dengan mengamati puncak atau lembahnya. Sedangkan, dengan menggunakan filter Karous-Hjelt maka dapat diperoleh zona resistif dan konduktif dalam kontur 2D dengan parameter rapat arus sebagai fungsi kedalaman.

3. Analisa Kuantitatif

a. Melakukan inversi

Pada analisa kuantitatif ini dapat dilakukan dengan inversi. Perangkat lunak yang digunakan yakni *Inv2DVLF* digunakan untuk mendapatkan distribusi resistivitas di bawah permukaan. Selanjutnya, dapat dimodelkan secara 2D dengan menggunakan perangkat lunak *Surfer11*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data Lapangan

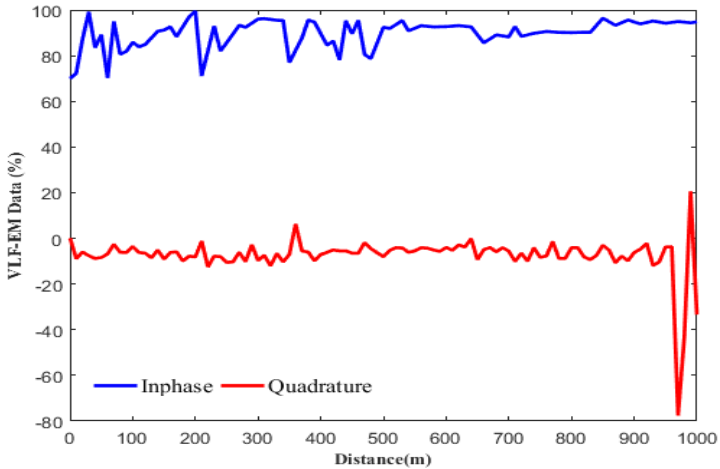
Pada saat akuisisi data di lapangan, diperoleh 4 lintasan data VLF-EM masing-masing dengan panjang 1000 meter. Jarak antar lintasan sejauh 6 km dengan jarak antar titik 5 meter untuk 2 lintasan dan 10 meter untuk 2 lintasan lainnya. Tiap titik dilakukan pengukuran sebanyak 3 kali dengan menggunakan 3 nilai frekuensi yang berbeda. Ketiga frekuensi tersebut diperoleh dari stasiun-stasiun pemancar radio yang berbeda, sebagaimana pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Daftar nilai frekuensi pada masing-masing lintasan VLF-EM

Lintasan	Frekuensi 1 (kHz)	Frekuensi 2 (kHz)	Frekuensi 3 (kHz)
1	19,8	23,2	23,5
2	19,8	21,8	22,2
3	19,8	23,2	23,5
4	19,8	22,2	15,8

Gambar 4.1 merupakan data VLF-EM untuk Lintasan 3, salah satu hasil pengukuran data VLF-EM dari empat lintasan yang digunakan. Data ini berupa data *in-phase* dan *quadrature* di sepanjang titik pengukuran yang masih bercampur dengan *noise*. Pada gambar tersebut, masih belum menunjukkan adanya *zero crossing* yang dapat mengindikasikan posisi anomali. Gambar ini mengindikasikan bahwa data observasi masih mengandung *noise* bilangan gelombang tinggi (*noise* Gaussian) dan rendah (*trend* data atau *drift*). Kedua jenis *noise* ini dapat mendistorsi hasil analisa data VLF-EM (Sungkono et al., 2017). Oleh karena itu, sebelum data ini dianalisa secara kualitatif (Filter Fraser dan K-Hjelt) dan kuantitatif (melalui proses inversi), data VLF-EM perlu difilter menggunakan metode NA-MEMD. Selanjutnya, analisa kualitatif digunakan untuk mengetahui lateral dari zona resistif dan

konduktif, sedangkan analisa kuantitatif dilakukan untuk mengetahui distribusi resistivitas 2D di bawah permukaan.



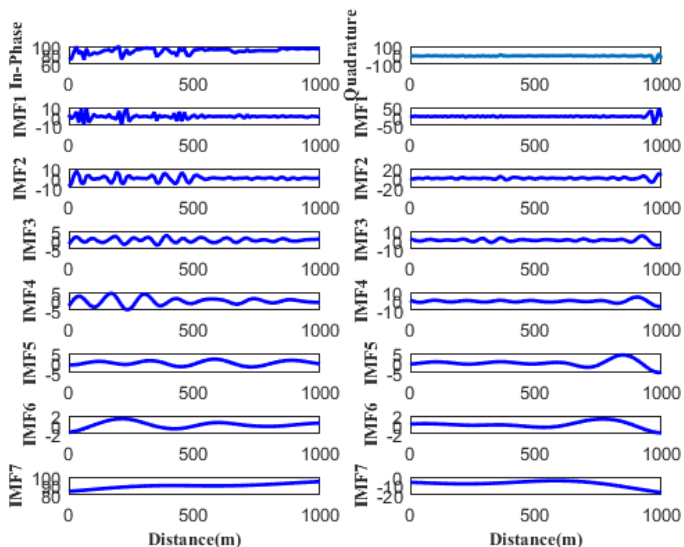
Gambar 4. 1 Kurva data observasi Lintasan 3

4.2 Filter NA-MEMD

Data VLF-EM merupakan data *bivariate* yang terdiri dari *real* (*in-phase*) dan *imaginer* (*quadrature*). Apabila ingin melakukan penyaringan data tersebut, maka harus menggunakan metode yang berbasis *bivariate* atau *multivariate* agar kedua data dapat disaring secara simultan. Proses penyaringan menggunakan metode NA-MEMD dapat dilakukan melalui dua langkah, yaitu 1) mendekomposisi data menggunakan metode NA-MEMD untuk menghasilkan IMF, 2) menjumlahkan IMF (*Intrinsic Mode Function*) yang telah didapatkan.

Gambar 4.2 merupakan salah satu contoh dari proses dekomposisi menggunakan metode NA-MEMD dari Lintasan 3 (data *in-phase* dan *quadrature*) yang terdekomposisi menjadi IMF1–IMF7. Nilai IMF tersebut menunjukkan bahwa semakin besar nilai IMF maka semakin besar panjang gelombang atau semakin kecil bilangan gelombang dari data IMF tersebut. Selanjutnya, IMF1–IMF3 mengindikasikan *noise* yang memiliki

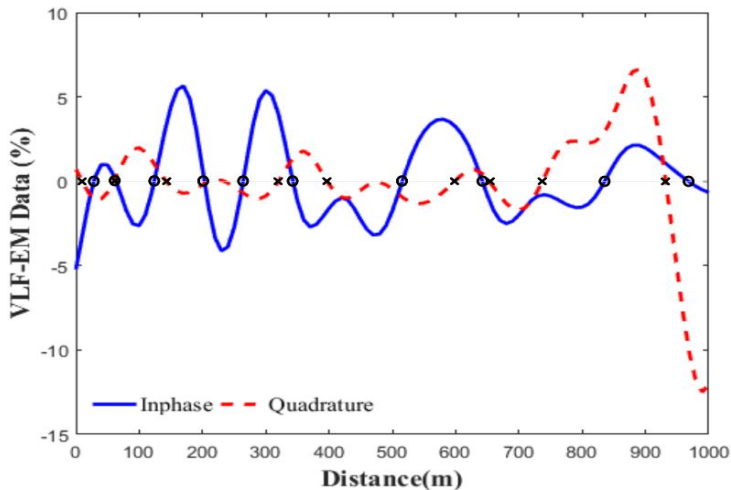
panjang gelombang yang rendah (bilangan gelombang yang tinggi) yang mengindikasikan noise. IMF dengan nilai paling besar merupakan nilai residu yang dapat disebabkan oleh efek *drift*. Sebab, IMF ini tidak mengandung *zero crossing* (merepresentasikan tidak mengandung anomali) dan memiliki panjang gelombang yang besar. Dengan demikian, IMF1–IMF3 dan IMF7 dapat diabaikan, sedangkan IMF lainnya dipilih untuk menghasilkan data yang telah bersih dari *noise* (Gambar 4.3).



Gambar 4. 2 Hasil dekomposisi yang diperoleh dari Lintasan 3 menggunakan filter NA-MEMD

Hasil filter menggunakan metode NA-MEMD Lintasan 3 dapat dilihat pada Gambar 4.3. Kurva *in-phase* dan *quadrature* telah menunjukkan adanya *zero crossing* dan lebih halus jika dibandingkan dengan Gambar 4.1. *Zero crossing* pada kurva *in-phase* (tanda lingkaran) terletak pada jarak 20 m, 75 m, 130 m, 200 m, 275 m, 340 m, 510 m, 630 m, 830 m, dan 975 m, sedangkan pada kurva *quadrature* (tanda silang) terletak pada jarak 5 m, 75

m, 140 m, 320 m, 400 m, 600 m, 640 m, 720 m, dan 920 m. Dengan demikian, Gambar 4.3 menunjukkan *zero crossing* yang cukup banyak dan posisi *zero crossing* tersebut pada kedua data terletak pada posisi yang berbeda. Kedua hal ini dapat mengakibatkan sulitnya proses identifikasi posisi sumber anomali pada data VLF-EM berdasarkan kaidah *zero crossing* (Khalil and Santos, 2011; Sungkono et al., 2017). Oleh karena itu, untuk mengidentifikasi posisi sumber anomali, filter Fraser dan K-Hjelt perlu diaplikasikan pada data VLF-EM.



Gambar 4. 3 Kurva data observasi Lintasan 3 setelah disaring menggunakan filter NA-MEMD. Tanda silang menunjukkan posisi *zero crossing* data *quadrature*, sedangkan tanda lingkaran mengindikasikan *zero crossing* untuk *in-phase*

4.3 Analisa Kualitatif

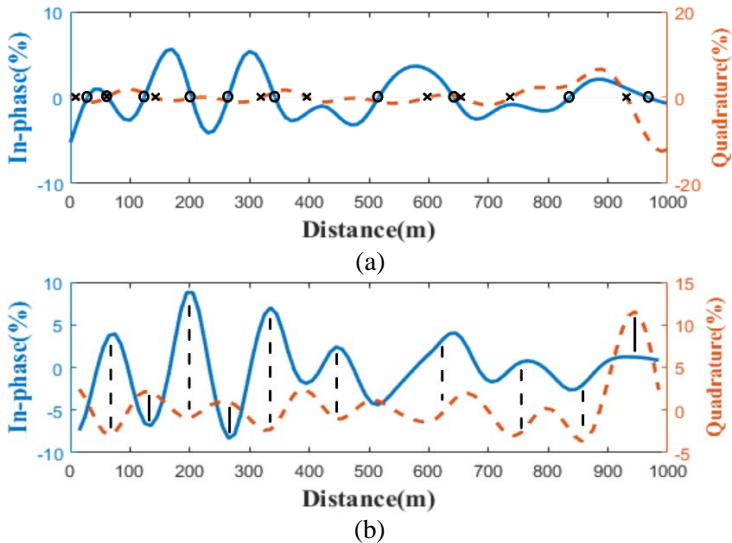
Pada bagian ini, pembahasan akan difokuskan pada proses filter untuk mengetahui zona resistif dan konduktif, yakni dengan menggunakan Filter Fraser dan K-Hjelt. Kedua filter ini digunakan untuk mengidentifikasi lokasi dan kemenerusan Sesar Pasuruan.

Sesar pada musim penghujan dapat berisi fluida. Selain itu, sesar juga dapat berisi lempung yang dibawa oleh air hujan. Oleh karena itu, sesar dapat lebih konduktif daripada lingkungannya (Ogilvy and Lee, 1991; Vargemezis, 2007). Selain bersifat konduktif, sesar juga bersifat menerus atau memiliki jalur yang menerus. Dengan demikian, untuk mengidentifikasi Sesar Pasuruan, hasil filter Fraser dan K-Hjelt pada masing-masing lintasan dapat disusun sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk melacak jalur sesar tersebut.

4.3.1 Filter Fraser

Data yang telah disaring oleh filter NA-MEMD menunjukkan beberapa lokasi *zero crossing*. Kondisi ini masih sulit untuk mengidentifikasi lokasi sumber anomali, khususnya untuk lintasan yang mengandung dua atau lebih anomali. Dengan demikian, menggunakan filter Fraser dapat mengubah beberapa posisi *zero crossing* menjadi titik optimal agar lebih mudah untuk mengidentifikasi posisi sumber anomali. Anomali yang dapat diidentifikasi ialah anomali resistif dan konduktif dari lingkungan. Anomali resistif ditandai dengan kurva *in-phase* bernilai negatif dan *quadrature* bernilai positif, sedangkan anomali konduktif ditandai dengan kurva *in-phase* bernilai positif dan *quadrature* bernilai negatif.

Gambar 4.4 (a) merupakan data VLF-EM sebelum difilter Fraser, sedangkan Gambar 4.4 (b) merupakan hasil filter Fraser. Gambar ini menunjukkan bahwa tidak semua posisi *zero crossing* dari data *in-phase* dan *quadrature* berkorelasi dengan optimum lokal. Oleh karena itu, dalam menentukan posisi anomali cenderung menggunakan data *in-phase* sebab lebih sensitif daripada data *quadrature* (Gnaneshwar et al., 2011; Maulidina, 2015). Selanjutnya, Gambar 4.4 (b) menunjukkan bawah anomali konduktif ditunjukkan dengan garis putus-putus, sedangkan anomali resistif berupa garis. Hasil filter ini, hanya terkait posisi anomali secara lateral, masih belum ada informasi kedalaman dari anomali tersebut.

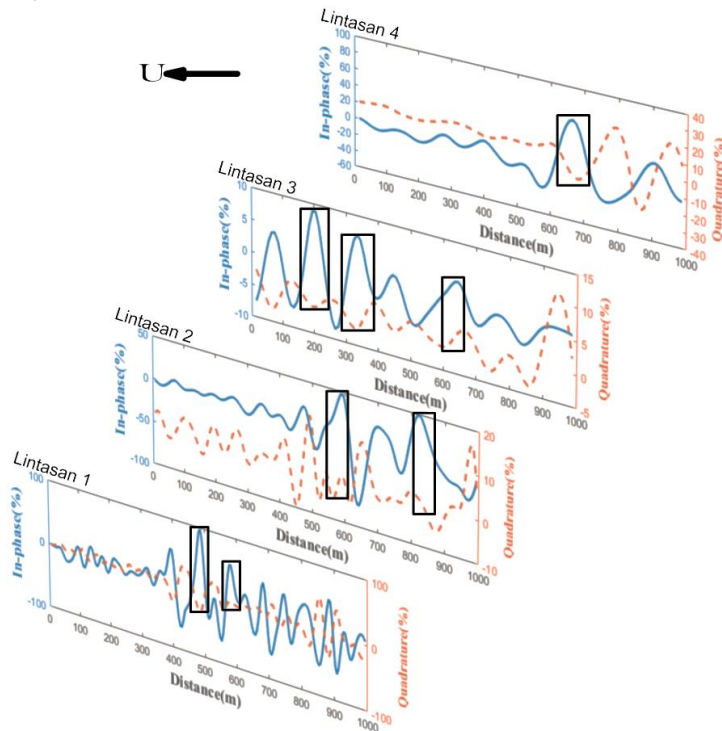


Gambar 4. 4 Data *in-phase* dan *quadrature* Lintasan 3 (a) sebelum dan (b) setelah menggunakan filter Fraser

Gambar 4.4 (b) memberikan informasi bahwa pada lintasan ini terdapat tujuh anomali konduktif dan tiga anomali resistif. Letak anomali konduktif berada pada jarak 75 m, 200 m, 340 m, 450 m, 630 m, 740 m, dan 860 m, sedangkan anomali resistif berada pada jarak 130 m, 275 m, dan 920 m. Apabila melihat Gambar 4.4 (a), banyak ditemukan *zero crossing*. Sehingga, dalam menentukan anomali konduktif, perlu mengetahui sifat fisik dari VLF-EM, yaitu anomali konduktif pada lingkungan resistif umumnya terletak pada amplitudo tinggi (*in-phase* dan *quadrature*) dari hasil filter Fraser (Sungkono et al., 2017).

Selanjutnya, dengan menggunakan karakter dari sesar, Sesar Pasuruan diidentifikasi menggunakan hasil filter Fraser pada Lintasan 1–4 (Gambar 4.5). Gambar 4.5 menunjukkan bahwa kotak mengindikasikan anomali konduktif yang berkaitan dengan dugaan dari kemenerusan Sesar Pasuruan. Tanda kotak ini berada pada jarak 400–500 m dan 500–600 m untuk Lintasan 1, jarak 500–600 m dan 780–830 m untuk Lintasan 2, sedangkan pada

jarak 175–220 m, 300–360 m, dan 600–700 m untuk Lintasan 3. Selanjutnya, pada jarak 620–710 m untuk Lintasan 4. Pendugaan anomali konduktif tersebut masih perlu dikomparasikan dengan hasil analisa yang lain, yakni filter K-Hjelt dan inversi data VLF-EM.



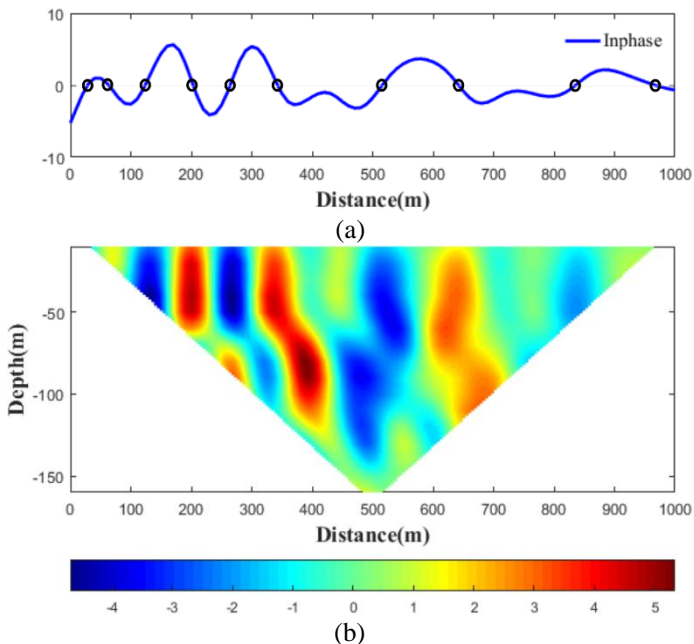
Gambar 4. 5 Hasil Lintasan 1–4 menggunakan filter Fraser

4.3.2 Filter Karous-Hjelt

Hasil filter K-Hjelt ialah kontur rapat arus dua dimensi (2D) atau rapat arus sebagai fungsi posisi dan kedalaman semu. Disebut kedalaman semu karena besarnya kedalaman ini bergantung pada spasi pengukuran. Selanjutnya, anomali rapat arus dapat digunakan sebagai parameter dalam menginterpretasi lebar dan kemiringan bentuk anomali pada kedalaman tertentu.

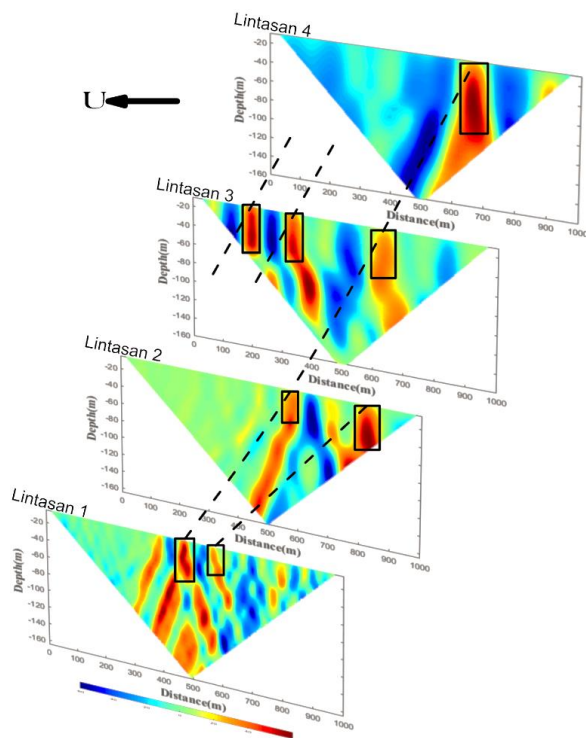
Gambar 4.6 (a) menunjukkan data observasi yang terfilter NA-MEMD, sedangkan Gambar 4.6 (b) merupakan hasil filter K-Hjelt dari data *in-phase*. Gambar 4.6 (a) hanya menginformasikan data *in-phase* observasi terfilter NA-MEMD. Sebab data *in-phase* lebih sensitif terhadap adanya anomali jika dibandingkan dengan data *quadrature*. Dengan demikian, penggambaran 2D pada filter K-Hjelt hanya dilakukan pada data *in-phase* (Maulidina, 2015).

Gambar 4.6 (b) mengindikasikan adanya anomali konduktif yang ditandai oleh nilai rapat arus positif dan resistif yang ditandai oleh nilai rapat arus negatif (Ogilvy and Lee, 1991). Anomali konduktif terletak pada jarak 175–220 m, 300–360 m, dan 600–700 m, serta anomali resistif terletak pada jarak 110–150 m dan 250–300 m.



Gambar 4. 6 (a) Data *in-phase* observasi terfilter NA-MEMD dengan tanda bulat menunjukkan *zero crossing*; (b) hasil filter K-Hjelt data *in-phase*

Selanjutnya, hasil filter K-Hjelt pada Lintasan 1–4 digunakan untuk mengidentifikasi posisi lintasan Sesar Pasuruan berdasarkan karakteristik sesar. Gambar 4.7 merupakan hasil K-Hjelt gabungan dari keempat lintasan tersebut. Anomali konduktif (ditandai dengan kotak) diduga merupakan lintasan Sesar Pasuruan, sebab anomali konduktif tersebut dekat permukaan (kedalaman dangkal) yang secara umum dapat diduga sebagai sesar (Drahor and Berge, 2017).



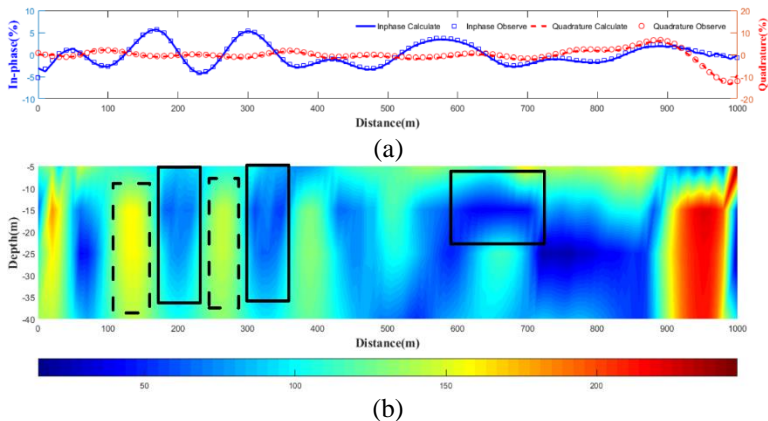
Gambar 4. 7 Filter K-Hjelt untuk Lintasan 1–4. Kotak mengindikasikan posisi anomali konduktif yang diduga jalur Sesar Pasuruan

4.4 Analisa Kuantitatif

Analisa kuantitatif dilakukan melalui proses inversi data *tipper* (*in-phase* dan *quadrature*) untuk memperoleh nilai resistivitas 2D. Analisa ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Inv2D VLF* (Monteiro Santos et al., 2006). Pemodelan kedepan atau *forward modelling* pada perangkat lunak ini menggunakan metode *finite element method* (FEM). Perangkat lunak tersebut membutuhkan beberapa parameter dalam melakukan inversi, seperti: resistivitas lingkungan, *gridding* parameter model, parameter *Lagrange*, dan jumlah iterasi.

Daerah penelitian tersusun atas batu pasir dan tufa yang termasuk Formasi Rabano (Marliyani et al., 2019). Formasi ini memiliki rentang nilai resistivitas 20–200 Ωm (Sholichin et al., 2014). Dengan demikian, nilai resistivitas lingkungan yang digunakan dalam proses inversi ini adalah 110 Ωm , yang diambil dari rata-rata rentang nilai resistivitas lingkungan. Selain itu, jumlah iterasi yang digunakan ialah 100, untuk mendapatkan nilai *error* yang kecil dan parameter *Lagrange* yang digunakan sebesar 0,03. Hasil inversi ini ialah jarak (m), kedalaman (m), dan nilai resistivitas (Ωm).

Gambar 4.8 merupakan tampilan hasil inversi data VLF-EM. Gambar 4.8 (a) menunjukkan bagusnya perbandingan antara data observasi yang terfilter NA-MEMD dengan data perhitungan untuk Lintasan 3. Gambar ini mengindikasikan bahwa kedua data (observasi dan perhitungan) telah berhimpit atau memiliki *fitting* yang bagus. Selain itu, nilai *misfit* dari proses inversi ini ialah 0,4.



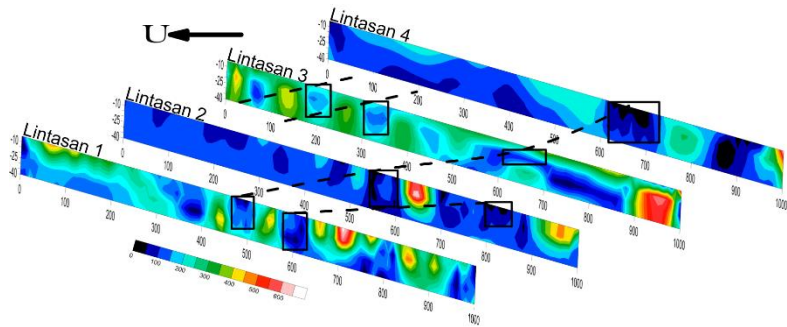
Gambar 4. 8 (a) model data observasi terfilter NA-MEMD dengan perhitungan inversi dan (b) model nilai resistivitas dalam model 2D

Selanjutnya, Gambar 4.8 (b) merupakan resistivitas 2D untuk Lintasan 3 dari hasil inversi. Kedalaman maksimum yang digunakan pada resistivitas 2D ini ialah kedalaman maksimum penetrasi sebesar 40 m sesuai dengan perhitungan *skin depth* (Persamaan 2.1), Gambar 4.8 (b) menginformasikan bahwa nilai resistivitas berkisar antara 0–250 Ωm dengan anomali konduktif berada pada nilai resistivitas antara 0–75 Ωm (kotak). Anomali tersebut diduga sebagai tufa dan batu pasir (terkait geologi setempat yang termasuk Formasi Rabano) tersaturasi fluida yang dapat diduga sebagai jalur Sesar Pasuruan. Sebab, sesar dapat terisi oleh fluida atau lempung (Marliyani et al., 2019; Vargemezis, 2007) sehingga membuatnya lebih konduktif.

Gambar 4.8 (b) menunjukkan adanya tiga anomali konduktif dan dua anomali resistif. Beberapa anomali konduktif ini memiliki kedalaman berkisar 5–35 meter untuk jarak pengukuran 175–220 m, 300–360 m, dan 600–700 m. Anomali tersebut mengindikasikan bahwa Sesar Pasuruan berada pada kedalaman yang relatif dangkal serta memiliki nilai resistivitas yang rendah antara 0–75 Ωm (Drahor and Berge, 2017).

Selanjutnya, anomali resistif (kotak bergaris putus-putus) dengan nilai resistivitas antara 150–250 Ωm yang memiliki kedalaman rata-rata 10–40 meter pada jarak 110–150 m dan 250–300 m. Anomali tersebut kemungkinan disebabkan oleh susunan batuan bawah permukaan yang tersusun atas pasir dan kerikil yang memiliki nilai resistivitas antara 100–1000 Ωm (Sholichin et al., 2014).

Gambar 4.9 merupakan hasil pemodelan resistivitas 2D untuk Lintasan 1–4. Gambar ini menunjukkan letak anomali konduktif berupa kotak. Gambar ini memiliki kesesuaian dengan Gambar 4.5 dan Gambar 4.7 masing-masing merupakan hasil analisa filter Fraser dan K-Hjelt. Sesuai dengan pemodelan 2D tersebut menunjukkan dugaan sesar berada pada kedalaman berkisar 5–35 meter. Hasil kedalaman yang diperoleh menggunakan metode VLF-EM juga berkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Marliyani et al. (2019) yakni berkisar antara 2–50 meter.



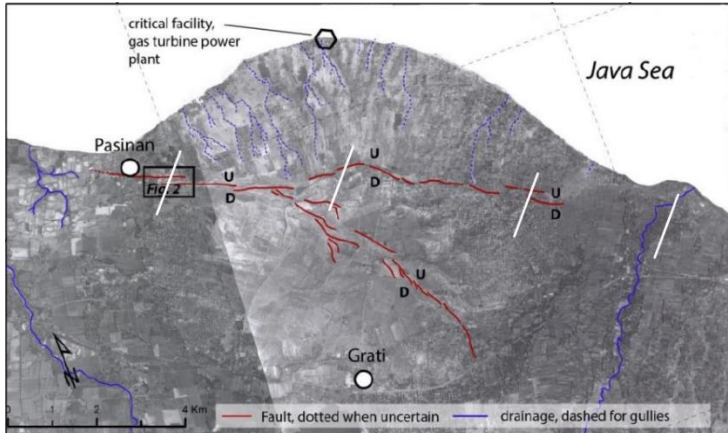
Gambar 4. 9 Resistivitas 2D hasil inversi Lintasan 1–4, kotak merepresentasikan dugaan sesar serta garis putus-putus sebagai dugaan jalur sesar

4.5 Jalur Sesar Berdasarkan Data VLF-EM

Berdasarkan hasil dari pengukuran VLF-EM yang telah dilakukan, maka diketahui bahwa keempat lintasan pada penelitian dilalui oleh Sesar Pasuruan yang membentang dari arah barat laut hingga tenggara sepanjang 13 km. Sesar ini melintasi Formasi

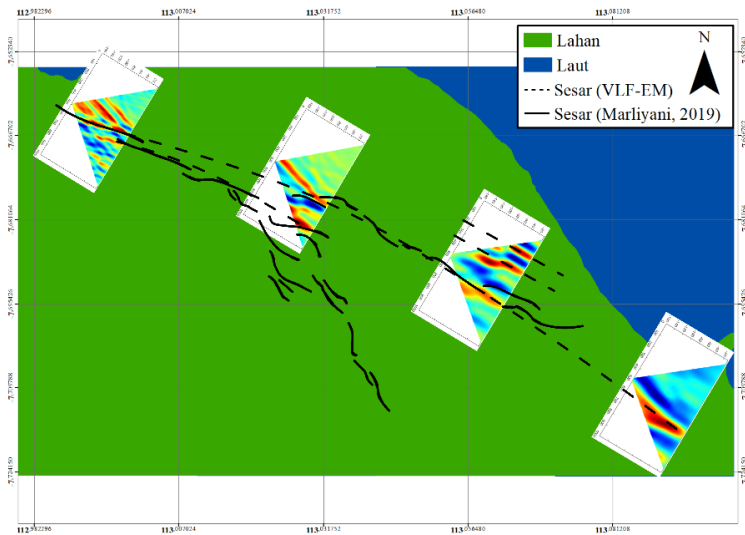
Rabano yang didominasi oleh batu pasir dan tufa. Namun, studi Paleoseismologi yang dilakukan oleh Marliyani et al. (2019) mampu mengidentifikasi keberadaan Sesar Pasuruan melalui 3 lintasan sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 4.10. Perbedaan jalur yang dilalui oleh Sesar Pasuruan antara kedua penelitian tersebut adalah Lintasan 4 atau lintasan yang berada paling timur (Gambar 4.11).

Lintasan 4 hasil pengukuran VLF-EM dalam penelitian ini mengindikasikan bahwa Sesar Pasuruan melalui lintasan tersebut pada jarak 620–710 m. Anomali pada jarak tersebut dapat lebih konduktif yang disebabkan oleh susunan bawah permukaan yang tersaturasi oleh fluida (Vargemezis, 2007). Hal tersebut diperkuat dengan hasil inversi yang menyebutkan bahwa nilai resistivitas berkisar 0–75 Ωm pada kedalaman 5–35 meter. Selain itu, hasil filter K-Hjelt yang menunjukkan adanya anomali konduktif dengan kedalaman hasil inversi yang relatif dangkal mengindikasikan keberadaan sesar pada lintasan tersebut (Drahor and Berge, 2017).



Gambar 4. 10 Keberadaan sesar Pasuruan berdasarkan studi Paleoseismologi (Marliyani et al., 2019), dengan garis putih sebagai representasi dari lintasan yang digunakan dalam penelitian metode VLF-EM

Perbedaan hasil interpretasi (Gambar 4.11) menjadi sebuah celah yang baik untuk menambahkan metode-metode geofisika lain yang berkaitan dalam mengidentifikasi keberadaan Sesar Pasuruan. Diantara metode tersebut yakni metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) atau *Vertical Electrical Sounding* (VES). Metode geolistrik tersebut dapat digunakan untuk identifikasi adanya sesar karena sangat sensitif terhadap perbedaan jenis batuan, sehingga dapat memberikan interpretasi bawah permukaan dengan lebih baik (Loke, 1999; Ramadhan et al., 2016).



Gambar 4. 11 Perbandingan pendugaan Sesar Pasuruan menggunakan metode VLF-EM dengan penelitian Marliyani et al. (2019). Garis putus-putus mengindikasikan dugaan jalur sesar berdasarkan data VLF-EM, sedangkan garis merupakan dugaan jalur sesar berdasarkan Marliyani et al. (2019)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Data pengukuran VLF-EM digunakan untuk mengidentifikasi Sesar Pasuruan. Data VLF-EM dianalisa menggunakan metode NA-MEMD untuk mengeliminasi *noise* yang terkontaminasi pada data tersebut. Selanjutnya, filter Fraser dan K-Hjelt untuk interpretasi kualitatif dan inversi untuk interpretasi kuantitatif. Kedua analisa tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi posisi lintasan Sesar Pasuruan. Sesar ini teridentifikasi dengan nilai resistivitas 0–75 Ωm pada kedalaman 5–35 meter yang membentang dari arah barat laut hingga tenggara. Hasil ini sesuai penelitian sebelumnya yang berkisar antara 2–50 meter (Marliyani et al., 2019).

5.2 Saran

Identifikasi Sesar Pasuruan pada penelitian ini memiliki sedikit perbedaan dengan penelitian sebelumnya, yakni dalam menganalisa Lintasan 4. Agar mendapatkan hasil yang lebih baik, maka diperlukan tambahan metode geofisika yang lain, salah satunya metode geolistrik seperti ERT atau VES.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Bosch, F.P., Muller, I., 2001. Continuous gradient VLF measurements: a new possibility for high resolution mapping of karst structures. *First Break* 19, 343–350. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2397.2001.00173.x>
- Drahor, M.G., Berge, M.A., 2017. Integrated geophysical investigations in a fault zone located on southwestern part of İzmir city, Western Anatolia, Turkey. *J. Appl. Geophys.* 136, 114–133. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.10.021>
- Fraser, D.C., 1969. CONTOURING OF VLF-EM DATA. *GEOPHYSICS* 34, 958–967. <https://doi.org/10.1190/1.1440065>
- Gnaneshwar, P., Shivaji, A., Srinivas, Y., Jettaiah, P., Sundararajan, N., 2011. Very-low-frequency electromagnetic (VLF-EM) measurements in the Schirmacheroasen area, East Antarctica. *Polar Sci.* 5, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.09.001>
- Gupta, A., Scholz, C.H., 2000. A model of normal fault interaction based on observations and theory p. *J. Struct. Geol.* 15.
- Gürer, A., Bayrak, M., Gürer, Ö.F., 2009. A VLF survey using current gathering phenomena for tracing buried faults of Fethiye–Burdur Fault Zone, Turkey. *J. Appl. Geophys.* 68, 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.03.011>
- Hancock, P.L., Barka, A.A., 1987. Kinematic indicators on active normal faults in Western Turkey. *J. Struct. Geol.* 9, 573–584. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90142-8](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90142-8)
- Hu, M., Liang, H., 2011. Intrinsic mode entropy based on multivariate empirical mode decomposition and its application to neural data analysis. *Cogn. Neurodyn.* 5, 277–284. <https://doi.org/10.1007/s11571-011-9159-8>
- Indriyani, D.D., 2014. PEMETAAN DISTRIBUSI ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH MENGGUNAKAN METODE GEOFISIKA VLF (VERY LOW

- FREQUENCY) DAERAH KARST PRACIMANTORO KABUPATEN WONOGIRI. Universitas Negeri Semarang.
- Ismail, N., 2013. GROUND-WATER RESOURCES ASSESSMENT USING GEOPHYSICAL VLF METHOD: A CASE STUDY FROM COASTAL URBAN FOREST IN BANDA ACEH. 2013 5.
- Kaikkonen, P., Sharma, S.P., 1998. 2-D nonlinear joint inversion of VLF and VLF-R data using simulated annealing. *J. Appl. Geophys.* 39, 155–176. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00025-1)
- Kalscheuer, T., Pedersen, L.B., Siripunvaraporn, W., 2008. Radiomagnetotelluric two-dimensional forward and inverse modelling accounting for displacement currents. *Geophys. J. Int.* 175, 486–514. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03902.x>
- Karous, M., Hjelt, S.E., 1983. LINEAR FILTERING OF VLF DIP-ANGLE MEASUREMENTS*. *Geophys. Prospect.* 31, 782–794. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01085.x>
- Khalil, M.A., Santos, F.M., 2011. Comparative study between filtering and inversion of VLF-EM profile data. *Arab. J. Geosci.* 4, 309–317. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0168-4>
- Loke, M.H., 1999. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys 67.
- Marliyani, G.I., Arrowsmith, J.R., Helmi, H., 2019. Evidence for Multiple Ground-Rupturing Earthquakes in the Past 4,000 Years Along the Pasuruan Fault, East Java, Indonesia: Documentation of Active Normal Faulting in the Javan Backarc. *Tectonics* 38, 1489–1506. <https://doi.org/10.1029/2018TC005255>
- Maulidina, M., 2015. Analisa Struktur Bawah Permukaan Tanah di Sekitar Candi Gambar Wetan, Kabupaten Blitar dengan

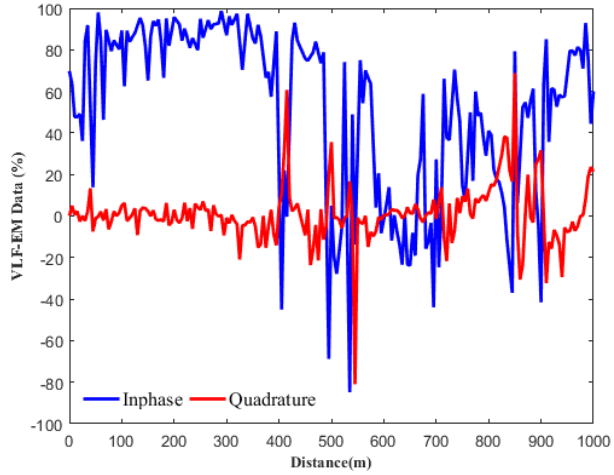
- Metode Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- McNeill, J.D., Labson, V.F., 1993. Interpretation Theory in Applied Geophysics 1.
- Monteiro Santos, F.A., Mateus, A., Figueiras, J., Gonçalves, M.A., 2006. Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method — A case study. *J. Appl. Geophys.* 60, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.01.002>
- Ogilvy, R.D., Lee, A.C., 1991. INTERPRETATION OF VLF-EM IN-PHASE DATA USING CURRENT DENSITY PSEUDOSECTIONS1. *Geophys. Prospect.* 39, 567–580. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1991.tb00328.x>
- Pusat Studi Gempa Nasional (Indonesia), 2017. Pusat Studi Gempa Nasional (Indonesia).
- Ramadhan, M.L., Prawita, S.M., Fatmasari, N.W., Pinehas, D., Adipradipto, D., 2016. Identifikasi Bidang Patahan Sesar Lembang dengan Metode Electrical Resistivity Tomography untuk Mitigasi Bencana Gempa Bumi dan Longsor. 2016 9.
- Rehman, N., Mandic, D.P., 2010. Multivariate empirical mode decomposition. *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 466, 1291–1302. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0502>
- Sasaki, Y., 2001. Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. *J. Appl. Geophys.* 46, 45–54. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00038-0)
- Sharma, S.P., Biswas, A., Baranwal, V.C., 2014. Very Low-Frequency Electromagnetic Method: A Shallow Subsurface Investigation Technique for Geophysical Applications, in: Sengupta, D. (Ed.), *Recent Trends in Modelling of Environmental Contaminants*. Springer India, New Delhi, pp. 119–141. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1783-1_5
- Sholichin, M., Asmaranto, R., Pratiwi, S., 2014. PENERAPAN PROGRAM RESISTIVITY 2D UNTUK ANALISA

POTENSI AIR TANAH DI CEKUNGAN AIR TANAH
PASURUAN.

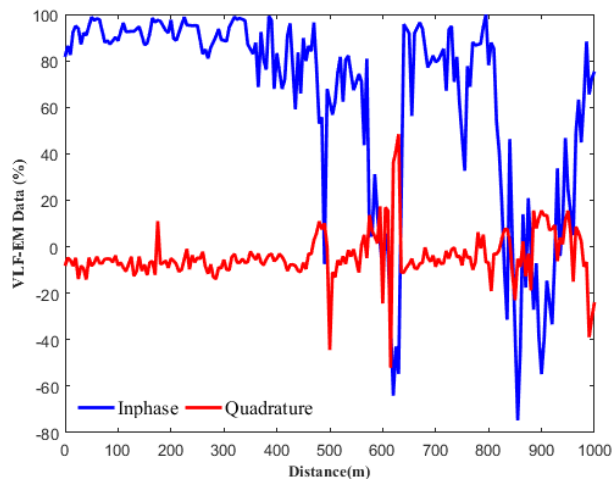
- Situs Resmi Pemerintah Kabupaten Pasuruan, 2020. URL pasuruankab.go.id
- Suharsono, Suwarti, T., 1992. Geologi Lembar Probolinggo, Pertama. ed. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sungkono, Husein, A., Prasetyo, H., Bahri, A.S., Monteiro Santos, F.A., Santosa, B.J., 2014. The VLF-EM imaging of potential collapse on the LUSI embankment. *J. Appl. Geophys.* 109, 218–232. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.08.004>
- Sungkono, Santosa, B.J., Bahri, A.S., Santos, F.M., Iswahyudi, A., 2017. Application of Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition in VLF-EM Data to Identify Underground River. *Adv. Data Sci. Adapt. Anal.* 09, 1650011. <https://doi.org/10.1142/S2424922X1650011X>
- Vargemezis, G., 2007. INTERPRETATION OF VLF MEASUREMENTS RELATED TO HYDROGEOLOGICAL SURVEYS, in: *Bulletin of the Geological Society of Greece*. pp. 593–604.
- Xu, B., Sheng, Y., Li, P., Cheng, Q., Wu, J., 2019. Causes and classification of EMD mode mixing. *Vibroengineering PROCEDIA* 22, 158–164. <https://doi.org/10.21595/vp.2018.20250>

LAMPIRAN

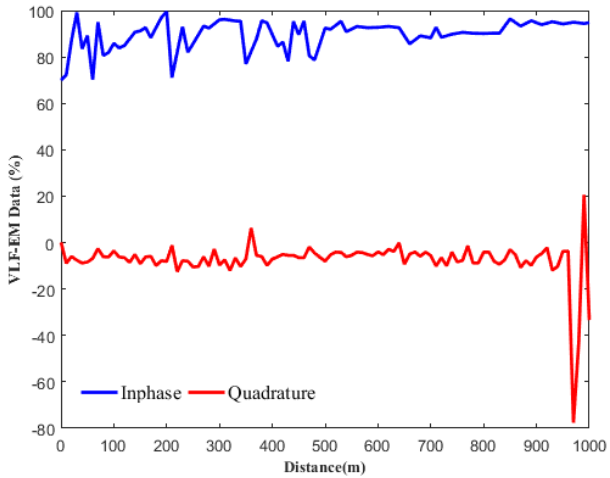
1) Data Observasi Pengukuran VLF-EM



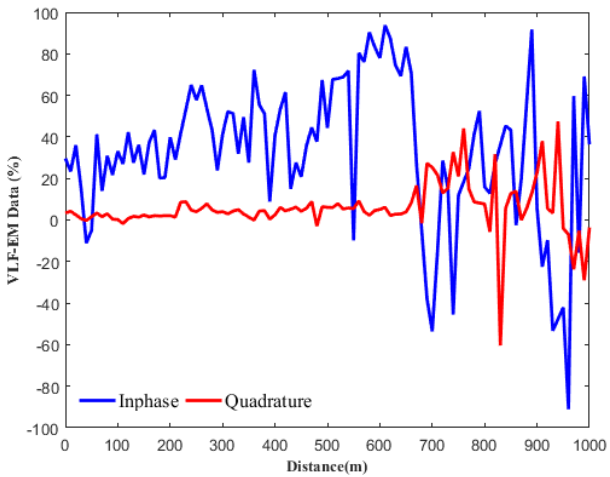
Gambar 1. Data observasi Lintasan 1



Gambar 2. Data observasi Lintasan 2

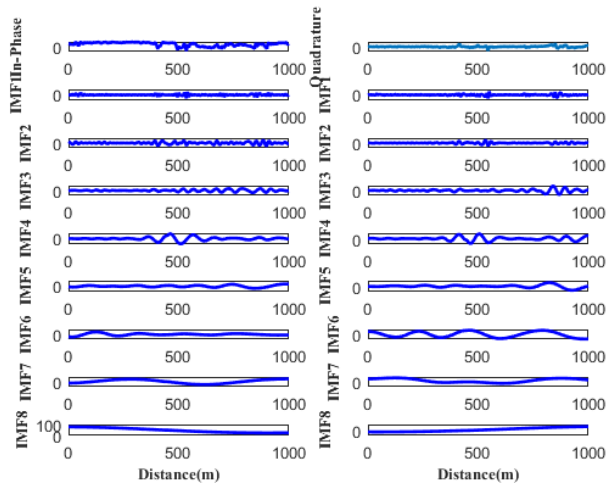


Gambar 3. Data observasi Lintasan 3

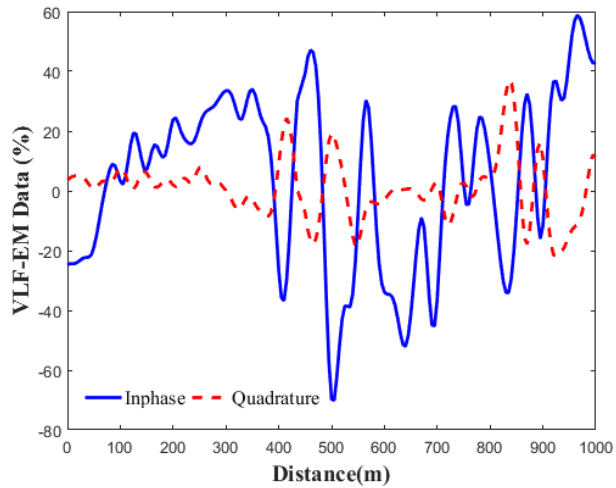


Gambar 4. Data observasi Lintasan 4

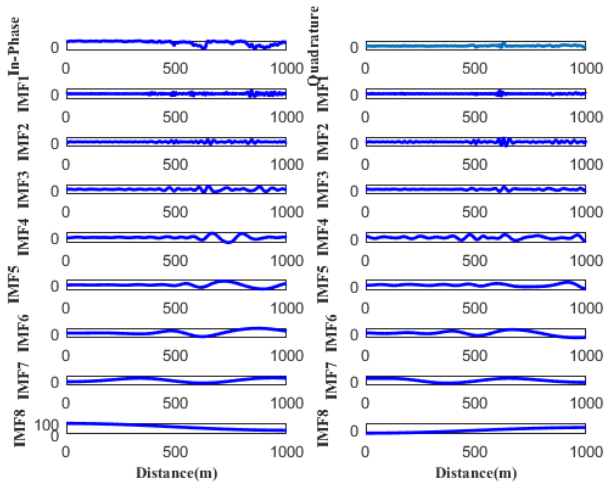
2) Hasil Pengolahan Filter NA-MEMD



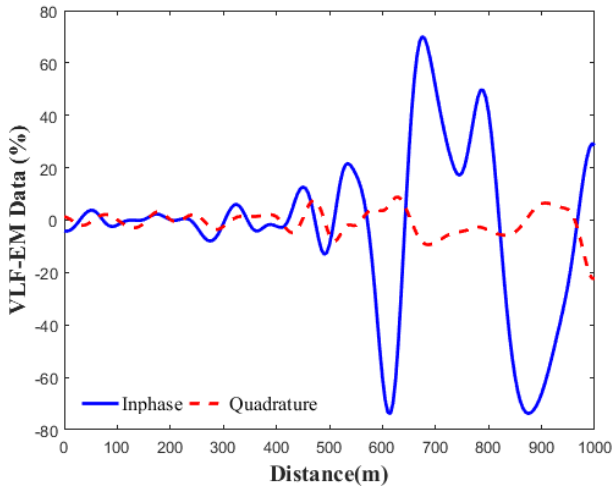
Gambar 5. Hasil dekomposisi filter NA-MEMD Lintasan 1



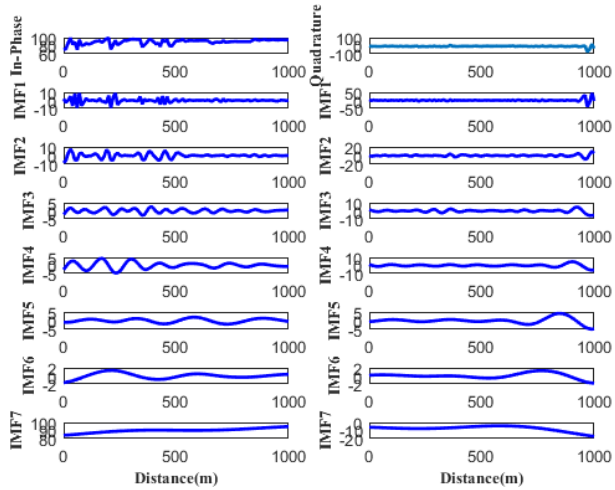
Gambar 6. Data observasi Lintasan 1 terfilter NA-MEMD



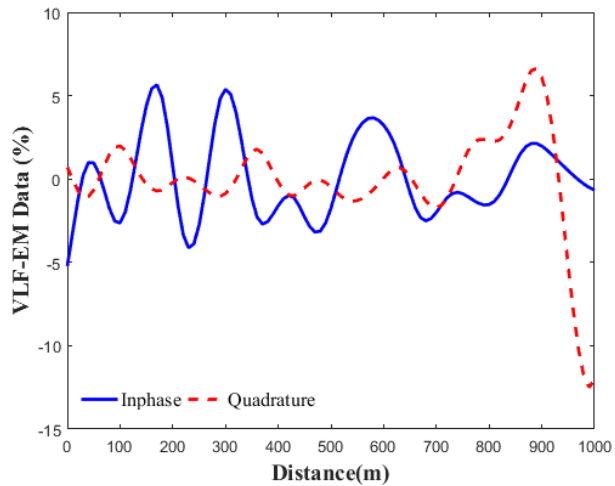
Gambar 7. Hasil dekomposisi filter NA-MEMD Lintasan 2



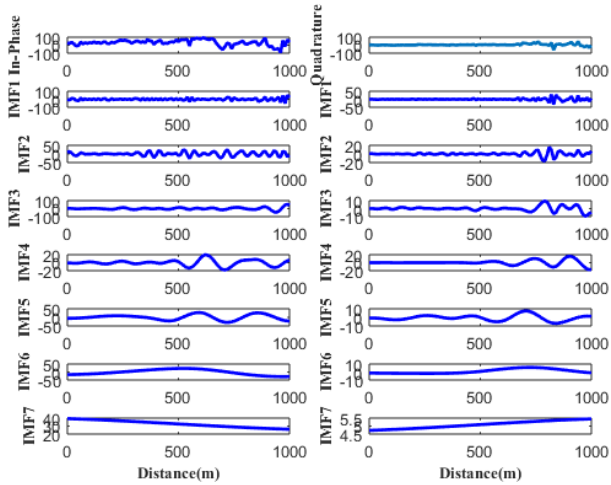
Gambar 8. Data observasi Lintasan 2 terfilter NA-MEMD



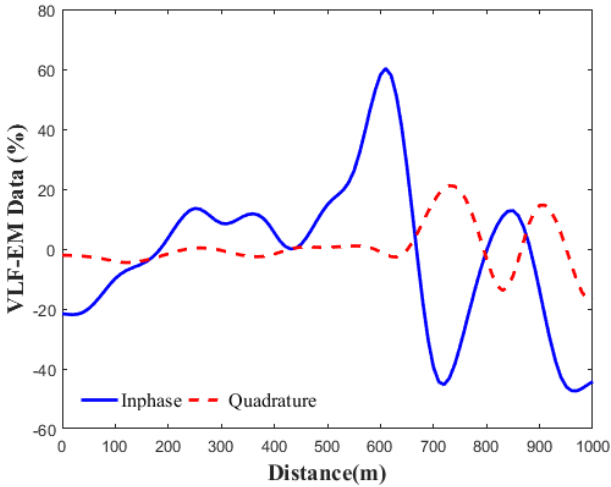
Gambar 9. Hasil dekomposisi filter NA-MEMD Lintasan 3



Gambar 10. Data observasi Lintasan 3 terfilter NA-MEMD

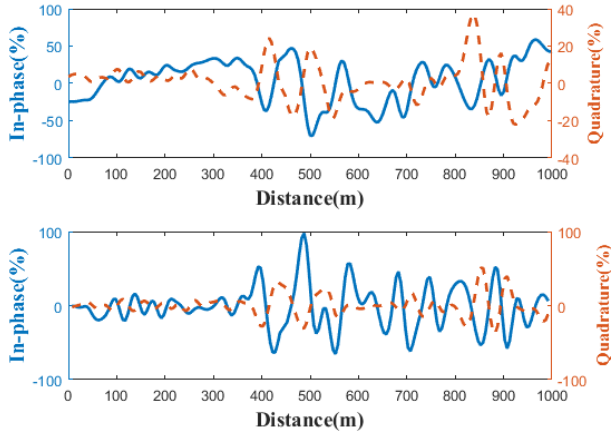


Gambar 11. Hasil dekomposisi filter NA-MEMD Lintasan 4

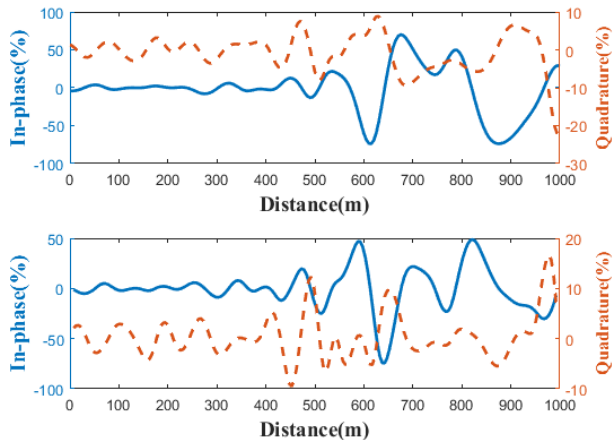


Gambar 12. Data observasi Lintasan 4 terfilter NA-MEMD

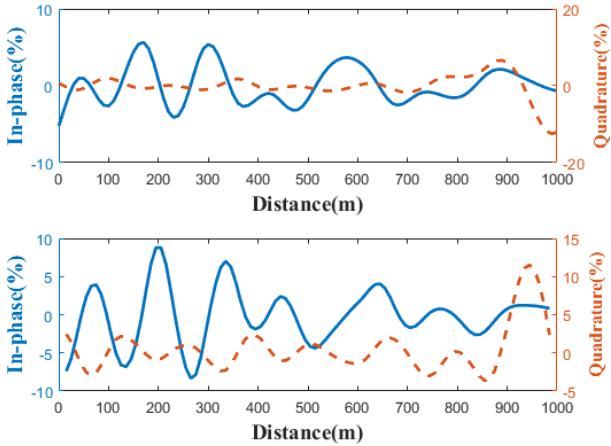
3) Hasil Pengolahan Filter Fraser



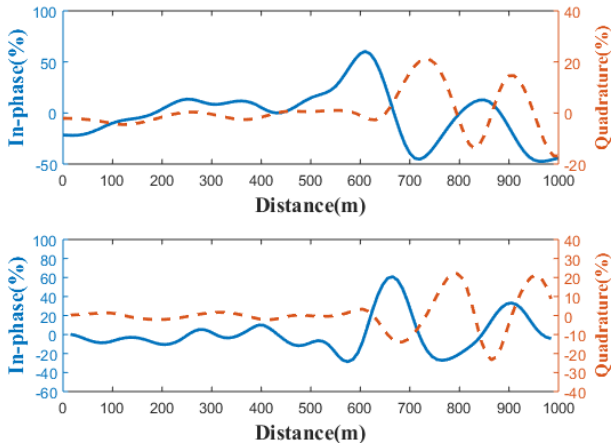
Gambar 13. Data *in-phase* dan *quadrature* Lintasan 1 (atas) sebelum dan (bawah) setelah menggunakan filter Fraser



Gambar 14. Data *in-phase* dan *quadrature* Lintasan 2 (atas) sebelum dan (bawah) setelah menggunakan filter Fraser

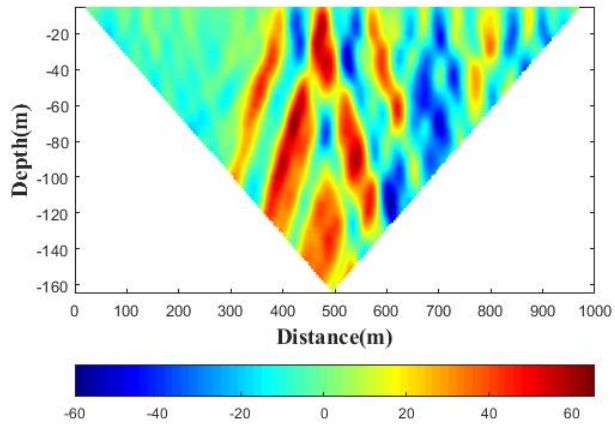


Gambar 15. Data *in-phase* dan *quadrature* Lintasan 3 (atas) sebelum dan (bawah) setelah menggunakan filter Fraser

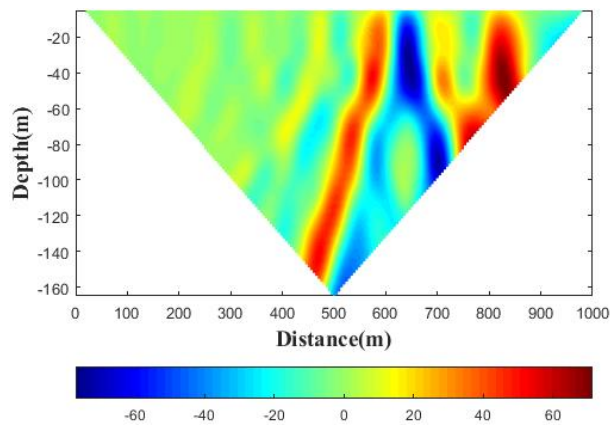


Gambar 16. Data *in-phase* dan *quadrature* Lintasan 4 (atas) sebelum dan (bawah) setelah menggunakan filter Fraser

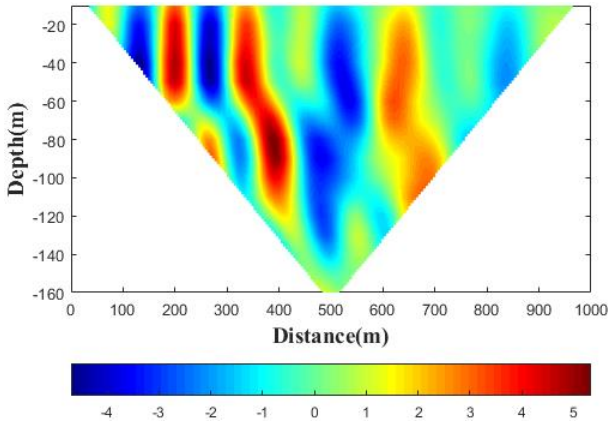
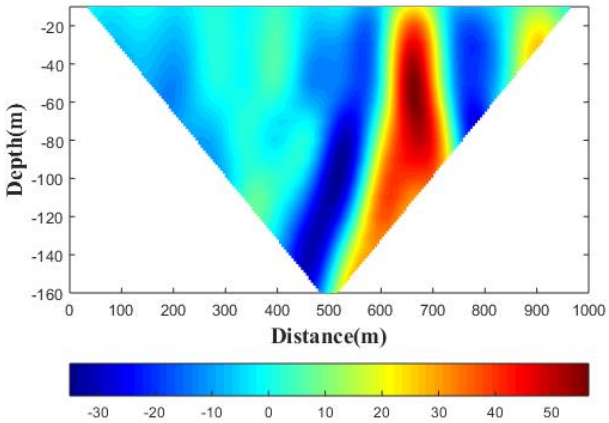
4) Hasil Pengolahan Filter K-Hjelt



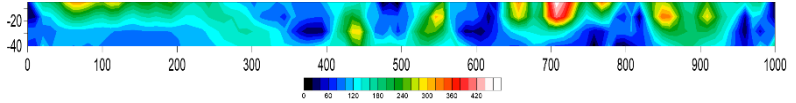
Gambar 17. Hasil filter K-Hjelt data *in-phase* Lintasan 1



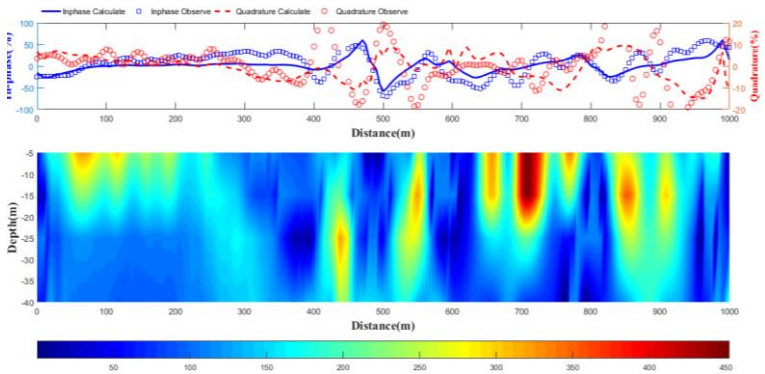
Gambar 18. Hasil filter K-Hjelt data *in-phase* Lintasan 2

Gambar 19. Hasil filter K-Hjelt data *in-phase* Lintasan 3Gambar 20. Hasil filter K-Hjelt data *in-phase* Lintasan 4

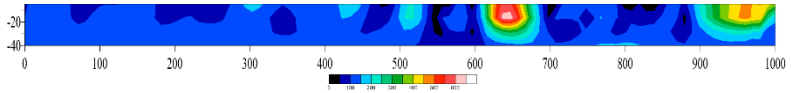
5) Hasil Proses Inversi



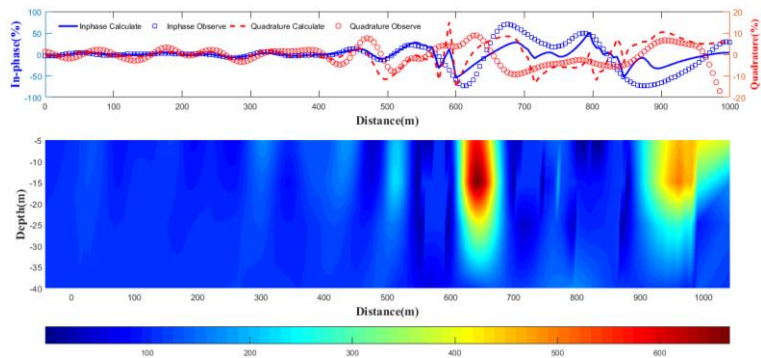
Gambar 21. Model resistivitas Lintasan 1 dalam 2D menggunakan perangkat lunak *Surfer11*



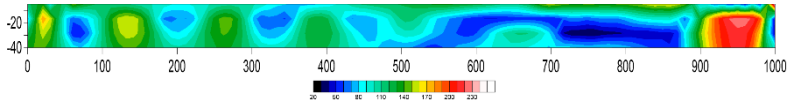
Gambar 22. Model data observasi Lintasan 1 terfilter NA-MEMD dengan perhitungan inversi (atas) dan model nilai resistivitas Lintasan 1 dalam 2D menggunakan perangkat lunak *Matlab2016* (bawah)



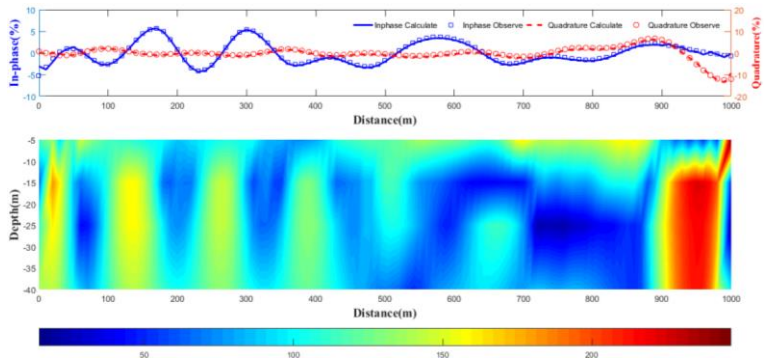
Gambar 23. Model resistivitas Lintasan 2 dalam 2D menggunakan perangkat lunak *Surfer11*



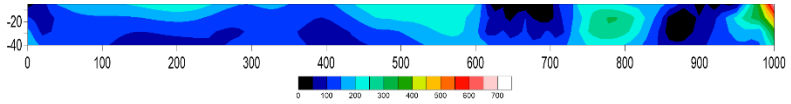
Gambar 24. Model data observasi Lintasan 2 terfilter NA-MEMD dengan perhitungan inversi (atas) dan model nilai resistivitas Lintasan 2 dalam 2D menggunakan perangkat lunak *Matlab2016* (bawah)



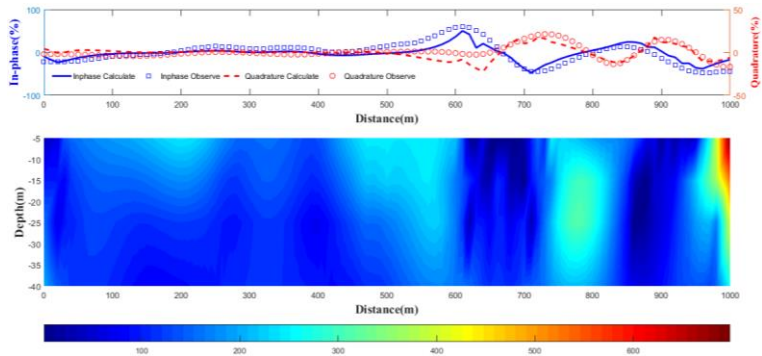
Gambar 25. Model resistivitas Lintasan 3 dalam 2D menggunakan perangkat lunak *Surfer11*



Gambar 26. Model data observasi Lintasan 3 terfilter NA-MEMD dengan perhitungan inversi (atas) dan model nilai resistivitas Lintasan 3 dalam 2D menggunakan perangkat lunak *Matlab2016* (bawah)



Gambar 27. Model resistivitas Lintasan 4 dalam 2D menggunakan perangkat lunak *Surfer11*



Gambar 28. Model data observasi Lintasan 4 terfilter NA-MEMD dengan perhitungan inversi (atas) dan model nilai resistivitas Lintasan 4 dalam 2D menggunakan perangkat lunak *Matlab2016* (bawah)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama M. Rizal Aris Maulana. Penulis lahir pada 5 Agustus 1998. Pendidikan yang telah dijalani Penulis yakni SD Islam Tarbiyatul Athfal Surabaya, SDN Klampis Ngasem VI/232 Surabaya, SMPN 17 Surabaya, SMAN 16 Surabaya dan berlanjut di Departemen Fisika ITS melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Semasa kuliah di ITS, penulis aktif mengikuti kegiatan kampus baik berupa pelatihan, kepanitiaan, maupun organisasi bahkan mengisi materi. Dalam kegiatan pelatihan Penulis aktif mengikuti pelatihan, seperti : LKMM Pra TD 2016, LKMM TD 2017, LKMW TD 2017, Diklat UKM Cinta Rebana 2017, REMO UKM Cinta Rebana 2016, REMO UKM Cinta Rebana 2017, *Advocation Course* 2017.

Selain kegiatan pelatihan, penulis juga aktif dalam kepanitiaan, seperti OC Mudik Bareng 2017, IC Mudik Bersama 2018, Sie Acara Festival Al-Banjari UKM Cinta Rebana 2017, Sie Acara *Physics Summit 6th* 2018, Tim AdHoc AD-ART UKM Cinta Rebana 2018, Sie Acara Festival Sholawat UKM Rebana 2018.

Kemudian, kegiatan penulis dalam mengikuti organisasi yakni menjadi Staff PSRA UKM Cinta Rebana 2017, Staff Wakil Ketua UKM Rebana 2018, Staff Eksternal SM-IAGI ITS 2018, Direktur Utama *Physics Summit 7th* 2019, Kepala Divisi Eksternal SM-IAGI ITS 2019.

Bukan hanya aktif dalam pelatihan, kepanitiaan, maupun organisasi. Penulis juga menjadi pemateri dalam suatu pelatihan, seperti : REMO UKM Rebana 2018, PAMOR UKM Rebana 2018, Diklat UKM Rebana 2018, dan Diklat UKM Rebana 2019.

Penulis sangat terbuka apabila ada kritik ataupun saran bahkan berdiskusi mengenai Tugas Akhir Penulis. Maka, silakan menghubungi penulis melalui *E-Mail* rijalariss@gmail.com.